

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE CIENCIAS AGRÍCOLAS



**EFFECTO DE PERIODOS CORTOS DE ENFRIAMIENTO SOBRE
RESPUESTAS FISIOLÓGICAS Y PRODUCTIVAS DE VACAS
HOLSTEIN PRIMÍPARAS Y MULTÍPARAS BAJO
CONDICIONES DE ESTRÉS POR CALOR**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGROPECUARIAS**

PRESENTA

JUAN AUGUSTO HERNÁNDEZ RIVERA

DIRECTOR DE TESIS

Ph. D. LEONEL AVENDAÑO REYES

Mexicali, Baja California

Mayo 13, 2011

Esta tesis fue realizada bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias Agropecuarias

Consejo particular

Ph. D. Leonel Avendaño Reyes
Director de tesis

Ph. D. Abelardo Correa Calderón
Sinodal

Dr. Ralph Guilherme da Silva Bruno
Sinodal

Dr. Enrique Gilberto Álvarez Almora
Sinodal

Dr. Ulises Macías Cruz
Sinodal

ÍNDICE

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otorgarme una beca para realizar mis estudios de Doctorado.

A la Universidad Autónoma de Baja California y al Instituto de Ciencias Agrícolas, por albergarme durante mis estudios de posgrado.

Al Ph. D. Leonel Avendaño Reyes, por brindarme su apoyo y su amistad, por enseñarme a realizar investigación científica desde su propia perspectiva, con profesionalismo y entrega, pero sobre todo por enseñarme a realizar investigación científica “hasta llegar al infarto. . .”

Al M.C. Daniel Álvarez Valenzuela, por ser mi maestro y amigo, por ayudarme a realizar los experimentos, compartiéndome sus conocimientos y experiencias, y por su manera tan peculiar de ver la vida.

AL Dr. Raúl Díaz Molina, por haberme apoyado arduamente en las pruebas de laboratorio.

Al MVZ Domingo Alberto Méndez Otero, por brindarme su amistad y confianza, por colaborar en los diversos proyectos de investigación, a través de otorgar todas las facilidades para usar sus instalaciones y animales.

Finalmente, a todas aquellas personas que tuvieron que ver en mi formación, o que simplemente me brindaron su apoyo y su amistad, nunca lo olvidaré. Lo que pasó en Mexicali ahí se queda, pero me llevo todo en mi corazón.

ÍNDICE

A Dios:

Porque si he llegado hasta donde he llegado es gracias a ti Señor, porque me iluminas a través del Espíritu Santo, porque contigo todo lo puedo, porque sin ti no soy nada. Honor y Gloria a ti Señor Jesús. . .

A mí Mamá:

Por enseñarme el camino de lo verdaderamente importante en la vida, por hacer de mí y de mis hermanos Hombres de Bien, ese es tu mayor logro, también porque te AMO.

A mí Agüe:

Porque aunque no nos dio tiempo de compartir este momento contigo, te lo comparto ahora, haciendo de mi tesis un pequeño homenaje a tus horas de oración por toda la familia, a tu entrega como persona, como madre y amiga, pero principalmente como abuelita, por ser mi abuelita que tanto me amó.

A mis Hermanos, Cuñadas y Sobrinos:

A todos ustedes por que los Amo y porque sé que el sentimiento es mutuo.

A mi Novia Florencia Goyri Macías:

A ti mi amor, dedico este espacio porque me has demostrado que a pesar de la distancia tú estás conmigo siempre, a través de tu cariño y tu amor.

ÍNDICE TEMÁTICO

ÍNDICE

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otorgarme una beca para realizar mis estudios de Doctorado.

A la Universidad Autónoma de Baja California y al Instituto de Ciencias Agrícolas, por albergarme durante mis estudios de posgrado.

Al Ph. D. Leonel Avendaño Reyes, por brindarme su apoyo y su amistad, por enseñarme a realizar investigación científica desde su propia perspectiva, con profesionalismo y entrega, pero sobre todo por enseñarme a realizar investigación científica “hasta llegar al infarto. . .”

Al M.C. Daniel Álvarez Valenzuela, por ser mi maestro y amigo, por ayudarme a realizar los experimentos, compartiéndome sus conocimientos y experiencias, y por su manera tan peculiar de ver la vida.

Al Dr. Raúl Díaz Molina, por haberme apoyado arduamente en las pruebas de laboratorio.

Al MVZ Domingo Alberto Méndez Otero, por brindarme su amistad y confianza, por colaborar en los diversos proyectos de investigación, a través de otorgar todas las facilidades para usar sus instalaciones y animales.

Finalmente, a todas aquellas personas que tuvieron que ver en mi formación, o que simplemente me brindaron su apoyo y su amistad, nunca lo olvidaré. Lo que pasó en Mexicali ahí se queda, pero me llevo todo en mi corazón.

ÍNDICE

ÍNDICE

ÍNDICE

ÍNDICE

ÍNDICE

2.1 Estrés calórico en ganado lechero

El estrés calórico es una condición producida **en** el animal por el incremento de la humedad relativa, temperatura del viento, radiación o movimiento del aire que al combinarse causan un estado de malestar en el animal debido a la incapacidad para disipar calor corporal, lo que produce efectos negativos sobre la eficiencia productiva y reproductiva del ganado lechero (Armstrong, 1994; Jordan, 2003).

Las vacas lecheras en lactación, por su elevado consumo, metabólicamente producen gran cantidad de calor, el que sumado al calor que impera en el ambiente, resulta en el incremento y ganancia de calor corporal (Fuquay, 1981). El incremento de calor corporal en el ganado debido al consumo de alimento es alto (35-70% de energía metabolizable), aunque depende del balance de nutrientes. Entonces, el calor generado no solo es energía no aprovechable (Conrad, 1985), sino que durante condiciones de estrés calórico este debe ser disipado. La reducción en el consumo de fibra puede ayudar a disminuir el incremento de calor corporal (Fuquay, 1981). Cuando incrementa el calor corporal disminuye la tasa metabólica y esto se asocia con la reducción del apetito (Silanikove, 2000). En este contexto, el estrés calórico desencadena una serie de mecanismos que afectan el funcionamiento de las diferentes regiones del hipotálamo. Inicialmente, causa un efecto negativo en la función de la región frontal, limitando la sensación térmica de enfriamiento; posteriormente manda una señal a la región intermedia

para indicar la sensación de saciedad, y finalmente estimula a la región lateral del hipotálamo para reducir el apetito y, como consecuencia de esta anorexia, disminuye la producción de leche por falta de nutrientes (Albright y Alliston, 1972).

Bajo condiciones de estrés calórico, los ácidos grasos volátiles se pueden encontrar con facilidad en forma de ácido acético en plasma sanguíneo (69 a 77%), debido a que los requerimientos de energía para la producción de leche y otras funciones son mayores, entonces, el ácido acético es la principal fuente de energía de los rumiantes (Chaiyabutr et al., 2008). La función del ácido acético es fundamental para la producción de leche, ya que participa en el metabolismo de la glándula mamaria a través de la síntesis de novo de los ácidos grasos de cadena corta y mediana para la leche, así como también para la generación de ATP y NADHP. Por otra parte, los valores altos de β -hidroxibutirato en torrente sanguíneo son consistentes con el incremento de la oxidación de los ácidos grasos liberados durante el estrés calórico (Bauman et al., 1988).

El jadeo es otra de las funciones del cuerpo que requiere altos niveles de energía durante el estrés calórico (McDowell, 1972) para disipar calor corporal. Bajo condiciones de estrés calórico el animal demanda más energía (Oshiro et al. 1981), por lo tanto, como resultado del catabolismo de los ácidos grasos del hígado, produce y libera cuerpos cetónicos debido a la gran movilización de reservas de grasa necesaria para obtener energía disponible (Schultz, 1974).

Un incremento constante de la tasa respiratoria en condiciones de estrés calórico resulta en una alcalosis respiratoria por la pérdida excesiva de bióxido de carbono. Para compensar este trastorno, la vaca incrementa la micción para liberar bicarbonato (HCO_3), solo que ahora perderá más HCO_3 del que se puede

producir simultáneamente en saliva. Se ha observado que cuando las vacas de leche están estresadas por calor, manifiestan salivación excesiva, donde es posible que pierdan también HCO_3 . Asimismo, bajo estas mismas condiciones es común observar a vacas postradas, comportamiento que sugiere que prefieren evitar cualquier movimiento dentro del corral. La falta de movimiento en el corral tiene un efecto en la reducción del consumo de agua y consecuentemente en la producción de saliva. El resultado final es una acidosis ruminal debido a una reducción del buffer (saliva) en el rumen (Dale et al., 1954). El pH del rumen es determinado en gran parte por el balance entre los ácidos generados de la fermentación de alimentos, el bicarbonato y los fosfatos buffer que se encuentran en la saliva, los cuales ayudan a neutralizar a estos ácidos. En contraste, bajo condiciones de estrés calórico disminuye la actividad ruminal, lo que conduce a una disminución de los amortiguadores salivares, de esta manera disminuye también el pH ruminal. Físicamente, la fibra es eficaz porque estimula la masticación y a su vez estimula la secreción de saliva. Por lo tanto, el consumo constante de alimentos con la fibra da origen al bolo de la masticación, lo cual tiene por objeto bufferizar el rumen, sin embargo, se sugiere dar en bajas proporciones para evitar un incremento del calor metabólico. La tasa del flujo de la saliva en ganado de carne y leche son estimados dentro de un rango de 108 a 308 L/d (Erdman, 1988). Con esta tasa del flujo de la saliva, se estima que la vaca puede contribuir en el rango de 390 a 1115 g de fosfato disódico y de 1134 a 3234 g de bicarbonato de sodio para bufferizar el rumen diariamente.

Una forma simple para cuantificar el grado de estrés calórico es mediante el uso del índice de temperatura-humedad (ITH), el cual se estima a partir de la

combinación de temperatura ambiental y humedad relativa. Una forma de estimar este índice es: $ITH = [0.81 \times \text{temperatura promedio}] + \text{humedad relativa} [\text{temperatura promedio} - 14.4] + 46.4$ (Hahn, 1999). Como ejemplo a lo anterior Armstrong (1994) estimó que el efecto negativo del estrés calórico inicia a partir de las 72 unidades de ITH. Sin embargo, Fuquay (1981) considera que es difícil determinar el grado de efecto del estrés calórico sobre la producción de leche debido a que otros factores que no están relacionados directamente con el ambiente pudieran estar afectando, tal es el caso de un mal manejo nutricional.

Un estudio hecho con vacas lecheras donde se probaron tres niveles de fibra detergente ácida (FDA; 16.0, 17.9, 19.4 y 21.2%) bajo dos ambientes con diferentes grados de estrés calórico (ITH de 64-77 y de 74-84 unidades), y West et al. (1999) encontraron en condiciones de ITH 64-77 que la producción de leche disminuyó y el porcentaje de grasa aumentó como el nivel de FDA también aumentó; pero en condiciones de ITH de 74-84 observaron que la producción de leche mostró un efecto cuadrático y el porcentaje de grasa disminuyó conforme la FDA se incrementó.

Por su parte, Thatcher et al. (1994) encontraron pérdidas en la producción de leche y grasa como resultado de las altas temperaturas. Es evidente que el estrés calórico tiene un efecto sobre la función secretora de la ubre (Silanikove, 1992). Asimismo, cuando vacas lecheras son sometidas a temperaturas ambientales entre 18-30 °C, la producción de leche, así como la producción de energía en leche, se reducen 15 y 35%, respectivamente (McDowell et al., 1976). También los porcentajes de grasa, sólidos totales y proteína en leche pueden disminuir en 39.7, 18.9 y 16.9%, respectivamente (Johnson, 1976).

¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.

Las respuestas fisiológicas son todas aquellas variables que ayudan a determinar, mediante la cuantificación de las mismas, los efectos negativos del estrés calórico en el animal. Estas variables incluyen condición corporal, tasa respiratoria, temperatura rectal y temperatura de la piel, entre otras. Por lo tanto, a continuación se describirán las variables más usadas en investigación.

2.1.1.1 Condición corporal

La condición corporal en vacas lecheras es una evaluación de la proporción de grasa corporal que poseen. Dicha evaluación es reconocida por toda la comunidad científica, así como por los productores de leche, considerándose como un factor de suma importancia para el manejo cotidiano del ganado lechero. La escala usada para evaluar la condición corporal puede variar entre países, pero la calificación más baja siempre refleja emaciación y la calificación más alta indica necesariamente obesidad. En acuerdo, Wildman et al. (1982) proponen una escala de calificación del 1 al 5 donde cada punto indica lo siguiente: 1, emaciada; 2, flaca; 3, regular; 4, gorda y 5, obesa. Es sabido que vacas con condición corporal muy baja o muy alta en el parto producen menos leche, afecta la reproducción y reduce la función inmunológica. Asimismo, vacas demasiado delgadas, aparte de no producir leche, suelen ser mayormente afectadas por climas demasiado fríos, mientras que vacas demasiado obesas pueden incrementar el riesgo de presentar desórdenes metabólicos. Butler y Smith (1989) reportaron una tasa de concepción de hasta 17% más baja en el primer servicio en vacas que perdieron más de una

unidad de condición corporal durante el parto, comparadas con vacas que perdieron menos de 0.5 unidades de condición corporal (65%).

En otro orden, la condición corporal puede verse afectada durante una lactación temprana y/o durante condiciones de estrés calórico debido a un incremento de la movilización de las reservas de grasa en el cuerpo por medio de la lipólisis, proceso por el cual los lípidos del organismo son transformados en ácidos grasos para cubrir en cierta parte las necesidades energéticas de la glándula mamaria para la producción de leche y grasa. Entonces la glucosa producida a partir de la lipólisis es utilizada para la síntesis del componente más importante de la leche, la lactosa (Bauman y Currie, 1980). Sin embargo, bajo estas condiciones, las vacas sufren un desabasto de energía que limita la disponibilidad de glucosa en la glándula por la falta de apetito (Berman y Meltzer, 1973).

Estudios realizados bajo condiciones de estrés calórico no han reportado cambios en la condición corporal de vacas con o sin enfriamiento (Avendaño-Reyes et al., 2010; Correa et al., 2002). Tampoco Flamenbaum et al. (1995) reportaron cambios en la condición corporal de vacas con respecto al nivel de producción de leche durante el verano. Sin embargo, se detectó una triple interacción entre el grado de estrés calórico, condición corporal y semanas en lactación, misma que coincidió con el pico de producción de leche tanto para animales enfriados y no enfriados a partir de la cuarta y hasta la octava semana. Existe una asociación entre una condición corporal baja y la producción de leche. Esta asociación es consistente con los resultados reportados por Roche et al. (2006 y 2007). Garnsworthy y Topps (1982) reportaron un efecto negativo en la

condición corporal al parto sobre la producción de leche, ya que vacas delgadas (2.7 unidades) produjeron mayor cantidad de leche que vacas gordas (3.7 unidades), debido que las primeras consumieron mayor cantidad de materia seca. Esto coincide con lo reportado por Treacher et al. (1986), quienes encontraron que vacas de condición corporal moderada (2.8 unidades) produjeron mayor cantidad de leche que vacas más gordas (3.9 unidades). La condición corporal óptima en la producción de leche para vacas lecheras de la raza Holstein es de entre 3.0 y 3.5, si sobre pasa éste último puede resultar en la reducción en la producción de leche, así como también en el porcentaje de proteína, aunque la asociación con el porcentaje de grasa en leche suele ser positiva (Roche et al., 2009).

2.1.1.2 Tasa respiratoria

Un problema grave en la producción animal bajo climas cálidos es el intercambio de calor entre el cuerpo del animal y el medio ambiente. El jadeo y el sudor son dos mecanismos de evaporación para eliminar calor. En bovinos la respiración solo es responsable del 15% de las pérdidas totales de calor (Finch, 1986), el resto corresponden a otros mecanismos tales como conducción, convección y radiación (Berman et al., 1985). Bajo estrés calórico severo se incrementa el jadeo, también se incrementa el número de respiraciones por minuto (resp/min) y se observan respiraciones rápidas, cortas y poco profundas. La tasa respiratoria en vacas lecheras estresadas por calor puede incrementarse hasta un 75% más de lo normal (20 resp/min) (Mount, 1979). Algunos autores han indicado que un incremento de la frecuencia respiratoria (50-60 resp/min) puede iniciar a

partir de una temperatura de 25 °C (Berman et al., 1985). Una vaca con 80 resp/min se puede considerar como un animal estresado por el calor (Poterfield, 1996). El ganado bovino a temperatura ambiente de 41.1°C y humedad relativa de 78% mostró una tasa respiratoria de 102 resp/min (Gwazdauskas, 1985). Wise et al. (1988) han reportado en vacas Holstein 126.4 resp/min con un ITH de 86.2 unidades. Otro estudio demostró la disminución en la producción de leche por efecto del estrés calórico en dos distintos ambientes, uno con 32°C y 20% humedad relativa (HR) y el otro con 32°C y 45% de HR (Johnson y Vanjonack, 1976). Esta diferencia disminuyó la tasa respiratoria y la tasa de sudoración, lo que resultó en un incremento de la temperatura rectal, así como en la reducción del consumo de alimento y consecuentemente en la disminución de la producción de leche.

Como consecuencia de la reducción en la producción de leche por efecto de las altas temperaturas, algunos investigadores han decidido experimentar con estrategias de enfriamiento artificial para vacas lecheras en lactación, logrando así reducir significativamente la tasa respiratoria. En el Valle de Mexicali, B.C., Avendaño-Reyes et al. (2010) usaron un sistema de enfriamiento a base de aspersores y abanicos, logrando reducir durante las horas más intensas de calor la tasa respiratoria de 112 a 107 resp/min, aplicando una y tres horas de enfriamiento respectivamente. Correa et al. (2002) reportaron 22% menos respiraciones en vacas enfriadas por 8 h con respecto a vacas testigo bajo la sombra y bajo un sistema de enfriamiento ambiental similar al estudio anterior. Otros autores han reportado similares respuestas, ya que al comparar animales enfriados bajo un sistema de enfriamiento con animales testigo que solo gozaron

de sombras lograron reducir la tasa respiratoria en 16 resp/min (Turner et al., 1992). Por otro lado, Armstrong (1999) logró observar diferencias más altas (de hasta 26 resp/min menos) en vacas Holstein enfriadas bajo un sistema de enfriamiento artificial basado en aspersores y abanicos, y mediante tres diferentes flujos de agua de acuerdo a la temperatura ambiental, comparado con vacas que solo contaban con sombras.

Aunque no existe una diferencia clara en el número de respiraciones entre distintas razas de vacas lecheras bajo condiciones termoneutrales, se ha reportado que vacas Jersey tienen tasas de respiración más alta que vacas Holstein, debido a que las Jersey tienen una mejor habilidad para disipar calor corporal comparadas con las Holstein (Kibler y Brody, 1952).

2.1.1.3 Temperatura rectal

La temperatura rectal es la variable más usada para evaluar el índice de adaptación fisiológico en ambientes calurosos, ya que es un excelente indicador para predecir la presencia de estrés calórico en ganado lechero. Un incremento o una disminución de 1°C es suficiente para afectar el funcionamiento del ganado (McDowell et al., 1976). El incremento de la temperatura rectal durante estrés calórico severo puede ser de hasta 0.7% más con respecto a la temperatura normal (38.5°C) (Igono et al., 1992). Diversos estudios coinciden en mencionar que el incremento de la temperatura rectal en el ganado lechero bajo condiciones de estrés calórico severo sobre pasa en mucho la temperatura rectal normal (Avendaño-Reyes et al., 2006, 2010; Khongdee et al., 2010; Correa et al., 2004; Igono et al., 1987). West et al. (1999) reportaron una correlación positiva ($r=0.78$)

entre la temperatura de la leche y la temperatura rectal, siendo la temperatura de la leche 0.15°C mayor que la rectal. Durante el equilibrio térmico, la temperatura rectal de vacas lecheras altas productoras resulta ser independiente de la temperatura ambiente, pero está relacionada con el metabolismo de energía o calor metabólico (Berman et al., 1985).

En toros expuestos a 40°C en una cámara ambiental, Bianca (1964) indicó que al proporcionar agua fría a una temperatura de $1-14^{\circ}\text{C}$ se reduce en 1.7°C la temperatura rectal y la de la piel. Martello et al. (2009) reportaron una diferencia de 0.8°C en vacas Holstein entre el invierno y el verano en Brasil. Asimismo, Adin et al. (2009) realizaron dos experimentos con los mismos grupos de tratamientos que fueron vacas lecheras en lactación enfriadas bajo un sistema de enfriamiento evaporativo y el otro sin la presencia de éste. El primer experimento se realizó dentro de una cámara ambiental con un ITH de 78, mientras que el segundo experimento se realizó dentro de un corral con sombra bajo un ITH de 80. En el primer experimento observaron una reducción de 0.2°C en los animales enfriados con respecto al grupo testigo. En el segundo experimento la diferencia fue de 0.3°C entre enfriadas y testigo (38.5 vs 38.8°C). En otro experimento realizado por Flamenbaum et al. (1986), observaron el efecto de proporcionar periodos cortos de enfriamiento con aspersores y abanicos de 15, 30 y 45 min durante 3 días en vacas lecheras sobre la respuesta en temperatura rectal. La disminución máxima de temperatura rectal se logró a partir de los 30 min después de proporcionar cada uno de los tratamientos. Los animales enfriados por 15, 30 y 45 min produjeron una disminución de 0.6, 0.7 y 1.0°C respectivamente. Avendaño-Reyes et al. (2010) probaron tiempos cortos de enfriamiento en vacas lecheras en lactación,

encontrando que vacas enfriadas por 3 h obtuvieron 0.4°C menos de temperatura rectal que vacas enfriadas solo por 1 h. Correa et al. (2004) probaron dos distintos sistemas de enfriamiento más un grupo testigo (sin enfriamiento) sobre la temperatura rectal de vacas Holstein y Pardo Suizo. Un sistema de enfriamiento fue a base de aspersores y abanicos y el otro a base de campanas evaporativas. Las diferencias fueron notablemente distintas al comparar al grupo testigo con los correspondientes sistemas de enfriamiento, siendo las vacas Pardo Suizo las que obtuvieron mejores respuestas en el grupo testigo, aspersores y abanicos, y campanas evaporativas, con temperaturas rectales de 39.2, 38.9 y 38.8°C respectivamente; mientras que para vacas Holstein fueron de 39.7, 39.0 y 38.8°C respectivamente. En otro estudio donde se probó un sistema de enfriamiento evaporativo con vacas cruzadas (Holstein 87.5% con Bos indicus 12.5%), se observaron poco más de 2°C menos de temperatura rectal respecto al grupo testigo (sin enfriamiento) (Khongdee et al., 2006). Existen diferencias notables en temperatura rectal entre razas de vacas lecheras y su habilidad por regular la temperatura rectal, ya que el promedio de temperatura rectal en las razas de vacas Bos taurus es mayor que las razas Bos indicus (Finch, 1986), debido a que las razas Bos taurus son más sensibles al estrés calórico.

2.1.1.4 Temperatura de la piel

Los mecanismos de pérdida de calor en el animal son insuficientes para mantener el equilibrio térmico en el organismo cuando se incrementa la temperatura ambiental. Otras formas utilizadas para evaluar el nivel de estrés calórico en el ganado es a través de la temperatura de la leche (Igono et al.,

1985), la temperatura de la piel en el área de la ubre (Bitman et al., 1984) y en el tímpano (Davis et al., 2003).

En condiciones de temperatura ambiental moderada, el ganado puede disipar calor hacia el medio ambiente a través de la piel por mecanismos de evaporación, radiación, conducción y convección (Baccari, 2001). Bajo estos términos, existen diversas investigaciones donde confirman que la capa de piel tiene una gran influencia sobre el intercambio térmico entre el individuo y el medio ambiente (Cappa et al. 1989; Aguiar and Targa 2001; Collier et al. 2006). Aunque dichos estudios se realizaron en cámaras ambientales, han proporcionado información precisa acerca de esas respuestas en el animal. El principal mecanismo fisiológico para controlar la pérdida de calor corporal es la modificación del flujo de sangre que llega a la superficie corporal y la redistribución del mismo. La vasodilatación periférica facilita la pérdida de calor porque reduce el efecto del aislamiento tisular y favorece la eliminación de calor por evaporación al facilitar la difusión de agua desde la piel. Por el contrario, cuando la vasoconstricción periférica alcanza su máximo nivel, las pérdidas evaporativas son mínimas y el efecto aislante de los tejidos se maximiza (Perera et al., 1986). Blazquez et al. (1994) reportaron un incremento en el flujo de la sangre en la piel de toros, el cual fue positivamente correlacionada con la tasa de sudoración.

Entre principios de los años 50's y los años 60's descubrieron que el número de glándulas sudoríparas en las razas cebuinas eran mayores que en las razas europeas (Ferguson and Dowling, 1955; Allen et al., 1962). Las razas *Bos indicus* tienen una mayor densidad de folículos pilosos ($1698/\text{cm}^2$) que las razas *Bos taurus* ($1064/\text{cm}^2$) (Dowling, 1955). La tasa de sudoración en vaquillas cebú

se incrementó cuando alcanzó una temperatura de 35°C en la temperatura de la piel y 30°C en la temperatura del aire (Allen, 1962). Comúnmente, si la temperatura de la superficie de la piel está por encima de 35°C en el ganado, el animal se considera que está bajo los efectos del estrés por calor (Collier et al., 2006).

Investigaciones recientes reportan el registro de la temperatura corporal con termómetros en forma de pistola y/o cámaras termales que detectan la temperatura corporal mediante un sistema infrarrojo, por lo que representan una herramienta para estimar la temperatura de la piel en los animales. De esta manera, la lectura de la temperatura se puede hacer a distancia, sin que se requiera el movimiento de los animales. Martello et al. (2009) reportaron durante los meses de verano e invierno diferencias importantes en las temperaturas de la base de la cola, región del pabellón auricular y la superficie corporal de vacas Holstein. Durante los meses de invierno dichas temperaturas fueron de 33.7, 32.5 y 33.7°C respectivamente, mientras que las temperaturas durante el invierno fueron de 26.5, 25.9 y 30.9°C respectivamente. Un dato interesante es que estos autores encontraron una correlación positiva entre las temperaturas antes mencionadas y la tasa respiratoria ($r = 0.63$, 0.63 y 0.54 respectivamente), indicando que el incremento de estas temperaturas fueron principalmente por el incremento de la frecuencia respiratoria. De acuerdo a lo anterior, Collier et al. (2006) reportaron una correlación positiva y alta entre la tasa respiratoria y la superficie corporal ($r = 0.73$). Ambos autores concluyen que las temperaturas de las diferentes partes de la piel pueden ser una excelente herramienta para describir el ambiente caluroso que les rodea a estos animales, también pueden ser

usadas como estimadores para indicar el nivel de estrés calórico de vacas lecheras en lactación.

2.1.2 Respuestas metabólicas y hormonales

2.1.2.1 Glucosa

Las vacas lecheras en producción requieren grandes cantidades de glucosa para mantener la lactancia. En rumiantes, la disponibilidad neta de glucosa depende principalmente de la gluconeogénesis y los principales nutrientes glucogénicos son el ácido propiónico y el lactato (Danfaer, 1994). Sin embargo, durante periodos largos e intensos de estrés calórico las vacas pueden reducir el consumo de alimento hasta en un 30%, lo cual provoca que la disponibilidad de energía disminuya (Collier et al., 2008). Una disponibilidad limitada de nutrientes, tales como la glucosa y/o aminoácidos, pueden limitar la síntesis de la leche y sus componentes (Clark et al., 1977) debido a que la glucosa es el principal precursor para la síntesis de la lactosa. La síntesis de lactosa consume hasta 70% de toda la glucosa circulante en la vaca lechera, lo que representa una considerable carga metabólica para los rumiantes (Ponce y Bell, 1984). La lactosa representa alrededor de 5% de la composición total de la leche en vacas Holstein (Tsenkova et al., 2000). Es un azúcar estrictamente específico de la leche, cuya síntesis y secreción está íntimamente relacionada con el volumen total de la leche que producen las vacas. La glándula mamaria retiene 900 ml de agua por cada 50 g de lactosa sintetizada (Forsyth, 1989). La lactosa actúa como un osmo-regulador para la absorción de agua en la glándula mamaria, esto la hace el principal componente osmótico para el proceso activo de extracción de agua hacia las vesículas de

Golgi. Entonces, cuando la síntesis de lactosa se incrementa, junto con el agua salen del aparato de Golgi y ambos compuestos se transportan vía lumen alveolar en forma de leche.

La síntesis de lactosa se lleva a cabo en el aparato de Golgi y se requieren de 5 pasos para su síntesis a partir de una molécula de glucosa:

1. Fosforilación de la glucosa. Esta transforma a la glucosa en glucosa 6-fosfato mediante una reacción con hexokinasa.
2. Isomeración de la glucosa 6-fosfato. Aquí transforma a la glucosa 6-fosfato en glucosa 1-fosfato mediante una reacción con fosfoglucomutasa.
3. Formación de uridindifosfato (UDP)-glucosa. Es el proceso donde la glucosa 1-fosfato se transforma en UDP-glucosa mediante la reacción con UDP-glucosa fosforilasa.
4. Isomeración de UDP-glucosa. Es el proceso donde la UDP-glucosa se transforma en UDP-galactosa mediante la reacción con UDP-glucosa epimerasa.
5. Síntesis de lactosa. En este proceso la UDP-galactosa se une a una molécula libre de glucosa, donde libera el compuesto uridindifosfato para formar lactosa o galactosa β 1,6 glucosa.

El proceso de la síntesis de lactosa está regulado por un complejo enzimático conocido como lactosa-sintasa, compuesto por dos proteínas: 1) la proteína A, o β 1,4 galactosiltransferasa que se encuentra en diversos tejidos y 2) la proteína B o α -lactoalbúmina que es una proteína sintetizada por las propias

células epiteliales del tejido mamario (Kennelly, 1999), razón por lo que la síntesis de lactosa ocurre solamente en la glándula mamaria. Además, la expresión del gen de la α -lactoalbúmina es regulada de cerca por algunas hormonas, tales como la progesterona por efecto de una retroalimentación negativa, así como una retroalimentación positiva de la prolactina y glucocorticoides, de tal modo que la síntesis de la lactosa ocurra solamente durante la lactancia.

Se ha demostrado que la administración de glucosa puede incrementar la producción de ácido propiónico, principal precursor de la gluconeogénesis (Danfaer et al., 1995). También puede incrementar la disposición de glucosa en el duodeno (Knowlton et al., 1998). En dos estudios se probaron los efectos de proporcionar diferentes cantidades de glucosa en duodeno sobre la producción de leche y sus componentes, usando dietas basadas en silo de forraje (Hurtaud et al., 2000). En el primer experimento se proporcionaron 0, 750, 1500 y 2250 g de glucosa/d; en el segundo 0, 250, 500, 1000 y 2000 g de glucosa/d. El incremento en las cantidades de glucosa en cada experimento incrementó la producción de leche en 2.4 y 1.6 kg/d respectivamente. La lactosa no fue afectada, mientras que la producción de grasa disminuyó linealmente. Los tratamientos de glucosa afectaron significativamente los perfiles de los ácidos grasos de cadena mediana y larga. Por otra parte, se observó un incremento lineal en la proteína a partir de los 1000 g de glucosa. En un estudio similar, Rigout et al. (2002) probaron 4 niveles de glucosa (T1 = 0, T2 = 443, T3 = 963 and T4 = 2398 g/d) en el duodeno de vacas lecheras sobre la producción de leche y lactosa. La concentración de glucosa en sangre tuvo un efecto lineal positivo, mientras que la producción de leche y lactosa tuvieron un efecto cuadrático. Los autores indican que disminución

de la leche en el T4 fue debido a un desbalance en la concentración de glucosa a nivel intracelular.

A este respecto, un análisis de lactosa en la leche puede reflejar los niveles de concentración de este compuesto en el aparato de Golgi o en el citosol (Faulkner, 1980). Cuando los niveles de glucosa alcanzaron niveles constantes, las concentraciones de glucosa-6-fosfato tendieron a incrementar linealmente, mientras que las concentraciones de glucosa-1-fosfato disminuyeron en T4. Estos resultados sugieren la posibilidad de que exista un bloqueo en la transformación de glucosa-6-fosfato a glucosa-1-fosfato, el cual consecuentemente podría afectar la producción de lactosa, así como la producción de leche. Este bloqueo pudiera deberse a la disminución de la actividad de la fosfoglucomutasa (Opstvedt et al., 1967).

2.1.2.2 Triglicéridos

Los periodos de intenso calor durante los meses de invierno pueden dar origen, como ya se ha mencionando, a una disminución en el consumo de alimento en las vacas lecheras debido a la falta de apetito. Esto provoca un estado de balance de energía negativo, similar al de las vacas lecheras al inicio de la lactancia. Dadas las circunstancias, los animales intentan compensar esta situación movilizand o grasa de los tejidos, obteniendo así la energía que se requiere para la producción de leche. Entonces, cuando el déficit de energía es mayor, la movilización de grasa excede la capacidad que el hígado tiene para metabolizarla y se produce el Síndrome de Movilización de Grasa. La movilización excesiva produce alternadamente infiltración de grasa en diferentes órganos y

tejidos, alterando su función (Contreras, 1990). Algunos estudios han mostrado una infiltración de grasa en el hígado de aproximadamente 20% o más durante la segunda semana del parto (Skaar et al., 1989; Gruffat et al., 1997), siendo que el porcentaje de infiltración de grasa en el hígado bajo condiciones normales es máximo de 13% (Gerloff, 1986; Herdt, 1988). Durante un estado de balance energético negativo por un estrés calórico severo, el nutriente más limitante es la glucosa (Itoh et al., 1998), que en los rumiantes debe ser sintetizada por gluconeogénesis hepática a partir de algunos precursores, cuyo aporte de energía es variable de acuerdo a los requerimientos. Estos precursores son: 1) el propionato, que puede contribuir en la formación de glucosa en 30-50% (Armentano y Young, 1983; Lomax y Baird, 1983); 2) el lactato, en aproximadamente un 10% (Huntington y Prior, 1983); 3) aminoácidos en 9% (Lomax et al., 1979) y 4) el glicerol en 5% (Bergman et al., 1966).

La formación de AMPc en el tejido adiposo y muscular puede ser estimulada por la adrenalina y la noradrenalina, por ello en el estrés se produce pérdida de peso y un aumento en la concentración de los ácidos grasos en sangre (McGilvery, 1979).

La degradación de los ácidos grasos producidos por β -oxidación da origen a moléculas de acetyl-CoA, mismas que son incorporadas al ciclo de Krebs para producir energía en forma de ATP. Esto ocurre principalmente en el hígado, pero también en riñones y músculos. El glicerol dará origen a la glucosa, particularmente, en el hígado. Cuando la cantidad de grasa movilizada excede la capacidad de oxidación en el hígado, las moléculas de acetyl-CoA no ingresan al ciclo de Krebs por insuficiencia de oxalacetato, así, el exceso de acetyl-CoA da

origen a cuerpos cetónicos. En estas circunstancias, el exceso de ácidos grasos y de glicerol que ingresa al hepatocito no se oxida, se re-esterifica, dando origen a triglicéridos, ahora, dentro de la célula hepática (Grummer, 1993). Bajo condiciones normales, este proceso de re-esterificación ocurre en el hepatocito, pero en cantidad moderada, lo que se considera como reserva para ser usada como fuente de energía. La gran mayoría de estos triglicéridos debe salir del hepatocito para ser utilizada como fuente de energía en otros tejidos y/o para la síntesis de grasa en la leche (Herdt, 1988). Para que esto ocurra, el hígado debe ser capaz de sintetizar una apolipoproteína B (apo B), derivada de una lipoproteína de muy baja densidad (VLDL). Esta lipoproteína es la que en conjunto con los triglicéridos permite el transporte desde el hepatocito hacia otros tejidos. Si la cantidad de triglicéridos que se está re-esterificando en el hígado, excede la capacidad de éste para sintetizar los componentes de la lipoproteína, los triglicéridos se depositan en el adipocito en forma de gotas de grasa (Herdt, 1988; Rayssiguier et al., 1988). Algunos autores han comprobado que al inicio de la lactancia, el hígado disminuye su capacidad de sintetizar esta apolipoproteína B (Bauchart, 1993; Bauchart et al., 1996).

La síntesis y secreción hepática de lipoproteínas son probablemente reguladas por factores nutricionales y hormonales, sin embargo, la mayoría de los mecanismos específicos involucrados aún permanecen desconocidos. En el periodo alrededor del parto hay algunas evidencias que permiten señalar que la capacidad hepática para sintetizar fosfolípidos determina la capacidad de síntesis de lipoproteínas de muy baja densidad en los rumiantes en el período alrededor del parto (Fronk et al., 1980; Herdt et al., 1983). Así vacas lecheras, una

deficiencia funcional de síntesis de fosfolípidos puede contribuir al engrasamiento del hígado o al síndrome del hígado graso.

2.1.2.3 Colesterol

El colesterol se forma a partir de acetil-CoA mediante una compleja serie de reacciones que involucran diversos intermediarios, como β -hidroxi- β -metilglutaril-CoA (HMG-CoA), mevalonato y dos isoprenos activados (pirofosfato de dimetilalilo y pirofosfato de isopentenilo). Entre esta serie de reacciones se encuentra la condensación de unidades de isopreno para producir escualeno no cíclico, el cual se cicla para formar un anillo esteroide y su cadena lateral, que después de varias reacciones, se convertirá en colesterol. La síntesis de colesterol es inhibida por concentraciones intracelulares elevadas de la misma molécula. El colesterol y sus ésteres se transportan en la sangre como lipoproteínas plasmáticas. Las lipoproteínas de alta densidad (HDL) sirven para remover el colesterol de la sangre, el cual es transportado hacia el hígado. Las lipoproteínas de muy baja densidad (VLDL) acarrean colesterol y sus ésteres, y triacilgliceroles desde el hígado a otros tejidos, donde los triacilgliceroles son degradados por la lipoproteinlipasa; ésta convierte a las VLDL en lipoproteína de baja densidad (LDL). Las LDL, que son abundantes en colesterol y sus ésteres, son capturadas por la endocitosis mediada por un receptor, en la que la apoproteína B-100 de la LDL es reconocida por receptores específicos, ubicados en la membrana plasmática.

Entonces, si bien el colesterol es requerido por órganos tales como glándulas suprarrenales, gónadas e hígado, como precursor de hormonas

esteroides (glucocorticoides, mineralocorticoides y hormonas sexuales), ácidos biliares (glucocólico y taurocólico) y vitamina D, también es requerido por los tejidos de tipo conectivo, muscular, nervioso y epitelial para la formación de membranas celulares.

La membrana plasmática está formada por lípidos y posee una propiedad en la que solamente permite la entrada a ciertas partículas en el interior de la célula, de la misma forma puede eliminar sus productos de desecho. Entonces es a través de la membrana en la que se regula la entrada y la salida de sustancias que logran el funcionamiento perfecto de la célula. Por ejemplo, bajo condiciones termoneutrales la glucosa pasa constantemente a través de la membrana del aparato Golgi hacia su lumen para la formación de lactosa, a través de un transportador de la glucosa (GLUT 1). La presencia del GLUT 1 en la membrana del aparato de Golgi es específica para las células del tejido epitelial mamario, debido a que el resto de las células no tienen este transportador de la glucosa (Zhao et al., 1996). El transporte de la glucosa es pasivo (no requiere ATP), por lo que no limita la tasa de transporte. Sin embargo, si es afectado por los niveles bajos de glucosa en el citoplasma, derivado de una disminución en el consumo de alimento por un estrés calórico severo.

Por otra parte, se ha demostrado que el estrés calórico tiene un efecto directo sobre el epitelio en la glándula mamaria, porque daña la constitución de las membranas celulares (Bowler et al., 1973; Hahn, 1982). Esto explicaría la baja producción de leche de vacas expuestas a un calor intenso. Al provocar una alteración en la composición de los lípidos de la membrana (Anderson y Parker, 1982), así como un aumento en la permeabilidad se incrementa la actividad de la

fosfolipasa y la fosfoinositidina, ambas actúan rompiendo los enlaces diester fosfóricos de la membrana (Calderwood et al., 1987).

El estrés calórico tiene la facultad de liberar gran cantidad de radicales libres (-OH) que destruyen a las membranas celulares, lo cual cuando es mayor que los mecanismos antioxidantes, el animal se encuentra en estrés oxidativo. Por lo tanto, el estrés calórico afecta los mecanismos antioxidantes. Diversos estudios han analizado el efecto del estrés calórico sobre el estatus oxidativo de vacas lecheras en lactación. Harmon et al. (1997) lograron comprobar que el estrés calórico disminuye la actividad antioxidante del plasma de las vacas lecheras. Por otro lado, Calamari et al. (1999) observaron en vacas sujetas a estrés por calor una reducción en la concentración total de caroteno y vitamina E en el plasma. En contraste, Trout et al. (1998) mencionaron que el estrés calórico no afectó las concentraciones de α -tocoferol y β -caroteno en vacas lecheras, debido a que el estrés calórico no afecta las concentraciones de los agentes antioxidantes en sangre, los cuales contra-restan la cantidad de radicales libres producidos durante un proceso de estrés oxidativo.

2.1.2.4 Tiroxina y Triiodotironina

La disminución en el consumo de alimento producida por el estrés calórico produce alteraciones en el funcionamiento de la glándula tiroides. La aparición del estado hipotiroideo trae como consecuencia bajas producciones de leche (Thriftt al., 1999), debido a que la disminución de la actividad tiroidea afecta el número de movimientos ruminales y la tasa de pasaje, alterando la digestibilidad de la materia seca (Miller et al., 1974).

Las hormonas tiroideas (HT) tiroxina (T_4) y triiodotironina (T_3), regulan el metabolismo de todos los tejidos y órganos del cuerpo, además, están directamente relacionadas con el desarrollo de la glándula mamaria y la lactogénesis, así como con el crecimiento fetal y la función de la glándula mamaria posparto (Yousef, 1985). En ausencia de ellas, el crecimiento y la diferenciación del epitelio mamario se reducen (Vonderhaar y Greco, 1979). Bajo condiciones de estrés calórico, las concentraciones de las HT disminuyen debido a que la glándula tiroides es sensible a las altas temperaturas. Un estudio demostró que la concentración de T_4 es más alta en la primavera que en el verano (Vanjonack y Johnson, 1975).

La concentración de T_4 en ganado lechero bajo condiciones termoneutrales es de 50-70 ng/ml, mientras que para T_3 es de entre 0.3-2.0 ng/ml (Anderson, 1971; Convey et al., 1978). Wilks et al. (1990) reportaron 39.2 y 0.75 ng/ml respectivamente, en un estudio realizado en Texas con vacas Holstein primíparas y multíparas bajo condiciones de estrés calórico a temperaturas de 40.8°C y humedad relativa de 85%. Similarmente, Johnson et al. (1988) observaron una disminución en la concentración de ambas hormonas tiroideas (T_3 y T_4) en vacas lecheras en lactación en respuesta al estrés calórico.

La supresión de la secreción de las HT reduce la producción de leche (Swanson y Miller, 1973), mientras que el tratamiento exógeno con T_4 ó T_3 estimula a la lactancia (Knobil y Neill, 1994). En vacas lecheras, se ha observado que la administración de T_4 aumentó la producción láctea en un 27% (Hindery y Turner, 1965), la producción de lactosa en un 25% y el porcentaje de grasa en un 42% (Davis et al., 1988). Estos resultados muestran como el estrés calórico

reduce la producción de leche como consecuencia de una reducción en el funcionamiento de la glándula tiroidea.

2.1.3 Respuestas productivas en distintos periodos de lactancia

2.1.3.1 Leche

Las condiciones ambientales registradas en lugares con clima cálido afectan la producción de leche. Debido a esto, el ganado lechero disminuye el consumo de alimento. Johnson (1976) menciona que una variación entre 3-10 % en la producción de leche puede ser debida a las condiciones climáticas existentes. Desde los años 60's se pudo demostrar en vacas Holstein una disminución en forma lineal de -0.23 y -0.26 kg/d por cada unidad de incremento de ITH a partir de las 70 unidades, sobre el consumo de materia seca y la producción de leche respectivamente (Johnson et al., 1962). West (2003) menciona que los efectos negativos del estrés calórico pueden reducir hasta en 40% la producción de leche en vacas Holstein. Estudios realizados en cámaras ambientales mostraron que las vacas lecheras sufrieron una disminución de 35% de leche durante la mitad de la curva de lactación (Nardone et al., 1992). Calamari et al. (1997) observaron una disminución en la producción de leche de 11 a 14 %, 22 a 26 % y de 15 a 18 % durante el inicio, la mitad y el final de la lactación, respectivamente. Johnson et al. (1988) reportaron 0.059 y 0.019%/d menos de producción de leche en vacas altas productoras (30 kg/d) y vacas con una producción de leche menor (25 kg/d), respectivamente. Las vacas lecheras altas productoras pueden sufrir más los efectos del estrés calórico debido a una mayor producción de calor metabólico. Purwanto et al. (1990) reportaron un incremento

en la producción de calor del 27.3 y 48.5 % en vacas lecheras que produjeron 18.5 y 31.6 kg/d de leche, respectivamente, en comparación con vacas que no estaban en lactancia. Rhoads et al. (2009) realizaron un experimento en una cámara ambiental ubicada en Arizona, reportando una diferencia de 10.6 kg/d de leche en vacas Holstein que durante el primer periodo estuvieron bajo condiciones termoneutrales, pero que durante el segundo periodo estuvieron expuestas a un estrés calórico severo (ITH>80; en horas pico). En otro estudio, Khongdee et al. (2010) encontraron una disminución del 17% en la producción de leche de vacas cruzadas Holstein (87.5%) x Brahman (12.5%) estresadas por calor (ITH>80; en las horas más intensas del día), durante la prueba de dos tipos de sombras, una convencional y la otra con una malla aislante (Polysac Co., Bangkok, Thailand) que colocaron alrededor de la estructura de la sombra. Ellos mencionan que el promedio de producción de leche de las vacas bajo una sombra convencional disminuyó de manera muy rápida conforme fue avanzando el experimento en relación a las vacas sujetas a una sombra con malla aislante, lo que sugiere que el impacto provocado por el estrés calórico fue acumulativo en términos de la producción de leche, resultando en un periodo de lactación más largo y en una mayor producción de leche para las vacas sujetas a una sombra con malla aislante.

2.1.3.2 Grasa

Las respuestas en el porcentaje de grasa en leche pueden reducir desfavorablemente durante periodos de estrés calórico. Johnson (1976) reportó que el porcentaje de grasa puede verse afectado negativamente a causa de las altas temperaturas ambientales. Bajo estas condiciones, el porcentaje de grasa en

leche puede disminuir hasta 39.7% (Kadzere, et al., 2002). Bandaranayaka y Holmes (1976) reportaron una caída de 13 % en el porcentaje de grasa de vacas Jersey bajo estrés calórico. Los autores mencionan que esta caída fue correlacionada negativamente con la reducción del pH y la proporción de acetato contenida en el rumen en temperaturas de 30°C. West et al. (1999) usando vacas Holstein y vacas Jersey reportaron 3.24 y 3.21% de grasa en leche bajo un ambiente frío y un ambiente caliente, respectivamente. Kim et al. (2010) determinaron el efecto de la temperatura ambiental sobre la composición de la leche de vacas Holstein; las temperaturas fueron 20, 25 y 30°C y las respuestas fueron 3.76, 3.72 y 3.30%, respectivamente. Los autores mencionan que sólo hubo una tendencia en el efecto lineal. Rhoads et al. (2009) realizaron un experimento en una cámara ambiental bajo dos periodos experimentales, el primer periodo se realizó bajo condiciones termoneutrales y el segundo bajo condiciones de estrés calórico. Los autores indicaron que el porcentaje de grasa fue mayor (3.90 %) en las vacas del primer periodo en relación con el grupo de vacas del segundo periodo (3.56). Khondgee et al. (2010), aunque no reportaron cambios significativos en el porcentaje de grasa, observaron valores de 3.17 y 3.25 % en respuesta a los tratamientos que fueron dos tipos de sombras, una aislante contra una convencional, respectivamente. Aunque estudios previos han reportado un incremento en el porcentaje de grasa a altas temperaturas (32°C) (Johnson, 1965). Estudios más recientes realizados en cámara ambiental indican una reducción en la concentración de grasa (Shwartz et al., 2009). Esto sugiere que el factor estacional especialmente durante el verano que se caracteriza por tener altas temperaturas puede contribuir a la disminución del porcentaje de grasa.

2.1.3.3 Proteína

El porcentaje de proteína, al igual que el de grasa en leche, disminuye considerablemente en presencia de estrés calórico. Kadzere et al. (2002) reportan que esta disminución puede ser de hasta 17% en temperaturas ambientales altas. El estrés calórico disminuye la síntesis de proteína microbial en el rumen a consecuencia de una disminución en el consumo de materia seca producida por inapetencia (Staples y Thatcher, 2004). En acuerdo, Bernabucci et al. (2002) mencionan que el estrés calórico afecta la síntesis de proteína de la leche, especialmente la síntesis de la α y la β caseína. Por su parte, Adin et al. (2008) probaron dos dietas con el 12 y 18% de fibra detergente neutra en vacas Holstein estresadas por calor, observando similar 3.17 y 3.14% de proteína en leche, respectivamente. Similarmente, Bandaranayaka y Holmes (1976) reportaron una caída del 10% en el porcentaje de proteína de vacas Jersey bajo estrés calórico. Más recientemente, Rhoads et al. (2009) encontraron mayor proteína en leche durante un periodo frío (condiciones termoneutrales, 2.63 %), que en un periodo caliente (estrés calórico, 2.60 %). También, Shwartz et al. (2009) encontraron 2.81 y 2.59 % de proteína en leche en vacas Holstein durante un periodo frío y otro con estrés calórico, respectivamente. Aunque en algunos estudios no han reportando cambios en el porcentaje de proteína (Khondgee et al., 2010; Kim et al., 2010). No obstante, es evidente que el este porcentaje de proteína en leche disminuye a causa de las temperaturas ambientales altas.

2.1.3.4 Conteo de células somáticas

La mastitis es una de las enfermedades más costosas que afecta a la industria lechera (Blosser, 1979). Se estima que las pérdidas van de los 140 a los 300 dólares por vaca al año, lo cual se asocia a una reducción en la producción de leche debido a los casos de mastitis subclínica (Kirk y Bartlett, 1988). Tan solo en Estados Unidos las pérdidas fueron de alrededor de 2 billones de dólares (Harmon, 1994). Las bacterias más comunes involucradas en los casos de mastitis son los *Estafilococos aureus*, *Streptococos agalactiae*, bacterias coliformes y coccidias de origen ambiental. Las células somáticas en leche (CSL) son células blancas o leucocitos que se encuentran presentes dentro de un proceso inflamatorio. Las CSL comúnmente registradas después de una prueba de mastitis en leche son: macrófagos, linfocitos y neutrófilos polimorfonucleares. En vacas lecheras, el nivel de CSL es generalmente menor a 200 mil CSL. Aunque durante las primeras lactaciones éste número podría ser aun menor de 100 mil CSL. Un estudio demostró que el 50% de vacas sin infección presentó alrededor de 100 mil CSL/ml, y el 80% tuvo 200 mil CSL/ml (Eberhart et al., 1979). Un incremento anormal de las CSL indica inflamación en la ubre. Elvinger et al. (1991) en Florida, mostraron un incremento significativo de CSL en vacas estresadas por calor comparadas con vacas sin estrés. Los resultados fueron 145 y 105 mil CSL/ml, respectivamente. Esta diferencia contribuyó en parte a disminuir la producción de leche dentro del grupo de vacas estresadas por el calor. Shearer y Beede (1990) mencionan que la disminución en la producción de leche por efecto de tener altos niveles de CSL es de entre 10 y 20 % en ganado estresado por calor. Las CSL son regularmente bajas durante la época de invierno, pero altas durante el verano

(Dohoo y Meek, 1982), lo cual coincide con el incremento en la incidencia de mastitis clínica durante estos mismos meses de verano (Hogan et al., 1989; Paape et al., 1973; Smith et al., 1985). Smith et al. (1985) muestran que la tasa de infección con patógenos ambientales fueron altos durante el verano, y coincidió con un número alto de bacterias coliformes en la cama. Ellos mencionan que las altas temperaturas en combinación con la humedad pudieron haber incrementado la susceptibilidad a infección debido al incremento en el número de patógenos al cual estuvieron expuestas esas vacas en el estudio. Por otra parte, un estudio mostró la tasa de asociación entre mastitis clínica y el conteo de patógenos en la cama (Hogan et al., 1989). En este estudio los autores plantean que el estrés calórico o las altas temperaturas no son exactamente la causa del incremento de CSL. Este incremento de las CSL se debe más bien a que las tetas están más tiempo en contacto con los patógenos, lo que resulta en más infecciones durante los meses de verano.

2.2 Sistemas de enfriamiento en ganado lechero

Numerosos proyectos de investigación han mostrado que las explotaciones en confinamiento para establos lecheros ubicados en climas cálidos pueden ser modificados mediante la instalación de sistemas de enfriamiento (SE) que se basan en enfriamiento evaporativo para mejorar tanto la producción de leche como la eficiencia reproductiva del ganado (Armstrong et al., 2000; Flamenbaum et al., 1986; Ryan et al., 1992). Los SE basados en el enfriamiento evaporativo colocados en las sombras de los corrales de descanso o en las de otras áreas del establo, además de proporcionar protección contra la radiación solar, enfrían o

refrescan el entorno de la vaca. Estos sistemas han probado ser rentables para la producción animal en zonas con baja humedad relativa y en zonas húmedas cuando se presentan las horas pico de temperatura, por lo que la humedad relativa es baja. En este sentido, Berman (2006) menciona que el impacto del enfriamiento evaporativo sobre la temperatura del aire se reduce considerablemente a una humedad relativa mayor de 45%. El autor enfatiza que la velocidad del aire en los SE es importante para su uso en ambientes con elevada humedad relativa, sugiriendo un rango de 1 a 1.5 m/seg para que el enfriamiento evaporativo sea eficiente.

Actualmente se encuentran disponibles dos tipos de enfriamientos evaporativos: los aspersores y abanicos y las campanas evaporativas. Además de la instalación de SE en los corrales de descanso, otras áreas del establo lechero deben ser enfriadas. Por ejemplo, las vacas lecheras tienden a juntarse en la sala de espera, un lugar previo a la sala de ordeña donde el animal tiene un tiempo de espera variable, pero que generalmente es de al menos de 20 minutos. En este lugar saturado, la temperatura corporal puede aumentar rápidamente, por lo que la vaca experimenta estrés calórico con mayor intensidad que cualquier otro lugar del establo. En algunos establos de Arizona, también ha dado buen resultado la instalación de SE en las líneas de salida de la sala de ordeña. En estos lugares, la recomendación es de instalar solamente aspersores de agua para que cuando la vaca llegue a su corral, el aire de los abanicos evapore esa humedad y se refresque. Los comederos suelen también ser otro lugar donde se instalan equipos de enfriamiento, procurando que la vaca aumente su consumo de alimento al pasar más tiempo bajo el equipo. Se debe recordar que el efecto negativo más

importante es la reducción en el consumo de alimento, por lo que es una medida adoptada por muchos productores. En establos construidos con el sistema de echaderos, es también una práctica común la instalación de SE tanto en los lugares donde se echan las vacas para descansar como en donde se paran para comer.

2.2.1 Estrategias de enfriamiento para reducir el estrés calórico en ganado lechero

2.2.1.1 Vacas primíparas

Las vacas primíparas son las vacas de primer parto en producción, y es justo en esta etapa donde es importante mencionar, que aunque desde el punto de vista zootécnico y/o de manejo, estos animales se consideren vacas, pero es de notarse que desde un enfoque fisiológico estos animales siguen siendo vaquillas. Esto pudiera ser la razón por lo que la literatura es limitada en estudios sobre efectos de sistemas de enfriamiento en vacas primíparas, debido a que para incrementar el número de muestra y disminuir el error experimental, diversos estudios suman a vacas primíparas con multíparas. De cualquier forma, es posible que vacas primíparas bajo condiciones de estrés calórico respondan de la misma forma que las multíparas. West et al. (1999) probaron diferentes niveles de proteína en un periodo frío y otro caliente en vacas lecheras las cuales incluyeron vacas primíparas y multíparas. La producción de leche fue mejorada durante el periodo frío en comparación al periodo caliente. Bajo condiciones termoneutrales los requerimientos de proteína en vacas primíparas entrando a la primera lactación es de 13.5-15.0 % y en vacas frescas multíparas es de 17.5 % (NRC, 2001).

Collier et al. (2003) probaron dos sistemas de enfriamiento sobre las respuestas en vacas primíparas y multíparas por separado. Los sistemas de enfriamiento usados como tratamientos fueron el Korral Kool (KK, Korral Kool Inc., Mesa, AZ) y el ADS-ST (Advanced Dairy System Shade Tracker LLC, Chandler, AZ). La producción de leche no fue afectada por los tratamientos en cada grupo de vacas. Sin embargo, la tasa respiratoria de vacas primíparas fue menor en 14 resp/min con el tratamiento ADS-ST con respecto al KK. En tanto, cuando se probaron estos mismos tratamientos en vacas multíparas, el sistema de enfriamiento ADS-ST también resultó ser mejor que el KK, solo que para estos animales la diferencia sólo fue de 7 resp./min. Burgos et al. (2007) en un estudio similar probaron estos mismos tratamientos durante dos veranos seguidos (2004 y 2005) en Arizona. Los autores mostraron que en cada grupo de vacas, la producción de leche y el porcentaje de grasa no fueron diferentes durante el año 2004, no así con el porcentaje de proteína de las primíparas, ya que el sistema ADS-ST logró aumentar en 0.7%, en comparación con el KK. En el año 2005 el sistema de enfriamiento KK logró mejorar en 7 y 9% la producción de leche en vacas primíparas y multíparas, respectivamente, con respecto al ADS-ST. Las vacas primíparas durante esta etapa de su vida productiva aún se encuentran en una fase de crecimiento, y es aquí donde el ganar peso, desarrollar una buena ubre y alcanzar una talla considerable se convierten en temas de verdadero interés para el productor, porque de esto dependerá la salud y la productividad, así como las ganancias económicas para el futuro. Ahora bien, es importante considerar que todo este manejo representa un ambiente totalmente nuevo para ellas, lo que les provoca un inevitable estrés. Adicionalmente, si estos animales jóvenes se

encuentran en zonas áridas, es de pensar que sufrirán también los efectos negativos del estrés calórico. Por lo tanto, encontrar las estrategias de enfriamiento ideales para una mejor productividad sigue siendo un verdadero reto para los productores, por lo que es necesario seguir realizando investigación en este sentido.

2.2.1.2 Vacas multíparas

Las vacas lecheras con múltiples partos en condiciones de estrés calórico suelen ser las más afectadas en relación a vacas primíparas debido al mayor peso metabólico y nivel de consumo que demanda su alta producción de leche. Los sistemas de enfriamiento, si bien no resuelven en su totalidad la problemática acerca de los efectos negativos que provoca el estrés calórico sobre la producción de leche, si logran ayudar en cierto porcentaje las pérdidas de leche. Correa et al. (2002) reportaron una producción de 4 kg de leche/d más en vacas que fueron enfriadas a base de aspersores y abanicos durante 8 h continuas diariamente que vacas sólo con sombra. Asimismo, Avendaño et al. (2006) enfriaron con este mismo método vacas Holstein durante el periodo seco en tres veranos consecutivos, observando una mejora general del confort de los animales expresado en menor temperatura rectal y tasa respiratoria, una tendencia de mayor peso de las crías al parto, mayor producción de leche posparto y mayor producción de leche corregida por grasa. Igono et al. (1987), cuando enfriaron durante 10 h a vacas Holstein estresadas por calor, observaron 2 L más de leche que vacas que se encontraban bajo la sombra. También, Igono et al. (1992) observaron que enfriando durante 10.5 h a vacas Hosltein se producía 28% más

leche que en vacas solo con sombra. Otra alternativa de enfriamiento es la realizada por Flamenbaum et al. (1995), quienes trabajaron con un equipo de enfriamiento a base de aspersores y abanicos, el cual fue operado desde las 07.30 y hasta las 18.30 h (11 h) durante la fase de lactación (150 d) de vacas Holstein. Una vez que era encendido el quipo, este funcionaba de forma cíclica en periodos cortos de 4.5 min, seguido de una pausa de 30 seg antes de volver a continuar, y de la misma manera hasta completar un periodo de 30 min. Al final del día se formaban 7 periodos de 30 min con intervalos de encendido y apagado de 1.5 h entre cada periodo. Los autores mencionan que con esta estrategia el sistema de enfriamiento y la condición corporal no afectaron de manera individual a la producción de leche. Sin embargo, si se detectó una interacción entre el tratamiento otorgado con el sistema de enfriamiento, condición corporal y las semanas de lactación de las vacas usadas durante el experimento, las cuales reflejaron un pico de mayor producción de leche en el grupo de vacas enfriadas en comparación con el grupo de vacas sin enfriamiento.

3. EFECTO DE PERIODOS CORTOS DE ENFRIAMIENTO SOBRE LAS RESPUESTAS FISIOLÓGICAS Y PRODUCTIVAS DE GANADO LECHERO EXPUESTO A ESTRES CALORICO SEVERO. 1. VACAS PRIMIPARAS

3.1 Resumen

El objetivo de este experimento fue evaluar el efecto de periodos cortos de enfriamiento sobre las respuestas fisiológicas y productivas durante el verano. Se usaron 27 vacas de primer parto que se agruparon en uno de 3 tratamientos: testigo, 1 h de enfriamiento (T); 2 h de enfriamiento (AM); y 4 h de enfriamiento (AM+PM). El sistema de enfriamiento fue a base de aspersores y abanicos. La temperatura rectal, producción de leche, proteína en leche y producción de energía en leche fue similar entre todos los grupos, aunque las temperaturas de la piel fueron menores ($P<0.05$) en el grupo AM+PM durante la mañana, pero mayores ($P<0.01$) durante la tarde, en comparación a los grupos T y AM. La tasa respiratoria fue menor ($P<0.01$) en el grupo AM+PM que en los grupos T y AM. Por otra parte, la grasa en leche fue mayor ($P<0.05$) en vacas del grupo AM+PM. Esto se debe a que el periodo de enfriamiento más largo (4 h) mejoró las respuestas fisiológicas, así como la grasa en leche de vacas Holstein primíparas. En conclusión, se recomienda incrementar los periodos de enfriamiento en zonas áridas para lograr así mejorar el funcionamiento y confort de las vacas lecheras.

Palabras clave: Estrés calórico, ganado lechero, sistema de enfriamiento, grasa en leche.

3.2 Abstract

To evaluate effects of short periods of cooling on physiological and productive parameters during summer, 27 first parity cows were grouped into control, 1 h cooling (C); 2 h cooling (AM); and 4 h cooling (AM+PM). The cooling system consisted of misting and forced ventilation. Rectal temperature, milk production, milk protein, and milk energy output were similar among the groups, although, the skin temperatures were lower ($P<0.05$) in the AM+PM group during the morning but higher ($P<0.01$) in the afternoon, compared to C and AM groups. The respiratory rate was lower ($P<0.01$) in the AM+PM group than in C and AM groups. Conversely, milk fat was higher ($P<0.05$) in AM+PM cows. Because use of a 4 h cooling period enhanced some physiological parameters and milk fat in primiparous Holstein cows, we recommend increasing the cooling period in arid regions to achieve higher performance and comfort of dairy cows.

Keywords: Heat stress, dairy cattle, cooling system, milk fat.

3.3 Introducción

El ganado lechero es susceptible a los cambios climáticos es porque la mayoría de las razas con una alta producción de leche provienen de lugares o regiones frías. Por otro lado, en muchas regiones del mundo que presentan un clima árido, tales como las del Valle de Mexicali en México, la temporada de calor en el verano se ha vuelto más larga (García-Cueto et al., 2008), lo que provoca que las condiciones de estrés calórico se clasifiquen de moderado a severo en establos lecheros, índices de temperatura-humedad (ITH) que va de 75 a las 85 unidades (Avendaño-Reyes et al., 2006). Las vacas lecheras Holstein son particularmente susceptibles a estrés calórico porque poseen un gran carga de calor metabólico, como resultado de sus elevados requerimientos de mantenimiento y producción y crecimiento, en el caso de vacas primíparas. Los mecanismos termorregulatorios que sirven para mantener el balance térmico en la vaca lechera cuando existe una gran demanda de energía, sobre todo en la producción de leche y/o la eficiencia reproductiva (West, 2003). Los mecanismos termorregulatorios de tipo fisiológico que ocurren durante el proceso de estrés calórico pueden incluir el incremento de la tasa de sudoración, una mayor vasodilatación por el incremento en el flujo de la sangre en la superficie de la piel. Asimismo, también se incrementa la tasa respiratoria, se disminuye el consumo de materia seca y de otros nutrientes, se reduce la tasa metabólica y se altera el metabolismo del agua, por último, se altera la síntesis de varias hormonas. Desafortunadamente todas estas respuestas al estrés calórico que afectan negativamente la fisiología y el desempeño de vacas Holstein en lactación (Kadzere et al., 2002).

La tasa de crecimiento de las vaquillas de reemplazo si no se lleva a cabo de manera correcta puede causar pérdidas cuantiosas para los productores de leche, porque representan el futuro del establo (Cady y Smith, 1996). El inadecuado tamaño de las vacas durante el primer parto puede limitar la producción de leche y tasa de concepción durante la primera lactación (Hoffman et al., 1996). El excesivo consumo de energía, podría tener efectos negativos sobre el desarrollo de la glándula mamaria, el cual reduce en parte el tejido parenquimatoso formado por las células epiteliales (Harrison et al, 1983). Radcliff et al. (1997) proporcionaron cantidades adecuadas de proteína metabolizable en animales que recibieron dietas altas en energía, y no observaron cambios significativos en el desarrollo de la glándula mamaria. Se ha observado que el estado de la pubertad está asociado con el peso corporal, sin embargo, el peso no está relacionado de manera lineal con el crecimiento. Por otra parte, el crecimiento del parénquima de la glándula mamaria puede ser truncado antes del término final de la formación de todo el sistema alveolar de la glándula, si existe un consumo excesivo de energía antes de la pubertad (Van Amburgh et al., 1991).

Asimismo, el movimiento de las vacas de primera lactación hacia el área de producción representa un nuevo ambiente que incluye dietas nuevas, corrales y manejos nuevos, convivencia con vacas grandes y maduras las cuales ejercen su jerarquía dentro del corral, todo esto puede causar un estrés adicional al ocasionado por el estrés calórico. El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de tres periodos de enfriamiento sobre las respuestas fisiológicas y productivas de vacas Holstein primíparas durante el verano en una región árida.

3.4. Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en el establo lechero llamado “Santo Domingo”, ubicado en el Km 43 de la carretera federal Mexicali-San Felipe, en el valle de Mexicali, Baja California con una latitud 115.3° y una longitud de 32.2° , ubicado al noroeste del Estado de Baja California, México. Las condiciones climáticas de esta región son como las del Desierto de Sonora, las cuales alcanzan temperaturas máximas de 50°C durante el verano y temperaturas mínimas de -5°C durante el invierno, con una precipitación media anual de 85 mm (García, 1985). Todos los procedimientos realizados en los animales se llevaron a cabo según las normas oficiales para el cuidado animal (NOM-051-ZOO-1995: Trato humanitario en la movilización de animales). Veintisiete vacas Holstein primíparas (90-150 d postparto) fueron bloqueadas por producción de leche dentro de 9 grupos y fueron asignadas a uno de tres tratamientos: 1) T (grupo testigo), 9 vacas enfriadas antes de cada ordeña, la cual se llevaba a cabo a las 05.00 y 17.00 h; 2) AM, 9 vacas enfriadas a las 10.00 h y antes de cada ordeña; y 3) AM+PM, 9 vacas enfriadas a las 10.00, 15.00 y 22.00 h, también antes de cada ordeña. Los periodos de enfriamiento fueron de 60 min, excepto los de antes de la ordeña, los cuales fueron de 30 min. En total que el tiempo de enfriamiento diario fue de 1 h para el grupo testigo, 2 h para el grupo AM y 4 h para el grupo AM+PM. El enfriado de las vacas se llevó a cabo en la sala de lavado de las vacas, justo antes de entrar a la sala de ordeña, la cual tenía una dimensión de 6 m de ancho y 12.5 m de longitud con una orientación de este a oeste. El sistema de enfriamiento consistió en colocar 4 abanicos en el techo de la sala de lavado a 3.5 m del piso de concreto. Cada abanico tuvo un diámetro de 65 cm y contó con 4 aspersores de gota fina de

agua de 25 mm de diámetro, los cuales producían un gasto de agua de 7 L/h, por lo que el total de gasto de agua por abanico fue de 28 L/h. El motor de cada abanico fue de 1.1 HP que alcanzaba 1000 rpm. La velocidad del aire fue de 13.7 km/h a 6 m de distancia (el motor operó con 115/230 V y trabajó con corriente trifásica; el volumen del aire y la presión de agua fueron de 13,592 m³/h y 17.58 cm³, respectivamente). Los abanicos fueron colocados en pares a una distancia de 6 m entre ellos. Todas las vacas estuvieron bajo un sistema de confinamiento en corrales abiertos (60 x 60 m) uno junto del otro, con una sombra en medio y comedero al frente de ambos corrales. Las sombras de esos corrales fueron de 9 m de ancho y 30 m de largo con una orientación de norte a sur. Las vacas caminaron alrededor de 3 a 20 m a partir de la salida de cada corral y hasta la sala de lavado de las vacas. Después del tratamiento o del baño otorgado las vacas regresaron a su respectivo corral.

Las vacas rotaron en todos los tratamientos en periodos de 28 d, las variables de respuesta fueron colectadas durante la última semana de cada periodo. Los periodos de estudio fueron 3: 1er. periodo del 20 de Junio al 18 de Julio; 2do. del 19 de Julio al 15 de Agosto; 3er. periodo del 16 de Agosto al 12 de Septiembre. La alimentación de las vacas consistió en ofrecerles una dieta formada por concentrado (600 g/kg de consumo), heno de alfalfa (300 g/kg de consumo) y zacate sudan (100 g/kg de consumo). La dieta se ofreció diariamente a las 06.00 y 18.00 h, y esta se formuló según las recomendaciones del NRC (2001), conteniendo 958 g/kg de MS, 172 g/kg de PC, 40.8 g/kg de grasa y 41.7 g/kg de FDN. El acceso al agua estuvo disponible todo el tiempo.

Las variables de respuesta fueron colectadas en tres tiempos durante la última semana de cada periodo en todas las vacas, y estas fueron: temperatura rectal (TR), tasa respiratoria (TRes), temperatura de la piel (TP), producción de leche, y sus componentes (porcentaje de grasa y proteína). La TRes fue determinada a partir del número de respiraciones durante 30 seg y multiplicado por 2 para obtener las respiraciones por minuto (resp/min). Para obtener la TR, las vacas fueron llevadas al área de enfermería, en donde se usó un termómetro manual (Delta Trak[®], Pleasanton, CA, USA). La TP se tomó con un termómetro en forma de pistola, la cual incluía un sistema infrarrojo para obtener las temperaturas (Raytec[®], Santa Cruz, CA, USA) en la región de la nalga, flanco derecho y ubre dentro del corral, de esta manera se evitó en gran medida el movimiento de los animales. Todas estas variables fisiológicas fueron colectadas dos veces al día dentro de los días de muestro (martes, jueves y sábado) a las 09.30 y 14.30 h. La producción de leche fue registrada usando pesadores de leche Waikato (Inter Ag, Hamilton, New Zealand), y las muestras para el análisis de su composición fueron colectadas durante la primera ordeña en la mañana. El análisis de la grasa en leche se realizó mediante el método Gerber (International Dairy Federation, 1991) y el análisis de PC se realizó mediante el método Kjeldhal (Barbano et al., 1991). La producción de energía en leche (EL) se calculó a partir de la producción de leche (Leche), grasa en leche (Grasa) y proteína en leche (Proteína), mediante la siguiente fórmula (Tyrrell y Reid, 1965):

$$EL = \left(\frac{40.72 \times \text{grasa} + (22.65 \times \text{PC}) + 102.77}{1000} \right) \times 2.204 \text{ leche}$$

La condición corporal (CC) fue evaluada por dos personas sobre una escala de cinco puntos, donde “1” correspondía a una vaca demasiado flaca y “5” a una

demasiado obesa (Wildman et al., 1982). El resultado obtenido por ambas personas fue promediado dentro de las mismas vacas y el periodo. La información del estado meteorológico se obtuvo de la Estación Climatológica Experimental del ICA-UABC, localizada en el Valle de Mexicali a 20 km del lugar de experimentación. Las variables climáticas colectadas por hora fueron temperatura ambiental (TA, °C) y humedad relativa (HR, %) máximos y mínimos. Con estas variables, se calculó el ITH de la siguiente fórmula propuesta por Hahn (1999):

$$\text{ITH} = (0.81 \times \text{TA}) + \text{HR} (\text{TA} - 14.4) + 46.4$$

Los promedios semanales de las variables de respuesta (CC, TR, TRes, TP, producción de leche, grasa en leche, proteína en leche y producción de energía en leche) fueron analizados por un Diseño Cuadro Latino usando un efecto aleatorio bajo el procedimiento del PROC MIXED del SAS (SAS Institute Inc., 2004). La estructura de varianza-covarianza fue seleccionada con base en dos criterios: El criterio de información Akaike y el Bayesiano. La estructura de covarianza que estuvo lo más cercano al cero (componentes de la varianza por el método de probabilidad máxima residual estimada) fue la que se seleccionó (Littell et al., 1996). El efecto lineal para estas variables incluyó el efecto de bloque (clasificado en 9 categorías), tratamiento (3 categorías), periodo (3 categorías) y la interacción tratamiento con bloque. Las vacas dentro del bloque fueron designadas como un efecto aleatorio. Las comparaciones hechas por contrastes ortogonales fueron T contra AM+PM (vacas enfriadas 1 h contra 4 h), AM contra AM+PM (vacas enfriadas 2 h contra 4 h). Las medias mínimos cuadráticas y los errores estándar de la media fueron reportados, así como el nivel de significancia

de $P < 0.05$, mientras que una tendencia fue considerada cuando existió $0.10 < P < 0.15$.

3.5 Resultados y discusión

Los valores máximos y mínimos para temperatura, humedad relativa e ITH por mes durante el estudio se muestran en el cuadro 1 y figura 1. La temperatura ambiental máxima fue de 47.2°C en el mes de Julio y la mínima de 19.8°C se registró en el mes de Junio. El ITH máximo fue de 95.5 unidades y el mínimo fue de 63.3 unidades, ambos registrados en el mes de Junio.

Cuadro 1. Promedios diarios máximos y mínimos para las variables climáticas temperatura ambiental (AM), humedad relativa (HR) e índice de temperatura-humedad (ITH).

Mes	Mínima diaria			Máxima diaria			Promedio diario		
	AM	HR	ITH	AM	HR	ITH	AM	HR	ITH
Junio									
Semana 1	19.8	7.9	63.9	42.5	76.3	84.4	29.6	27.8	74.1
Semana 2	20.0	7.0	65.9	44.3	72.7	95.5	32.4	31.7	77.7
Semana 3	23.7	9.5	67.8	43.8	53.0	94.7	34.7	33.8	81.9
Semana 4	25.4	8.6	69.8	44.6	59.2	95.3	35.4	31.4	81.7
Julio									
Semana 1	26.0	7.3	73.3	47.2	85.0	87.6	36.0	33.5	81.8
Semana 2	27.4	6.0	70.8	43.2	69.7	86.4	34.2	33.5	80.2
Semana 3	28.0	11.6	74.3	45.4	74.4	87.3	35.5	34.7	81.8
Semana 4	28.1	13.1	78.0	43.5	72.2	87.3	34.7	42.5	82.5
Agosto									
Semana 1	24.9	6.5	69.3	43.4	78.3	86.2	34.1	39.6	81.0
Semana 2	29.1	11.9	76.2	45.3	68.6	87.5	37.1	31.3	83.0
Semana 3	29.1	8.0	78.1	46.2	78.5	87.0	35.7	41.6	83.4
Semana 4	29.5	12.8	77.1	45.3	76.5	87.9	37.5	31.9	83.6
Septiembre									
Semana 1	27.8	13.9	76.4	46.2	80.6	88.7	36.1	38.4	83.3
Semana 2	26.0	9.2	71.6	44.2	73.1	86.7	35.5	27.1	80.4

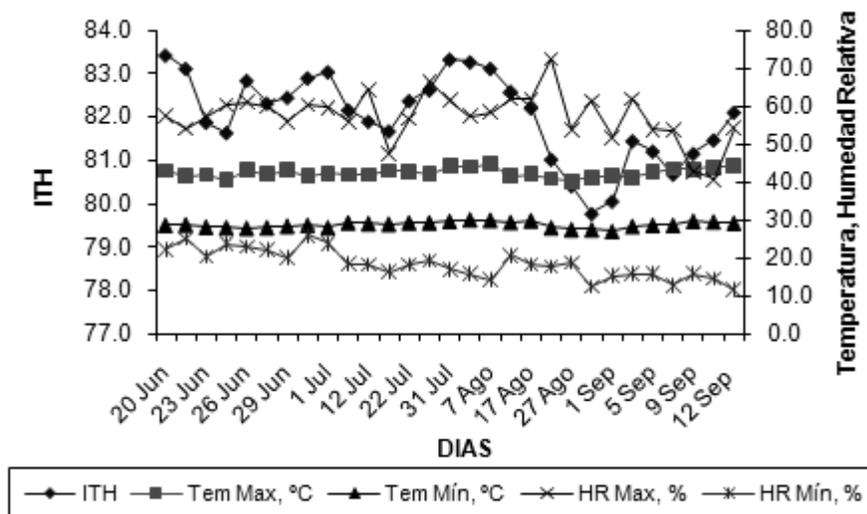


Figura 1. Promedio del índice de temperatura-humedad, temperatura ambiental y humedad relativa máximas y mínimas registradas durante el estudio.

Un valor de ITH de 72 unidades es considerado como el punto en el cual la vaca lechera Holstein inicia con los efectos negativos del estrés calórico. Los valores de ITH de 70 unidades se consideran como confortables, de 72 a 78 unidades como estresantes y mayor a 78 se considera como un estrés de peligro moderado (Armstrong, 1994; West, 2003). En el ganado lechero durante este experimento (Figura 1), el promedio mínimo diario de ITH nunca estuvo en la zona de confort, en el cual se empieza a considerar como estrés calórico (ITH = 72 unidades) más aún, solo en una semana el promedio de ITH estuvo por debajo de las 80 unidades, lo que sugiere que el estrés calórico fue severo durante la mayor parte del estudio. El Desierto de Sonora, como hábitat terrestre, es considerado una zona que presenta relativamente condiciones climáticas extremas (García-Cueto et al., 2008), y estas condiciones durante el estudio fueron consideradas agudas, ya que las vacas absorbieron más calor del que pudieron perder. Las

vacas lecheras tienen la capacidad de regular su temperatura corporal interna, poniendo al mismo nivel la cantidad de calor producido durante su metabolismo y el calor que fluye del animal hacia el exterior en el ambiente circundante. Las altas temperaturas y la humedad del ambiente restringen la disipación del calor de la superficie del cuerpo, lo que puede llevar a un flujo retrógrado. Incrementándose considerablemente la temperatura del cuerpo, misma que puede ser perdida a través de la síntesis de la leche (Igono et al., 1992; Kadzere et al., 2002).

Una evidencia fisiológica clara como respuesta termorregulatoria durante el tiempo prolongado de exposición al calor que tuvieron las vacas durante el presente estudio fue la TRes (Cuadro 2). Durante la mañana, la TRes en el grupo T fue 5% mayor ($P < 0.01$) que en el grupo AM+PM, y durante la tarde esta diferencia excedió el 8% ($P < 0.01$). Brown-Brandl et al. (2005) establecieron que la TRes es el principal indicador para el estrés calórico porque es afectada considerablemente en diversas categorías del estado del tiempo basadas a partir del ITH. Como la TRes se incrementa a medida que se incrementa la temperatura ambiente, la TRes suele ser alta durante la tarde.

El reflejo del jadeo durante el verano es típico en las vacas lecheras, ya que determina un efecto de enfriamiento debido a la exposición de la boca y la lengua en la atmosfera. El incremento de la TRes durante periodos de estrés calórico es parte esencial dentro de la pérdida de calor en el cuerpo porque existe un intercambio térmico durante el proceso de la respiración (Yousef, 1985).

Cuadro 2. Promedio de las variables fisiológicas en vacas Holstein primíparas bajo varios tres estrategias de enfriamiento durante el estudio.

	Tratamientos				Contrastes	
	T	AM	AM+PM	EE	T vs. AM+PM	AM vs. AM+PM
Condición corporal	3.44	3.44	3.43	0.0256	0.6266	0.6979
Temperatura rectal, °C	38.95	38.95	38.97	0.1184	0.8742	0.9063
Temperatura de piel						
Nalga AM, °C	34.44	34.34	33.16	0.1538	<0.0001	<0.0001
Nalga PM, °C	34.49	35.96	36.11	0.1487	<0.0001	0.4879
Costado derecho AM, °C	34.59	34.46	33.29	0.1523	<0.0001	<0.0001
Costado derecho PM, °C	34.65	36.14	36.29	0.1255	<0.0001	0.4049
Ubre AM, °C	34.91	34.77	33.51	0.1458	<0.0001	<0.0001
Ubre PM, °C	34.71	36.30	36.38	0.1679	<0.0001	0.7399
Tasa respiratoria						
AM, respiraciones/min	95.52	96.63	91.32	1.1661	0.0018	0.0001
PM, respiraciones/min	104.93	103.44	96.80	1.3576	<0.0001	<0.0001

Nota: T=testigo; AM=testigo + enfriamiento 1000 h; AM+PM =testigo + enfriamiento 1000, 1500 y 2200 h.

La TR fue similar en todos los grupos de tratamiento de vacas primíparas (~38.95°C) y no alcanzó el promedio de 39°C (Cuadro 2), lo que sugiere que estas vacas lecheras se consideran como animales jóvenes que pueden tolerar una gran carga de calor debido a que tienen una tasa de sudoración más alta que las vacas maduras (Avendaño-Reyes et al., 2010). Esto hace que el calor por cada kilogramo de peso vivo disminuya la sudoración. Asimismo, también se sabe que las vacas primíparas tienen menores producciones de leche, menos consumo de MS, y como consecuencia, tienen menor carga de calor metabólico. Una producción alta en una vaca Holstein (> 45 kg/d de leche) hace que pierda más energía en forma de calor que produciendo leche, pues la vaca lechera es una especie con un bajo nivel de tolerancia al estrés por calor (West, 2003).

Durante la mañana, la TP de la nalga (33.2°C), costado derecho (33.3°C), y ubre (33.5°C) fueron menores ($P<0.01$) en vacas AM+PM que en vacas T (34.4, 34.6, 34.9°C, respectivamente) y AM (34.3, 34.5, 34.8°C, respectivamente) (Cuadro 2). Sin embargo, durante la tarde, la TP fue mayor ($P<0.01$) en vacas AM+PM (nalga 36.1°C, costado derecho 36.3°C y ubre 36.4°C) que en vacas T (34.5, 34.7, 34.7°C, respectivamente). Mientras tanto, la TP de los grupos AM+PM y AM fueron similares durante la tarde. Durante la mañana, la TP indicó que el enfriamiento durante la noche en el grupo AM+PM fue efectivo, porque las vacas mantuvieron una temperatura corporal baja antes de las horas de calor que ocurrían durante el día. Sin embargo, durante la tarde, cuando la temperatura ambiental y la radiación solar estaban en su punto máximo, se notó que las vacas del grupo AM+PM experimentaron mayor actividad dentro del corral, se acercaban al comedero o al bebedero para comer o beber agua, debido a que el tiempo de enfriamiento fue mayor para estas vacas. En contraste, las vacas de los tratamientos T y AM estuvieron más tiempo postradas debajo de la sombra durante la tarde, las cuales no presentaron ningún movimiento en relación a las vacas del grupo AM+PM. Estos eventos se basan en la observación que se realizó durante el desarrollo de este experimento, aunque este comportamiento de las vacas no haya sido medido.

Las vacas enfriadas 4 h/d produjeron más grasa en leche (37 g/kg) que las vacas de los grupos T y AM (35.1 g/kg en ambos grupos) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Promedio de las variables de producción en vacas Holstein primíparas bajo tres estrategias de enfriamiento durante el estudio.

	Tratamientos				Contrastes	
	T	AM	AM+PM	EE	T vs. AM+PM	AM vs. AM+PM
Leche, Kg	16.16	16.27	16.12	0.4607	0.9005	0.6449
Grasa, g/kg	35.4	35.1	37.0	0.1082	0.0601	0.0219
Proteína, g/kg	34.1	33.8	33.7	0.0606	0.5294	0.8398
Producción de energía en leche, MCal/d	11.90	12.09	12.06	0.3742	0.6511	0.9268

Nota: T=testigo; AM=testigo + enfriamiento 1000 h; AM+PM =testigo + enfriamiento 1000, 1500 y 2200 h.

Mientras que diversos investigadores han encontrado una disminución de grasa en leche como resultado de una exposición al estrés calórico (Kadzere et al., 2002; Rhoads et al., 2009), otros no han observado cambios sobre esta variable en diferentes ambientes (Burgos et al., 2007; Shwartz et al., 2009). La disminución de la grasa en leche es el resultado de la exposición al calor, el cual se asocia con una disminución del consumo de forraje y un subsecuente cambio en la proporción de acetato a propionato (Collier, 1985). Parcialmente consistente con los resultados encontrados en este estudio, Amenu et al. (2004) reportaron que las vacas bajo un sistema de enfriamiento y que comieron una dieta de alta calidad durante los meses de verano tuvieron una proporción mayor de grasa y caseína en la leche. Estas vacas también produjeron más queso por cada 100 kg de leche, con una mayor producción de humedad-sal-caseína-grasa-ajustada y una mayor eficiencia productiva, comparadas con leche de vacas sin acceso a un sistema de enfriamiento y que aparte comieron una dieta de menor calidad. Como consecuencia del estrés calórico, la proporción de grasa en leche es reducida por un incremento relativo de los ácidos grasos de cadena larga que resultan por una disminución en los niveles de acetato circulantes, debido a una disminución en el

consumo de fibra (Thompson, 1985; Baumgard et al., 2000). Una reducción en el flujo de sangre en la glándula mamaria también puede ocurrir durante el estrés calórico; el cortisol y la hormona de crecimiento pueden influenciar el metabolismo mamario, ya que el cortisol puede alterar el suministro de glucosa en las células epiteliales de la glándula mamaria, mientras que la hormona de crecimiento puede alterar la circulación de los ácidos grasos de cadena larga y de las enzimas lipogénicas dentro de la ubre (Bell y Bauman, 1997; Itoh et al., 1998).

La variabilidad de condiciones en el cual los sistemas de enfriamiento pudieran ser efectivos, así como su modo de acción en vacas lecheras, aún no está clara. Este estudio fue un esfuerzo para identificar los periodos en el cual un sistema evaporativo puede ser usado eficientemente para el alivio de vacas de primera lactación.

3.6 Conclusión

Los resultados de esta investigación indicaron que en vacas primíparas el largo de los periodos de enfriamiento mejora el estado de confort de los animales pero no modifican el nivel de producción de leche bajo diversas condiciones de estrés calórico. Solo la tasa respiratoria y la proporción de grasa en leche fueron las respuestas más influenciadas por el largo del enfriamiento.

4. EFECTO DE PERIODOS CORTOS DE ENFRIAMIENTO SOBRE LAS RESPUESTAS FISIOLÓGICAS Y PRODUCTIVAS DE GANADO LECHERO EXPUESTO A ESTRES CALORICO SEVERO. 2. VACAS MULTIPARAS

4.1 Resumen

El objetivo de este experimento fue evaluar el efecto de dos periodos cortos de enfriamiento sobre las respuestas fisiológicas y productivas de vacas Holstein en lactación bajo condiciones de calor severo. Treinta y nueve vacas fueron bloqueadas por producción de leche para ser asignadas a uno de tres tratamientos: grupo testigo (T), vacas enfriadas 30 min antes de la ordeña (05.00 y 17.00 h, 1 h de enfriamiento); grupo AM, vacas enfriadas 1 h a las 10.00 h y 30 min antes de cada ordeña (2 h de enfriamiento); y grupo AM+PM, vacas enfriadas 1 h a las 10.00, 15.00 y 22.00 h, además 30 min antes de cada ordeña (4 h de enfriamiento). El sistema de enfriamiento fue colocado en la sala de baño, previo a la de ordeña, donde las vacas fueron desplazadas desde su respectivo corral para asignarles los tiempos de enfriamiento. La tasa respiratoria y las temperaturas de la nalga y costado derecho fueron menores ($P<0.05$) en el grupo de vacas AM+PM que en las vacas de los grupos AM y T durante la tarde, pero fue menor ($P<0.05$) que el grupo AM durante la mañana. La temperatura rectal fue similar ($P>0.05$) en los tres grupos de vacas. Las concentraciones de tiroxina tendieron a ser mayores ($P<0.10$) en el grupo T con respecto de los grupos AM y AM+PM. El grupo AM+PM mostró una mayor ($P<0.05$) producción de leche que el grupo T (18.70 vs. 17.43 kg, respectivamente). También las vacas del grupo AM+PM exhibieron una tendencia ($P<0.10$) a incrementar la energía en leche, con respecto a los grupos T

y AM (13.75 vs. 13.18 y 13.15 MCal, respectivamente). El porcentaje de proteína, grasa en leche, condición corporal, glucosa, colesterol, triglicéridos y triiodotironina fueron similares ($P>0.05$) entre los tres grupos. El grupo enfriado durante 4 h con un equipo de aspersores y abanicos durante altas temperaturas, representa una alternativa para observar una mejoría moderada en la producción de leche de vacas Holstein en lactación, sin embargo, se sugiere proporcionar más tiempo de enfriamiento para incrementar la productividad de vacas Holstein en lactación.

Palabras clave: Estrés calórico, enfriamiento artificial, producción de leche, índice de temperatura-humedad, grasa en leche.

4.2 Abstract

The objective of this study was to evaluate the effect of two short-term cooling periods on physiological and productive status of lactating Holstein cows during hot ambient temperatures. Thirty nine multiparous cows were blocked by milk yield and were assigned to three treatments being: control group (C), cows cooled before milking time by 30 min (05.00 and 17.00 h daily, 1 hour cooling); AM group, cows cooled at 10.00 h and before milking (2 hours cooling); and AM + PM group, cows cooled at 10.00, 15.00 and 22.00 h, as well as before milking (4 hours cooling). The cooling system was placed in the holding pen where the cows were moved throughout cooling times. Respiratory rate, and temperatures of thurl and right flank were lower ($P<0.05$) in cows from AM+PM group than AM and C cows during the morning and during the afternoon; however, udder temperature was higher in AM + PM group compared to AM and C groups during the afternoon, but was lower than AM group during the morning. Rectal temperature was similar ($P<0.05$) in the three groups. Thyroxin concentrations tended ($P<0.10$) to be higher in C group related to AM and AM+PM groups. The AM+PM group showed higher ($P<0.05$) milk production than C group (18.70 vs. 17.43 kg respectively). Also, AM+PM cows exhibited a trend ($P<0.10$) to increase milk energy output than C and AM groups (13.75 vs. 13.18 and 13.15 MCal, respectively). Protein and fat in milk, body condition score, glucose, cholesterol, triglycerides and triiodothyronine were similar ($P>0.05$) among the three groups.

Four hours of cooling with spray and fans during severe summer temperatures represents an alternative to observe a modest improvement in milk

yield of lactating Holstein cows, however, more time of cooling is needed to enhance overall performance of lactating Holstein cows.

Keywords: Heat stress, artificial cooling, milk production, temperature-humidity index, milk fat.

4.3 Introducción

Los efectos del calentamiento global tienen un especial efecto en regiones áridas y semi-áridas, resultando en veranos más largos y calurosos. Una gran parte del noroeste de México está situada en esta región de modo que la industria lechera experimenta cada año veranos más calurosos (Chacón et al., 2010). El funcionamiento de la vaca lechera es afectado negativamente por dos fuentes de calor: la primera es el calor producido precisamente por el ambiente y la segunda es el producido internamente por el metabolismo basal. Esta última fuente de calor quizá sea el factor menos importante, pero si la producción de leche o el consumo de alimento se incrementan, se producirá más calor derivado del metabolismo de los nutrientes, el cual puede causar estrés calórico por la combinación del calor metabólico y las altas temperaturas del ambiente (Fuquay, 1981).

El índice de temperatura-humedad (ITH) sirve para determinar el grado de estrés calórico que afecta a los rumiantes y se obtiene combinando la temperatura ambiente y la humedad relativa. Las vacas Holstein en lactación son especialmente susceptibles al estrés calórico que se presenta cuando el ITH excede de 72 unidades, mientras que el estrés calórico severo ocurre a partir de 80 unidades de ITH (Armstrong, 1994). El efecto más importante del estrés calórico sobre el ganado es la disminución del consumo de materia seca, lo cual afecta la producción de leche y las funciones reproductivas cuando las vacas lecheras son expuestas a un ambiente caliente o un ambiente caliente y húmedo en periodos de 5 semanas (Arieli et al., 2004). Otros efectos de tipo fisiológicos y de comportamiento que ocasiona estrés calórico sobre el ganado son el incremento de: consumo de agua, la tasa respiratoria, transpiración y jadeo; así

como la disminución de la tasa de pasaje del alimento y del flujo sanguíneo hacia órganos internos, lo cual altera finalmente la secreción y disponibilidad de las hormonas relacionadas con las funciones metabólicas, productivas y reproductivas de las vacas lecheras en lactación (Kadzere et al. 2002; West 1999).

Investigaciones recientes reportan temperaturas del cuerpo con el uso de termómetros en forma de pistola y con tecnología infrarroja, lo que se considera confiable para registrar la temperatura de las diferentes partes de la piel de los animales; otra ventaja es que cuando se realice la lectura de la temperatura se pueda hacer a cierta distancia, sin la necesidad de que el animal tenga que moverse. Si la temperatura de la superficie de la piel está por debajo de los 35°C, el gradiente de temperatura entre la base y la piel es bastante grande para que los animales utilicen eficazmente las 4 rutas de intercambio de calor (convección, conducción, radiación y evaporación; Collier et al., 2006).

Las vacas lecheras en lactación se caracterizan por ser unas verdaderas máquinas para producir calor, por lo que, ellas necesitan liberar gran cantidad de calor metabólico de manera continua. Una de las formas para reducir los efectos del estrés calórico es utilizar sistemas de enfriamiento artificial. El principio de estos sistemas consiste en humedecer la piel del animal con aspersores de agua para refrescar a las vacas a través del aire emitido por los abanicos (Gebremedhin y Wu, 2001). Los sistemas de enfriamiento basados en aspersores y abanicos han demostrado tener un impacto positivo sobre la productividad de vacas Holstein en lactación en regiones áridas, ya que reducen la temperatura del cuerpo a través de la evaporación.

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de dos periodos cortos de enfriamiento usando un sistema de enfriamiento a base de aspersores y abanicos, sobre las respuestas fisiológicas y productivas de vacas Holstein en lactación bajo condiciones de calor severo.

4.4 Materiales y métodos

Considerando la producción de leche y los días en leche, 39 vacas Holstein multíparas (de 2 a 4 partos) fueron asignadas a uno de tres tratamientos: grupo testigo (T), 13 vacas con dos tiempos de enfriamiento de 30 min cada uno por día antes de la ordeña, a las 05.00 y 17.00 h (1 h de enfriamiento); grupo AM, 13 vacas enfriadas a las 10.00 h además de T (2 h de enfriamiento); grupo AM+PM, 13 vacas enfriadas a las 10.00, 15.00 y 22.00 h además de T (4 h de enfriamiento).

El sistema de enfriamiento fue colocado en la sala de baño y consistió en cuatro abanicos de 64 cm de diámetro cada uno, que a su vez contenían 4 válvulas de 25 mm de diámetro cada una, liberando 7 L de agua por hora, por lo tanto, cada abanico emitió 28 L de agua por hora. El motor de cada abanico fue de 1.1 HP que alcanzaba 1000 rpm; la velocidad del aire fue de 13.7 km/h a 6 m de distancia (el motor operó con 115/230 V y con corriente trifásica). El volumen del aire y la presión de agua fueron 13,592 m³/h y 17.58 cm³, respectivamente. Los abanicos fueron colocados en pares a una distancia de 6 m entre ellos.

Todas las vacas estuvieron bajo un sistema de confinamiento en corrales abiertos (60 x 60 m) y adyacentes, con una sombra en medio y comedero al frente de ambos corrales. Las sombras de los corrales tenían las siguientes

dimensiones: 9 m de ancho y 30 m de largo con una orientación de norte a sur. Las vacas caminaron entre 3 y 20 m a partir de la salida de cada corral y hasta la sala de baño. Después del enfriamiento otorgado las vacas, éstas regresaban a su respectivo corral.

Las vacas rotaron en todos los tratamientos en periodos de 28 d y las variables de respuesta fueron colectadas durante la última semana de cada periodo. Los periodos de estudio fueron 3: 1er. periodo del 20 de Junio al 18 de Julio; 2do. del 19 de Julio al 15 de Agosto; y 3er. periodo del 16 de Agosto al 12 de Septiembre. La alimentación de las vacas durante el período experimental consistió en una dieta formulada en base a los requerimientos que marca el NRC (2001; 958 g/kg de MS, 172 g/kg de PC, 40.8 g/kg de extracto etéreo y 41.7 g/kg de FDN), dicha dieta contenía alimento concentrado (600 g/kg de consumo), heno de alfalfa (300 g/kg de consumo) y zacate sudan (100 g/kg de consumo). La dieta se ofrecía diariamente las 06.00 y 18.00 h. El agua se ofreció a libre acceso.

Las variables de respuesta fueron colectadas en tres tiempos durante la última semana de cada periodo, en todas las vacas, e incluyeron la temperatura rectal (TR), tasa respiratoria (TRes), temperatura de la piel (TP), producción de leche, así como sus componentes (porcentaje de grasa y proteína). La TRes fue determinada a partir del número de respiraciones durante 30 seg y multiplicado por 2 para obtener las respiraciones por minuto (resp/min). Para obtener la TR, las vacas fueron llevadas al área de enfermería, en donde se usó un termómetro manual (Delta Trak[®], Pleasanton, CA, USA). La TP se registró con un termómetro en forma de pistola con un sistema infrarrojo para obtener las temperaturas (Raytec[®], Santa Cruz, CA, USA) en la región de la nalga, flanco derecho y ubre

dentro del corral, evitando así en gran medida el movimiento de los animales. Todas estas variables fisiológicas fueron colectadas dos veces al día dentro de los días de muestro, a las 09.30 y 14.30 h. La producción de leche fue registrada usando pesadores de leche Waikato (Inter Ag, Hamilton, New Zealand) y las muestras para el análisis de su composición fueron colectadas durante la primera ordeña de la mañana. El análisis de la grasa en leche se realizó mediante el método Gerber (International Dairy Federation, 1991) y el análisis de proteína en leche se realizó con el método Kjeldhal (Barbano et al., 1991). La energía en leche (EL) se calculó a partir de la producción de leche (Leche), grasa en leche (Grasa) y proteína en leche (Proteína), mediante la siguiente fórmula (Tyrrell y Reid, 1965):

$$EL \text{ (Mcal/d)} = \{[40.72 \times \text{Grasa}) + (22.65 \times \text{Proteína}) + 102.77\} / 1000 \times 2.204 \text{ leche}$$

La condición corporal (CC) fue evaluada por dos personas sobre una escala de cinco puntos, donde “1” correspondía a una vaca demasiado flaca y “5” a una demasiado obesa (Wildman et al., 1982). El resultado obtenido por ambas personas fue promediado dentro de las mismas vacas y el periodo. La información del estado meteorológico se obtuvo de la Estación Climatológica Experimental del ICA-UABC, localizada en el Valle de Mexicali a 20 km del lugar de experimentación. Las variables climáticas colectadas por hora fueron temperatura ambiental (TA, °C) y humedad relativa (HR, %), máximos y mínimos. Con estas variables se calculó el ITH usando la siguiente fórmula propuesta por Hahn (1999):

$$ITH = (0.81 \times TA) + HR (TA - 14.4) + 46.4$$

Los promedios semanales de las variables de respuesta (CC, TR, TRes, TP, producción de leche, grasa en leche, proteína en leche y energía en leche) fueron analizados por un Diseño Cuadro Latino usando un efecto aleatorio bajo el

procedimiento MIXED del SAS (SAS Institute Inc., 2004). La estructura de varianza-covarianza se seleccionó usando dos criterios: el criterio de información Akaike y el Bayesiano. La estructura de covarianza que estuvo más cercana al cero (componentes de varianza por la probabilidad de máxima verosimilitud) fue la que se seleccionó (Littell et al., 1996). El modelo lineal incluyó los efectos de bloque (clasificado en 9 categorías), tratamiento (3 categorías), periodo (3 categorías) y la interacción tratamiento con bloque. Las vacas dentro del bloque fueron designadas como el efecto aleatorio. Las comparaciones hechas por contrastes ortogonales fueron T contra AM+PM (vacas enfriadas 1 h contra 4 h) y AM contra AM+PM (vacas enfriadas 2 h contra 4 h). Los valores reportados son medias mínimo-cuadráticas y sus errores estándar, así como el nivel de significancia de $P < 0.05$; una tendencia fue considerada cuando existió $0.10 < P < 0.15$.

Este estudio se condujo en un rancho comercial dedicado a la producción de leche en el Valle de Mexicali (latitud 115.3° y longitud de 32.2°), ubicado al noroeste del Estado de Baja California, México. Las condiciones climáticas de esta región son como las del Desierto de Sonora, las cuales alcanzan temperaturas máximas de 50°C durante el verano y temperaturas mínimas de -5°C durante el invierno, con una precipitación media anual de 85 mm (García, 1985). Todos los procedimientos realizados en los animales se llevaron a cabo según las normas oficiales para el cuidado animal (NOM-051-ZOO-1995: Trato humanitario en la movilización de animales).

4.5 Resultados

La temperatura máxima y mínima registrada durante el periodo experimental fue de 48 y 30 °C, y la humedad relativa fue de 70 y 10 %, respectivamente (Figura 2).

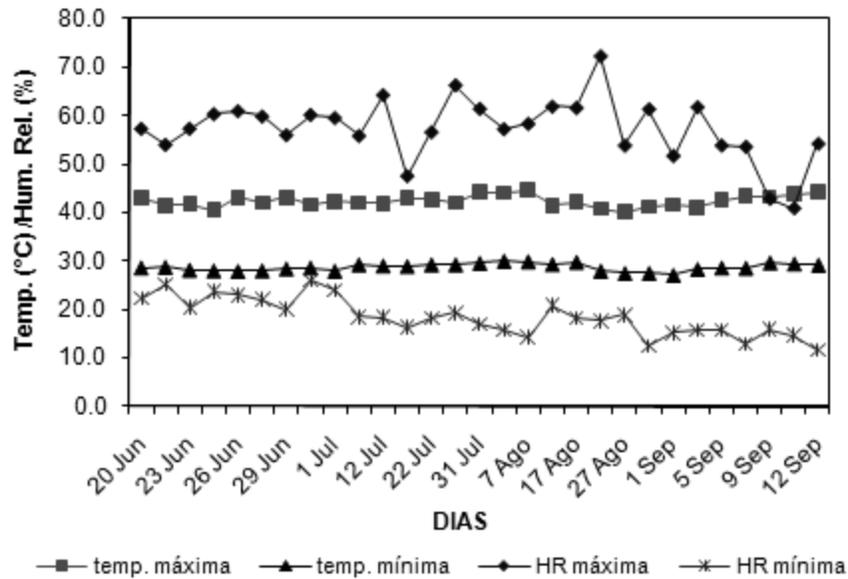


Figura 2. Temperatura ambiental y humedad relativa máximas y mínimas registradas durante el estudio.

El promedio máximo de los valores para ITH alcanzó las 90 unidades, mientras que el promedio mínimo de ITH fue consistentemente por encima de las 72 unidades durante el periodo experimental (Figura 3).

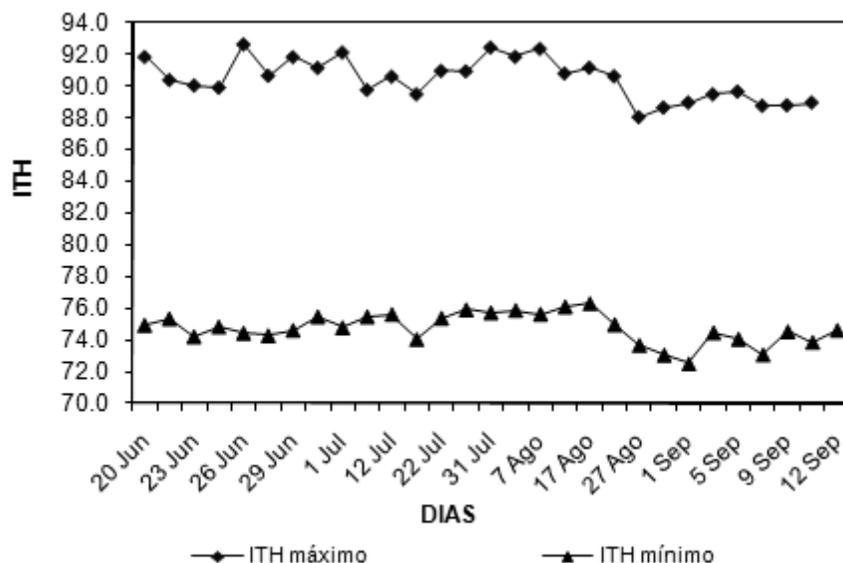


Figura 3. Índice de temperatura-humedad máximo y mínimo registrado durante el estudio.

El cuadro 4 incluye las variables fisiológicas para los tres grupos de tratamiento. La CC tendió ($P < 0.10$) a ser mayor en las vacas del grupo T (3.49 vs. 3.45 unidades) en comparación con el grupo AM+PM. La temperatura de la región de la nalga (33.53 vs. 33.91 y 34.24°C) y costado derecho (33.63 vs. 34.01 y 34.42°C) durante la mañana fueron menores ($P < 0.05$) en las vacas del grupo AM+PM en comparación con los grupos T y AM, sin embargo, la temperatura de la ubre fue similar ($P > 0.05$) entre los grupos T y AM+PM, siendo este último grupo diferente de AM ($P < 0.05$). Mientras tanto, durante las horas de la tarde, los grupos T y AM tuvieron temperaturas menores ($P < 0.05$) que el grupo AM+PM en la región de la nalga (34.57 y 35.74 vs. 36.33°C), costado derecho (34.48 y 35.73 vs. 36.38°C) y ubre (34.70 y 36.00 vs. 36.62°C). La TRes fue menor ($P < 0.05$) en el grupo AM+PM (86.53 resp/min) que los grupos T y AM (93.82 y 90.47 resp/min,

respectivamente) durante la mañana. También, durante la tarde las vacas del grupo AM+PM tuvieron menor ($P<0.05$) promedio de respiraciones por minuto que el grupo de vacas AM (96.92 vs. 100.28, respectivamente). Asimismo, cuando este grupo fue comparado con el grupo T (99.39 resp/min), tendió ($P<0.10$) a ser menor. La temperatura rectal fue similar ($P>0.05$) entre los tres grupos de tratamiento T, AM y AM+PM.

Cuadro 4. Promedio de las variables fisiológicas en vacas Holstein en lactación bajo tres estrategias de enfriamiento durante el estudio.

	Tratamientos				Contrastes	
	T	AM	AM+PM	EE	T vs. AM+PM	AM vs. AM+PM
Condición corporal	3.49	3.46	3.45	0.0412	0.0975	0.6056
Temperatura rectal, °C	38.89	39.00	39.06	0.0958	0.1498	0.4714
Temperatura de piel						
Nalga AM, °C	33.91	34.24	33.53	0.1449	0.0307	0.0002
Nalga PM, °C	34.57	35.74	36.33	0.1710	<0.0001	0.0137
Costado derecho AM, °C	34.01	34.42	33.63	0.1398	0.0440	0.0002
Costado derecho PM, °C	34.48	35.73	36.38	0.1554	<0.0001	0.0032
Ubre AM, °C	34.37	34.74	34.14	0.1696	0.2983	0.0082
Ubre PM, °C	34.79	36.00	36.62	0.1801	<0.0001	0.0149
Tasa respiratoria						
AM, respiraciones/min	93.82	90.47	86.53	1.2299	<0.0001	0.0087
PM, respiraciones/min	99.39	100.28	96.92	1.1286	0.0554	0.0127

Nota: T=testigo; AM=testigo + enfriamiento 1000 h; AM+PM =testigo + enfriamiento 1000, 1500 y 2200 h.

El cuadro 5 muestra que los niveles de glucosa, colesterol, triglicéridos y concentración de triiodotironina fueron similares ($P>0.05$) cuando se comparó AM+PM con los grupos T y AM, excepto colesterol que tendió ($P<0.10$) a incrementar los niveles del grupo AM+PM en relación al grupo AM. La

concentración de tiroxina en el grupo AM+PM (40.91 ng/ml) tendió a ser menor ($P<0.10$) cuando se comparó con los grupos T y AM (45.61 y 45.42 ng/ml).

Cuadro 5. Promedio de las variables metabólicas y hormonales de vacas Holstein en lactación bajo tres estrategias de enfriamiento durante el estudio.

	Tratamientos				Contrastes	
	T	AM	AM+PM	EE	T vs. AM+PM	AM vs. AM+PM
Glucosa, mg/dl	54.71	55.56	55.31	2.9399	0.8857	0.9522
Colesterol, mg/dl	169.93	161.06	170.92	8.5205	0.8561	0.0863
Triglicéridos, mg/dl	29.80	32.22	28.01	3.9940	0.7528	0.4633
Triiodotironina, ng/ml	1.55	1.49	1.43	0.1490	0.2424	0.5752
Tiroxina, ng/ml	45.61	45.42	40.91	3.0187	0.0642	0.0798

Nota: T=testigo; AM=testigo + enfriamiento 1000 h; AM+PM =testigo + enfriamiento 1000, 1500 y 2200 h.

Los promedios de producción de leche, porcentaje de proteína y grasa, así como de producción de energía en leche se presentan en el cuadro 6.

Cuadro 6. Promedio de las variables de producción en vacas Holstein en lactación bajo tres estrategias de enfriamiento durante el estudio.

	Tratamientos				Contrastes	
	T	AM	AM+PM	EE	T vs. AM+PM	AM vs. AM+PM
Leche, Kg	17.43	18.20	18.70	0.4526	0.0004	0.1379
Grasa, g/kg	35.3	33.2	34.7	0.1082	0.0601	0.0219
Proteína, g/kg	33.0	33.4	32.8	0.0606	0.5294	0.8398
Producción de energía en leche, MCal/d	13.18	13.15	13.75	0.3539	0.0958	0.0867

Nota: T=testigo; AM=testigo + enfriamiento 1000 h; AM+PM =testigo + enfriamiento 1000, 1500 y 2200 h.

La producción de leche fue mayor ($P<0.05$) en las vacas del grupo AM+PM (18.7 kg/d) que en las vacas del grupo T (17.4 kg/d). El grupo de vacas AM+PM también mostraron una tendencia ($P=0.0958$) a incrementar la producción de

energía en leche (13.8 MCal) cuando se compararon con el grupo T (13.2 MCal). Las variables relacionadas con la composición de la leche, tales como el porcentaje de grasa y proteína no fueron mejoradas ($P>0.05$) por el grupo AM+PM con respecto a los grupos T y AM.

4.6 Discusión

Las condiciones climáticas en el Valle de Mexicali son caracterizadas por ser extremas durante el verano (Avendaño et al. 2006). Durante el periodo de estudio se observó una temperatura ambiental y un ITH máximo por arriba de los 40 °C y 83 unidades, respectivamente, lo cual indica que las vacas experimentales estuvieron sometidas a un estrés calórico de moderado a severo (Fuquay, 1981). Un estudio previo demostró que cuando vacas Holstein en lactación se encuentran bajo los efectos del estrés calórico y son expuestas a 21 °C durante la noche por al menos 6 h, pueden perder suficiente calor corporal (Igono et al., 1992). En contraste, los resultados de este estudio (Figura 2) indican que el estrés calórico estuvo de manera continua las 24 h del día en todo el periodo experimental con un ITH mínimo de 80 unidades, muy por arriba del punto crítico de 72 unidades (Armstrong, 1994). Por esta razón las vacas no pudieron perder calor corporal en casi ningún momento del día. Esto sugiere que posiblemente el tiempo de enfriamiento con el sistema de aspersores y abanicos no fue suficiente para eliminar por completo los efectos del estrés calórico, por lo que la producción de leche fue afectada negativamente como ocurrió en otros estudios (Chaiyabutr et al. 2008; Hahn y Mader 1997). Sin embargo, cuando Avendaño et al. (2007) usaron un sistema de enfriamiento similar, indicaron que éste puede ser efectivo

para reducir los efectos del estrés calórico siempre que las condiciones de humedad relativa sean bajas, asimismo, se reportó un promedio de humedad relativa de 36%, mencionando que esto fue lo que favoreció para perder calor en el animal por medios evaporativos.

La condición corporal tendió a ser mejor en el grupo testigo con respecto al grupo de animales expuestos a mayor número de baños (Cuadro 4). Por otra parte, no se han reportado cambios sobre esta variable en vacas con o sin enfriamiento (Flamenbaum et al., 1995; Correa et al., 2002). Investigaciones recientes reportan el uso de termómetros en forma de pistola con infrarrojo, las cuales han logrado ser de gran utilidad para estimar la temperatura de la piel en los animales, además de tener un bajo costo (Collier et al. 2006). Las temperaturas más bajas de las diferentes partes de la piel como son: nalga, costado derecho y ubre observados en los animales de mayor tiempo de enfriamiento, con respecto al grupo testigo durante la mañana, pudieron estar influenciadas por un alivio al estrés calórico, el cual se obtuvo a partir del último baño de la noche anterior. Adicionalmente, un ITH bajo durante la mañana favoreció estos resultados. En contraste, al incrementar la radiación solar durante la tarde, aumentó la temperatura de las diferentes partes de la piel, especialmente en aquellas vacas de mayor tiempo de enfriamiento, debido a que producen más cantidad de leche y con ello producen también más calor metabólico. Un estudio de comportamiento animal demostró que las vacas altas productoras son más sensibles al estrés por calor que vacas bajas productoras debido a que tienen un periodo más corto de descanso durante las 24 h de día (Silanikove, 2000). Entonces, al tener las vacas mayor actividad locomotora dentro del corral,

aumenta su metabolismo y se incrementa el calor corporal (Tapki y Sahin, 2006). Una temperatura rectal por debajo de 38.5 °C se considera como normal en vacas lecheras (Igono et al., 1992). La temperatura rectal registrada en los tres grupos fue por arriba de los 38.5 °C durante el periodo de estudio. Un incremento en la tasa respiratoria de las vacas del grupo testigo es un mecanismo normal para que los animales puedan disipar el calor corporal hacia el exterior y de esta manera mantengan la termorregulación en condiciones de extremo calor (Yousef, 1985). Los datos correspondientes a temperatura rectal y tasa respiratoria mostraron claramente la importancia que tiene el uso de un sistema de enfriamiento para reducir los efectos del estrés calórico en el ganado lechero durante el verano.

La concentración de triiodotironina (T_3) y tiroxina (T_4) se mantuvieron bajos e iguales en todos los tratamientos. Diversos autores han reportado en vacas lecheras niveles bajos en T_3 y T_4 , afectando hasta en 25% su producción (Chaiyaburt et al., 2008) bajo temperaturas ambientales altas (Magdub et al. 1982; Beede y Collier, 1986). Además, se ha reportado que cambios a corto plazo de la temperatura ambiente no alteran la secreción de tirotrópica (HET). Así, los patrones de temperatura relacionados con la secreción de la tiroides, pueden ser regulados por otros factores, tales como la concentración de HET, la disminución en la tasa metabólica, consumo de alimento, crecimiento y producción de leche (Hurley et al., 1981; Silanikove, 2000). Los resultados del cuadro 5 demuestran que los niveles de T_4 en vacas con mayor tiempo de enfriamiento tendieron a ser menores que las vacas del grupo testigo. De tal forma que la concentración de T_4 se encuentra inversamente relacionada con una lactación intensa (Vanjonack y Johnson, 1975; Hart, et al., 1978). Niveles bajos en la concentración de T_4

demuestra una clara disminución en los requerimientos de energía de mantenimiento. Por lo tanto, es posible que la disminución en la secreción de T_4 en las vacas de este estudio y la necesidad por formar más hormonas tiroideas, se encuentre relacionado con la demanda de más energía para la formación de leche (Hersom, et al., 2004). Aunque no fue evaluado el consumo de alimento en este estudio, se ha demostrado que animales con estrés calórico consumen menor cantidad de fibra, la concentración de T_4 en plasma es baja y coincide con una alta concentración de T_4 en leche, a diferencia de animales con un alto consumo de fibra, en donde sucede lo contrario (Magdub, et al., 1982). Diversas investigaciones muestran que el consumo de glucosa en la glándula mamaria depende de un incremento en la concentración de glucosa dentro de la arteria plasmática (Fullerton et al., 1989; Sandles et al., 1988), mientras que otros autores no han reportado cambios (McDowell et al., 1987; Mepham, 1993). Los resultados del presente estudio coinciden con este último planteamiento porque no existió diferencia entre las vacas con el mayor tiempo de enfriamiento en relación con el grupo testigo. Esto indica que el consumo de glucosa dentro de la glándula mamaria es afectado por el estado de la lactación y la disminución de la actividad de las células epiteliales en la glándula (Chaiyabutr et al. 2008). Regularmente, la glucosa que se utiliza dentro de la glándula mamaria para la formación de lactosa requiere ser transportada por un transportador de glucosa específico que se ubica en las membranas celulares de la glándula (Madon et al., 1990; Prosser, 1988), lo cual si existen niveles bajos de glucosa dentro de la célula, la tasa de transporte de la glucosa puede verse afectada (Chaiyabutr et al., 2007).

El cuadro 6 muestra una diferencia en la producción de leche de 1.3 kg de leche al día entre vacas T y AM+PM. Si esta diferencia en producción de leche se proyectara en el tiempo que duró el estudio (84 d), ésta podría alcanzar hasta 109 kg de leche/vaca. Esta diferencia, puede ser mayor si se proporciona enfriamiento durante la etapa inicial de la lactancia, cuando el pico de la producción de leche está en su máximo nivel (Avendaño et al., 2007, Igono et al., 1987). Un mayor consumo de materia seca de los animales, aunado a mejores condiciones ambientales fue la combinación que produjo estos resultados, ya que se observó que diariamente, los animales con mayor número de baños al salir de la sala de ordeña se dirigían directamente al comedero, a diferencia de las vacas del grupo testigo, que se dirigían a echarse bajo la sombra. Asimismo, los animales estresados consumen menos y tienen una baja producción de leche. Por otra parte, es posible que los animales con mayor tiempo de enfriamiento hayan destinado sus reservas de energía hacia la producción de leche, mientras que los animales del grupo testigo pasaron más tiempo tratando de disipar la carga de calor que el ambiente ejercía en sus cuerpos. Con respecto a esto, algunos autores mencionan que el gasto de energía en vacas lecheras bajo condiciones de estrés calórico es usado para disipar el calor corporal y mantenerse frescos; este desvío de energía causa que el rendimiento sea menor y termine por afectar la producción de leche negativamente (Chaiyabutr et al., 2008.). El sistema de enfriamiento no mostró ningún efecto en los porcentajes de grasa y proteína. La literatura no muestra una tendencia definida a aumentar los componentes de la leche por efecto de un sistema de enfriamiento durante el verano ya que los resultados han sido inconsistentes (West et al., 2003).

4.7 Conclusión

En conclusión, el presente estudio demostró que en un ambiente fresco derivado del tratamiento con el mayor tiempo de enfriamiento (AM+PM) logró disminuir los efectos del estrés calórico. No obstante, se considera que el tiempo máximo de enfriamiento (4 h) utilizado es aún insuficiente para lograr una respuesta adecuada en vacas estresadas por el calor, por lo que se sugiere aumentar el periodo de enfriamiento para obtener una mayor respuesta productiva.

2.1 Estrés calórico en ganado lechero

¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.

Las respuestas fisiológicas son todas aquellas variables que ayudan a determinar, mediante la cuantificación de las mismas, los efectos negativos del estrés calórico en el animal. Estas variables incluyen condición corporal, tasa respiratoria, temperatura rectal y temperatura de la piel, entre otras. Por lo tanto, a continuación se describirán las variables más usadas en investigación.

2.1.1.1 Condición corporal La condición corporal en vacas lecheras es una evaluación de la proporción de grasa corporal que poseen. Dicha evaluación es reconocida por la toda la comunidad científica, así como por los productores de leche, considerándose como un factor de suma importancia para el manejo cotidiano del ganado lechero. La escala usada para evaluar la condición corporal puede variar entre países, pero la calificación más baja siempre refleja emaciación y la calificación más alta indica necesariamente obesidad. En acuerdo, Wildman et al. (1982) proponen una escala de calificación del 1 al 5 donde cada punto indica lo siguiente: 1, emaciada; 2, flaca; 3, regular; 4, gorda y 5, obesa. Es sabido que vacas con condición corporal muy baja o muy alta en el parto producen menos leche, afecta la reproducción y reduce la función inmunológica. Asimismo, vacas demasiado delgadas, aparte de no producir leche, suelen ser mayormente afectadas por climas demasiado fríos, mientras que vacas demasiado obesas pueden incrementar el riesgo de presentar desórdenes metabólicos. Butler y Smith

(1989) reportaron una tasa de concepción de hasta 17% más baja en el primer servicio en vacas que perdieron más de una unidad de condición corporal durante el parto, comparadas con vacas que perdieron menos de 0.5 unidades de condición corporal (65%).

En otro orden, la condición corporal puede verse afectada durante una lactación temprana y/o durante condiciones de estrés calórico debido a un incremento de la movilización de las reservas de grasa en el cuerpo por medio de la lipólisis, proceso por el cual los lípidos del organismo son transformados en ácidos grasos para cubrir en cierta parte las necesidades energéticas de la glándula mamaria para la producción de leche y grasa. Entonces la glucosa producida a partir de la lipólisis es utilizada para la síntesis del componente más importante de la leche, la lactosa (Bauman y Currie, 1980). Sin embargo, bajo estas condiciones, las vacas sufren un desabasto de energía que limita la disponibilidad de glucosa en la glándula por la falta de apetito (Berman y Meltzer, 1973).

Estudios realizados bajo condiciones de estrés calórico no han reportado cambios en la condición corporal de vacas con o sin enfriamiento (Avendaño-Reyes et al., 2010; Correa et al., 2002). Tampoco Flamenbaum et al. (1995) reportaron cambios en la condición corporal de vacas con respecto al nivel de producción de leche durante el verano. Sin embargo, se detectó una triple interacción entre el grado de estrés calórico, condición corporal y semanas en lactación, misma que coincidió con el pico de producción de leche tanto para animales enfriados y no enfriados a partir de la cuarta y hasta la octava semana. Existe una asociación entre una condición corporal baja y la producción de leche.

Esta asociación es consistente con los resultados reportados por Roche et al. (2006 y 2007). Garnsworthy y Topps (1982) reportaron un efecto negativo en la condición corporal al parto sobre la producción de leche, ya que vacas delgadas (2.7 unidades) produjeron mayor cantidad de leche que vacas gordas (3.7 unidades), debido que las primeras consumieron mayor cantidad de materia seca. Esto coincide con lo reportado por Treacher et al. (1986), quienes encontraron que vacas de condición corporal moderada (2.8 unidades) produjeron mayor cantidad de leche que vacas más gordas (3.9 unidades). La condición corporal óptima en la producción de leche para vacas lecheras de la raza Holstein es de entre 3.0 y 3.5, si sobre pasa éste último puede resultar en la reducción en la producción de leche, así como también en el porcentaje de proteína, aunque la asociación con el porcentaje de grasa en leche suele ser positiva (Roche et al., 2009).

2.1.1.2 Tasa respiratoria Un problema grave en la producción animal bajo climas cálidos es el intercambio de calor entre el cuerpo del animal y el medio ambiente. El jadeo y el sudor son dos mecanismos de evaporación para eliminar calor. En bovinos la respiración solo es responsable del 15% de las pérdidas totales de calor (Finch, 1986), el resto corresponden a otros mecanismos tales como conducción, convección y radiación (Berman et al., 1985). Bajo estrés calórico severo se incrementa el jadeo, también se incrementa el número de respiraciones por minuto (resp/min) y se observan respiraciones rápidas, cortas y poco profundas. La tasa respiratoria en vacas lecheras estresadas por calor puede incrementarse hasta un 75% más de lo normal (20 resp/min) (Mount, 1979).

Algunos autores han indicado que un incremento de la frecuencia respiratoria (50-60 resp/min) puede iniciar a partir de una temperatura de 25 °C (Berman et al., 1985). Una vaca con 80 resp/min se puede considerar como un animal estresado por el calor (Potterfield, 1996). El ganado bovino a temperatura ambiente de 41.1°C y humedad relativa de 78% mostró una tasa respiratoria de 102 resp/min (Gwazdauskas, 1985). Wise et al. (1988) han reportado en vacas Holstein 126.4 resp/min con un ITH de 86.2 unidades. Otro estudio demostró la disminución en la producción de leche por efecto del estrés calórico en dos distintos ambientes, uno con 32°C y 20% humedad relativa (HR) y el otro con 32°C y 45% de HR (Johnson y Vanjonack, 1976). Esta diferencia disminuyó la tasa respiratoria y la tasa de sudoración, lo que resultó en un incremento de la temperatura rectal, así como en la reducción del consumo de alimento y consecuentemente en la disminución de la producción de leche.

Como consecuencia de la reducción en la producción de leche por efecto de las altas temperaturas, algunos investigadores han decidido experimentar con estrategias de enfriamiento artificial para vacas lecheras en lactación, logrando así reducir significativamente la tasa respiratoria. En el Valle de Mexicali, B.C., Avendaño-Reyes et al. (2010) usaron un sistema de enfriamiento a base de aspersores y abanicos, logrando reducir durante las horas más intensas de calor la tasa respiratoria de 112 a 107 resp/min, aplicando una y tres horas de enfriamiento respectivamente. Correa et al. (2002) reportaron 22% menos respiraciones en vacas enfriadas por 8 h con respecto a vacas testigo bajo la sombra y bajo un sistema de enfriamiento ambiental similar al estudio anterior. Otros autores han reportado similares respuestas, ya que al comparar animales

enfriados bajo un sistema de enfriamiento con animales testigo que solo gozaron de sombras lograron reducir la tasa respiratoria en 16 resp/min (Turner et al., 1992). Por otro lado, Armstrong (1999) logró observar diferencias más altas (de hasta 26 resp/min menos) en vacas Holstein enfriadas bajo un sistema de enfriamiento artificial basado en aspersores y abanicos, y mediante tres diferentes flujos de agua de acuerdo a la temperatura ambiental, comparado con vacas que solo contaban con sombras.

Aunque no existe una diferencia clara en el número de respiraciones entre distintas razas de vacas lecheras bajo condiciones termoneutrales, se ha reportado que vacas Jersey tienen tasas de respiración más alta que vacas Holstein, debido a que las Jersey tienen una mejor habilidad para disipar calor corporal comparadas con las Holstein (Kibler y Brody, 1952).

2.1.1.3 Temperatura rectal La temperatura rectal es la variable más usada para evaluar el índice de adaptación fisiológico en ambientes calurosos, ya que es un excelente indicador para predecir la presencia de estrés calórico en ganado lechero. Un incremento o una disminución de 1°C es suficiente para afectar el funcionamiento del ganado (McDowell et al., 1976). El incremento de la temperatura rectal durante estrés calórico severo puede ser de hasta 0.7% más con respecto a la temperatura normal (38.5°C) (Igono et al., 1992). Diversos estudios coinciden en mencionar que el incremento de la temperatura rectal en el ganado lechero bajo condiciones de estrés calórico severo sobre pasa en mucho la temperatura rectal normal (Avendaño-Reyes et al., 2006, 2010; Khongdee et al., 2010; Correa et al., 2004; Igono et al., 1987). West et al. (1999) reportaron una

correlación positiva ($r=0.78$) entre la temperatura de la leche y la temperatura rectal, siendo la temperatura de la leche 0.15°C mayor que la rectal. Durante el equilibrio térmico, la temperatura rectal de vacas lecheras altas productoras resulta ser independiente de la temperatura ambiente, pero está relacionada con el metabolismo de energía o calor metabólico (Berman et al., 1985).

En toros expuestos a 40°C en una cámara ambiental, Bianca (1964) indicó que al proporcionar agua fría a una temperatura de $1-14^{\circ}\text{C}$ se reduce en 1.7°C la temperatura rectal y la de la piel. Martello et al. (2009) reportaron una diferencia de 0.8°C en vacas Holstein entre el invierno y el verano en Brasil. Asimismo, Adin et al. (2009) realizaron dos experimentos con los mismos grupos de tratamientos que fueron vacas lecheras en lactación enfriadas bajo un sistema de enfriamiento evaporativo y el otro sin la presencia de éste. El primer experimento se realizó dentro de una cámara ambiental con un ITH de 78, mientras que el segundo experimento se realizó dentro de un corral con sombra bajo un ITH de 80. En el primer experimento observaron una reducción de 0.2°C en los animales enfriados con respecto al grupo testigo. En el segundo experimento la diferencia fue de 0.3°C entre enfriadas y testigo (38.5 vs 38.8°C). En otro experimento realizado por Flamenbaum et al. (1986), observaron el efecto de proporcionar periodos cortos de enfriamiento con aspersores y abanicos de 15, 30 y 45 min durante 3 días en vacas lecheras sobre la respuesta en temperatura rectal. La disminución máxima de temperatura rectal se logró a partir de los 30 min después de proporcionar cada uno de los tratamientos. Los animales enfriados por 15, 30 y 45 min produjeron una disminución de 0.6, 0.7 y 1.0°C respectivamente. Avendaño-Reyes et al. (2010) probaron tiempos cortos de enfriamiento en vacas lecheras en lactación,

encontrando que vacas enfriadas por 3 h obtuvieron 0.4°C menos de temperatura rectal que vacas enfriadas solo por 1 h. Correa et al. (2004) probaron dos distintos sistemas de enfriamiento más un grupo testigo (sin enfriamiento) sobre la temperatura rectal de vacas Holstein y Pardo Suizo. Un sistema de enfriamiento fue a base de aspersores y abanicos y el otro a base de campanas evaporativas. Las diferencias fueron notablemente distintas al comparar al grupo testigo con los correspondientes sistemas de enfriamiento, siendo las vacas Pardo Suizo las que obtuvieron mejores respuestas en el grupo testigo, aspersores y abanicos, y campanas evaporativas, con temperaturas rectales de 39.2, 38.9 y 38.8°C respectivamente; mientras que para vacas Holstein fueron de 39.7, 39.0 y 38.8°C respectivamente. En otro estudio donde se probó un sistema de enfriamiento evaporativo con vacas cruzadas (Holstein 87.5% con Bos indicus 12.5%), se observaron poco más de 2°C menos de temperatura rectal respecto al grupo testigo (sin enfriamiento) (Khongdee et al., 2006). Existen diferencias notables en temperatura rectal entre razas de vacas lecheras y su habilidad por regular la temperatura rectal, ya que el promedio de temperatura rectal en las razas de vacas Bos taurus es mayor que las razas Bos indicus (Finch, 1986), debido a que las razas Bos taurus son más sensibles al estrés calórico.

¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.

Los mecanismos de pérdida de calor en el animal son insuficientes para mantener el equilibrio térmico en el organismo cuando se incrementa la temperatura ambiental. Otras formas utilizadas para evaluar el nivel de estrés calórico en el ganado es a través de la temperatura de la leche (Igono et al.,

1985), la temperatura de la piel en el área de la ubre (Bitman et al., 1984) y en el tímpano (Davis et al., 2003).

En condiciones de temperatura ambiental moderada, el ganado puede disipar calor hacia el medio ambiente a través de la piel por mecanismos de evaporación, radiación, conducción y convección (Baccari, 2001). Bajo estos términos, existen diversas investigaciones donde confirman que la capa de piel tiene una gran influencia sobre el intercambio térmico entre el individuo y el medio ambiente (Cappa et al. 1989; Aguiar and Targa 2001; Collier et al. 2006). Aunque dichos estudios se realizaron en cámaras ambientales, han proporcionado información precisa acerca de esas respuestas en el animal. El principal mecanismo fisiológico para controlar la pérdida de calor corporal es la modificación del flujo de sangre que llega a la superficie corporal y la redistribución del mismo. La vasodilatación periférica facilita la pérdida de calor porque reduce el efecto del aislamiento tisular y favorece la eliminación de calor por evaporación al facilitar la difusión de agua desde la piel. Por el contrario, cuando la vasoconstricción periférica alcanza su máximo nivel, las pérdidas evaporativas son mínimas y el efecto aislante de los tejidos se maximiza (Perera et al., 1986). Blazquez et al. (1994) reportaron un incremento en el flujo de la sangre en la piel de toros, el cual fue positivamente correlacionada con la tasa de sudoración.

Entre principios de los años 50's y los años 60's descubrieron que el número de glándulas sudoríparas en las razas cebuinas eran mayores que en las razas europeas (Ferguson and Dowling, 1955; Allen et al., 1962). Las razas *Bos indicus* tienen una mayor densidad de folículos pilosos ($1698/\text{cm}^2$) que las razas *Bos taurus* ($1064/\text{cm}^2$) (Dowling, 1955). La tasa de sudoración en vaquillas cebú

se incrementó cuando alcanzó una temperatura de 35°C en la temperatura de la piel y 30°C en la temperatura del aire (Allen, 1962). Comúnmente, si la temperatura de la superficie de la piel está por encima de 35°C en el ganado, el animal se considera que está bajo los efectos del estrés por calor (Collier et al., 2006).

Investigaciones recientes reportan el registro de la temperatura corporal con termómetros en forma de pistola y/o cámaras termales que detectan la temperatura corporal mediante un sistema infrarrojo, por lo que representan una herramienta para estimar la temperatura de la piel en los animales. De esta manera, la lectura de la temperatura se puede hacer a distancia, sin que se requiera el movimiento de los animales. Martello et al. (2009) reportaron durante los meses de verano e invierno diferencias importantes en las temperaturas de la base de la cola, región del pabellón auricular y la superficie corporal de vacas Holstein. Durante los meses de invierno dichas temperaturas fueron de 33.7, 32.5 y 33.7°C respectivamente, mientras que las temperaturas durante el invierno fueron de 26.5, 25.9 y 30.9°C respectivamente. Un dato interesante es que estos autores encontraron una correlación positiva entre las temperaturas antes mencionadas y la tasa respiratoria ($r = 0.63$, 0.63 y 0.54 respectivamente), indicando que el incremento de estas temperaturas fueron principalmente por el incremento de la frecuencia respiratoria. De acuerdo a lo anterior, Collier et al. (2006) reportaron una correlación positiva y alta entre la tasa respiratoria y la superficie corporal ($r = 0.73$). Ambos autores concluyen que las temperaturas de las diferentes partes de la piel pueden ser una excelente herramienta para describir el ambiente caluroso que les rodea a estos animales, también pueden ser

usadas como estimadores para indicar el nivel de estrés calórico de vacas lecheras en lactación.

2.1.2 Respuestas metabólicas y hormonales

2.1.2.1 Glucosa

Las vacas lecheras en producción requieren grandes cantidades de glucosa para mantener la lactancia. En rumiantes, la disponibilidad neta de glucosa depende principalmente de la gluconeogénesis y los principales nutrientes glucogénicos son el ácido propiónico y el lactato (Danfaer, 1994). Sin embargo, durante periodos largos e intensos de estrés calórico las vacas pueden reducir el consumo de alimento hasta en un 30%, lo cual provoca que la disponibilidad de energía disminuya (Collier et al., 2008). Una disponibilidad limitada de nutrientes, tales como la glucosa y/o aminoácidos, pueden limitar la síntesis de la leche y sus componentes (Clark et al., 1977) debido a que la glucosa es el principal precursor para la síntesis de la lactosa. La síntesis de lactosa consume hasta 70% de toda la glucosa circulante en la vaca lechera, lo que representa una considerable carga metabólica para los rumiantes (Ponce y Bell, 1984). La lactosa representa alrededor de 5% de la composición total de la leche en vacas Holstein (Tsenkova et al., 2000). Es un azúcar estrictamente específico de la leche, cuya síntesis y secreción está íntimamente relacionada con el volumen total de la leche que producen las vacas. La glándula mamaria retiene 900 ml de agua por cada 50 g de lactosa sintetizada (Forsyth, 1989). La lactosa actúa como un osmo-regulador para la absorción de agua en la glándula mamaria, esto la hace el principal componente osmótico para el proceso activo de extracción de agua hacia las vesículas de

Golgi. Entonces, cuando la síntesis de lactosa se incrementa, junto con el agua salen del aparato de Golgi y ambos compuestos se transportan vía lumen alveolar en forma de leche.

La síntesis de lactosa se lleva a cabo en el aparato de Golgi y se requieren de 5 pasos para su síntesis a partir de una molécula de glucosa:

6. Fosforilación de la glucosa. Esta transforma a la glucosa en glucosa 6-fosfato mediante una reacción con hexokinasa.
7. Isomeración de la glucosa 6-fosfato. Aquí transforma a la glucosa 6-fosfato en glucosa 1-fosfato mediante una reacción con fosfoglucomutasa.
8. Formación de uridindifosfato (UDP)-glucosa. Es el proceso donde la glucosa 1-fosfato se transforma en UDP-glucosa mediante la reacción con UDP-glucosa fosforilasa.
9. Isomeración de UDP-glucosa. Es el proceso donde la UDP-glucosa se transforma en UDP-galactosa mediante la reacción con UDP-glucosa epimerasa.
10. Síntesis de lactosa. En este proceso la UDP-galactosa se une a una molécula libre de glucosa, donde libera el compuesto uridindifosfato para formar lactosa o galactosa β 1,6 glucosa.

El proceso de la síntesis de lactosa está regulado por un complejo enzimático conocido como lactosa-sintasa, compuesto por dos proteínas: 1) la proteína A, o β 1,4 galactosiltransferasa que se encuentra en diversos tejidos y 2) la proteína B o α -lactoalbúmina que es una proteína sintetizada por las propias

células epiteliales del tejido mamario (Kennelly, 1999), razón por lo que la síntesis de lactosa ocurre solamente en la glándula mamaria. Además, la expresión del gen de la α -lactoalbúmina es regulada de cerca por algunas hormonas, tales como la progesterona por efecto de una retroalimentación negativa, así como una retroalimentación positiva de la prolactina y glucocorticoides, de tal modo que la síntesis de la lactosa ocurra solamente durante la lactancia.

Se ha demostrado que la administración de glucosa puede incrementar la producción de ácido propiónico, principal precursor de la gluconeogénesis (Danfaer et al., 1995). También puede incrementar la disposición de glucosa en el duodeno (Knowlton et al., 1998). En dos estudios se probaron los efectos de proporcionar diferentes cantidades de glucosa en duodeno sobre la producción de leche y sus componentes, usando dietas basadas en silo de forraje (Hurtaud et al., 2000). En el primer experimento se proporcionaron 0, 750, 1500 y 2250 g de glucosa/d; en el segundo 0, 250, 500, 1000 y 2000 g de glucosa/d. El incremento en las cantidades de glucosa en cada experimento incrementó la producción de leche en 2.4 y 1.6 kg/d respectivamente. La lactosa no fue afectada, mientras que la producción de grasa disminuyó linealmente. Los tratamientos de glucosa afectaron significativamente los perfiles de los ácidos grasos de cadena mediana y larga. Por otra parte, se observó un incremento lineal en la proteína a partir de los 1000 g de glucosa. En un estudio similar, Rigout et al. (2002) probaron 4 niveles de glucosa (T1 = 0, T2 = 443, T3 = 963 and T4 = 2398 g/d) en el duodeno de vacas lecheras sobre la producción de leche y lactosa. La concentración de glucosa en sangre tuvo un efecto lineal positivo, mientras que la producción de leche y lactosa tuvieron un efecto cuadrático. Los autores indican que disminución

de la leche en el T4 fue debido a un desbalance en la concentración de glucosa a nivel intracelular.

A este respecto, un análisis de lactosa en la leche puede reflejar los niveles de concentración de este compuesto en el aparato de Golgi o en el citosol (Faulkner, 1980). Cuando los niveles de glucosa alcanzaron niveles constantes, las concentraciones de glucosa-6-fosfato tendieron a incrementar linealmente, mientras que las concentraciones de glucosa-1-fosfato disminuyeron en T4. Estos resultados sugieren la posibilidad de que exista un bloqueo en la transformación de glucosa-6-fosfato a glucosa-1-fosfato, el cual consecuentemente podría afectar la producción de lactosa, así como la producción de leche. Este bloqueo pudiera deberse a la disminución de la actividad de la fosfoglucomutasa (Opstvedt et al., 1967).

2.1.2.2 Triglicéridos

Los periodos de intenso calor durante los meses de invierno pueden dar origen, como ya se ha mencionando, a una disminución en el consumo de alimento en las vacas lecheras debido a la falta de apetito. Esto provoca un estado de balance de energía negativo, similar al de las vacas lecheras al inicio de la lactancia. Dadas las circunstancias, los animales intentan compensar esta situación movilizand o grasa de los tejidos, obteniendo así la energía que se requiere para la producción de leche. Entonces, cuando el déficit de energía es mayor, la movilización de grasa excede la capacidad que el hígado tiene para metabolizarla y se produce el Síndrome de Movilización de Grasa. La movilización excesiva produce alternadamente infiltración de grasa en diferentes órganos y

tejidos, alterando su función (Contreras, 1990). Algunos estudios han mostrado una infiltración de grasa en el hígado de aproximadamente 20% o más durante la segunda semana del parto (Skaar et al., 1989; Gruffat et al., 1997), siendo que el porcentaje de infiltración de grasa en el hígado bajo condiciones normales es máximo de 13% (Gerloff, 1986; Herdt, 1988). Durante un estado de balance energético negativo por un estrés calórico severo, el nutriente más limitante es la glucosa (Itoh et al., 1998), que en los rumiantes debe ser sintetizada por gluconeogénesis hepática a partir de algunos precursores, cuyo aporte de energía es variable de acuerdo a los requerimientos. Estos precursores son: 1) el propionato, que puede contribuir en la formación de glucosa en 30-50% (Armentano y Young, 1983; Lomax y Baird, 1983); 2) el lactato, en aproximadamente un 10% (Huntington y Prior, 1983); 3) aminoácidos en 9% (Lomax et al., 1979) y 4) el glicerol en 5% (Bergman et al., 1966).

La formación de AMPc en el tejido adiposo y muscular puede ser estimulada por la adrenalina y la noradrenalina, por ello en el estrés se produce pérdida de peso y un aumento en la concentración de los ácidos grasos en sangre (McGilvery, 1979).

La degradación de los ácidos grasos producidos por β -oxidación da origen a moléculas de acetil-CoA, mismas que son incorporadas al ciclo de Krebs para producir energía en forma de ATP. Esto ocurre principalmente en el hígado, pero también en riñones y músculos. El glicerol dará origen a la glucosa, particularmente, en el hígado. Cuando la cantidad de grasa movilizada excede la capacidad de oxidación en el hígado, las moléculas de aceti-CoA no ingresan al ciclo de Krebs por insuficiencia de oxalacetato, así, el exceso de acetil-CoA da

origen a cuerpos cetónicos. En estas circunstancias, el exceso de ácidos grasos y de glicerol que ingresa al hepatocito no se oxida, se re-esterifica, dando origen a triglicéridos, ahora, dentro de la célula hepática (Grummer, 1993). Bajo condiciones normales, este proceso de re-esterificación ocurre en el hepatocito, pero en cantidad moderada, lo que se considera como reserva para ser usada como fuente de energía. La gran mayoría de estos triglicéridos debe salir del hepatocito para ser utilizada como fuente de energía en otros tejidos y/o para la síntesis de grasa en la leche (Herdt, 1988). Para que esto ocurra, el hígado debe ser capaz de sintetizar una apolipoproteína B (apo B), derivada de una lipoproteína de muy baja densidad (VLDL). Esta lipoproteína es la que en conjunto con los triglicéridos permite el transporte desde el hepatocito hacia otros tejidos. Si la cantidad de triglicéridos que se está re-esterificando en el hígado, excede la capacidad de éste para sintetizar los componentes de la lipoproteína, los triglicéridos se depositan en el adipocito en forma de gotas de grasa (Herdt, 1988; Rayssiguier et al., 1988). Algunos autores han comprobado que al inicio de la lactancia, el hígado disminuye su capacidad de sintetizar esta apolipoproteína B (Bauchart, 1993; Bauchart et al., 1996).

La síntesis y secreción hepática de lipoproteínas son probablemente reguladas por factores nutricionales y hormonales, sin embargo, la mayoría de los mecanismos específicos involucrados aún permanecen desconocidos. En el periodo alrededor del parto hay algunas evidencias que permiten señalar que la capacidad hepática para sintetizar fosfolípidos determina la capacidad de síntesis de lipoproteínas de muy baja densidad en los rumiantes en el período alrededor del parto (Fronk et al., 1980; Herdt et al., 1983). Así vacas lecheras, una

deficiencia funcional de síntesis de fosfolípidos puede contribuir al engrasamiento del hígado o al síndrome del hígado graso.

2.1.2.3 Colesterol

El colesterol se forma a partir de acetil-CoA mediante una compleja serie de reacciones que involucran diversos intermediarios, como β -hidroxi- β -metilglutaril-CoA (HMG-CoA), mevalonato y dos isoprenos activados (pirofosfato de dimetilalilo y pirofosfato de isopentenilo). Entre esta serie de reacciones se encuentra la condensación de unidades de isopreno para producir escualeno no cíclico, el cual se cicla para formar un anillo esteroide y su cadena lateral, que después de varias reacciones, se convertirá en colesterol. La síntesis de colesterol es inhibida por concentraciones intracelulares elevadas de la misma molécula. El colesterol y sus ésteres se transportan en la sangre como lipoproteínas plasmáticas. Las lipoproteínas de alta densidad (HDL) sirven para remover el colesterol de la sangre, el cual es transportado hacia el hígado. Las lipoproteínas de muy baja densidad (VLDL) acarrean colesterol y sus ésteres, y triacilgliceroles desde el hígado a otros tejidos, donde los triacilgliceroles son degradados por la lipoproteinlipasa; ésta convierte a las VLDL en lipoproteína de baja densidad (LDL). Las LDL, que son abundantes en colesterol y sus ésteres, son capturadas por la endocitosis mediada por un receptor, en la que la apoproteína B-100 de la LDL es reconocida por receptores específicos, ubicados en la membrana plasmática.

Entonces, si bien el colesterol es requerido por órganos tales como glándulas suprarrenales, gónadas e hígado, como precursor de hormonas

esteroides (glucocorticoides, mineralocorticoides y hormonas sexuales), ácidos biliares (glucocólico y taurocólico) y vitamina D, también es requerido por los tejidos de tipo conectivo, muscular, nervioso y epitelial para la formación de membranas celulares.

La membrana plasmática está formada por lípidos y posee una propiedad en la que solamente permite la entrada a ciertas partículas en el interior de la célula, de la misma forma puede eliminar sus productos de desecho. Entonces es a través de la membrana en la que se regula la entrada y la salida de sustancias que logran el funcionamiento perfecto de la célula. Por ejemplo, bajo condiciones termoneutrales la glucosa pasa constantemente a través de la membrana del aparato Golgi hacia su lumen para la formación de lactosa, a través de un transportador de la glucosa (GLUT 1). La presencia del GLUT 1 en la membrana del aparato de Golgi es específica para las células del tejido epitelial mamario, debido a que el resto de las células no tienen este transportador de la glucosa (Zhao et al., 1996). El transporte de la glucosa es pasivo (no requiere ATP), por lo que no limita la tasa de transporte. Sin embargo, si es afectado por los niveles bajos de glucosa en el citoplasma, derivado de una disminución en el consumo de alimento por un estrés calórico severo.

Por otra parte, se ha demostrado que el estrés calórico tiene un efecto directo sobre el epitelio en la glándula mamaria, porque daña la constitución de las membranas celulares (Bowler et al., 1973; Hahn, 1982). Esto explicaría la baja producción de leche de vacas expuestas a un calor intenso. Al provocar una alteración en la composición de los lípidos de la membrana (Anderson y Parker, 1982), así como un aumento en la permeabilidad se incrementa la actividad de la

fosfolipasa y la fosfoinositidina, ambas actúan rompiendo los enlaces diester fosfóricos de la membrana (Calderwood et al., 1987).

El estrés calórico tiene la facultad de liberar gran cantidad de radicales libres (-OH) que destruyen a las membranas celulares, lo cual cuando es mayor que los mecanismos antioxidantes, el animal se encuentra en estrés oxidativo. Por lo tanto, el estrés calórico afecta los mecanismos antioxidantes. Diversos estudios han analizado el efecto del estrés calórico sobre el estatus oxidativo de vacas lecheras en lactación. Harmon et al. (1997) lograron comprobar que el estrés calórico disminuye la actividad antioxidante del plasma de las vacas lecheras. Por otro lado, Calamari et al. (1999) observaron en vacas sujetas a estrés por calor una reducción en la concentración total de caroteno y vitamina E en el plasma. En contraste, Trout et al. (1998) mencionaron que el estrés calórico no afectó las concentraciones de α -tocoferol y β -caroteno en vacas lecheras, debido a que el estrés calórico no afecta las concentraciones de los agentes antioxidantes en sangre, los cuales contra-restan la cantidad de radicales libres producidos durante un proceso de estrés oxidativo.

2.1.2.4 Tiroxina y Triiodotironina

La disminución en el consumo de alimento producida por el estrés calórico produce alteraciones en el funcionamiento de la glándula tiroides. La aparición del estado hipotiroideo trae como consecuencia bajas producciones de leche (Thriftt al., 1999), debido a que la disminución de la actividad tiroidea afecta el número de movimientos ruminales y la tasa de pasaje, alterando la digestibilidad de la materia seca (Miller et al., 1974).

Las hormonas tiroideas (HT) tiroxina (T_4) y triiodotironina (T_3), regulan el metabolismo de todos los tejidos y órganos del cuerpo, además, están directamente relacionadas con el desarrollo de la glándula mamaria y la lactogénesis, así como con el crecimiento fetal y la función de la glándula mamaria posparto (Yousef, 1985). En ausencia de ellas, el crecimiento y la diferenciación del epitelio mamario se reducen (Vonderhaar y Greco, 1979). Bajo condiciones de estrés calórico, las concentraciones de las HT disminuyen debido a que la glándula tiroides es sensible a las altas temperaturas. Un estudio demostró que la concentración de T_4 es más alta en la primavera que en el verano (Vanjonack y Johnson, 1975).

La concentración de T_4 en ganado lechero bajo condiciones termoneutrales es de 50-70 ng/ml, mientras que para T_3 es de entre 0.3-2.0 ng/ml (Anderson, 1971; Convey et al., 1978). Wilks et al. (1990) reportaron 39.2 y 0.75 ng/ml respectivamente, en un estudio realizado en Texas con vacas Holstein primíparas y multíparas bajo condiciones de estrés calórico a temperaturas de 40.8°C y humedad relativa de 85%. Similarmente, Johnson et al. (1988) observaron una disminución en la concentración de ambas hormonas tiroideas (T_3 y T_4) en vacas lecheras en lactación en respuesta al estrés calórico.

La supresión de la secreción de las HT reduce la producción de leche (Swanson y Miller, 1973), mientras que el tratamiento exógeno con T_4 ó T_3 estimula a la lactancia (Knobil y Neill, 1994). En vacas lecheras, se ha observado que la administración de T_4 aumentó la producción láctea en un 27% (Hindery y Turner, 1965), la producción de lactosa en un 25% y el porcentaje de grasa en un 42% (Davis et al., 1988). Estos resultados muestran como el estrés calórico

reduce la producción de leche como consecuencia de una reducción en el funcionamiento de la glándula tiroidea.

2.1.1.2 Tasa respiratoria2.1.1.3 Temperatura rectal; **Error! La autoreferencia al marcador no es válida.**

2.1.2 Respuestas metabólicas y hormonales2.1.2.1 Glucosa2.1.2.2 Triglicéridos2.1.2.3 Colesterol2.1.2.4 Tiroxina y Triiodotironina2.1.3 Respuestas productivas en distintos periodos de lactancia

2.1.3.1 Leche2.1.3.2 Grasa2.1.3.3 Proteína2.1.3.4 Conteo de células somáticas

2.2 Sistemas de enfriamiento en ganado lechero2.2.1 Estrategias de enfriamiento para reducir el estrés calórico en ganado lechero2.2.1.1 Vacas primíparas2.2.1.2 Vacas múltiparas

3. EFECTO DE PERIODOS CORTOS DE ENFRIAMIENTO SOBRE LAS RESPUESTAS FISIOLÓGICAS Y PRODUCTIVAS DE GANADO LECHERO EXPUESTO A ESTRES CALORICO SEVERO. 1.

VACAS PRIMIPARAS3.1 Resumen3.2 Abstract3.3 Introducción3.4. Materiales y métodos

3.5 Resultados y discusión3.6 Conclusión

4. EFECTO DE PERIODOS CORTOS DE ENFRIAMIENTO SOBRE LAS RESPUESTAS FISIOLÓGICAS Y PRODUCTIVAS DE GANADO LECHERO EXPUESTO A ESTRES CALORICO SEVERO. 2. VACAS MULTIPARAS

4.1 Resumen4.2 Abstract4.3

Introducción4.4 Materiales y métodos4.5 Resultados4.6 Discusión...

4.6 Discusión...

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

4.7 Conclusión5. LITERATURA CITADA¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.ÍNDICE

Cuadro 1. Promedios diarios máximos y mínimos para las variables climáticas temperatura ambiental, humedad relativa e índice de temperatura-humedad.....45

Cuadro 2. Promedios de las variables fisiológicas en vacas Holstein primíparas bajo tres estrategias de enfriamiento durante el estudio.....48

Cuadro 3. Promedio de las variables de producción en vacas Holstein primíparas bajo tres estrategias de enfriamiento durante el estudio.....50

Cuadro 4. Promedio de las variables fisiológicas en vacas Holstein en lactación bajo tres estrategias de enfriamiento durante el estudio.....64

Cuadro 5. Promedio de las variables metabólicas y hormonales de vacas Holstein en lactación bajo tres estrategias de enfriamiento durante el estudio.....65

Cuadro 6. Promedio de las variables de producción en vacas Holstein en lactación bajo tres estrategias de enfriamiento durante el estudio.....65

ÍNDICE

Figura 1. Promedios del índice de temperatura-humedad, temperatura ambiental y humedad relativa máximas y mínimas registradas durante el estudio.....	46
Figura 2. Temperatura ambiental y humedad relativa máximas y mínimas registradas durante el estudio.....	62
Figura 3. Índice de temperatura-humedad máximo y mínimo registrado durante el estudio.....	63

ÍNDICE

Las vacas Holstein tienen una producción de leche excepcional cuando las temperaturas del ambiente oscilan entre los 5 y 25 °C y el índice de temperatura-humedad (ITH) no excede de 72 unidades; este rango se considera como la zona de confort para las vacas lecheras o el clima ideal para la producción de leche (McDowell, 1972). Sin embargo, en lugares que se caracterizan por tener climas con temperaturas altas, las vacas Holstein no logran expresar su potencial para la producción de leche ni su óptima capacidad reproductiva (Dikmen et al., 2009; West 2003; De Rensis y Scaramuzzi, 2003). En estos términos, el estrés calórico es un tema que preocupa a diversos autores alrededor del mundo, en lugares tales como Estados Unidos de América, Brasil, Turquía, Israel y México, entre otros, porque afecta negativamente la producción de leche ocasionando pérdidas económicas considerables (Igono et al., 1987, y 1992; Her et al., 1988; Flamenbaum et al., 1995; Correa et al., 2002; Avendaño et al., 2006; Adin et al., 2009).

Se ha comprobado que las vacas que paren durante los meses de invierno producen más leche que vacas que parieron durante los meses calientes del verano en lactaciones de 305 d (McDaniel et al., 1967). En este sentido, Folman et al. (1979) reportaron que temperaturas de casi 40°C disminuyen hasta en 8% la producción de leche durante el verano en comparación con el invierno. Asimismo, bajo las condiciones climáticas del Mediterráneo, Barash et al. (1996) observaron que la producción de vacas en lactación fue menor durante el verano que durante el invierno. Estudios que se llevaron a cabo en cámaras ambientales, describen

una disminución en la producción de leche del 14% en vacas con estrés calórico al inicio de la lactación (Lacetera et al., 1996).

Existen diversas estrategias para reducir los efectos negativos del estrés calórico en las vacas lecheras, entre las que se incluyen el buen diseño de las instalaciones, la manipulación de las dietas, así como el manejo genético a través de la realización de cruzamientos con animales que tienen una mejor resistencia a climas cálidos. Una estrategia más es la modificación del ambiente mediante el uso de sistemas de enfriamiento (Armstrong, 1994; West, 1999; Berman, 2008). Igono et al. (1987) enfriaron durante 10 h a vacas Holstein estresadas por calor, ellos observaron 2 litros de leche por arriba de las vacas que se encontraban bajo la sombra. En otro estudio, Igono et al. (1992) observaron que al enfriar durante 10.5 h a vacas Holstein obtenían 28% más leche que vacas en la sombra. En el valle de Mexicali y bajo condiciones desérticas caracterizadas por altas temperaturas y baja humedad relativa, Correa et al. (2002) reportaron una producción de 4 kg de leche/d más en vacas que fueron enfriadas con un sistema a base de aspersores y abanicos durante 8 h continuas diariamente, con respecto a vacas con sombra.

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la administración de periodos cortos de enfriamiento sobre las respuestas fisiológicas y productivas de vacas Holstein primíparas y multíparas en lactancia bajo condiciones de estrés por calor en una zona árida de México.

ÍNDICE

2.1 Estrés calórico en ganado lechero

El estrés calórico es una condición producida en el animal por el incremento de la humedad relativa, temperatura del viento, radiación o movimiento del aire que al combinarse causan un estado de malestar en el animal debido a la incapacidad para disipar calor corporal, lo que produce efectos negativos sobre la eficiencia productiva y reproductiva del ganado lechero (Armstrong, 1994; Jordan, 2003).

Las vacas lecheras en lactación, por su elevado consumo, metabólicamente producen gran cantidad de calor, el que sumado al calor que impera en el ambiente, resulta en el incremento y ganancia de calor corporal (Fuquay, 1981). El incremento de calor corporal en el ganado debido al consumo de alimento es alto (35-70% de energía metabolizable), aunque depende del balance de nutrientes. Entonces, el calor generado no solo es energía no aprovechable (Conrad, 1985), sino que durante condiciones de estrés calórico este debe ser disipado. La reducción en el consumo de fibra puede ayudar a disminuir el incremento de calor corporal (Fuquay, 1981). Cuando incrementa el calor corporal disminuye la tasa metabólica y esto se asocia con la reducción del apetito (Silanikove, 2000). En este contexto, el estrés calórico desencadena una serie de mecanismos que afectan el funcionamiento de las diferentes regiones del hipotálamo. Inicialmente, causa un efecto negativo en la función de la región frontal, limitando la sensación térmica de enfriamiento; posteriormente manda una señal a la región intermedia para indicar la sensación de saciedad, y finalmente estimula a la región lateral del

hipotálamo para reducir el apetito y, como consecuencia de esta anorexia, disminuye la producción de leche por falta de nutrientes (Albright y Alliston, 1972).

Bajo condiciones de estrés calórico, los ácidos grasos volátiles se pueden encontrar con facilidad en forma de ácido acético en plasma sanguíneo (69 a 77%), debido a que los requerimientos de energía para la producción de leche y otras funciones son mayores, entonces, el ácido acético es la principal fuente de energía de los rumiantes (Chaiyabutr et al., 2008). La función del ácido acético es fundamental para la producción de leche, ya que participa en el metabolismo de la glándula mamaria a través de la síntesis de novo de los ácidos grasos de cadena corta y mediana para la leche, así como también para la generación de ATP y NADHP. Por otra parte, los valores altos de β -hidroxibutirato en torrente sanguíneo son consistentes con el incremento de la oxidación de los ácidos grasos liberados durante el estrés calórico (Bauman et al., 1988).

El jadeo es otra de las funciones del cuerpo que requiere altos niveles de energía durante el estrés calórico (McDowell, 1972) para disipar calor corporal. Bajo condiciones de estrés calórico el animal demanda más energía (Oshiro et al. 1981), por lo tanto, como resultado del catabolismo de los ácidos grasos del hígado, produce y libera cuerpos cetónicos debido a la gran movilización de reservas de grasa necesaria para obtener energía disponible (Schultz, 1974).

Un incremento constante de la tasa respiratoria en condiciones de estrés calórico resulta en una alcalosis respiratoria por la pérdida excesiva de bióxido de carbono. Para compensar este trastorno, la vaca incrementa la micción para liberar bicarbonato (HCO_3), solo que ahora perderá más HCO_3 del que se puede producir simultáneamente en saliva. Se ha observado que cuando las vacas de

leche están estresadas por calor, manifiestan salivación excesiva, donde es posible que pierdan también HCO_3 . Asimismo, bajo estas mismas condiciones es común observar a vacas postradas, comportamiento que sugiere que prefieren evitar cualquier movimiento dentro del corral. La falta de movimiento en el corral tiene un efecto en la reducción del consumo de agua y consecuentemente en la producción de saliva. El resultado final es una acidosis ruminal debido a una reducción del buffer (saliva) en el rumen (Dale et al., 1954). El pH del rumen es determinado en gran parte por el balance entre los ácidos generados de la fermentación de alimentos, el bicarbonato y los fosfatos buffer que se encuentran en la saliva, los cuales ayudan a neutralizar a estos ácidos. En contraste, bajo condiciones de estrés calórico disminuye la actividad ruminal, lo que conduce a una disminución de los amortiguadores salivares, de esta manera disminuye también el pH ruminal. Físicamente, la fibra es eficaz porque estimula la masticación y a su vez estimula la secreción de saliva. Por lo tanto, el consumo constante de alimentos con la fibra da origen al bolo de la masticación, lo cual tiene por objeto bufferizar el rumen, sin embargo, se sugiere dar en bajas proporciones para evitar un incremento del calor metabólico. La tasa del flujo de la saliva en ganado de carne y leche son estimados dentro de un rango de 108 a 308 L/d (Erdman, 1988). Con esta tasa del flujo de la saliva, se estima que la vaca puede contribuir en el rango de 390 a 1115 g de fosfato disódico y de 1134 a 3234 g de bicarbonato de sodio para bufferizar el rumen diariamente.

Una forma simple para cuantificar el grado de estrés calórico es mediante el uso del índice de temperatura-humedad (ITH), el cual se estima a partir de la combinación de temperatura ambiental y humedad relativa. Una forma de estimar

este índice es: $ITH = [0.81 \times \text{temperatura promedio}] + \text{humedad relativa} [\text{temperatura promedio} - 14.4] + 46.4$ (Hahn, 1999). Como ejemplo a lo anterior Armstrong (1994) estimó que el efecto negativo del estrés calórico inicia a partir de las 72 unidades de ITH. Sin embargo, Fuquay (1981) considera que es difícil determinar el grado de efecto del estrés calórico sobre la producción de leche debido a que otros factores que no están relacionados directamente con el ambiente pudieran estar afectando, tal es el caso de un mal manejo nutricional.

Un estudio hecho con vacas lecheras donde se probaron tres niveles de fibra detergente ácida (FDA; 16.0, 17.9, 19.4 y 21.2%) bajo dos ambientes con diferentes grados de estrés calórico (ITH de 64-77 y de 74-84 unidades), y West et al. (1999) encontraron en condiciones de ITH 64-77 que la producción de leche disminuyó y el porcentaje de grasa aumentó como el nivel de FDA también aumentó; pero en condiciones de ITH de 74-84 observaron que la producción de leche mostró un efecto cuadrático y el porcentaje de grasa disminuyó conforme la FDA se incrementó.

Por su parte, Thatcher et al. (1994) encontraron pérdidas en la producción de leche y grasa como resultado de las altas temperaturas. Es evidente que el estrés calórico tiene un efecto sobre la función secretora de la ubre (Silanikove, 1992). Asimismo, cuando vacas lecheras son sometidas a temperaturas ambientales entre 18-30 °C, la producción de leche, así como la producción de energía en leche, se reducen 15 y 35%, respectivamente (McDowell et al., 1976). También los porcentajes de grasa, sólidos totales y proteína en leche pueden disminuir en 39.7, 18.9 y 16.9%, respectivamente (Johnson, 1976).

¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.

Las respuestas fisiológicas son todas aquellas variables que ayudan a determinar, mediante la cuantificación de las mismas, los efectos negativos del estrés calórico en el animal. Estas variables incluyen condición corporal, tasa respiratoria, temperatura rectal y temperatura de la piel, entre otras. Por lo tanto, a continuación se describirán las variables más usadas en investigación.

2.1.1.1 Condición corporal La condición corporal en vacas lecheras es una evaluación de la proporción de grasa corporal que poseen. Dicha evaluación es reconocida por la toda la comunidad científica, así como por los productores de leche, considerándose como un factor de suma importancia para el manejo cotidiano del ganado lechero. La escala usada para evaluar la condición corporal puede variar entre países, pero la calificación más baja siempre refleja emaciación y la calificación más alta indica necesariamente obesidad. En acuerdo, Wildman et al. (1982) proponen una escala de calificación del 1 al 5 donde cada punto indica lo siguiente: 1, emaciada; 2, flaca; 3, regular; 4, gorda y 5, obesa. Es sabido que vacas con condición corporal muy baja o muy alta en el parto producen menos leche, afecta la reproducción y reduce la función inmunológica. Asimismo, vacas demasiado delgadas, aparte de no producir leche, suelen ser mayormente afectadas por climas demasiado fríos, mientras que vacas demasiado obesas pueden incrementar el riesgo de presentar desórdenes metabólicos. Butler y Smith (1989) reportaron una tasa de concepción de hasta 17% más baja en el primer servicio en vacas que perdieron más de una unidad de condición corporal durante

el parto, comparadas con vacas que perdieron menos de 0.5 unidades de condición corporal (65%).

En otro orden, la condición corporal puede verse afectada durante una lactación temprana y/o durante condiciones de estrés calórico debido a un incremento de la movilización de las reservas de grasa en el cuerpo por medio de la lipólisis, proceso por el cual los lípidos del organismo son transformados en ácidos grasos para cubrir en cierta parte las necesidades energéticas de la glándula mamaria para la producción de leche y grasa. Entonces la glucosa producida a partir de la lipólisis es utilizada para la síntesis del componente más importante de la leche, la lactosa (Bauman y Currie, 1980). Sin embargo, bajo estas condiciones, las vacas sufren un desabasto de energía que limita la disponibilidad de glucosa en la glándula por la falta de apetito (Berman y Meltzer, 1973).

Estudios realizados bajo condiciones de estrés calórico no han reportado cambios en la condición corporal de vacas con o sin enfriamiento (Avendaño-Reyes et al., 2010; Correa et al., 2002). Tampoco Flamenbaum et al. (1995) reportaron cambios en la condición corporal de vacas con respecto al nivel de producción de leche durante el verano. Sin embargo, se detectó una triple interacción entre el grado de estrés calórico, condición corporal y semanas en lactación, misma que coincidió con el pico de producción de leche tanto para animales enfriados y no enfriados a partir de la cuarta y hasta la octava semana. Existe una asociación entre una condición corporal baja y la producción de leche. Esta asociación es consistente con los resultados reportados por Roche et al. (2006 y 2007). Garnsworthy y Topps (1982) reportaron un efecto negativo en la

condición corporal al parto sobre la producción de leche, ya que vacas delgadas (2.7 unidades) produjeron mayor cantidad de leche que vacas gordas (3.7 unidades), debido que las primeras consumieron mayor cantidad de materia seca. Esto coincide con lo reportado por Treacher et al. (1986), quienes encontraron que vacas de condición corporal moderada (2.8 unidades) produjeron mayor cantidad de leche que vacas más gordas (3.9 unidades). La condición corporal óptima en la producción de leche para vacas lecheras de la raza Holstein es de entre 3.0 y 3.5, si sobre pasa éste último puede resultar en la reducción en la producción de leche, así como también en el porcentaje de proteína, aunque la asociación con el porcentaje de grasa en leche suele ser positiva (Roche et al., 2009).

2.1.1.2 Tasa respiratoria Un problema grave en la producción animal bajo climas cálidos es el intercambio de calor entre el cuerpo del animal y el medio ambiente. El jadeo y el sudor son dos mecanismos de evaporación para eliminar calor. En bovinos la respiración solo es responsable del 15% de las pérdidas totales de calor (Finch, 1986), el resto corresponden a otros mecanismos tales como conducción, convección y radiación (Berman et al., 1985). Bajo estrés calórico severo se incrementa el jadeo, también se incrementa el número de respiraciones por minuto (resp/min) y se observan respiraciones rápidas, cortas y poco profundas. La tasa respiratoria en vacas lecheras estresadas por calor puede incrementarse hasta un 75% más de lo normal (20 resp/min) (Mount, 1979). Algunos autores han indicado que un incremento de la frecuencia respiratoria (50-60 resp/min) puede iniciar a partir de una temperatura de 25 °C (Berman et al.,

1985). Una vaca con 80 resp/min se puede considerar como un animal estresado por el calor (Poterfield, 1996). El ganado bovino a temperatura ambiente de 41.1°C y humedad relativa de 78% mostró una tasa respiratoria de 102 resp/min (Gwazdauskas, 1985). Wise et al. (1988) han reportado en vacas Holstein 126.4 resp/min con un ITH de 86.2 unidades. Otro estudio demostró la disminución en la producción de leche por efecto del estrés calórico en dos distintos ambientes, uno con 32°C y 20% humedad relativa (HR) y el otro con 32°C y 45% de HR (Johnson y Vanjonack, 1976). Esta diferencia disminuyó la tasa respiratoria y la tasa de sudoración, lo que resultó en un incremento de la temperatura rectal, así como en la reducción del consumo de alimento y consecuentemente en la disminución de la producción de leche.

Como consecuencia de la reducción en la producción de leche por efecto de las altas temperaturas, algunos investigadores han decidido experimentar con estrategias de enfriamiento artificial para vacas lecheras en lactación, logrando así reducir significativamente la tasa respiratoria. En el Valle de Mexicali, B.C., Avendaño-Reyes et al. (2010) usaron un sistema de enfriamiento a base de aspersores y abanicos, logrando reducir durante las horas más intensas de calor la tasa respiratoria de 112 a 107 resp/min, aplicando una y tres horas de enfriamiento respectivamente. Correa et al. (2002) reportaron 22% menos respiraciones en vacas enfriadas por 8 h con respecto a vacas testigo bajo la sombra y bajo un sistema de enfriamiento ambiental similar al estudio anterior. Otros autores han reportado similares respuestas, ya que al comparar animales enfriados bajo un sistema de enfriamiento con animales testigo que solo gozaron de sombras lograron reducir la tasa respiratoria en 16 resp/min (Turner et al.,

1992). Por otro lado, Armstrong (1999) logró observar diferencias más altas (de hasta 26 resp/min menos) en vacas Holstein enfriadas bajo un sistema de enfriamiento artificial basado en aspersores y abanicos, y mediante tres diferentes flujos de agua de acuerdo a la temperatura ambiental, comparado con vacas que solo contaban con sombras.

Aunque no existe una diferencia clara en el número de respiraciones entre distintas razas de vacas lecheras bajo condiciones termoneutrales, se ha reportado que vacas Jersey tienen tasas de respiración más alta que vacas Holstein, debido a que las Jersey tienen una mejor habilidad para disipar calor corporal comparadas con las Holstein (Kibler y Brody, 1952).

2.1.1.3 Temperatura rectal La temperatura rectal es la variable más usada para evaluar el índice de adaptación fisiológico en ambientes calurosos, ya que es un excelente indicador para predecir la presencia de estrés calórico en ganado lechero. Un incremento o una disminución de 1°C es suficiente para afectar el funcionamiento del ganado (McDowell et al., 1976). El incremento de la temperatura rectal durante estrés calórico severo puede ser de hasta 0.7% más con respecto a la temperatura normal (38.5°C) (Igono et al., 1992). Diversos estudios coinciden en mencionar que el incremento de la temperatura rectal en el ganado lechero bajo condiciones de estrés calórico severo sobre pasa en mucho la temperatura rectal normal (Avendaño-Reyes et al., 2006, 2010; Khongdee et al., 2010; Correa et al., 2004; Igono et al., 1987). West et al. (1999) reportaron una correlación positiva ($r=0.78$) entre la temperatura de la leche y la temperatura rectal, siendo la temperatura de la leche 0.15°C mayor que la rectal. Durante el

equilibrio térmico, la temperatura rectal de vacas lecheras altas productoras resulta ser independiente de la temperatura ambiente, pero está relacionada con el metabolismo de energía o calor metabólico (Berman et al., 1985).

En toros expuestos a 40 °C en una cámara ambiental, Bianca (1964) indicó que al proporcionar agua fría a una temperatura de 1-14°C se reduce en 1.7°C la temperatura rectal y la de la piel. Martello et al. (2009) reportaron una diferencia de 0.8° C en vacas Holstein entre el invierno y el verano en Brasil. Asimismo, Adin et al. (2009) realizaron dos experimentos con los mismos grupos de tratamientos que fueron vacas lecheras en lactación enfriadas bajo un sistema de enfriamiento evaporativo y el otro sin la presencia de éste. El primer experimento se realizó dentro de una cámara ambiental con un ITH de 78, mientras que el segundo experimento se realizó dentro de un corral con sombra bajo un ITH de 80. En el primer experimento observaron una reducción de 0.2°C en los animales enfriados con respecto al grupo testigo. En el segundo experimento la diferencia fue de 0.3°C entre enfriadas y testigo (38.5 vs 38.8°C). En otro experimento realizado por Flamenbaum et al. (1986), observaron el efecto de proporcionar periodos cortos de enfriamiento con aspersores y abanicos de 15, 30 y 45 min durante 3 días en vacas lecheras sobre la respuesta en temperatura rectal. La disminución máxima de temperatura rectal se logró a partir de los 30 min después de proporcionar cada uno de los tratamientos. Los animales enfriados por 15, 30 y 45 min produjeron una disminución de 0.6, 0.7 y 1.0°C respectivamente. Avendaño-Reyes et al. (2010) probaron tiempos cortos de enfriamiento en vacas lecheras en lactación, encontrando que vacas enfriadas por 3 h obtuvieron 0.4°C menos de temperatura rectal que vacas enfriadas solo por 1 h. Correa et al. (2004) probaron dos distintos

sistemas de enfriamiento más un grupo testigo (sin enfriamiento) sobre la temperatura rectal de vacas Holstein y Pardo Suizo. Un sistema de enfriamiento fue a base de aspersores y abanicos y el otro a base de campanas evaporativas. Las diferencias fueron notablemente distintas al comparar al grupo testigo con los correspondientes sistemas de enfriamiento, siendo las vacas Pardo Suizo las que obtuvieron mejores respuestas en el grupo testigo, aspersores y abanicos, y campanas evaporativas, con temperaturas rectales de 39.2, 38.9 y 38.8°C respectivamente; mientras que para vacas Holstein fueron de 39.7, 39.0 y 38.8°C respectivamente. En otro estudio donde se probó un sistema de enfriamiento evaporativo con vacas cruzadas (Holstein 87.5% con Bos indicus 12.5%), se observaron poco más de 2°C menos de temperatura rectal respecto al grupo testigo (sin enfriamiento) (Khongdee et al., 2006). Existen diferencias notables en temperatura rectal entre razas de vacas lecheras y su habilidad por regular la temperatura rectal, ya que el promedio de temperatura rectal en las razas de vacas Bos taurus es mayor que las razas Bos indicus (Finch, 1986), debido a que las razas Bos taurus son más sensibles al estrés calórico.

¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.

Los mecanismos de pérdida de calor en el animal son insuficientes para mantener el equilibrio térmico en el organismo cuando se incrementa la temperatura ambiental. Otras formas utilizadas para evaluar el nivel de estrés calórico en el ganado es a través de la temperatura de la leche (Igono et al., 1985), la temperatura de la piel en el área de la ubre (Bitman et al., 1984) y en el tímpano (Davis et al., 2003).

En condiciones de temperatura ambiental moderada, el ganado puede disipar calor hacia el medio ambiente a través de la piel por mecanismos de evaporación, radiación, conducción y convección (Baccari, 2001). Bajo estos términos, existen diversas investigaciones donde confirman que la capa de piel tiene una gran influencia sobre el intercambio térmico entre el individuo y el medio ambiente (Cappa et al. 1989; Aguiar and Targa 2001; Collier et al. 2006). Aunque dichos estudios se realizaron en cámaras ambientales, han proporcionado información precisa acerca de esas respuestas en el animal. El principal mecanismo fisiológico para controlar la pérdida de calor corporal es la modificación del flujo de sangre que llega a la superficie corporal y la redistribución del mismo. La vasodilatación periférica facilita la pérdida de calor porque reduce el efecto del aislamiento tisular y favorece la eliminación de calor por evaporación al facilitar la difusión de agua desde la piel. Por el contrario, cuando la vasoconstricción periférica alcanza su máximo nivel, las pérdidas evaporativas son mínimas y el efecto aislante de los tejidos se maximiza (Perera et al., 1986). Blazquez et al. (1994) reportaron un incremento en el flujo de la sangre en la piel de toros, el cual fue positivamente correlacionada con la tasa de sudoración.

Entre principios de los años 50's y los años 60's descubrieron que el número de glándulas sudoríparas en las razas cebuinas eran mayores que en las razas europeas (Ferguson and Dowling, 1955; Allen et al., 1962). Las razas *Bos indicus* tienen una mayor densidad de folículos pilosos ($1698/\text{cm}^2$) que las razas *Bos taurus* ($1064/\text{cm}^2$) (Dowling, 1955). La tasa de sudoración en vaquillas cebú se incrementó cuando alcanzó una temperatura de 35°C en la temperatura de la piel y 30°C en la temperatura del aire (Allen, 1962). Comúnmente, si la

temperatura de la superficie de la piel está por encima de 35°C en el ganado, el animal se considera que está bajo los efectos del estrés por calor (Collier et al., 2006).

Investigaciones recientes reportan el registro de la temperatura corporal con termómetros en forma de pistola y/o cámaras termales que detectan la temperatura corporal mediante un sistema infrarrojo, por lo que representan una herramienta para estimar la temperatura de la piel en los animales. De esta manera, la lectura de la temperatura se puede hacer a distancia, sin que se requiera el movimiento de los animales. Martello et al. (2009) reportaron durante los meses de verano e invierno diferencias importantes en las temperaturas de la base de la cola, región del pabellón auricular y la superficie corporal de vacas Holstein. Durante los meses de invierno dichas temperaturas fueron de 33.7, 32.5 y 33.7°C respectivamente, mientras que las temperaturas durante el invierno fueron de 26.5, 25.9 y 30.9°C respectivamente. Un dato interesante es que estos autores encontraron una correlación positiva entre las temperaturas antes mencionadas y la tasa respiratoria ($r = 0.63$, 0.63 y 0.54 respectivamente), indicando que el incremento de estas temperaturas fueron principalmente por el incremento de la frecuencia respiratoria. De acuerdo a lo anterior, Collier et al. (2006) reportaron una correlación positiva y alta entre la tasa respiratoria y la superficie corporal ($r = 0.73$). Ambos autores concluyen que las temperaturas de las diferentes partes de la piel pueden ser una excelente herramienta para describir el ambiente caluroso que les rodea a estos animales, también pueden ser usadas como estimadores para indicar el nivel de estrés calórico de vacas lecheras en lactación.

2.1.2 Respuestas metabólicas y hormonales

2.1.2.1 Glucosa

Las vacas lecheras en producción requieren grandes cantidades de glucosa para mantener la lactancia. En rumiantes, la disponibilidad neta de glucosa depende principalmente de la gluconeogénesis y los principales nutrientes glucogénicos son el ácido propiónico y el lactato (Danfaer, 1994). Sin embargo, durante periodos largos e intensos de estrés calórico las vacas pueden reducir el consumo de alimento hasta en un 30%, lo cual provoca que la disponibilidad de energía disminuya (Collier et al., 2008). Una disponibilidad limitada de nutrientes, tales como la glucosa y/o aminoácidos, pueden limitar la síntesis de la leche y sus componentes (Clark et al., 1977) debido a que la glucosa es el principal precursor para la síntesis de la lactosa. La síntesis de lactosa consume hasta 70% de toda la glucosa circulante en la vaca lechera, lo que representa una considerable carga metabólica para los rumiantes (Ponce y Bell, 1984). La lactosa representa alrededor de 5% de la composición total de la leche en vacas Holstein (Tsenkova et al., 2000). Es un azúcar estrictamente específico de la leche, cuya síntesis y secreción está íntimamente relacionada con el volumen total de la leche que producen las vacas. La glándula mamaria retiene 900 ml de agua por cada 50 g de lactosa sintetizada (Forsyth, 1989). La lactosa actúa como un osmo-regulador para la absorción de agua en la glándula mamaria, esto la hace el principal componente osmótico para el proceso activo de extracción de agua hacia las vesículas de Golgi. Entonces, cuando la síntesis de lactosa se incrementa, junto con el agua

salen del aparato de Golgi y ambos compuestos se transportan vía lumen alveolar en forma de leche.

La síntesis de lactosa se lleva a cabo en el aparato de Golgi y se requieren de 5 pasos para su síntesis a partir de una molécula de glucosa:

11. Fosforilación de la glucosa. Esta transforma a la glucosa en glucosa 6-fosfato mediante una reacción con hexokinasa.
12. Isomeración de la glucosa 6-fosfato. Aquí transforma a la glucosa 6-fosfato en glucosa 1-fosfato mediante una reacción con fosfoglucomutasa.
13. Formación de uridindifosfato (UDP)-glucosa. Es el proceso donde la glucosa 1-fosfato se transforma en UDP-glucosa mediante la reacción con UDP-glucosa fosforilasa.
14. Isomeración de UDP-glucosa. Es el proceso donde la UDP-glucosa se transforma en UDP-galactosa mediante la reacción con UDP-glucosa epimerasa.
15. Síntesis de lactosa. En este proceso la UDP-galactosa se une a una molécula libre de glucosa, donde libera el compuesto uridindifosfato para formar lactosa o galactosa β 1,6 glucosa.

El proceso de la síntesis de lactosa está regulado por un complejo enzimático conocido como lactosa-sintasa, compuesto por dos proteínas: 1) la proteína A, o β 1,4 galactosiltransferasa que se encuentra en diversos tejidos y 2) la proteína B o α -lactoalbúmina que es una proteína sintetizada por las propias células epiteliales del tejido mamario (Kennelly, 1999), razón por lo que la síntesis

de lactosa ocurre solamente en la glándula mamaria. Además, la expresión del gen de la α -lactoalbúmina es regulada de cerca por algunas hormonas, tales como la progesterona por efecto de una retroalimentación negativa, así como una retroalimentación positiva de la prolactina y glucocorticoides, de tal modo que la síntesis de la lactosa ocurra solamente durante la lactancia.

Se ha demostrado que la administración de glucosa puede incrementar la producción de ácido propiónico, principal precursor de la gluconeogénesis (Danfaer et al., 1995). También puede incrementar la disposición de glucosa en el duodeno (Knowlton et al., 1998). En dos estudios se probaron los efectos de proporcionar diferentes cantidades de glucosa en duodeno sobre la producción de leche y sus componentes, usando dietas basadas en silo de forraje (Hurtaud et al., 2000). En el primer experimento se proporcionaron 0, 750, 1500 y 2250 g de glucosa/d; en el segundo 0, 250, 500, 1000 y 2000 g de glucosa/d. El incremento en las cantidades de glucosa en cada experimento incrementó la producción de leche en 2.4 y 1.6 kg/d respectivamente. La lactosa no fue afectada, mientras que la producción de grasa disminuyó linealmente. Los tratamientos de glucosa afectaron significativamente los perfiles de los ácidos grasos de cadena mediana y larga. Por otra parte, se observó un incremento lineal en la proteína a partir de los 1000 g de glucosa. En un estudio similar, Rigout et al. (2002) probaron 4 niveles de glucosa (T1 = 0, T2 = 443, T3 = 963 and T4 = 2398 g/d) en el duodeno de vacas lecheras sobre la producción de leche y lactosa. La concentración de glucosa en sangre tuvo un efecto lineal positivo, mientras que la producción de leche y lactosa tuvieron un efecto cuadrático. Los autores indican que disminución

de la leche en el T4 fue debido a un desbalance en la concentración de glucosa a nivel intracelular.

A este respecto, un análisis de lactosa en la leche puede reflejar los niveles de concentración de este compuesto en el aparato de Golgi o en el citosol (Faulkner, 1980). Cuando los niveles de glucosa alcanzaron niveles constantes, las concentraciones de glucosa-6-fosfato tendieron a incrementar linealmente, mientras que las concentraciones de glucosa-1-fosfato disminuyeron en T4. Estos resultados sugieren la posibilidad de que exista un bloqueo en la transformación de glucosa-6-fosfato a glucosa-1-fosfato, el cual consecuentemente podría afectar la producción de lactosa, así como la producción de leche. Este bloqueo pudiera deberse a la disminución de la actividad de la fosfoglucomutasa (Opstvedt et al., 1967).

2.1.2.2 Triglicéridos

Los periodos de intenso calor durante los meses de invierno pueden dar origen, como ya se ha mencionando, a una disminución en el consumo de alimento en las vacas lecheras debido a la falta de apetito. Esto provoca un estado de balance de energía negativo, similar al de las vacas lecheras al inicio de la lactancia. Dadas las circunstancias, los animales intentan compensar esta situación movilizand o grasa de los tejidos, obteniendo así la energía que se requiere para la producción de leche. Entonces, cuando el déficit de energía es mayor, la movilización de grasa excede la capacidad que el hígado tiene para metabolizarla y se produce el Síndrome de Movilización de Grasa. La movilización excesiva produce alternadamente infiltración de grasa en diferentes órganos y

tejidos, alterando su función (Contreras, 1990). Algunos estudios han mostrado una infiltración de grasa en el hígado de aproximadamente 20% o más durante la segunda semana del parto (Skaar et al., 1989; Gruffat et al., 1997), siendo que el porcentaje de infiltración de grasa en el hígado bajo condiciones normales es máximo de 13% (Gerloff, 1986; Herdt, 1988). Durante un estado de balance energético negativo por un estrés calórico severo, el nutriente más limitante es la glucosa (Itoh et al., 1998), que en los rumiantes debe ser sintetizada por gluconeogénesis hepática a partir de algunos precursores, cuyo aporte de energía es variable de acuerdo a los requerimientos. Estos precursores son: 1) el propionato, que puede contribuir en la formación de glucosa en 30-50% (Armentano y Young, 1983; Lomax y Baird, 1983); 2) el lactato, en aproximadamente un 10% (Huntington y Prior, 1983); 3) aminoácidos en 9% (Lomax et al., 1979) y 4) el glicerol en 5% (Bergman et al., 1966).

La formación de AMPc en el tejido adiposo y muscular puede ser estimulada por la adrenalina y la noradrenalina, por ello en el estrés se produce pérdida de peso y un aumento en la concentración de los ácidos grasos en sangre (McGilvery, 1979).

La degradación de los ácidos grasos producidos por β -oxidación da origen a moléculas de acetyl-CoA, mismas que son incorporadas al ciclo de Krebs para producir energía en forma de ATP. Esto ocurre principalmente en el hígado, pero también en riñones y músculos. El glicerol dará origen a la glucosa, particularmente, en el hígado. Cuando la cantidad de grasa movilizada excede la capacidad de oxidación en el hígado, las moléculas de acetyl-CoA no ingresan al ciclo de Krebs por insuficiencia de oxalacetato, así, el exceso de acetyl-CoA da

origen a cuerpos cetónicos. En estas circunstancias, el exceso de ácidos grasos y de glicerol que ingresa al hepatocito no se oxida, se re-esterifica, dando origen a triglicéridos, ahora, dentro de la célula hepática (Grummer, 1993). Bajo condiciones normales, este proceso de re-esterificación ocurre en el hepatocito, pero en cantidad moderada, lo que se considera como reserva para ser usada como fuente de energía. La gran mayoría de estos triglicéridos debe salir del hepatocito para ser utilizada como fuente de energía en otros tejidos y/o para la síntesis de grasa en la leche (Herdt, 1988). Para que esto ocurra, el hígado debe ser capaz de sintetizar una apolipoproteína B (apo B), derivada de una lipoproteína de muy baja densidad (VLDL). Esta lipoproteína es la que en conjunto con los triglicéridos permite el transporte desde el hepatocito hacia otros tejidos. Si la cantidad de triglicéridos que se está re-esterificando en el hígado, excede la capacidad de éste para sintetizar los componentes de la lipoproteína, los triglicéridos se depositan en el adipocito en forma de gotas de grasa (Herdt, 1988; Rayssiguier et al., 1988). Algunos autores han comprobado que al inicio de la lactancia, el hígado disminuye su capacidad de sintetizar esta apolipoproteína B (Bauchart, 1993; Bauchart et al., 1996).

La síntesis y secreción hepática de lipoproteínas son probablemente reguladas por factores nutricionales y hormonales, sin embargo, la mayoría de los mecanismos específicos involucrados aún permanecen desconocidos. En el periodo alrededor del parto hay algunas evidencias que permiten señalar que la capacidad hepática para sintetizar fosfolípidos determina la capacidad de síntesis de lipoproteínas de muy baja densidad en los rumiantes en el período alrededor del parto (Fronk et al., 1980; Herdt et al., 1983). Así vacas lecheras, una

deficiencia funcional de síntesis de fosfolípidos puede contribuir al engrasamiento del hígado o al síndrome del hígado graso.

2.1.2.3 Colesterol

El colesterol se forma a partir de acetil-CoA mediante una compleja serie de reacciones que involucran diversos intermediarios, como β -hidroxi- β -metilglutaril-CoA (HMG-CoA), mevalonato y dos isoprenos activados (pirofosfato de dimetilalilo y pirofosfato de isopentenilo). Entre esta serie de reacciones se encuentra la condensación de unidades de isopreno para producir escualeno no cíclico, el cual se cicla para formar un anillo esteroide y su cadena lateral, que después de varias reacciones, se convertirá en colesterol. La síntesis de colesterol es inhibida por concentraciones intracelulares elevadas de la misma molécula. El colesterol y sus ésteres se transportan en la sangre como lipoproteínas plasmáticas. Las lipoproteínas de alta densidad (HDL) sirven para remover el colesterol de la sangre, el cual es transportado hacia el hígado. Las lipoproteínas de muy baja densidad (VLDL) acarrean colesterol y sus ésteres, y triacilgliceroles desde el hígado a otros tejidos, donde los triacilgliceroles son degradados por la lipoproteinlipasa; ésta convierte a las VLDL en lipoproteína de baja densidad (LDL). Las LDL, que son abundantes en colesterol y sus ésteres, son capturadas por la endocitosis mediada por un receptor, en la que la apoproteína B-100 de la LDL es reconocida por receptores específicos, ubicados en la membrana plasmática.

Entonces, si bien el colesterol es requerido por órganos tales como glándulas suprarrenales, gónadas e hígado, como precursor de hormonas

esteroides (glucocorticoides, mineralocorticoides y hormonas sexuales), ácidos biliares (glucocólico y taurocólico) y vitamina D, también es requerido por los tejidos de tipo conectivo, muscular, nervioso y epitelial para la formación de membranas celulares.

La membrana plasmática está formada por lípidos y posee una propiedad en la que solamente permite la entrada a ciertas partículas en el interior de la célula, de la misma forma puede eliminar sus productos de desecho. Entonces es a través de la membrana en la que se regula la entrada y la salida de sustancias que logran el funcionamiento perfecto de la célula. Por ejemplo, bajo condiciones termoneutrales la glucosa pasa constantemente a través de la membrana del aparato Golgi hacia su lumen para la formación de lactosa, a través de un transportador de la glucosa (GLUT 1). La presencia del GLUT 1 en la membrana del aparato de Golgi es específica para las células del tejido epitelial mamario, debido a que el resto de las células no tienen este transportador de la glucosa (Zhao et al., 1996). El transporte de la glucosa es pasivo (no requiere ATP), por lo que no limita la tasa de transporte. Sin embargo, si es afectado por los niveles bajos de glucosa en el citoplasma, derivado de una disminución en el consumo de alimento por un estrés calórico severo.

Por otra parte, se ha demostrado que el estrés calórico tiene un efecto directo sobre el epitelio en la glándula mamaria, porque daña la constitución de las membranas celulares (Bowler et al., 1973; Hahn, 1982). Esto explicaría la baja producción de leche de vacas expuestas a un calor intenso. Al provocar una alteración en la composición de los lípidos de la membrana (Anderson y Parker, 1982), así como un aumento en la permeabilidad se incrementa la actividad de la

fosfolipasa y la fosfoinositidina, ambas actúan rompiendo los enlaces diester fosfóricos de la membrana (Calderwood et al., 1987).

El estrés calórico tiene la facultad de liberar gran cantidad de radicales libres (-OH) que destruyen a las membranas celulares, lo cual cuando es mayor que los mecanismos antioxidantes, el animal se encuentra en estrés oxidativo. Por lo tanto, el estrés calórico afecta los mecanismos antioxidantes. Diversos estudios han analizado el efecto del estrés calórico sobre el estatus oxidativo de vacas lecheras en lactación. Harmon et al. (1997) lograron comprobar que el estrés calórico disminuye la actividad antioxidante del plasma de las vacas lecheras. Por otro lado, Calamari et al. (1999) observaron en vacas sujetas a estrés por calor una reducción en la concentración total de caroteno y vitamina E en el plasma. En contraste, Trout et al. (1998) mencionaron que el estrés calórico no afectó las concentraciones de α -tocoferol y β -caroteno en vacas lecheras, debido a que el estrés calórico no afecta las concentraciones de los agentes antioxidantes en sangre, los cuales contra-restan la cantidad de radicales libres producidos durante un proceso de estrés oxidativo.

2.1.2.4 Tiroxina y Triiodotironina

La disminución en el consumo de alimento producida por el estrés calórico produce alteraciones en el funcionamiento de la glándula tiroides. La aparición del estado hipotiroideo trae como consecuencia bajas producciones de leche (Thriftt al., 1999), debido a que la disminución de la actividad tiroidea afecta el número de movimientos ruminales y la tasa de pasaje, alterando la digestibilidad de la materia seca (Miller et al., 1974).

Las hormonas tiroideas (HT) tiroxina (T_4) y triiodotironina (T_3), regulan el metabolismo de todos los tejidos y órganos del cuerpo, además, están directamente relacionadas con el desarrollo de la glándula mamaria y la lactogénesis, así como con el crecimiento fetal y la función de la glándula mamaria posparto (Yousef, 1985). En ausencia de ellas, el crecimiento y la diferenciación del epitelio mamario se reducen (Vonderhaar y Greco, 1979). Bajo condiciones de estrés calórico, las concentraciones de las HT disminuyen debido a que la glándula tiroides es sensible a las altas temperaturas. Un estudio demostró que la concentración de T_4 es más alta en la primavera que en el verano (Vanjonack y Johnson, 1975).

La concentración de T_4 en ganado lechero bajo condiciones termoneutrales es de 50-70 ng/ml, mientras que para T_3 es de entre 0.3-2.0 ng/ml (Anderson, 1971; Convey et al., 1978). Wilks et al. (1990) reportaron 39.2 y 0.75 ng/ml respectivamente, en un estudio realizado en Texas con vacas Holstein primíparas y multíparas bajo condiciones de estrés calórico a temperaturas de 40.8°C y humedad relativa de 85%. Similarmente, Johnson et al. (1988) observaron una disminución en la concentración de ambas hormonas tiroideas (T_3 y T_4) en vacas lecheras en lactación en respuesta al estrés calórico.

La supresión de la secreción de las HT reduce la producción de leche (Swanson y Miller, 1973), mientras que el tratamiento exógeno con T_4 ó T_3 estimula a la lactancia (Knobil y Neill, 1994). En vacas lecheras, se ha observado que la administración de T_4 aumentó la producción láctea en un 27% (Hindery y Turner, 1965), la producción de lactosa en un 25% y el porcentaje de grasa en un 42% (Davis et al., 1988). Estos resultados muestran como el estrés calórico

reduce la producción de leche como consecuencia de una reducción en el funcionamiento de la glándula tiroidea.

2.1.3 Respuestas productivas en distintos periodos de lactancia

2.1.3.1 Leche

Las condiciones ambientales registradas en lugares con clima cálido afectan la producción de leche. Debido a esto, el ganado lechero disminuye el consumo de alimento. Johnson (1976) menciona que una variación entre 3-10 % en la producción de leche puede ser debida a las condiciones climáticas existentes. Desde los años 60's se pudo demostrar en vacas Holstein una disminución en forma lineal de -0.23 y -0.26 kg/d por cada unidad de incremento de ITH a partir de las 70 unidades, sobre el consumo de materia seca y la producción de leche respectivamente (Johnson et al., 1962). West (2003) menciona que los efectos negativos del estrés calórico pueden reducir hasta en 40% la producción de leche en vacas Holstein. Estudios realizados en cámaras ambientales mostraron que las vacas lecheras sufrieron una disminución de 35% de leche durante la mitad de la curva de lactación (Nardone et al., 1992). Calamari et al. (1997) observaron una disminución en la producción de leche de 11 a 14 %, 22 a 26 % y de 15 a 18 % durante el inicio, la mitad y el final de la lactación, respectivamente. Johnson et al. (1988) reportaron 0.059 y 0.019%/d menos de producción de leche en vacas altas productoras (30 kg/d) y vacas con una producción de leche menor (25 kg/d), respectivamente. Las vacas lecheras altas productoras pueden sufrir más los efectos del estrés calórico debido a una mayor producción de calor metabólico. Purwanto et al. (1990) reportaron un incremento

en la producción de calor del 27.3 y 48.5 % en vacas lecheras que produjeron 18.5 y 31.6 kg/d de leche, respectivamente, en comparación con vacas que no estaban en lactancia. Rhoads et al. (2009) realizaron un experimento en una cámara ambiental ubicada en Arizona, reportando una diferencia de 10.6 kg/d de leche en vacas Holstein que durante el primer periodo estuvieron bajo condiciones termoneutrales, pero que durante el segundo periodo estuvieron expuestas a un estrés calórico severo (ITH>80; en horas pico). En otro estudio, Khongdee et al. (2010) encontraron una disminución del 17% en la producción de leche de vacas cruzadas Holstein (87.5%) x Brahman (12.5%) estresadas por calor (ITH>80; en las horas más intensas del día), durante la prueba de dos tipos de sombras, una convencional y la otra con una malla aislante (Polysac Co., Bangkok, Thailand) que colocaron alrededor de la estructura de la sombra. Ellos mencionan que el promedio de producción de leche de las vacas bajo una sombra convencional disminuyó de manera muy rápida conforme fue avanzando el experimento en relación a las vacas sujetas a una sombra con malla aislante, lo que sugiere que el impacto provocado por el estrés calórico fue acumulativo en términos de la producción de leche, resultando en un periodo de lactación más largo y en una mayor producción de leche para las vacas sujetas a una sombra con malla aislante.

2.1.3.2 Grasa

Las respuestas en el porcentaje de grasa en leche pueden reducir desfavorablemente durante periodos de estrés calórico. Johnson (1976) reportó que el porcentaje de grasa puede verse afectado negativamente a causa de las altas temperaturas ambientales. Bajo estas condiciones, el porcentaje de grasa en

leche puede disminuir hasta 39.7% (Kadzere, et al., 2002). Bandaranayaka y Holmes (1976) reportaron una caída de 13 % en el porcentaje de grasa de vacas Jersey bajo estrés calórico. Los autores mencionan que esta caída fue correlacionada negativamente con la reducción del pH y la proporción de acetato contenida en el rumen en temperaturas de 30°C. West et al. (1999) usando vacas Holstein y vacas Jersey reportaron 3.24 y 3.21% de grasa en leche bajo un ambiente frío y un ambiente caliente, respectivamente. Kim et al. (2010) determinaron el efecto de la temperatura ambiental sobre la composición de la leche de vacas Holstein; las temperaturas fueron 20, 25 y 30°C y las respuestas fueron 3.76, 3.72 y 3.30%, respectivamente. Los autores mencionan que sólo hubo una tendencia en el efecto lineal. Rhoads et al. (2009) realizaron un experimento en una cámara ambiental bajo dos periodos experimentales, el primer periodo se realizó bajo condiciones termoneutrales y el segundo bajo condiciones de estrés calórico. Los autores indicaron que el porcentaje de grasa fue mayor (3.90 %) en las vacas del primer periodo en relación con el grupo de vacas del segundo periodo (3.56). Khondgee et al. (2010), aunque no reportaron cambios significativos en el porcentaje de grasa, observaron valores de 3.17 y 3.25 % en respuesta a los tratamientos que fueron dos tipos de sombras, una aislante contra una convencional, respectivamente. Aunque estudios previos han reportado un incremento en el porcentaje de grasa a altas temperaturas (32°C) (Johnson, 1965). Estudios más recientes realizados en cámara ambiental indican una reducción en la concentración de grasa (Shwartz et al., 2009). Esto sugiere que el factor estacional especialmente durante el verano que se caracteriza por tener altas temperaturas puede contribuir a la disminución del porcentaje de grasa.

2.1.3.3 Proteína

El porcentaje de proteína, al igual que el de grasa en leche, disminuye considerablemente en presencia de estrés calórico. Kadzere et al. (2002) reportan que esta disminución puede ser de hasta 17% en temperaturas ambientales altas. El estrés calórico disminuye la síntesis de proteína microbial en el rumen a consecuencia de una disminución en el consumo de materia seca producida por inapetencia (Staples y Thatcher, 2004). En acuerdo, Bernabucci et al. (2002) mencionan que el estrés calórico afecta la síntesis de proteína de la leche, especialmente la síntesis de la α y la β caseína. Por su parte, Adin et al. (2008) probaron dos dietas con el 12 y 18% de fibra detergente neutra en vacas Holstein estresadas por calor, observando similar 3.17 y 3.14% de proteína en leche, respectivamente. Similarmente, Bandaranayaka y Holmes (1976) reportaron una caída del 10% en el porcentaje de proteína de vacas Jersey bajo estrés calórico. Más recientemente, Rhoads et al. (2009) encontraron mayor proteína en leche durante un periodo frío (condiciones termoneutrales, 2.63 %), que en un periodo caliente (estrés calórico, 2.60 %). También, Shwartz et al. (2009) encontraron 2.81 y 2.59 % de proteína en leche en vacas Holstein durante un periodo frío y otro con estrés calórico, respectivamente. Aunque en algunos estudios no han reportando cambios en el porcentaje de proteína (Khondgee et al., 2010; Kim et al., 2010). No obstante, es evidente que el este porcentaje de proteína en leche disminuye a causa de las temperaturas ambientales altas.

2.1.3.4 Conteo de células somáticas

La mastitis es una de las enfermedades más costosas que afecta a la industria lechera (Blosser, 1979). Se estima que las pérdidas van de los 140 a los 300 dólares por vaca al año, lo cual se asocia a una reducción en la producción de leche debido a los casos de mastitis subclínica (Kirk y Bartlett, 1988). Tan solo en Estados Unidos las pérdidas fueron de alrededor de 2 billones de dólares (Harmon, 1994). Las bacterias más comunes involucradas en los casos de mastitis son los *Estafilococos aureus*, *Streptococos agalactiae*, bacterias coliformes y coccidias de origen ambiental. Las células somáticas en leche (CSL) son células blancas o leucocitos que se encuentran presentes dentro de un proceso inflamatorio. Las CSL comúnmente registradas después de una prueba de mastitis en leche son: macrófagos, linfocitos y neutrófilos polimorfonucleares. En vacas lecheras, el nivel de CSL es generalmente menor a 200 mil CSL. Aunque durante las primeras lactaciones éste número podría ser aun menor de 100 mil CSL. Un estudio demostró que el 50% de vacas sin infección presentó alrededor de 100 mil CSL/ml, y el 80% tuvo 200 mil CSL/ml (Eberhart et al., 1979). Un incremento anormal de las CSL indica inflamación en la ubre. Elvinger et al. (1991) en Florida, mostraron un incremento significativo de CSL en vacas estresadas por calor comparadas con vacas sin estrés. Los resultados fueron 145 y 105 mil CSL/ml, respectivamente. Esta diferencia contribuyó en parte a disminuir la producción de leche dentro del grupo de vacas estresadas por el calor. Shearer y Beede (1990) mencionan que la disminución en la producción de leche por efecto de tener altos niveles de CSL es de entre 10 y 20 % en ganado estresado por calor. Las CSL son regularmente bajas durante la época de invierno, pero altas durante el verano

(Dohoo y Meek, 1982), lo cual coincide con el incremento en la incidencia de mastitis clínica durante estos mismos meses de verano (Hogan et al., 1989; Paape et al., 1973; Smith et al., 1985). Smith et al. (1985) muestran que la tasa de infección con patógenos ambientales fueron altos durante el verano, y coincidió con un número alto de bacterias coliformes en la cama. Ellos mencionan que las altas temperaturas en combinación con la humedad pudieron haber incrementado la susceptibilidad a infección debido al incremento en el número de patógenos al cual estuvieron expuestas esas vacas en el estudio. Por otra parte, un estudio mostró la tasa de asociación entre mastitis clínica y el conteo de patógenos en la cama (Hogan et al., 1989). En este estudio los autores plantean que el estrés calórico o las altas temperaturas no son exactamente la causa del incremento de CSL. Este incremento de las CSL se debe más bien a que las tetas están más tiempo en contacto con los patógenos, lo que resulta en más infecciones durante los meses de verano.

2.2 Sistemas de enfriamiento en ganado lechero

Numerosos proyectos de investigación han mostrado que las explotaciones en confinamiento para establos lecheros ubicados en climas cálidos pueden ser modificados mediante la instalación de sistemas de enfriamiento (SE) que se basan en enfriamiento evaporativo para mejorar tanto la producción de leche como la eficiencia reproductiva del ganado (Armstrong et al., 2000; Flamenbaum et al., 1986; Ryan et al., 1992). Los SE basados en el enfriamiento evaporativo colocados en las sombras de los corrales de descanso o en las de otras áreas del establo, además de proporcionar protección contra la radiación solar, enfrían o

refrescan el entorno de la vaca. Estos sistemas han probado ser rentables para la producción animal en zonas con baja humedad relativa y en zonas húmedas cuando se presentan las horas pico de temperatura, por lo que la humedad relativa es baja. En este sentido, Berman (2006) menciona que el impacto del enfriamiento evaporativo sobre la temperatura del aire se reduce considerablemente a una humedad relativa mayor de 45%. El autor enfatiza que la velocidad del aire en los SE es importante para su uso en ambientes con elevada humedad relativa, sugiriendo un rango de 1 a 1.5 m/seg para que el enfriamiento evaporativo sea eficiente.

Actualmente se encuentran disponibles dos tipos de enfriamientos evaporativos: los aspersores y abanicos y las campanas evaporativas. Además de la instalación de SE en los corrales de descanso, otras áreas del establo lechero deben ser enfriadas. Por ejemplo, las vacas lecheras tienden a juntarse en la sala de espera, un lugar previo a la sala de ordeña donde el animal tiene un tiempo de espera variable, pero que generalmente es de al menos de 20 minutos. En este lugar saturado, la temperatura corporal puede aumentar rápidamente, por lo que la vaca experimenta estrés calórico con mayor intensidad que cualquier otro lugar del establo. En algunos establos de Arizona, también ha dado buen resultado la instalación de SE en las líneas de salida de la sala de ordeña. En estos lugares, la recomendación es de instalar solamente aspersores de agua para que cuando la vaca llegue a su corral, el aire de los abanicos evapore esa humedad y se refresque. Los comederos suelen también ser otro lugar donde se instalan equipos de enfriamiento, procurando que la vaca aumente su consumo de alimento al pasar más tiempo bajo el equipo. Se debe recordar que el efecto negativo más

importante es la reducción en el consumo de alimento, por lo que es una medida adoptada por muchos productores. En establos construidos con el sistema de echaderos, es también una práctica común la instalación de SE tanto en los lugares donde se echan las vacas para descansar como en donde se paran para comer.

2.2.1 Estrategias de enfriamiento para reducir el estrés calórico en ganado lechero

2.2.1.1 Vacas primíparas

Las vacas primíparas son las vacas de primer parto en producción, y es justo en esta etapa donde es importante mencionar, que aunque desde el punto de vista zootécnico y/o de manejo, estos animales se consideren vacas, pero es de notarse que desde un enfoque fisiológico estos animales siguen siendo vaquillas. Esto pudiera ser la razón por lo que la literatura es limitada en estudios sobre efectos de sistemas de enfriamiento en vacas primíparas, debido a que para incrementar el número de muestra y disminuir el error experimental, diversos estudios suman a vacas primíparas con multíparas. De cualquier forma, es posible que vacas primíparas bajo condiciones de estrés calórico respondan de la misma forma que las multíparas. West et al. (1999) probaron diferentes niveles de proteína en un periodo frío y otro caliente en vacas lecheras las cuales incluyeron vacas primíparas y multíparas. La producción de leche fue mejorada durante el periodo frío en comparación al periodo caliente. Bajo condiciones termoneutrales los requerimientos de proteína en vacas primíparas entrando a la primera lactación es de 13.5-15.0 % y en vacas frescas multíparas es de 17.5 % (NRC, 2001). Collier et al. (2003) probaron dos sistemas de enfriamiento sobre las respuestas

en vacas primíparas y multíparas por separado. Los sistemas de enfriamiento usados como tratamientos fueron el Korral Kool (KK, Korral Kool Inc., Mesa, AZ) y el ADS-ST (Advanced Dairy System Shade Tracker LLC, Chandler, AZ). La producción de leche no fue afectada por los tratamientos en cada grupo de vacas. Sin embargo, la tasa respiratoria de vacas primíparas fue menor en 14 resp/min con el tratamiento ADS-ST con respecto al KK. En tanto, cuando se probaron estos mismos tratamientos en vacas multíparas, el sistema de enfriamiento ADS-ST también resultó ser mejor que el KK, solo que para estos animales la diferencia sólo fue de 7 resp./min. Burgos et al. (2007) en un estudio similar probaron estos mismos tratamientos durante dos veranos seguidos (2004 y 2005) en Arizona. Los autores mostraron que en cada grupo de vacas, la producción de leche y el porcentaje de grasa no fueron diferentes durante el año 2004, no así con el porcentaje de proteína de las primíparas, ya que el sistema ADS-ST logró aumentar en 0.7%, en comparación con el KK. En el año 2005 el sistema de enfriamiento KK logró mejorar en 7 y 9% la producción de leche en vacas primíparas y multíparas, respectivamente, con respecto al ADS-ST. Las vacas primíparas durante esta etapa de su vida productiva aún se encuentran en una fase de crecimiento, y es aquí donde el ganar peso, desarrollar una buena ubre y alcanzar una talla considerable se convierten en temas de verdadero interés para el productor, porque de esto dependerá la salud y la productividad, así como las ganancias económicas para el futuro. Ahora bien, es importante considerar que todo este manejo representa un ambiente totalmente nuevo para ellas, lo que les provoca un inevitable estrés. Adicionalmente, si estos animales jóvenes se encuentran en zonas áridas, es de pensar que sufrirán también los efectos

negativos del estrés calórico. Por lo tanto, encontrar las estrategias de enfriamiento ideales para una mejor productividad sigue siendo un verdadero reto para los productores, por lo que es necesario seguir realizando investigación en este sentido.

2.2.1.2 Vacas multíparas

Las vacas lecheras con múltiples partos en condiciones de estrés calórico suelen ser las más afectadas en relación a vacas primíparas debido al mayor peso metabólico y nivel de consumo que demanda su alta producción de leche. Los sistemas de enfriamiento, si bien no resuelven en su totalidad la problemática acerca de los efectos negativos que provoca el estrés calórico sobre la producción de leche, si logran ayudar en cierto porcentaje las pérdidas de leche. Correa et al. (2002) reportaron una producción de 4 kg de leche/d más en vacas que fueron enfriadas a base de aspersores y abanicos durante 8 h continuas diariamente que vacas sólo con sombra. Asimismo, Avendaño et al. (2006) enfriaron con este mismo método vacas Holstein durante el periodo seco en tres veranos consecutivos, observando una mejora general del confort de los animales expresado en menor temperatura rectal y tasa respiratoria, una tendencia de mayor peso de las crías al parto, mayor producción de leche posparto y mayor producción de leche corregida por grasa. Igonó et al. (1987), cuando enfriaron durante 10 h a vacas Holstein estresadas por calor, observaron 2 L más de leche que vacas que se encontraban bajo la sombra. También, Igonó et al. (1992) observaron que enfriando durante 10.5 h a vacas Hosltein se producía 28% más leche que en vacas solo con sombra. Otra alternativa de enfriamiento es la

realizada por Flamenbaum et al. (1995), quienes trabajaron con un equipo de enfriamiento a base de aspersores y abanicos, el cual fue operado desde las 07.30 y hasta las 18.30 h (11 h) durante la fase de lactación (150 d) de vacas Holstein. Una vez que era encendido el quipo, este funcionaba de forma cíclica en periodos cortos de 4.5 min, seguido de una pausa de 30 seg antes de volver a continuar, y de la misma manera hasta completar un periodo de 30 min. Al final del día se formaban 7 periodos de 30 min con intervalos de encendido y apagado de 1.5 h entre cada periodo. Los autores mencionan que con esta estrategia el sistema de enfriamiento y la condición corporal no afectaron de manera individual a la producción de leche. Sin embargo, si se detectó una interacción entre el tratamiento otorgado con el sistema de enfriamiento, condición corporal y las semanas de lactación de las vacas usadas durante el experimento, las cuales reflejaron un pico de mayor producción de leche en el grupo de vacas enfriadas en comparación con el grupo de vacas sin enfriamiento.

3. EFECTO DE PERIODOS CORTOS DE ENFRIAMIENTO SOBRE LAS RESPUESTAS FISIOLÓGICAS Y PRODUCTIVAS DE GANADO LECHERO EXPUESTO A ESTRES CALORICO SEVERO. 1. VACAS PRIMIPARAS

3.1 Resumen

El objetivo de este experimento fue evaluar el efecto de periodos cortos de enfriamiento sobre las respuestas fisiológicas y productivas durante el verano. Se usaron 27 vacas de primer parto que se agruparon en uno de 3 tratamientos: testigo, 1 h de enfriamiento (T); 2 h de enfriamiento (AM); y 4 h de enfriamiento (AM+PM). El sistema de enfriamiento fue a base de aspersores y abanicos. La temperatura rectal, producción de leche, proteína en leche y producción de energía en leche fue similar entre todos los grupos, aunque las temperaturas de la piel fueron menores ($P < 0.05$) en el grupo AM+PM durante la mañana, pero mayores ($P < 0.01$) durante la tarde, en comparación a los grupos T y AM. La tasa respiratoria fue menor ($P < 0.01$) en el grupo AM+PM que en los grupos T y AM. Por otra parte, la grasa en leche fue mayor ($P < 0.05$) en vacas del grupo AM+PM. Esto se debe a que el periodo de enfriamiento más largo (4 h) mejoró las respuestas fisiológicas, así como la grasa en leche de vacas Holstein primíparas. En conclusión, se recomienda incrementar los periodos de enfriamiento en zonas áridas para lograr así mejorar el funcionamiento y confort de las vacas lecheras.

Palabras clave: Estrés calórico, ganado lechero, sistema de enfriamiento, grasa en leche.

3.2 Abstract

To evaluate effects of short periods of cooling on physiological and productive parameters during summer, 27 first parity cows were grouped into control, 1 h cooling (C); 2 h cooling (AM); and 4 h cooling (AM+PM). The cooling system consisted of misting and forced ventilation. Rectal temperature, milk production, milk protein, and milk energy output were similar among the groups, although, the skin temperatures were lower ($P<0.05$) in the AM+PM group during the morning but higher ($P<0.01$) in the afternoon, compared to C and AM groups. The respiratory rate was lower ($P<0.01$) in the AM+PM group than in C and AM groups. Conversely, milk fat was higher ($P<0.05$) in AM+PM cows. Because use of a 4 h cooling period enhanced some physiological parameters and milk fat in primiparous Holstein cows, we recommend increasing the cooling period in arid regions to achieve higher performance and comfort of dairy cows.

Keywords: Heat stress, dairy cattle, cooling system, milk fat.

3.3 Introducción

El ganado lechero es susceptible a los cambios climáticos es porque la mayoría de las razas con una alta producción de leche provienen de lugares o regiones frías. Por otro lado, en muchas regiones del mundo que presentan un clima árido, tales como las del Valle de Mexicali en México, la temporada de calor en el verano se ha vuelto más larga (García-Cueto et al., 2008), lo que provoca que las condiciones de estrés calórico se clasifiquen de moderado a severo en establos lecheros, índices de temperatura-humedad (ITH) que va de 75 a las 85 unidades (Avendaño-Reyes et al., 2006). Las vacas lecheras Holstein son particularmente susceptibles a estrés calórico porque poseen un gran carga de calor metabólico, como resultado de sus elevados requerimientos de mantenimiento y producción y crecimiento, en el caso de vacas primíparas. Los mecanismos termorregulatorios que sirven para mantener el balance térmico en la vaca lechera cuando existe una gran demanda de energía, sobre todo en la producción de leche y/o la eficiencia reproductiva (West, 2003). Los mecanismos termorregulatorios de tipo fisiológico que ocurren durante el proceso de estrés calórico pueden incluir el incremento de la tasa de sudoración, una mayor vasodilatación por el incremento en el flujo de la sangre en la superficie de la piel. Asimismo, también se incrementa la tasa respiratoria, se disminuye el consumo de materia seca y de otros nutrientes, se reduce la tasa metabólica y se altera el metabolismo del agua, por último, se altera la síntesis de varias hormonas. Desafortunadamente todas estas respuestas al estrés calórico que afectan negativamente la fisiología y el desempeño de vacas Holstein en lactación (Kadzere et al., 2002).

La tasa de crecimiento de las vaquillas de reemplazo si no se lleva a cabo de manera correcta puede causar pérdidas cuantiosas para los productores de leche, porque representan el futuro del establo (Cady y Smith, 1996). El inadecuado tamaño de las vacas durante el primer parto puede limitar la producción de leche y tasa de concepción durante la primera lactación (Hoffman et al., 1996). El excesivo consumo de energía, podría tener efectos negativos sobre el desarrollo de la glándula mamaria, el cual reduce en parte el tejido parenquimatoso formado por las células epiteliales (Harrison et al, 1983). Radcliff et al. (1997) proporcionaron cantidades adecuadas de proteína metabolizable en animales que recibieron dietas altas en energía, y no observaron cambios significativos en el desarrollo de la glándula mamaria. Se ha observado que el estado de la pubertad está asociado con el peso corporal, sin embargo, el peso no está relacionado de manera lineal con el crecimiento. Por otra parte, el crecimiento del parénquima de la glándula mamaria puede ser truncado antes del término final de la formación de todo el sistema alveolar de la glándula, si existe un consumo excesivo de energía antes de la pubertad (Van Amburgh et al., 1991).

Asimismo, el movimiento de las vacas de primera lactación hacia el área de producción representa un nuevo ambiente que incluye dietas nuevas, corrales y manejos nuevos, convivencia con vacas grandes y maduras las cuales ejercen su jerarquía dentro del corral, todo esto puede causar un estrés adicional al ocasionado por el estrés calórico. El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de tres periodos de enfriamiento sobre las respuestas fisiológicas y productivas de vacas Holstein primíparas durante el verano en una región árida.

3.4. Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en el establo lechero llamado “Santo Domingo”, ubicado en el Km 43 de la carretera federal Mexicali-San Felipe, en el valle de Mexicali, Baja California con una latitud 115.3° y una longitud de 32.2° , ubicado al noroeste del Estado de Baja California, México. Las condiciones climáticas de esta región son como las del Desierto de Sonora, las cuales alcanzan temperaturas máximas de 50°C durante el verano y temperaturas mínimas de -5°C durante el invierno, con una precipitación media anual de 85 mm (García, 1985). Todos los procedimientos realizados en los animales se llevaron a cabo según las normas oficiales para el cuidado animal (NOM-051-ZOO-1995: Trato humanitario en la movilización de animales). Veintisiete vacas Holstein primíparas (90-150 d postparto) fueron bloqueadas por producción de leche dentro de 9 grupos y fueron asignadas a uno de tres tratamientos: 1) T (grupo testigo), 9 vacas enfriadas antes de cada ordeña, la cual se llevaba a cabo a las 05.00 y 17.00 h; 2) AM, 9 vacas enfriadas a las 10.00 h y antes de cada ordeña; y 3) AM+PM, 9 vacas enfriadas a las 10.00, 15.00 y 22.00 h, también antes de cada ordeña. Los periodos de enfriamiento fueron de 60 min, excepto los de antes de la ordeña, los cuales fueron de 30 min. En total que el tiempo de enfriamiento diario fue de 1 h para el grupo testigo, 2 h para el grupo AM y 4 h para el grupo AM+PM. El enfriado de las vacas se llevó a cabo en la sala de lavado de las vacas, justo antes de entrar a la sala de ordeña, la cual tenía una dimensión de 6 m de ancho y 12.5 m de longitud con una orientación de este a oeste. El sistema de enfriamiento consistió en colocar 4 abanicos en el techo de la sala de lavado a 3.5 m del piso de concreto. Cada abanico tuvo un diámetro de 65 cm y contó con 4 aspersores de gota fina de

agua de 25 mm de diámetro, los cuales producían un gasto de agua de 7 L/h, por lo que el total de gasto de agua por abanico fue de 28 L/h. El motor de cada abanico fue de 1.1 HP que alcanzaba 1000 rpm. La velocidad del aire fue de 13.7 km/h a 6 m de distancia (el motor operó con 115/230 V y trabajó con corriente trifásica; el volumen del aire y la presión de agua fueron de 13,592 m³/h y 17.58 cm³, respectivamente). Los abanicos fueron colocados en pares a una distancia de 6 m entre ellos. Todas las vacas estuvieron bajo un sistema de confinamiento en corrales abiertos (60 x 60 m) uno junto del otro, con una sombra en medio y comedero al frente de ambos corrales. Las sombras de esos corrales fueron de 9 m de ancho y 30 m de largo con una orientación de norte a sur. Las vacas caminaron alrededor de 3 a 20 m a partir de la salida de cada corral y hasta la sala de lavado de las vacas. Después del tratamiento o del baño otorgado las vacas regresaron a su respectivo corral.

Las vacas rotaron en todos los tratamientos en periodos de 28 d, las variables de respuesta fueron colectadas durante la última semana de cada periodo. Los periodos de estudio fueron 3: 1er. periodo del 20 de Junio al 18 de Julio; 2do. del 19 de Julio al 15 de Agosto; 3er. periodo del 16 de Agosto al 12 de Septiembre. La alimentación de las vacas consistió en ofrecerles una dieta formada por concentrado (600 g/kg de consumo), heno de alfalfa (300 g/kg de consumo) y zacate sudan (100 g/kg de consumo). La dieta se ofreció diariamente a las 06.00 y 18.00 h, y esta se formuló según las recomendaciones del NRC (2001), conteniendo 958 g/kg de MS, 172 g/kg de PC, 40.8 g/kg de grasa y 41.7 g/kg de FDN. El acceso al agua estuvo disponible todo el tiempo.

Las variables de respuesta fueron colectadas en tres tiempos durante la última semana de cada periodo en todas las vacas, y estas fueron: temperatura rectal (TR), tasa respiratoria (TRes), temperatura de la piel (TP), producción de leche, y sus componentes (porcentaje de grasa y proteína). La TRes fue determinada a partir del número de respiraciones durante 30 seg y multiplicado por 2 para obtener las respiraciones por minuto (resp/min). Para obtener la TR, las vacas fueron llevadas al área de enfermería, en donde se usó un termómetro manual (Delta Trak[®], Pleasanton, CA, USA). La TP se tomó con un termómetro en forma de pistola, la cual incluía un sistema infrarrojo para obtener las temperaturas (Raytec[®], Santa Cruz, CA, USA) en la región de la nalga, flanco derecho y ubre dentro del corral, de esta manera se evitó en gran medida el movimiento de los animales. Todas estas variables fisiológicas fueron colectadas dos veces al día dentro de los días de muestro (martes, jueves y sábado) a las 09.30 y 14.30 h. La producción de leche fue registrada usando pesadores de leche Waikato (Inter Ag, Hamilton, New Zealand), y las muestras para el análisis de su composición fueron colectadas durante la primera ordeña en la mañana. El análisis de la grasa en leche se realizó mediante el método Gerber (International Dairy Federation, 1991) y el análisis de PC se realizó mediante el método Kjeldhal (Barbano et al., 1991). La producción de energía en leche (EL) se calculó a partir de la producción de leche (Leche), grasa en leche (Grasa) y proteína en leche (Proteína), mediante la siguiente fórmula (Tyrrell y Reid, 1965):

$$EL = \left(\frac{40.72 \times \text{grasa} + (22.65 \times \text{PC}) + 102.77}{1000} \right) \times 2.204 \text{ leche}$$

La condición corporal (CC) fue evaluada por dos personas sobre una escala de cinco puntos, donde “1” correspondía a una vaca demasiado flaca y “5” a una

demasiado obesa (Wildman et al., 1982). El resultado obtenido por ambas personas fue promediado dentro de las mismas vacas y el periodo. La información del estado meteorológico se obtuvo de la Estación Climatológica Experimental del ICA-UABC, localizada en el Valle de Mexicali a 20 km del lugar de experimentación. Las variables climáticas colectadas por hora fueron temperatura ambiental (TA, °C) y humedad relativa (HR, %) máximos y mínimos. Con estas variables, se calculó el ITH de la siguiente fórmula propuesta por Hahn (1999):

$$\text{ITH} = (0.81 \times \text{TA}) + \text{HR} (\text{TA} - 14.4) + 46.4$$

Los promedios semanales de las variables de respuesta (CC, TR, TRes, TP, producción de leche, grasa en leche, proteína en leche y producción de energía en leche) fueron analizados por un Diseño Cuadro Latino usando un efecto aleatorio bajo el procedimiento del PROC MIXED del SAS (SAS Institute Inc., 2004). La estructura de varianza-covarianza fue seleccionada con base en dos criterios: El criterio de información Akaike y el Bayesiano. La estructura de covarianza que estuvo lo más cercano al cero (componentes de la varianza por el método de probabilidad máxima residual estimada) fue la que se seleccionó (Littell et al., 1996). El efecto lineal para estas variables incluyó el efecto de bloque (clasificado en 9 categorías), tratamiento (3 categorías), periodo (3 categorías) y la interacción tratamiento con bloque. Las vacas dentro del bloque fueron designadas como un efecto aleatorio. Las comparaciones hechas por contrastes ortogonales fueron T contra AM+PM (vacas enfriadas 1 h contra 4 h), AM contra AM+PM (vacas enfriadas 2 h contra 4 h). Las medias mínimos cuadráticas y los errores estándar de la media fueron reportados, así como el nivel de significancia

de $P < 0.05$, mientras que una tendencia fue considerada cuando existió $0.10 < P < 0.15$.

3.5 Resultados y discusión

Los valores máximos y mínimos para temperatura, humedad relativa e ITH por mes durante el estudio se muestran en el cuadro 1 y figura 1. La temperatura ambiental máxima fue de 47.2°C en el mes de Julio y la mínima de 19.8°C se registró en el mes de Junio. El ITH máximo fue de 95.5 unidades y el mínimo fue de 63.3 unidades, ambos registrados en el mes de Junio.

Cuadro 1. Promedios diarios máximos y mínimos para las variables climáticas temperatura ambiental (AM), humedad relativa (HR) e índice de temperatura-humedad (ITH).

Mes	Mínima diaria			Máxima diaria			Promedio diario		
	AM	HR	ITH	AM	HR	ITH	AM	HR	ITH
Junio									
Semana 1	19.8	7.9	63.9	42.5	76.3	84.4	29.6	27.8	74.1
Semana 2	20.0	7.0	65.9	44.3	72.7	95.5	32.4	31.7	77.7
Semana 3	23.7	9.5	67.8	43.8	53.0	94.7	34.7	33.8	81.9
Semana 4	25.4	8.6	69.8	44.6	59.2	95.3	35.4	31.4	81.7
Julio									
Semana 1	26.0	7.3	73.3	47.2	85.0	87.6	36.0	33.5	81.8
Semana 2	27.4	6.0	70.8	43.2	69.7	86.4	34.2	33.5	80.2
Semana 3	28.0	11.6	74.3	45.4	74.4	87.3	35.5	34.7	81.8
Semana 4	28.1	13.1	78.0	43.5	72.2	87.3	34.7	42.5	82.5
Agosto									
Semana 1	24.9	6.5	69.3	43.4	78.3	86.2	34.1	39.6	81.0
Semana 2	29.1	11.9	76.2	45.3	68.6	87.5	37.1	31.3	83.0
Semana 3	29.1	8.0	78.1	46.2	78.5	87.0	35.7	41.6	83.4
Semana 4	29.5	12.8	77.1	45.3	76.5	87.9	37.5	31.9	83.6
Septiembre									
Semana 1	27.8	13.9	76.4	46.2	80.6	88.7	36.1	38.4	83.3
Semana 2	26.0	9.2	71.6	44.2	73.1	86.7	35.5	27.1	80.4

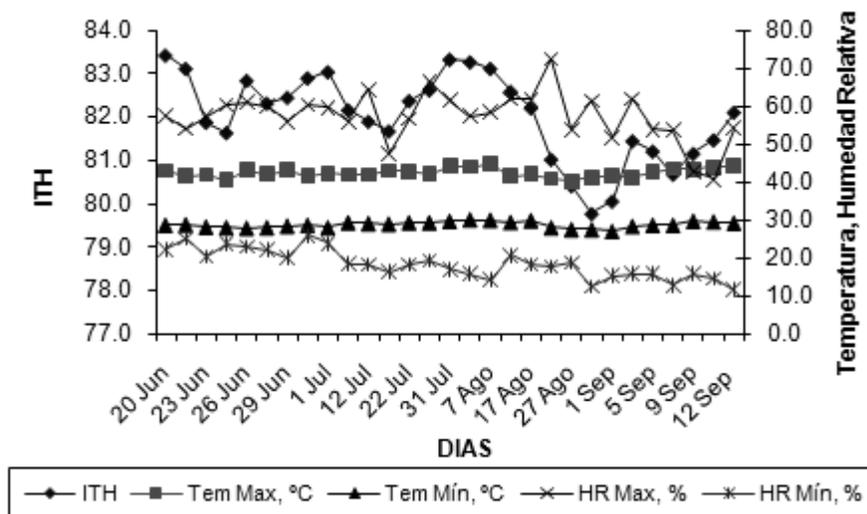


Figura 1. Promedio del índice de temperatura-humedad, temperatura ambiental y humedad relativa máximas y mínimas registradas durante el estudio.

Un valor de ITH de 72 unidades es considerado como el punto en el cual la vaca lechera Holstein inicia con los efectos negativos del estrés calórico. Los valores de ITH de 70 unidades se consideran como confortables, de 72 a 78 unidades como estresantes y mayor a 78 se considera como un estrés de peligro moderado (Armstrong, 1994; West, 2003). En el ganado lechero durante este experimento (Figura 1), el promedio mínimo diario de ITH nunca estuvo en la zona de confort, en el cual se empieza a considerar como estrés calórico (ITH = 72 unidades) más aún, solo en una semana el promedio de ITH estuvo por debajo de las 80 unidades, lo que sugiere que el estrés calórico fue severo durante la mayor parte del estudio. El Desierto de Sonora, como hábitat terrestre, es considerado una zona que presenta relativamente condiciones climáticas extremas (García-Cueto et al., 2008), y estas condiciones durante el estudio fueron consideradas agudas, ya que las vacas absorbieron más calor del que pudieron perder. Las

vacas lecheras tienen la capacidad de regular su temperatura corporal interna, poniendo al mismo nivel la cantidad de calor producido durante su metabolismo y el calor que fluye del animal hacia el exterior en el ambiente circundante. Las altas temperaturas y la humedad del ambiente restringen la disipación del calor de la superficie del cuerpo, lo que cual puede llevar a un flujo retrógrado. Incrementándose considerablemente la temperatura del cuerpo, misma que puede ser perdida a través de la síntesis de la leche (Igono et al., 1992; Kadzere et al., 2002).

Una evidencia fisiológica clara como respuesta termorregulatoria durante el tiempo prolongado de exposición al calor que tuvieron las vacas durante el presente estudio fue la TRes (Cuadro 2). Durante la mañana, la TRes en el grupo T fue 5% mayor ($P < 0.01$) que en el grupo AM+PM, y durante la tarde esta diferencia excedió el 8% ($P < 0.01$). Brown-Brandl et al. (2005) establecieron que la TRes es el principal indicador para el estrés calórico porque es afectada considerablemente en diversas categorías del estado del tiempo basadas a partir del ITH. Como la TRes se incrementa a medida que se incrementa la temperatura ambiente, la TRes suele ser alta durante la tarde.

El reflejo del jadeo durante el verano es típico en las vacas lecheras, ya que determina un efecto de enfriamiento debido a la exposición de la boca y la lengua en la atmosfera. El incremento de la TRes durante periodos de estrés calórico es parte esencial dentro de la pérdida de calor en el cuerpo porque existe un intercambio térmico durante el proceso de la respiración (Yousef, 1985).

Cuadro 2. Promedio de las variables fisiológicas en vacas Holstein primíparas bajo varios tres estrategias de enfriamiento durante el estudio.

	Tratamientos				Contrastes	
	T	AM	AM+PM	EE	T vs. AM+PM	AM vs. AM+PM
Condición corporal	3.44	3.44	3.43	0.0256	0.6266	0.6979
Temperatura rectal, °C	38.95	38.95	38.97	0.1184	0.8742	0.9063
Temperatura de piel						
Nalga AM, °C	34.44	34.34	33.16	0.1538	<0.0001	<0.0001
Nalga PM, °C	34.49	35.96	36.11	0.1487	<0.0001	0.4879
Costado derecho AM, °C	34.59	34.46	33.29	0.1523	<0.0001	<0.0001
Costado derecho PM, °C	34.65	36.14	36.29	0.1255	<0.0001	0.4049
Ubre AM, °C	34.91	34.77	33.51	0.1458	<0.0001	<0.0001
Ubre PM, °C	34.71	36.30	36.38	0.1679	<0.0001	0.7399
Tasa respiratoria						
AM, respiraciones/min	95.52	96.63	91.32	1.1661	0.0018	0.0001
PM, respiraciones/min	104.93	103.44	96.80	1.3576	<0.0001	<0.0001

Nota: T=testigo; AM=testigo + enfriamiento 1000 h; AM+PM =testigo + enfriamiento 1000, 1500 y 2200 h.

La TR fue similar en todos los grupos de tratamiento de vacas primíparas (~38.95°C) y no alcanzó el promedio de 39°C (Cuadro 2), lo que sugiere que estas vacas lecheras se consideran como animales jóvenes que pueden tolerar una gran carga de calor debido a que tienen una tasa de sudoración más alta que las vacas maduras (Avendaño-Reyes et al., 2010). Esto hace que el calor por cada kilogramo de peso vivo disminuya la sudoración. Asimismo, también se sabe que las vacas primíparas tienen menores producciones de leche, menos consumo de MS, y como consecuencia, tienen menor carga de calor metabólico. Una producción alta en una vaca Holstein (> 45 kg/d de leche) hace que pierda más energía en forma de calor que produciendo leche, pues la vaca lechera es una especie con un bajo nivel de tolerancia al estrés por calor (West, 2003).

Durante la mañana, la TP de la nalga (33.2°C), costado derecho (33.3°C), y ubre (33.5°C) fueron menores ($P<0.01$) en vacas AM+PM que en vacas T (34.4, 34.6, 34.9°C, respectivamente) y AM (34.3, 34.5, 34.8°C, respectivamente) (Cuadro 2). Sin embargo, durante la tarde, la TP fue mayor ($P<0.01$) en vacas AM+PM (nalga 36.1°C, costado derecho 36.3°C y ubre 36.4°C) que en vacas T (34.5, 34.7, 34.7°C, respectivamente). Mientras tanto, la TP de los grupos AM+PM y AM fueron similares durante la tarde. Durante la mañana, la TP indicó que el enfriamiento durante la noche en el grupo AM+PM fue efectivo, porque las vacas mantuvieron una temperatura corporal baja antes de las horas de calor que ocurrían durante el día. Sin embargo, durante la tarde, cuando la temperatura ambiental y la radiación solar estaban en su punto máximo, se notó que las vacas del grupo AM+PM experimentaron mayor actividad dentro del corral, se acercaban al comedero o al bebedero para comer o beber agua, debido a que el tiempo de enfriamiento fue mayor para estas vacas. En contraste, las vacas de los tratamientos T y AM estuvieron más tiempo postradas debajo de la sombra durante la tarde, las cuales no presentaron ningún movimiento en relación a las vacas del grupo AM+PM. Estos eventos se basan en la observación que se realizó durante el desarrollo de este experimento, aunque este comportamiento de las vacas no haya sido medido.

Las vacas enfriadas 4 h/d produjeron más grasa en leche (37 g/kg) que las vacas de los grupos T y AM (35.1 g/kg en ambos grupos) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Promedio de las variables de producción en vacas Holstein primíparas bajo tres estrategias de enfriamiento durante el estudio.

	Tratamientos				Contrastes	
	T	AM	AM+PM	EE	T vs. AM+PM	AM vs. AM+PM
Leche, Kg	16.16	16.27	16.12	0.4607	0.9005	0.6449
Grasa, g/kg	35.4	35.1	37.0	0.1082	0.0601	0.0219
Proteína, g/kg	34.1	33.8	33.7	0.0606	0.5294	0.8398
Producción de energía en leche, MCal/d	11.90	12.09	12.06	0.3742	0.6511	0.9268

Nota: T=testigo; AM=testigo + enfriamiento 1000 h; AM+PM =testigo + enfriamiento 1000, 1500 y 2200 h.

Mientras que diversos investigadores han encontrado una disminución de grasa en leche como resultado de una exposición al estrés calórico (Kadzere et al., 2002; Rhoads et al., 2009), otros no han observado cambios sobre esta variable en diferentes ambientes (Burgos et al., 2007; Shwartz et al., 2009). La disminución de la grasa en leche es el resultado de la exposición al calor, el cual se asocia con una disminución del consumo de forraje y un subsecuente cambio en la proporción de acetato a propionato (Collier, 1985). Parcialmente consistente con los resultados encontrados en este estudio, Amenu et al. (2004) reportaron que las vacas bajo un sistema de enfriamiento y que comieron una dieta de alta calidad durante los meses de verano tuvieron una proporción mayor de grasa y caseína en la leche. Estas vacas también produjeron más queso por cada 100 kg de leche, con una mayor producción de humedad-sal-caseína-grasa-ajustada y una mayor eficiencia productiva, comparadas con leche de vacas sin acceso a un sistema de enfriamiento y que aparte comieron una dieta de menor calidad. Como consecuencia del estrés calórico, la proporción de grasa en leche es reducida por un incremento relativo de los ácidos grasos de cadena larga que resultan por una disminución en los niveles de acetato circulantes, debido a una disminución en el

consumo de fibra (Thompson, 1985; Baumgard et al., 2000). Una reducción en el flujo de sangre en la glándula mamaria también puede ocurrir durante el estrés calórico; el cortisol y la hormona de crecimiento pueden influenciar el metabolismo mamario, ya que el cortisol puede alterar el suministro de glucosa en las células epiteliales de la glándula mamaria, mientras que la hormona de crecimiento puede alterar la circulación de los ácidos grasos de cadena larga y de las enzimas lipogénicas dentro de la ubre (Bell y Bauman, 1997; Itoh et al., 1998).

La variabilidad de condiciones en el cual los sistemas de enfriamiento pudieran ser efectivos, así como su modo de acción en vacas lecheras, aún no está clara. Este estudio fue un esfuerzo para identificar los periodos en el cual un sistema evaporativo puede ser usado eficientemente para el alivio de vacas de primera lactación.

3.6 Conclusión

Los resultados de esta investigación indicaron que en vacas primíparas el largo de los periodos de enfriamiento mejora el estado de confort de los animales pero no modifican el nivel de producción de leche bajo diversas condiciones de estrés calórico. Solo la tasa respiratoria y la proporción de grasa en leche fueron las respuestas más influenciadas por el largo del enfriamiento.

4. EFECTO DE PERIODOS CORTOS DE ENFRIAMIENTO SOBRE LAS RESPUESTAS FISIOLÓGICAS Y PRODUCTIVAS DE GANADO LECHERO EXPUESTO A ESTRES CALORICO SEVERO. 2. VACAS MULTIPARAS

4.1 Resumen

El objetivo de este experimento fue evaluar el efecto de dos periodos cortos de enfriamiento sobre las respuestas fisiológicas y productivas de vacas Holstein en lactación bajo condiciones de calor severo. Treinta y nueve vacas fueron bloqueadas por producción de leche para ser asignadas a uno de tres tratamientos: grupo testigo (T), vacas enfriadas 30 min antes de la ordeña (05.00 y 17.00 h, 1 h de enfriamiento); grupo AM, vacas enfriadas 1 h a las 10.00 h y 30 min antes de cada ordeña (2 h de enfriamiento); y grupo AM+PM, vacas enfriadas 1 h a las 10.00, 15.00 y 22.00 h, además 30 min antes de cada ordeña (4 h de enfriamiento). El sistema de enfriamiento fue colocado en la sala de baño, previo a la de ordeña, donde las vacas fueron desplazadas desde su respectivo corral para asignarles los tiempos de enfriamiento. La tasa respiratoria y las temperaturas de la nalga y costado derecho fueron menores ($P<0.05$) en el grupo de vacas AM+PM que en las vacas de los grupos AM y T durante la tarde, pero fue menor ($P<0.05$) que el grupo AM durante la mañana. La temperatura rectal fue similar ($P>0.05$) en los tres grupos de vacas. Las concentraciones de tiroxina tendieron a ser mayores ($P<0.10$) en el grupo T con respecto de los grupos AM y AM+PM. El grupo AM+PM mostró una mayor ($P<0.05$) producción de leche que el grupo T (18.70 vs. 17.43 kg, respectivamente). También las vacas del grupo AM+PM exhibieron una tendencia ($P<0.10$) a incrementar la energía en leche, con respecto a los grupos T

y AM (13.75 vs. 13.18 y 13.15 MCal, respectivamente). El porcentaje de proteína, grasa en leche, condición corporal, glucosa, colesterol, triglicéridos y triiodotironina fueron similares ($P>0.05$) entre los tres grupos. El grupo enfriado durante 4 h con un equipo de aspersores y abanicos durante altas temperaturas, representa una alternativa para observar una mejoría moderada en la producción de leche de vacas Holstein en lactación, sin embargo, se sugiere proporcionar más tiempo de enfriamiento para incrementar la productividad de vacas Holstein en lactación.

Palabras clave: Estrés calórico, enfriamiento artificial, producción de leche, índice de temperatura-humedad, grasa en leche.

4.2 Abstract

The objective of this study was to evaluate the effect of two short-term cooling periods on physiological and productive status of lactating Holstein cows during hot ambient temperatures. Thirty nine multiparous cows were blocked by milk yield and were assigned to three treatments being: control group (C), cows cooled before milking time by 30 min (05.00 and 17.00 h daily, 1 hour cooling); AM group, cows cooled at 10.00 h and before milking (2 hours cooling); and AM + PM group, cows cooled at 10.00, 15.00 and 22.00 h, as well as before milking (4 hours cooling). The cooling system was placed in the holding pen where the cows were moved throughout cooling times. Respiratory rate, and temperatures of thurl and right flank were lower ($P < 0.05$) in cows from AM+PM group than AM and C cows during the morning and during the afternoon; however, udder temperature was higher in AM + PM group compared to AM and C groups during the afternoon, but was lower than AM group during the morning. Rectal temperature was similar ($P < 0.05$) in the three groups. Thyroxin concentrations tended ($P < 0.10$) to be higher in C group related to AM and AM+PM groups. The AM+PM group showed higher ($P < 0.05$) milk production than C group (18.70 vs. 17.43 kg respectively). Also, AM+PM cows exhibited a trend ($P < 0.10$) to increase milk energy output than C and AM groups (13.75 vs. 13.18 and 13.15 MCal, respectively). Protein and fat in milk, body condition score, glucose, cholesterol, triglycerides and triiodothyronine were similar ($P > 0.05$) among the three groups.

Four hours of cooling with spray and fans during severe summer temperatures represents an alternative to observe a modest improvement in milk

yield of lactating Holstein cows, however, more time of cooling is needed to enhance overall performance of lactating Holstein cows.

Keywords: Heat stress, artificial cooling, milk production, temperature-humidity index, milk fat.

4.3 Introducción

Los efectos del calentamiento global tienen un especial efecto en regiones áridas y semi-áridas, resultando en veranos más largos y calurosos. Una gran parte del noroeste de México está situada en esta región de modo que la industria lechera experimenta cada año veranos más calurosos (Chacón et al., 2010). El funcionamiento de la vaca lechera es afectado negativamente por dos fuentes de calor: la primera es el calor producido precisamente por el ambiente y la segunda es el producido internamente por el metabolismo basal. Esta última fuente de calor quizá sea el factor menos importante, pero si la producción de leche o el consumo de alimento se incrementan, se producirá más calor derivado del metabolismo de los nutrientes, el cual puede causar estrés calórico por la combinación del calor metabólico y las altas temperaturas del ambiente (Fuquay, 1981).

El índice de temperatura-humedad (ITH) sirve para determinar el grado de estrés calórico que afecta a los rumiantes y se obtiene combinando la temperatura ambiente y la humedad relativa. Las vacas Holstein en lactación son especialmente susceptibles al estrés calórico que se presenta cuando el ITH excede de 72 unidades, mientras que el estrés calórico severo ocurre a partir de 80 unidades de ITH (Armstrong, 1994). El efecto más importante del estrés calórico sobre el ganado es la disminución del consumo de materia seca, lo cual afecta la producción de leche y las funciones reproductivas cuando las vacas lecheras son expuestas a un ambiente caliente o un ambiente caliente y húmedo en periodos de 5 semanas (Arieli et al., 2004). Otros efectos de tipo fisiológicos y de comportamiento que ocasiona estrés calórico sobre el ganado son el incremento de: consumo de agua, la tasa respiratoria, transpiración y jadeo; así

como la disminución de la tasa de pasaje del alimento y del flujo sanguíneo hacia órganos internos, lo cual altera finalmente la secreción y disponibilidad de las hormonas relacionadas con las funciones metabólicas, productivas y reproductivas de las vacas lecheras en lactación (Kadzere et al. 2002; West 1999).

Investigaciones recientes reportan temperaturas del cuerpo con el uso de termómetros en forma de pistola y con tecnología infrarroja, lo que se considera confiable para registrar la temperatura de las diferentes partes de la piel de los animales; otra ventaja es que cuando se realice la lectura de la temperatura se pueda hacer a cierta distancia, sin la necesidad de que el animal tenga que moverse. Si la temperatura de la superficie de la piel está por debajo de los 35°C, el gradiente de temperatura entre la base y la piel es bastante grande para que los animales utilicen eficazmente las 4 rutas de intercambio de calor (convección, conducción, radiación y evaporación; Collier et al., 2006).

Las vacas lecheras en lactación se caracterizan por ser unas verdaderas máquinas para producir calor, por lo que, ellas necesitan liberar gran cantidad de calor metabólico de manera continua. Una de las formas para reducir los efectos del estrés calórico es utilizar sistemas de enfriamiento artificial. El principio de estos sistemas consiste en humedecer la piel del animal con aspersores de agua para refrescar a las vacas a través del aire emitido por los abanicos (Gebremedhin y Wu, 2001). Los sistemas de enfriamiento basados en aspersores y abanicos han demostrado tener un impacto positivo sobre la productividad de vacas Holstein en lactación en regiones áridas, ya que reducen la temperatura del cuerpo a través de la evaporación.

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de dos periodos cortos de enfriamiento usando un sistema de enfriamiento a base de aspersores y abanicos, sobre las respuestas fisiológicas y productivas de vacas Holstein en lactación bajo condiciones de calor severo.

4.4 Materiales y métodos

Considerando la producción de leche y los días en leche, 39 vacas Holstein multíparas (de 2 a 4 partos) fueron asignadas a uno de tres tratamientos: grupo testigo (T), 13 vacas con dos tiempos de enfriamiento de 30 min cada uno por día antes de la ordeña, a las 05.00 y 17.00 h (1 h de enfriamiento); grupo AM, 13 vacas enfriadas a las 10.00 h además de T (2 h de enfriamiento); grupo AM+PM, 13 vacas enfriadas a las 10.00, 15.00 y 22.00 h además de T (4 h de enfriamiento).

El sistema de enfriamiento fue colocado en la sala de baño y consistió en cuatro abanicos de 64 cm de diámetro cada uno, que a su vez contenían 4 válvulas de 25 mm de diámetro cada una, liberando 7 L de agua por hora, por lo tanto, cada abanico emitió 28 L de agua por hora. El motor de cada abanico fue de 1.1 HP que alcanzaba 1000 rpm; la velocidad del aire fue de 13.7 km/h a 6 m de distancia (el motor operó con 115/230 V y con corriente trifásica). El volumen del aire y la presión de agua fueron 13,592 m³/h y 17.58 cm³, respectivamente. Los abanicos fueron colocados en pares a una distancia de 6 m entre ellos.

Todas las vacas estuvieron bajo un sistema de confinamiento en corrales abiertos (60 x 60 m) y adyacentes, con una sombra en medio y comedero al frente de ambos corrales. Las sombras de los corrales tenían las siguientes

dimensiones: 9 m de ancho y 30 m de largo con una orientación de norte a sur. Las vacas caminaron entre 3 y 20 m a partir de la salida de cada corral y hasta la sala de baño. Después del enfriamiento otorgado las vacas, éstas regresaban a su respectivo corral.

Las vacas rotaron en todos los tratamientos en periodos de 28 d y las variables de respuesta fueron colectadas durante la última semana de cada periodo. Los periodos de estudio fueron 3: 1er. periodo del 20 de Junio al 18 de Julio; 2do. del 19 de Julio al 15 de Agosto; y 3er. periodo del 16 de Agosto al 12 de Septiembre. La alimentación de las vacas durante el período experimental consistió en una dieta formulada en base a los requerimientos que marca el NRC (2001; 958 g/kg de MS, 172 g/kg de PC, 40.8 g/kg de extracto etéreo y 41.7 g/kg de FDN), dicha dieta contenía alimento concentrado (600 g/kg de consumo), heno de alfalfa (300 g/kg de consumo) y zacate sudan (100 g/kg de consumo). La dieta se ofrecía diariamente las 06.00 y 18.00 h. El agua se ofreció a libre acceso.

Las variables de respuesta fueron colectadas en tres tiempos durante la última semana de cada periodo, en todas las vacas, e incluyeron la temperatura rectal (TR), tasa respiratoria (TRes), temperatura de la piel (TP), producción de leche, así como sus componentes (porcentaje de grasa y proteína). La TRes fue determinada a partir del número de respiraciones durante 30 seg y multiplicado por 2 para obtener las respiraciones por minuto (resp/min). Para obtener la TR, las vacas fueron llevadas al área de enfermería, en donde se usó un termómetro manual (Delta Trak[®], Pleasanton, CA, USA). La TP se registró con un termómetro en forma de pistola con un sistema infrarrojo para obtener las temperaturas (Raytec[®], Santa Cruz, CA, USA) en la región de la nalga, flanco derecho y ubre

dentro del corral, evitando así en gran medida el movimiento de los animales. Todas estas variables fisiológicas fueron colectadas dos veces al día dentro de los días de muestro, a las 09.30 y 14.30 h. La producción de leche fue registrada usando pesadores de leche Waikato (Inter Ag, Hamilton, New Zealand) y las muestras para el análisis de su composición fueron colectadas durante la primera ordeña de la mañana. El análisis de la grasa en leche se realizó mediante el método Gerber (International Dairy Federation, 1991) y el análisis de proteína en leche se realizó con el método Kjeldhal (Barbano et al., 1991). La energía en leche (EL) se calculó a partir de la producción de leche (Leche), grasa en leche (Grasa) y proteína en leche (Proteína), mediante la siguiente fórmula (Tyrrell y Reid, 1965):

$$EL \text{ (Mcal/d)} = \left(\frac{[40.72 \times \text{Grasa}] + (22.65 \times \text{Proteína}) + 102.77}{1000} \right) \times 2.204 \text{ leche}$$

La condición corporal (CC) fue evaluada por dos personas sobre una escala de cinco puntos, donde “1” correspondía a una vaca demasiado flaca y “5” a una demasiado obesa (Wildman et al., 1982). El resultado obtenido por ambas personas fue promediado dentro de las mismas vacas y el periodo. La información del estado meteorológico se obtuvo de la Estación Climatológica Experimental del ICA-UABC, localizada en el Valle de Mexicali a 20 km del lugar de experimentación. Las variables climáticas colectadas por hora fueron temperatura ambiental (TA, °C) y humedad relativa (HR, %), máximos y mínimos. Con estas variables se calculó el ITH usando la siguiente fórmula propuesta por Hahn (1999):

$$ITH = (0.81 \times TA) + HR (TA - 14.4) + 46.4$$

Los promedios semanales de las variables de respuesta (CC, TR, TRes, TP, producción de leche, grasa en leche, proteína en leche y energía en leche) fueron analizados por un Diseño Cuadro Latino usando un efecto aleatorio bajo el

procedimiento MIXED del SAS (SAS Institute Inc., 2004). La estructura de varianza-covarianza se seleccionó usando dos criterios: el criterio de información Akaike y el Bayesiano. La estructura de covarianza que estuvo más cercana al cero (componentes de varianza por la probabilidad de máxima verosimilitud) fue la que se seleccionó (Littell et al., 1996). El modelo lineal incluyó los efectos de bloque (clasificado en 9 categorías), tratamiento (3 categorías), periodo (3 categorías) y la interacción tratamiento con bloque. Las vacas dentro del bloque fueron designadas como el efecto aleatorio. Las comparaciones hechas por contrastes ortogonales fueron T contra AM+PM (vacas enfriadas 1 h contra 4 h) y AM contra AM+PM (vacas enfriadas 2 h contra 4 h). Los valores reportados son medias mínimo-cuadráticas y sus errores estándar, así como el nivel de significancia de $P < 0.05$; una tendencia fue considerada cuando existió $0.10 < P < 0.15$.

Este estudio se condujo en un rancho comercial dedicado a la producción de leche en el Valle de Mexicali (latitud 115.3° y longitud de 32.2°), ubicado al noroeste del Estado de Baja California, México. Las condiciones climáticas de esta región son como las del Desierto de Sonora, las cuales alcanzan temperaturas máximas de 50°C durante el verano y temperaturas mínimas de -5°C durante el invierno, con una precipitación media anual de 85 mm (García, 1985). Todos los procedimientos realizados en los animales se llevaron a cabo según las normas oficiales para el cuidado animal (NOM-051-ZOO-1995: Trato humanitario en la movilización de animales).

4.5 Resultados

La temperatura máxima y mínima registrada durante el periodo experimental fue de 48 y 30 °C, y la humedad relativa fue de 70 y 10 %, respectivamente (Figura 2).

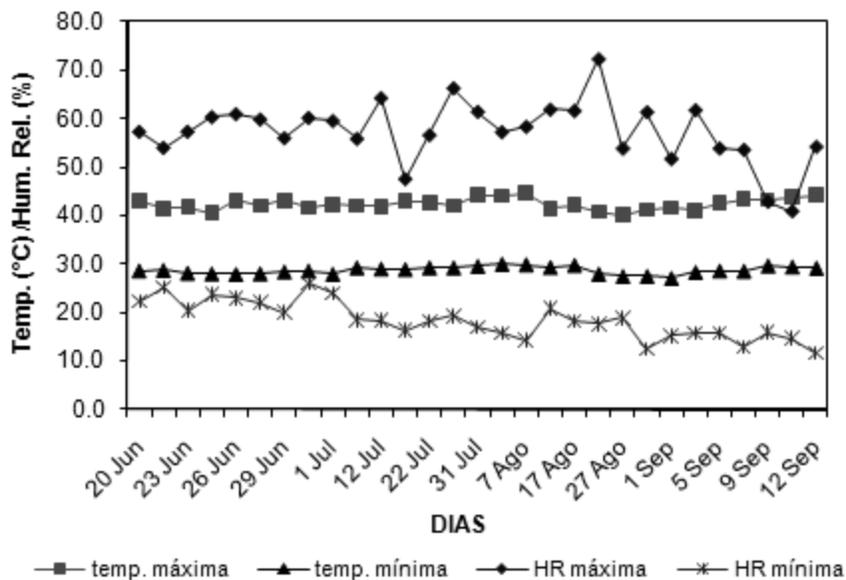


Figura 2. Temperatura ambiental y humedad relativa máximas y mínimas registradas durante el estudio.

El promedio máximo de los valores para ITH alcanzó las 90 unidades, mientras que el promedio mínimo de ITH fue consistentemente por encima de las 72 unidades durante el periodo experimental (Figura 3).

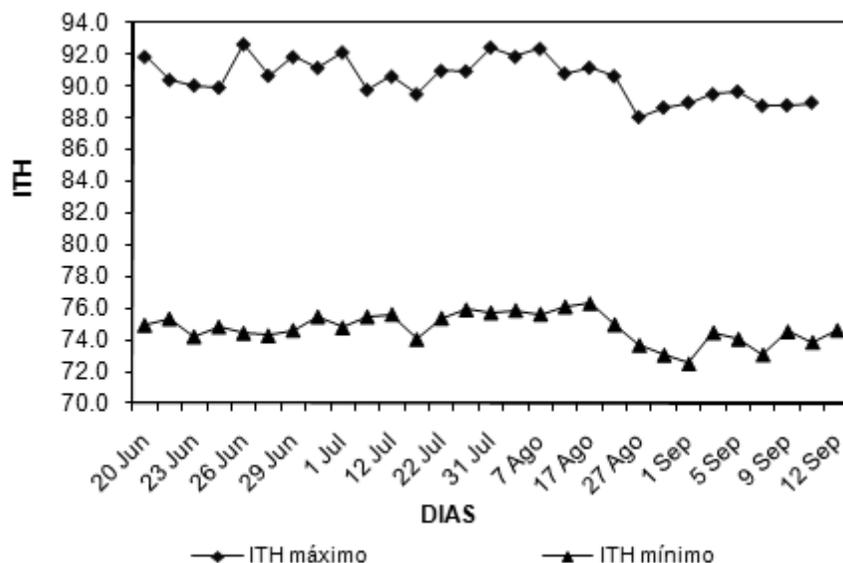


Figura 3. Índice de temperatura-humedad máximo y mínimo registrado durante el estudio.

El cuadro 4 incluye las variables fisiológicas para los tres grupos de tratamiento. La CC tendió ($P < 0.10$) a ser mayor en las vacas del grupo T (3.49 vs. 3.45 unidades) en comparación con el grupo AM+PM. La temperatura de la región de la nalga (33.53 vs. 33.91 y 34.24°C) y costado derecho (33.63 vs. 34.01 y 34.42°C) durante la mañana fueron menores ($P < 0.05$) en las vacas del grupo AM+PM en comparación con los grupos T y AM, sin embargo, la temperatura de la ubre fue similar ($P > 0.05$) entre los grupos T y AM+PM, siendo este último grupo diferente de AM ($P < 0.05$). Mientras tanto, durante las horas de la tarde, los grupos T y AM tuvieron temperaturas menores ($P < 0.05$) que el grupo AM+PM en la región de la nalga (34.57 y 35.74 vs. 36.33°C), costado derecho (34.48 y 35.73 vs. 36.38°C) y ubre (34.70 y 36.00 vs. 36.62°C). La TRes fue menor ($P < 0.05$) en el grupo AM+PM (86.53 resp/min) que los grupos T y AM (93.82 y 90.47 resp/min,

respectivamente) durante la mañana. También, durante la tarde las vacas del grupo AM+PM tuvieron menor ($P<0.05$) promedio de respiraciones por minuto que el grupo de vacas AM (96.92 vs. 100.28, respectivamente). Asimismo, cuando este grupo fue comparado con el grupo T (99.39 resp/min), tendió ($P<0.10$) a ser menor. La temperatura rectal fue similar ($P>0.05$) entre los tres grupos de tratamiento T, AM y AM+PM.

Cuadro 4. Promedio de las variables fisiológicas en vacas Holstein en lactación bajo tres estrategias de enfriamiento durante el estudio.

	Tratamientos				Contrastes	
	T	AM	AM+PM	EE	T vs. AM+PM	AM vs. AM+PM
Condición corporal	3.49	3.46	3.45	0.0412	0.0975	0.6056
Temperatura rectal, °C	38.89	39.00	39.06	0.0958	0.1498	0.4714
Temperatura de piel						
Nalga AM, °C	33.91	34.24	33.53	0.1449	0.0307	0.0002
Nalga PM, °C	34.57	35.74	36.33	0.1710	<0.0001	0.0137
Costado derecho AM, °C	34.01	34.42	33.63	0.1398	0.0440	0.0002
Costado derecho PM, °C	34.48	35.73	36.38	0.1554	<0.0001	0.0032
Ubre AM, °C	34.37	34.74	34.14	0.1696	0.2983	0.0082
Ubre PM, °C	34.79	36.00	36.62	0.1801	<0.0001	0.0149
Tasa respiratoria						
AM, respiraciones/min	93.82	90.47	86.53	1.2299	<0.0001	0.0087
PM, respiraciones/min	99.39	100.28	96.92	1.1286	0.0554	0.0127

Nota: T=testigo; AM=testigo + enfriamiento 1000 h; AM+PM =testigo + enfriamiento 1000, 1500 y 2200 h.

El cuadro 5 muestra que los niveles de glucosa, colesterol, triglicéridos y concentración de triiodotironina fueron similares ($P>0.05$) cuando se comparó AM+PM con los grupos T y AM, excepto colesterol que tendió ($P<0.10$) a incrementar los niveles del grupo AM+PM en relación al grupo AM. La

concentración de tiroxina en el grupo AM+PM (40.91 ng/ml) tendió a ser menor ($P<0.10$) cuando se comparó con los grupos T y AM (45.61 y 45.42 ng/ml).

Cuadro 5. Promedio de las variables metabólicas y hormonales de vacas Holstein en lactación bajo tres estrategias de enfriamiento durante el estudio.

	Tratamientos				Contrastes	
	T	AM	AM+PM	EE	T vs. AM+PM	AM vs. AM+PM
Glucosa, mg/dl	54.71	55.56	55.31	2.9399	0.8857	0.9522
Colesterol, mg/dl	169.93	161.06	170.92	8.5205	0.8561	0.0863
Triglicéridos, mg/dl	29.80	32.22	28.01	3.9940	0.7528	0.4633
Triiodotironina, ng/ml	1.55	1.49	1.43	0.1490	0.2424	0.5752
Tiroxina, ng/ml	45.61	45.42	40.91	3.0187	0.0642	0.0798

Nota: T=testigo; AM=testigo + enfriamiento 1000 h; AM+PM =testigo + enfriamiento 1000, 1500 y 2200 h.

Los promedios de producción de leche, porcentaje de proteína y grasa, así como de producción de energía en leche se presentan en el cuadro 6.

Cuadro 6. Promedio de las variables de producción en vacas Holstein en lactación bajo tres estrategias de enfriamiento durante el estudio.

	Tratamientos				Contrastes	
	T	AM	AM+PM	EE	T vs. AM+PM	AM vs. AM+PM
Leche, Kg	17.43	18.20	18.70	0.4526	0.0004	0.1379
Grasa, g/kg	35.3	33.2	34.7	0.1082	0.0601	0.0219
Proteína, g/kg	33.0	33.4	32.8	0.0606	0.5294	0.8398
Producción de energía en leche, MCal/d	13.18	13.15	13.75	0.3539	0.0958	0.0867

Nota: T=testigo; AM=testigo + enfriamiento 1000 h; AM+PM =testigo + enfriamiento 1000, 1500 y 2200 h.

La producción de leche fue mayor ($P<0.05$) en las vacas del grupo AM+PM (18.7 kg/d) que en las vacas del grupo T (17.4 kg/d). El grupo de vacas AM+PM también mostraron una tendencia ($P=0.0958$) a incrementar la producción de

energía en leche (13.8 MCal) cuando se compararon con el grupo T (13.2 MCal). Las variables relacionadas con la composición de la leche, tales como el porcentaje de grasa y proteína no fueron mejoradas ($P>0.05$) por el grupo AM+PM con respecto a los grupos T y AM.

4.6 Discusión...

Las condiciones climáticas en el Valle de Mexicali son caracterizadas por ser extremas durante el verano (Avendaño et al. 2006). Durante el periodo de estudio se observó una temperatura ambiental y un ITH máximo por arriba de los 40 °C y 83 unidades, respectivamente, lo cual indica que las vacas experimentales estuvieron sometidas a un estrés calórico de moderado a severo (Fuquay, 1981). Un estudio previo demostró que cuando vacas Holstein en lactación se encuentran bajo los efectos del estrés calórico y son expuestas a 21 °C durante la noche por al menos 6 h, pueden perder suficiente calor corporal (Igono et al., 1992). En contraste, los resultados de este estudio (Figura 2) indican que el estrés calórico estuvo de manera continua las 24 h del día en todo el periodo experimental con un ITH mínimo de 80 unidades, muy por arriba del punto crítico de 72 unidades (Armstrong, 1994). Por esta razón las vacas no pudieron perder calor corporal en casi ningún momento del día. Esto sugiere que posiblemente el tiempo de enfriamiento con el sistema de aspersores y abanicos no fue suficiente para eliminar por completo los efectos del estrés calórico, por lo que la producción de leche fue afectada negativamente como ocurrió en otros estudios (Chaiyabutr et al. 2008; Hahn y Mader 1997). Sin embargo, cuando Avendaño et al. (2007) usaron un sistema de enfriamiento similar, indicaron que éste puede ser efectivo

para reducir los efectos del estrés calórico siempre que las condiciones de humedad relativa sean bajas, asimismo, se reportó un promedio de humedad relativa de 36%, mencionando que esto fue lo que favoreció para perder calor en el animal por medios evaporativos.

La condición corporal tendió a ser mejor en el grupo testigo con respecto al grupo de animales expuestos a mayor número de baños (Cuadro 4). Por otra parte, no se han reportado cambios sobre esta variable en vacas con o sin enfriamiento (Flamenbaum et al., 1995; Correa et al., 2002). Investigaciones recientes reportan el uso de termómetros en forma de pistola con infrarrojo, las cuales han logrado ser de gran utilidad para estimar la temperatura de la piel en los animales, además de tener un bajo costo (Collier et al. 2006). Las temperaturas más bajas de las diferentes partes de la piel como son: nalga, costado derecho y ubre observados en los animales de mayor tiempo de enfriamiento, con respecto al grupo testigo durante la mañana, pudieron estar influenciadas por un alivio al estrés calórico, el cual se obtuvo a partir del último baño de la noche anterior. Adicionalmente, un ITH bajo durante la mañana favoreció estos resultados. En contraste, al incrementar la radiación solar durante la tarde, aumentó la temperatura de las diferentes partes de la piel, especialmente en aquellas vacas de mayor tiempo de enfriamiento, debido a que producen más cantidad de leche y con ello producen también más calor metabólico. Un estudio de comportamiento animal demostró que las vacas altas productoras son más sensibles al estrés por calor que vacas bajas productoras debido a que tienen un periodo más corto de descanso durante las 24 h de día (Silanikove, 2000). Entonces, al tener las vacas mayor actividad locomotora dentro del corral,

aumenta su metabolismo y se incrementa el calor corporal (Tapki y Sahin, 2006). Una temperatura rectal por debajo de 38.5 °C se considera como normal en vacas lecheras (Igono et al., 1992). La temperatura rectal registrada en los tres grupos fue por arriba de los 38.5 °C durante el periodo de estudio. Un incremento en la tasa respiratoria de las vacas del grupo testigo es un mecanismo normal para que los animales puedan disipar el calor corporal hacia el exterior y de esta manera mantengan la termorregulación en condiciones de extremo calor (Yousef, 1985). Los datos correspondientes a temperatura rectal y tasa respiratoria mostraron claramente la importancia que tiene el uso de un sistema de enfriamiento para reducir los efectos del estrés calórico en el ganado lechero durante el verano.

La concentración de triiodotironina (T_3) y tiroxina (T_4) se mantuvieron bajos e iguales en todos los tratamientos. Diversos autores han reportado en vacas lecheras niveles bajos en T_3 y T_4 , afectando hasta en 25% su producción (Chaiyaburt et al., 2008) bajo temperaturas ambientales altas (Magdub et al. 1982; Beede y Collier, 1986). Además, se ha reportado que cambios a corto plazo de la temperatura ambiente no alteran la secreción de tirotrópica (HET). Así, los patrones de temperatura relacionados con la secreción de la tiroides, pueden ser regulados por otros factores, tales como la concentración de HET, la disminución en la tasa metabólica, consumo de alimento, crecimiento y producción de leche (Hurley et al., 1981; Silanikove, 2000). Los resultados del cuadro 5 demuestran que los niveles de T_4 en vacas con mayor tiempo de enfriamiento tendieron a ser menores que las vacas del grupo testigo. De tal forma que la concentración de T_4 se encuentra inversamente relacionada con una lactación intensa (Vanjonack y Johnson, 1975; Hart, et al., 1978). Niveles bajos en la concentración de T_4

demuestra una clara disminución en los requerimientos de energía de mantenimiento. Por lo tanto, es posible que la disminución en la secreción de T_4 en las vacas de este estudio y la necesidad por formar más hormonas tiroideas, se encuentre relacionado con la demanda de más energía para la formación de leche (Hersom, et al., 2004). Aunque no fue evaluado el consumo de alimento en este estudio, se ha demostrado que animales con estrés calórico consumen menor cantidad de fibra, la concentración de T_4 en plasma es baja y coincide con una alta concentración de T_4 en leche, a diferencia de animales con un alto consumo de fibra, en donde sucede lo contrario (Magdub, et al., 1982). Diversas investigaciones muestran que el consumo de glucosa en la glándula mamaria depende de un incremento en la concentración de glucosa dentro de la arteria plasmática (Fullerton et al., 1989; Sandles et al., 1988), mientras que otros autores no han reportado cambios (McDowell et al., 1987; Mephram, 1993). Los resultados del presente estudio coinciden con este último planteamiento porque no existió diferencia entre las vacas con el mayor tiempo de enfriamiento en relación con el grupo testigo. Esto indica que el consumo de glucosa dentro de la glándula mamaria es afectado por el estado de la lactación y la disminución de la actividad de las células epiteliales en la glándula (Chaiyabutr et al. 2008). Regularmente, la glucosa que se utiliza dentro de la glándula mamaria para la formación de lactosa requiere ser transportada por un transportador de glucosa específico que se ubica en las membranas celulares de la glándula (Madon et al., 1990; Prosser, 1988), lo cual si existen niveles bajos de glucosa dentro de la célula, la tasa de transporte de la glucosa puede verse afectada (Chaiyabutr et al., 2007).

El cuadro 6 muestra una diferencia en la producción de leche de 1.3 kg de leche al día entre vacas T y AM+PM. Si esta diferencia en producción de leche se proyectara en el tiempo que duró el estudio (84 d), ésta podría alcanzar hasta 109 kg de leche/vaca. Esta diferencia, puede ser mayor si se proporciona enfriamiento durante la etapa inicial de la lactancia, cuando el pico de la producción de leche está en su máximo nivel (Avendaño et al., 2007, Igono et al., 1987). Un mayor consumo de materia seca de los animales, aunado a mejores condiciones ambientales fue la combinación que produjo estos resultados, ya que se observó que diariamente, los animales con mayor número de baños al salir de la sala de ordeña se dirigían directamente al comedero, a diferencia de las vacas del grupo testigo, que se dirigían a echarse bajo la sombra. Asimismo, los animales estresados consumen menos y tienen una baja producción de leche. Por otra parte, es posible que los animales con mayor tiempo de enfriamiento hayan destinado sus reservas de energía hacia la producción de leche, mientras que los animales del grupo testigo pasaron más tiempo tratando de disipar la carga de calor que el ambiente ejercía en sus cuerpos. Con respecto a esto, algunos autores mencionan que el gasto de energía en vacas lecheras bajo condiciones de estrés calórico es usado para disipar el calor corporal y mantenerse frescos; este desvío de energía causa que el rendimiento sea menor y termine por afectar la producción de leche negativamente (Chaiyabutr et al., 2008.). El sistema de enfriamiento no mostró ningún efecto en los porcentajes de grasa y proteína. La literatura no muestra una tendencia definida a aumentar los componentes de la leche por efecto de un sistema de enfriamiento durante el verano ya que los resultados han sido inconsistentes (West et al., 2003).

4.7 Conclusión

En conclusión, el presente estudio demostró que en un ambiente fresco derivado del tratamiento con el mayor tiempo de enfriamiento (AM+PM) logró disminuir los efectos del estrés calórico. No obstante, se considera que el tiempo máximo de enfriamiento (4 h) utilizado es aún insuficiente para lograr una respuesta adecuada en vacas estresadas por el calor, por lo que se sugiere aumentar el periodo de enfriamiento para obtener una mayor respuesta productiva.

5. LITERATURA CITADA

- Adin, G., R. Solomon, E. Shoshani, I. Flamenbaum, M. Nikbachat, E. Yosef, A. Zenou, I. Halachmi, A. Shamaya, A. Brosh, S. J. Mabweesh, and J. Miron. 2008. Heat production, eating behavior and milk yield of lactating cows fed two rations differing in roughage content and digestibility under heat load conditions. *Livest. Sci.* 119:145-153.
- Adin, G., A. Gelman, R. Solomon, I. Flamenbaum, M. Nikbachat, E. Yosef, A. Zenou, A. Shamay, Y. Feuermann, S.J. Mabweesh, and J. Miron. 2009. Effects of cooling dry cows under heat load conditions on mammary gland enzymatic activity, intake of food and water, and performance during the dry period and after parturition. *Livest. Sci.* 124:189-195.
- Aguiar, I. S., and L. A., Targa. 2001. Respostas termorreguladoras, armazenamento de calor corporal e produção de leite de vacas holandesas mantidas ao sol e com acesso a sombra natural. *Rev. Energ. Agric.* 14:9-17.
- Albright, J. L., and C. W. Alliston. 1972. Effects of varying the environment upon performance of dairy cattle. *J. Anim. Sci.* 32:566-577.
- Allen, T. E. 1962. Responses of Zebu, Jersey, and Zebu x Jersey crossbred heifers to rising temperature, with particular reference to sweating. *Aust. J. Agric. Res.* 13:165-179.
- Amenu, B., R. T. Cowan, and H. C. Deeth. 2004. Impact of forage quality and heat stress on milk composition and cheddar cheese yield. *Anim. Prod. Aus.* 25:5-8.
- Anderson, R. R. 1971. Secretion rates of thyroxine and triiodothyronine in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 54:1195-1199.
- Anderson, R. L., and R. Parker. 1982. Analysis of membrane lipid composition of mammalian cells during the development of thermotolerance. *Int. J. Radiat. Res.* 42:57-68.
- Arieli, A., G. Adin, and I. Bruckental. 2004. The effect of protein intake on performance of cows in hot environmental temperatures. *J. Dairy Sci.* 87:620-629.
- Armentano, L. E., and J. W. Young. 1983. Production and metabolism of volatile fatty acids, glucose and CO₂ in steers and the effects of monensin on volatile fatty acid kinetics. *J. Nutr.* 113:1265-1277.

- Armstrong, D. V. 1994. Heat stress interaction with shade and cooling. *J. Dairy Sci.* 77:2044-2050.
- Armstrong, D. V., D. J. Molina, A. Correa-Calderon, H. González-García, and S. N. Faber. 1999. Effect of a three stage spray and fan cooling system on milk yield and reproduction of Holstein cows in early lactation. *J. Dairy Sci.* 82 (Suppl. 1):48 (Abstr).
- Armstrong, D. V. 2000. Methods to reduce heat stress for dairy cows. *Proc. 2000 Heart of America Dairy Management Conf.*, pp 13-19. June 21-22. St. Joseph, MO.
- 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.
- Avendaño-Reyes, L., F. D. Alvarez, A. Correa, J. S. Saucedo, F. Rivera, F. J. Verdugo, C. F. Arechiga, and P. H. Robinson. 2007. Evaluation of a cooling system used in the dry period of dairy cattle in summer. *Tec. Pec. Mex.* 45:209-225.
- Avendaño-Reyes, L., F. D. Álvarez-Valenzuela, A. Correa-Calderón, A. Algándar-Sandoval, E. Rodríguez-González, R. Pérez-Velázquez, U. Macías-Cruz, R. Díaz-Molina, P. H. Robinson, and J.G. Fadel. 2010. Comparison of three cooling management systems to reduce heat stress in lactating Holstein cows during hot and dry ambient conditions. *Livest. Sci.* 132:48-52.
- Baccari, F. Jr. 2001. Manejo ambiental da vaca leiteira em climas quentes. Universidad Estadual de Londrina, Londrina, Brazil.
- Bandaranayaka, D. D., and C. W. Holmes. 1976. Changes in the composition of milk and rumen contents in cows exposed to a high ambient temperature with controlled feeding. *Trop. Anim. Health Prod.* 8:38-46.
- Barash, H., N. Silanikove, A. Shamay, and E. Ezra. 2001. Interrelationships among ambient temperature, day length, and milk yield in dairy cows under a Mediterranean climate. *J. Dairy Sci.* 84:2314-2320.
- Barbano, D. M., J. M. Lynch, and J. R. Fleming. 1991. Direct and indirect determination of true protein content of milk by Kjeldahl analysis: Collaborative study. *J. Assoc. Offic. Anal. Chem.* 74:281-288.
- Bauchart, D. 1993. Lipid absorption and transport in ruminants. *J. Dairy Sci.* 76: 3864-3881.

- Bauchard, D., D. Gruffat, and D. Durand. 1996. Lipid absorption and hepatic metabolism in ruminants. *Proc. Nutr. Soc.* 55: 39-47.
- Bauman, D. E., and W. B. Currie. 1980. Partitioning of nutrients during pregnancy and lactation: A review of mechanisms involving homeostasis and homeorhesis. *J. Dairy Sci.* 63:1514-1529.
- Bauman, D. E., C.J. Peel, W. D. Steinhour, P. J. Reynolds, H.F. Tyrrell, A.C.G. Brown, and G.L. Haaland. 1988. Effect of bovine somatotropin on metabolism of lactating dairy cows: influence on rates of irreversible loss and oxidation of glucose and nonesterified fatty acids. *J. Nutr.* 118:1031-1040.
- Baumgard, L. H., B. A. Corl, D. A. Dwyer, A. Saebo, and D. E. Bauman. 2000. Identification of the conjugated linoleic acid isomer that inhibits milk fat synthesis. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 278:R179-R184.
- Beede, D. K., and R. J. Collier. 1986. Potential nutritional strategies for intensively managed cattle during heat stress. *J. Anim. Sci.* 62:543-550.
- Bell, A. W., and D. E. Bauman. 1997. Adaptations of glucose metabolism during pregnancy and lactation. *J. Mammary Gland Biol. Neoplasia.* 2:265-278.
- Bergman, N. E., W. E. Roe, and W. Kon. 1966. Quantitative aspects of propionate metabolism and gluconeogenesis in sheep. *Am. J. Physiol.* 211: 793-799.
- Berman, A., and A. Meltzer. 1973. Critical temperature in lactating dairy cattle: a new approach to an old problem. *Int. J. Biometeorol.* 17:167-176.
- Berman, A., Y. Folman, M. Kalm, Z. Mamen, D. Wolfenson, A. Arieli, and Y. Graver. 1985. Upper critical temperatures and forced ventilation effects for high yielding dairy cows in a subtropical climate. *J. Dairy Sci.* 68:1488-1498.
- Berman, A. 2006. Extending the potential of evaporative cooling for heat stress relief. *J. Dairy Sci.* 89:3817-3824.
- Berman, A. 2008. Increasing heat stress relief produced by coupled coat wetting and forced ventilation. *J. Dairy Sci.* 91:4571-4578.
- Bernabucci, U., N. Lacetera, B. Ronchi, and A. Nardone. 2002. Effects of the hot season on milk protein fractions in Holstein cows. *Anim. Res.* 51:25-33.
- Bianca, W. 1964. Thermoregulatory responses of the dehydrated ox to drinking cold and warm water in a warm environment. *Res. Vet. Sci.* 5:75-80.
- Bitman, J. A., D. L. Lefcourt, and B. Stroud. 1984. Circadian and ultradian temperature rhythms of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 67:1014-1023.

- Blazquez, N. B., Long, S. E., Mayhew, T. M., Perry, G. C., Prescott, N. J., Wathes, C. M., 1994. Rate of discharge and morphology of sweat glands in the perineal, lumbodorsal and scrotal skin of cattle. *Res. Vet. Sci.* 57, 277-284.
- Blosser, T. H. 1979. Economic losses from and the National Research Program on Mastitis in the United States. *J. Dairy Sci.* 62:119-127.
- Bowler, K., Duncan C. J., Gladwell, R. T., and Davison T. F., 1973. Cellular heat injury. *Comp Biochem Physiol.* 45A:441-450.
- Brown-Brandl, T. M., R. A. Eigenberg, J. A. Nienaber, and G. L. Hahn. 2005. Dynamic response indicators of heat stress in shaded and non-shaded feedlot cattle. Part 1: Analyses of indicators. *Biosys. Eng.* 90:451-462.
- Butler, W. R., and R. D. Smith. 1989. Interrelationships between energy balance and postpartum reproductive function in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 72:767-783.
- Burgos, R., L. J. Odens, R. J. Collier, L. H. Baumgard, and M. J. VanBaale. 2007. Evaluation of different cooling systems in lactating heat-stressed dairy cows in a semi-arid environment. *Prof. Anim. Sci.* 23:546-555.
- Chacón, A. D., M. E. Giner, V. M. Vázquez, S. M. Roe, S. M. Maldonado, H. Lindquist, B. Strode, R. Anderson, C. Quiroz, and J. Schreiber. 2010. Emisión de gases de efecto Invernadero en Baja California y proyecciones de casos de referencia 1990-2025. 1ra Edición. Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza. Cd. Juárez, Chih., México.
- Chaiyabutr, N., S. Thammacharoen, S. Komolvanich, and S. Chanpongsang. 2007. Effects of long term exogenous bovine somatotropin on nutrients uptake by the mammary glands of crossbred Holstein cattle in the tropics. *Asian Aust. J. Anim. Sci.* 20:1407-1416.
- Chaiyabutr, N., S. Chanpongsang, and S. Suadsong. 2008. Effects of evaporative cooling on the regulation of body water and milk production in crossbred Holstein cattle in a tropical environment. *Int. J. Biometeorol.* 52:575-585.
- Cady, R. A., and T. R. Smith. 1996. Economics of heifer raising programs. *Proc. Calves, Heifers and Dairy Profitability National Conference. Northeast Regional Agricultural Engineering Service Pub. No. 74 pp. 7-24. Cornell University, Ithaca, NY 14853.*
- Calamari, L., M. G. Maianti, F. Calegari, F. Abeni, and L. Stefanini. 1997. Variazioni dei parametri lattodinamografici nel periodo estivo in bovine in fasi diverse di lattazione. *Atti Congresso Nazionale S.I.S.Vet, vol. LI, pp. 203-204.*
- Calamari, L., M. G., Maianti, F., Amendola, and G. Lombardi. 1999. On some aspects of the oxidative status and on antioxidants in blood of dairy cows

during summer. Proc. 13th Associazione Scientifica Produzioni Animali Congress, Piacenza, Italy, pp. 449-451.

- Calderwood, S. K., Stevenson, M. A., and Hahn, G. M. 1987. Heat stress stimulates inositol triphosphate release and phosphorylation of phosphoinositides in CHO and Balb C 3T3 cells. *J. Cell. Physiol.* 130:369-376.
- Cappa, V, P. Vazhapilly, M. G. Maianti, R. Lombardelli, and E. Frazzi. 1989. Effect of environmental variations (microclimate) on the performance of dairy cows. *Sci. Tec. Lattiero-Casearia* 40:98-115.
- Clark, J. H., H. R. Spires, R. G. Derrig, and M. R. Bennink. 1977. Milk production, nitrogen utilization and glucose synthesis in lactating cows infused postruminally with sodium caseinate and glucose. *J. Nutr.* 107:631-644.
- Collier, R. J. 1985. Nutritional, metabolic and environmental aspects of lactation. In B. L. Larson (Ed.) *Lactation*, pp. 80-128. Ames, IA: Iowa State University Press.
- Collier, R. J., E. L. Annen, D. V. Armstrong, and A. L. Wolfgram. 2003. Evaluation of two evaporative cooling systems for dairy cattle under semi-arid conditions. *J. Dairy Sci.* 86(Suppl. 1):18. (Abstr.).
- Collier, R. J., G. E. Dahl, M. J. Vanbaale. 2006. Major advances associated with environmental effects on dairy cattle. *J. Dairy Sci* 89:1244-1253.
- Collier, R. J., J. L. Collier, R. P. Rhoads, and L. H. Baumgard, 2008. Genes involved in the bovine heat stress response. *J. Dairy Sci.* 91:445-454.
- Conrad, J. H. 1985. Feeding of farm animals in hot and cold environments. In: *Stress Physiology in Livestock, Vol. 2: Ungulates.* M. K. Yousef (Ed.) pp. 205-26. CRC Press: Boca Raton, FL, U.S.A.
- Contreras, P. A. 1990. Algunas enfermedades asociadas al desbalance mineral y energético en bovinos. En: *Diagnósticos Diferenciales de las Principales Enfermedades de las Especies de Producción.* Ed. M. Quezada. Universidad de Concepción-Chile, pp. 186-199.
- Convey, E. M., L. T. Chapin, J. W. Thomas, and K. Leung. 1978. Serum thyrotropin, thyroxine, and tri-iodothyronine in dairy cows fed varying amounts of iodine. *J. Dairy Sci.* 61:771-775.
- Correa, C. A., R. L. Avendaño, A. R. Villanueva, D. V. Armstrong, J. F. Smith, S. K. Denise. 2002. Efecto de un sistema de enfriamiento en la productividad de vacas lecheras bajo estrés calórico. *Agrociencia* 36:531-535.

- Correa-Calderon 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.
- Dale, H. E., C. K. Goberdhan, and S. Brody. 1954. A comparison of the effects of starvation and thermal stress on the acid-base balance of dairy cattle. *Am. J. Vet. Res.* 15(55):197-201.
- Danfaer, A. 1994. Nutrient metabolism and utilization in the liver. *Livest. Prod. Sci.* 34:115-127.
- Danfaer, A., V. Tetens, and N. Agergaard. 1995. Review and an experimental study on the physiological and quantitative aspects of gluconeogenesis in lactating ruminants. *Comp. Biochem. Physiol. B. Biochem. Mol. Biol.* 111:201-210.
- Davis, S. R., R. J. Collier, J. P. McNamara, H. H. Head, W. J. Croom, and C. J. Wilcox. 1988. Effects of thyroxine and growth hormone treatment of dairy cows on mammary uptake of glucose, oxygen and other milk fat precursors. *J. Anim. Sci.* 66:80-89.
- De Rensis, F. and R. J. Scaramuzzi. 2003. Heat stress and seasonal effects on reproduction in the dairy cow. *Theriogenology* 60:1139-1151.
- Dikmen, S., L. Martins, E. Pontes, and P. J. Hansen. 2009. Genotype effects on body temperature in dairy cows under grazing conditions in a hot climate including evidence. *Int. J. Biometeorol.* 53:327-331.
- Dohoo, I. R., and A. H. Meek. 1982. Somatic cell counts in bovine milk. *Can. Vet. J.* 23:119-125.
- Dowling, D. F. 1955. The hair follicle and apocrine gland populations of Zebu (*Bos indicus* L.) and Shorthorn (*Bos taurus* L.) cattle skin. *Aust. J. Agric. Res.* 6:645-654.
- Eberhart, R. J., H. C. Gdmore, L. J. Hutchinson, and S. B. Spencer. 1979. Somatic cell counts in DHI samples. Page 32 in *Proc. 18th Annu. Mtg. Natl. Mastitis Council., Louisville, KY. Natl. Mastitis Council., Inc., Arlington, V.A.*
- Elvinger, F., P. J. Hansen, and R. P. Natzke. 1991. Modulation of function of bovine polymorphonuclear leukocytes and lymphocytes by high temperature in vitro and in vivo. *Am. J. Vet. Res.* 52:1692-1698.
- Erdman, R. A. 1988. Dietary buffering requirements of the lactating dairy cow: A review. *J. Dairy Sci.* 71:3246-3266.

- Faulkner, A. 1980. The presence of cellular metabolites in milk. *Biochim. Biophys. Acta* 630:141-145.
- Ferguson, K. A., and Dowling, D. F. 1955. The functions of cattle sweat glands. *Aust. J. Agric. Res.* 6:640-644.
- Finch, V. A. 1986. Body temperature in beef cattle: its control and relevance to production in the tropics. *J. Anim. Sci.* 62:531-542.
- Flamenbaum, I., I D. Wolfenson, M. Mamen, and A. Berman. 1986. Cooling dairy cattle by a combination of sprinkling and forced ventilation and its implementation in the shelter system. *J. Dairy. Sci.* 69:3140-3147.
- Flamenbaum, I., D. Wolfenson, P. L. Kunz, M. Mamen, and A. Berman. 1995. Interactions between body condition at calving and cooling of dairy cows during lactation in summer. *J. Dairy Sci.* 78:2221-2229.
- Folman, Y., A. Berman, Z. Herz, M. Kaim, M. Rosenberg, M. Mamen and S. Gordin. 1979. Milk yield and fertility of high-yielding dairy cows in a subtropical climate during summer and winter. *J. Dairy Res.* 46:411-425.
- Forsyth, I. A. 1989. Growth factors in mammary gland function. *J. Reprod. Fert.* 85:759-770.
- Fronk, T. J., L. H. Schultz, and A. R. Hardie. 1980. Effect of dry period overconditioning on subsequent metabolic disorders and performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 63:1080-1090.
- Fullerton, F. M., I. R. Fleet, R. B. Heap, I. C. Hart, and T. B. Mephram. 1989. Cardiovascular responses 259 and mammary substrate uptake in Jersey cows treated with pituitary-derived growth hormone during late lactation. *J. Dairy Sci.* 56:27-35.
- Fuquay, J. W. 1981. Heat stress as it affects animal production. *J. Anim Sci.* 52:164-174.
- García, E. 1985. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana) (2a edición). México, D.F. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- García-Cueto, R., M. A. Tejeda, and O. E. Jáuregui. 2008. Downscaling estadístico aplicado a ondas de calor en una ciudad árida del noroeste de México y estimación del efecto del cambio climático global. In: J. Sigró Rodríguez, M. Brunet-India, and E. Aguilar- Anfrons (eds.). *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (Serie A, No. 6)*, Tarragona, Spain.

- Garnsworthy, P. C., and J. H. Topps. 1982. The effect of body condition of dairy cows at calving on their food intake and performance when given complete diets. *Anim. Prod.* 35:113-119.
- Gebremedhin, K. G., B. Wu. 2001. A model of evaporative cooling of wet skin surface and fur layer. *J. Therm. Biol.* 26:537-545.
- Gerloff, B. J., T. H. Herdt, R. S. Emery. 1986. The relationship of hepatic lipidosis to health and performance in dairy cattle. *J. Am. Vet. Med. Assoc.* 188:845-850.
- Gruffat, D., D. Durand, Y. Chilliard, P. Williams, and D. Bauchart. 1997. Hepatic gene expression of apolipoprotein B100 during early lactation in underfed high producing dairy cows. *J. Dairy Sci.* 80:657-666.
- Grummer, R. R. 1993. Etiology of lipid-related metabolic disorders in periparturient dairy cows. *J. Dairy Sci.* 76:3882-3896.
- Gwazdauskas, F. C. 1985. Effects of climate on reproduction in cattle. *J. Dairy Sci.* 68:1568-1578.
- Hahn, G. M. 1982. *Hyperthermia and Cancer*. New York and London: Plenum Press.
- Hahn, G. L., and T. L. Mader. 1997. Heat waves in relation to thermoregulation, feeding behavior and mortality of feedlot cattle. In: *Proceedings of the 5th International Livestock Environment Symposium Minneapolis*. 29-31 May 1997. ASAE, St Joseph, MI, pp 563-567.
- Hahn, G. L. 1999. Dynamic responses of cattle to thermal heat loads. *J. Dairy Sci.* 77:10-20.
- Harmon, R. J. 1994. Physiology of mastitis and factors affecting somatic cell counts. *J. Dairy Sci.* 77:2103-2112.
- Harmon, R. J., M. Lu, D. S. Trammel, and B. A. Smith. 1997. Influence of heat stress and calving on antioxidant activity in bovine blood. *J. Dairy Sci.* 80 (suppl. 1):264 (Abstr.).
- Harrison, R. D., I. P. Reynolds, and W. Little. 1983. A quantitative analysis of mammary glands of dairy heifers reared at different rates of live weight gain. *J. Dairy Res.* 50:405-412.
- Hart, I. C., J. H. Bines, and S. V. Morant. 1978. Endocrine control of energy metabolism in the cow. Correlations of hormones and metabolites in high and low yielding cows for age of lactation. *J. Dairy Sci.* 62:270-277.

- Her, E., D. Wolfenson, I. Flamenbaum, Y. Folman, M. Kaim, and A. Berman. 1988. Thermal, productive, and reproductive responses of high yielding cows exposed to short-term cooling in summer. *J. Dairy Sci.* 71:1085-1092.
- Herd, T. H., L. Goeders, J. S. Liesman. 1983. Test for estimation of bovine hepatic lipid content. *J. Am. Vet. Med. Assoc.* 182:953-955.
- Herd, T. H. 1988. Fatty liver in dairy cows. *Vet. Clin. North Am.: Food Anim. Pract.* 4:269-287.
- Hersom, M. J., R. P. Wettemann, C. R. Krehbiel, G. W. Horn, and D. H. Keisler. 2004. Effect of live weight gain of steers during winter grazing: III. Blood metabolites and hormones during feedlot finishing. *J. Anim. Sci.* 82:2059-2068.
- Hindery, G. A., and C. W. Turner. 1965. Effect of administration of Lthyroxine 25 and 50% above secretion rate on lactating cows. *J. Dairy Sci.* 48:596-601.
- Hoffman, P. C., N. M. Brehm, S. G. Price, and A. Prill-Adams. 1996. Effect of accelerated post-pubertal growth and early calving on lactation performance of primiparous Holstein heifers. *J. Dairy Sci.* 79:2024-2031.
- Hogan, J. S., K. L. Smith, K. H. Hoblet, D. A. Todhunter, P. S. Schoenberger, W. D. Hueston, D. E. Pritchard, G. L. Bowman, L. E. Heider, B. L. Brockett, and H. R. Conrad. 1989. Bacterial counts in bedding materials used in nine commercial dairies. *J. Dairy Sci.* 72:250-258.
- Huntington, G. B., and R. L. Prior. 1983. Digestion and absorption of nutrients by beef heifers fed a high concentrate diet. *J. Nutr.* 117: 2280-2288.
- Hurley, W. L., E. M. Convey, K. Leung, L. A. Edgerton, R. W. Hemken. 1981. Bovine prolactin, TSH, T₄ and T₃ concentrations as affected by tall fescue summer toxicosis and temperature. *J. Anim. Sci.* 51:374-379.
- Hurtaud, C., S. Lemosquet, and H. Rulquin. 2000. Effect of graded duodenal infusions of glucose on yield and composition of milk from dairy cows. 2. Diets based on grass silage. *J. Dairy Sci.* 83:2952-2962.
- Igono, M. O., B. J. Steevens, M. D. Shanklin, and H. D. Johnson. 1985. Spray cooling effects on milk production, milk and rectal temperature of cows during a moderate temperature summer season. *J. Dairy Sci.* 68:979-985.
- Igono, M. O., H. D. Johnson, B. J. Steevens, G. F. Krause, and M. D. Shanklin. 1987. Physiological, productive, and economic benefits of shade, spray, and fan system versus shade for Holstein cows during summer heat. *J. Dairy Sci.* 70:1069-1079.

- Igono, M. O., G. Bjotvedt, and H. T. Sanford-Crane. 1992. Environmental profile and critical temperature effects on milk production of Holstein cows in desert climate. *Int. J. Biometeorol.* 36:77-87.
- International Dairy Federation. (1991). Milk and milk products - Fat content. General guidance on the use of butyrometric methods. FIL-IDF Standard 52. Brussels, Belgium: International Dairy Federation.
- Itoh, F., Y. Obara, M. Rose, H. Fuse, and H. Hashimoto. 1998. Insulin and glucagon secretion in lactating cows during heat exposure. *J. Anim. Sci.* 76:2182-2189.
- Johnson, H. D., A. C. Ragsdale, I. L. Berry, and M. D. Shanklin. 1962. Effects of various temperature-humidity combinations on milk production of Holstein cattle. *Univ. Missouri Agric. Exp. Stn. Res. Bull.* (791).
- Johnson, H. D. 1965. Environmental temperature and lactation (with special reference to cattle). *Int. J. Biometeorol.* 9:103.
- Johnson, H. D., and W. J. Vanjonack. 1976. Effects of environmental and other stressors on blood hormone patterns in lactating animals. *J. Dairy Sci.* 59:1603-1617.
- Johnson, H. D., Shanklin, M. D., Hahn, L., 1988. Productive adaptability of Holstein cows to environmental heat. *Res. Bull. No. 1060, Univ. Missouri Coll. Agr., Agr. Exp. Station, USA.*
- Jordan, E. R. 2003. Effects of heat stress on reproduction. *J. Dairy Sci.* 86:(E. Supp.): E104-E114.
- Kadzere, C. T., M. R. Morphy, N. Silanikove, and E. Maltz. 2002. Heat stress in lactating dairy cow: A review. *Livest. Prod. Sci.* 77:59-91.
- Kennelly, J. 1999. Milk composition in the cow. In: *Proceedings of the 1999 Cornell Nutrition Conference for Feed Manufacturers.* Rochester, NY.
- Khongdee, S., N. Chaiyabutr, G. Hinch, K. Markvichitr, and C. Vajrabukka. 2006. Effects of evaporative cooling on reproductive performance and milk production of dairy cows in hot wet conditions. *Int. J. Biometeorol.* 50: 253-257.
- Khongdee, S., S. Sripoon, S. Chousawai, G. Hinch, N. Chaiyabutr, K. Markvichitr, and C. Vajrabukka. 2010. The effect of modified roofing on the milk yield and reproductive performance of heat-stressed dairy cows under hot-humid conditions. *Amin. Sci. J.* 81:606-611.

- Kibler, H. H., and S. Brody. 1952. Relative efficiency of surface evaporative, respiratory evaporative, and non-evaporative cooling in relation to heat production in Jersey, Holstein, Brown Swiss and Brahman cattle, 5 to 105°F. Missouri Agricultural Experimental Station Bulletin No. 497.
- Kim, K. H., D. H. Kim, Y. K. Oh, S. S. Lee, H. J. Lee, D. W. Kim, Y. J. Seol, and N. Kimura. 2010. Productivity and energy partition of late lactation dairy cows during heat exposure. *Anim. Sci. J.* 81:58-62.
- Kirk, J. H., and P. C. Bartlett. 1988. Economic impact of mastitis in Michigan Holstein dairy herds using computerized records system. *Agri-Practice* (Jan/Feb):3.
- Knobil, E, and J. D. Neill. 1994. *The Physiology of Reproduction*. 2nd ed. New York: Raven Press, pp. 1083.
- Knowlton, K. F., T. E. Dawson, B. P. Glenn, G. B. Huntington, and R. A. Erdman. 1998. Glucose metabolism and milk yield of cows infused abomasally or ruminally with starch. *J. Dairy Sci.* 81:3248-3258.
- Lacetera, N., U. Bernabucci, B. Ronchi, and A. Nardone. 1996. Body condition score, metabolic status and milk production of early lactating dairy cows exposed to warm environment. *Riv. Agric. Subtrop. Trop.* 90:43-55.
- Littell, R. C., G. A. Milliken, W. W. Stroup, and R. D. Wolfinger. 1996. *SAS System for Mixed Models*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Lomax, M. A., G. D. Baird, and C. Mallinson. 1979. Differences between lactating and non-lactating cows in concentration and secretion rates of insulin. *Biochem. J.* 180:281-289.
- Lomax, M. A. and G. D. Baird. 1983. Blood flow and nutrient exchange across the liver and gut of dairy cow: effects of lactation and fasting. *Br. J. Nutr.* 49:481-496.
- Madon, R. J., S. Martin, A. Davies, H. A. C. Fawcett, D. J. Flint, and S. A. Baldwin. 1990. Identification and characterization of glucose transport proteins in plasma membrane and golgi vesicle-enriched fractions prepared from lactating rat mammary gland. *Biochem. J.* 272:99-105.
- Magdub, A., H. D. Johnson, and R. L. Belyea. 1982. Effect of environmental heat and fiber on thyroid physiology of lactating cows. *J. Dairy Sci.* 65:2323-2331.
- Martello L. S., H. Savastano Jr., S. L. Silva, and J. C. C. Balieiro. 2009. Alternative body sites for heat stress measurement in milking cows under tropical conditions and their relationship to the thermal discomfort of the animals. *Int. J. Biometeorol.* 54:647-652.

- McDaniel, B. T., R. H. Miller, E. L. Corley, and R. D. Plowman. 1967. DHIA age adjustment factors for standardizing lactations to a mature basis. DHI Lett., ABS-44-188. Dairy-Herd-Improvement Letter. 43:1.
- McDowell, R. E. 1972 Improvement of Livestock Production in Warm Climates. Freeman, San Francisco.
- McDowell, R. E., N. W. Hooven, and J. K. Camoens. 1976. Effects of climate on performance of Holsteins in first lactation. J. Dairy Sci. 59:965-973.
- McDowell, G. H., J. M. Gooden, D. Leenanuruksa, M. Jois, and A. W. English. 1987. Effects of exogenous growth hormone on milk production and nutrient uptake by muscle and mammary tissues of dairy cows in mid lactation. Austr. J. Biol. Sci. 40:295-306.
- McGilvery, R. 1979. Biochemistry a Functional Approach. 2ed Holt-Saunders International Editions. Philadelphia/London/Toronto.
- Mephram, T. B. 1993. The development of ideas on the role of glucose in regulating milk secretion. Aust. J. Agric. Res. 44:508-522.
- Miller, J. K., W.A. Swanson, W. A. Lyke, B. R. Moss, and W. F. Byrne. 1974. Effects of thyroid status on digestive tract fill and flow rate of indigested residues in cattle. J. Dairy Sci. 57:193-197.
- Mount, L. E. 1979. Adaptation to Thermal Environment: Man and His Productive Animals. University Park Press, Baltimore, MD.
- Nardone, A., N. G. Lacetera, B. Ronchi, and U. Bernabucci, 1992. Effetti del caldo ambientale sulla produzione di latte e sui consumi alimentari di vacche Frisone. Prod. Anim. 5 (1), 1-15 (III Serie).
- National Research Council. 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle (7th ed.). Washington, DC: National Academy Press.
- Opstvedt, J., R. L. Baldwin, and M. Ronning. 1967. Effect of diet upon activities of several enzymes in abdominal adipose and mammary tissues in the lactating dairy cow. J. Dairy Sci. 50:108-109.
- Oshiro, S., Y. Sasaki, M. Hamasaki, and T. Tsuda. 1981. Physiological effects of intravenously infused catecholamine on sheep exposed to environmental temperature of 20 and 35 degrees centigrade. Jpn. J. Zotech. Sci. 52:97-103.

- Paape, M. J., W. D. Schultze, R. H. Miller, and J. W. Smith. 1973. Thermal stress and circulating erythrocytes, leukocytes, and milk somatic cells. *J. Dairy Sci.* 56:84-91.
- Perera, K. S., F. C., Gwazdauskas, R. E. Pearson, and T. B. Brumback. 1986. Effect of season and stage of lactation on performance of Holsteins. *J. Dairy Sci.* 69:228-236.
- Ponce, P. and L. Bell. 1984. Estudio de la lactancia del cruce 5/8 H – 3/8 C cubano. I Componentes mayores de la leche. Proteína, grasa, lactosa. *Rev. Salud Anim.* 6(1):85-94.
- Poterfield, P. S. 1996. *Endocrine Physiology*. Ed. Mosby. United States of America, pp. 57.
- Prosser, C. G. 1988. Mechanism of the decrease in hexose transport by mouse mammary epithelial cell caused by fasting. *Biochem. J.* 249:149-154.
- Purwanto, B. P., Y. Abo, R. Sakamoto, F. Furumoto, and S. Yamamoto. 1990. Diurnal patterns of heat production and heart rate under thermoneutral conditions in Holstein Friesian cows differing in milk production. *J. Agric. Sci. (Camb.)*. 114:139-142.
- Radcliff, R. P., M. J. Vandehaar, A. L. Skidmore, L. T. Chapin, B. R. Radke, J. W. Lloyd, E. P. Stanisiewski, and H. A. Tucker. 1997. Effects of diet and bovine somatotropin on heifer growth and mammary development. *J. Dairy Sci.* 80:1996-2003.
- Rayssiguier, Y., A. Mazur, E. Gueux, I. M. Reid, and C. J. Roberts. 1988. Plasma lipoproteins and fatty liver in dairy cows. *Res. Vet. Sci.* 45:389-393.
- Rigout, S., S. Lemosquet, J. E. van Eys, J. W. Blum, and H. Rulquin. 2002. Duodenal glucose increases glucose fluxes and lactose synthesis in grass silage-fed dairy cows. *J. Dairy Sci.* 85:595-606.
- Roche, J. R., D. P. Berry, and E. S. Kolver. 2006. Holstein-Friesian strain and feed effects on milk production, body weight, and body condition score profiles in grazing dairy cows. *J. Dairy Sci.* 89:3532-3543.
- Roche, J. R., D. P. Berry, J. M. Lee, K. A. Macdonald, and R. C. Boston. 2007. Describing the body condition score change between successive calvings: A novel strategy generalizable to diverse cohorts. *J. Dairy Sci.* 90:4378-4396.
- Roche, J. R., N. C. Friggens, J. K. Kay, M. W. Fisher, K. J. Stafford, and D. P. Berry. 2009. Invited review: Body condition score and its association with dairy cow productivity, health, and welfare. *J. Dairy Sci.* 92:5769-5801.

- 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.
- 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.
- Sandles, L. D., Y. X. D. Sun, A. G. C. Cruz, G. H. McDowell, and J. M. Gooden. 1988. Response of lactating ewes to exogenous growth hormone: short and long-term effects of productivity and tissue utilization of key metabolites. *Aust. J. Biol. Sci.* 41:357-370.
- SAS Institute Inc. 2004. SAS/STAT user's guide software released 9.12. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Schultz, L. H. 1974. Ketosis. In: Larson, BL, Smith, VR (eds) *Lactation*, vol. 2. Academic, New York, pp 318-354.
- Silanikove, N. 1992. Effects of water scarcity and hot environment on appetite and digestion in ruminants: A review. *Livest. Prod. Sci.* 30:175-194.
- Silanikove, N. 2000. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. *Livest. Prod. Sci.* 67:1-18.
- Smith, K. L., D. A. Todhunter, and P. S. Schoenberger. 1985. Environmental mastitis: cause, prevalence, prevention. *J. Dairy Sci.* 68:1531-1553.
- Shearer, J. K., and D. K. Bcede. 1990. Effects of high environmental temperature on production, reproduction, and health of dairy cattle. *Agri Practice.* 11:5-17.
- 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.
- Skaar, T. C., R. R. Grummer, R. M. Dentine, and R. H. Stauffacher. 1989. Seasonal effects of prepartum and postpartum fat and niacin feeding on lactational performance of dairy cows in early lactation. *J. Dairy Sci.* 72: 2028-2038.
- Staples, C. R., and W. W. Thatcher. 2004. Stress, heat, in dairy cattle. In: J.W. Fuquay, P. Fox, H. Roginski (eds). *Encyclopedia of Dairy Sciences*. Ed Elsevier. p.p. 2592-2597.

- Swanson, E. W., and Miller J. K. 1973. Restoration of normal lactation in hypothyroid cows. *J. Dairy Sci.* 56:92-97.
- Tapki, I., and A. Sahin. 2006. Comparison of the thermoregulatory behaviors of low and high producing dairy cows in a hot environment. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 99:1-11.
- Thatcher, W. W., C. R. Staples, G. Danet-Desnoyers, B. Oldick, and E. J. P. Schmitt. 1994. Embryo health and mortality in sheep and cattle. *J. Anim. Sci.* 72:16-30.
- Thompson, G. E. 1985. Lactation and the thermal environment. In: M. Yousef (ed.) *Stress Physiology in Livestock (Vol. 1)*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Thrift, T. A., A. W. Bernal, D. A. Lewis, D. A. Neuendorff, C. C. Willard, and R. D. Randel. 1999. Effects of induced hypothyroidism on weight gains, lactation, and reproductive performance of primiparous Brahman heifers. *J. Anim. Sci.* 77:1844-1850.
- Treacher, R. J., I. M. Reid, and C. J. Roberts. 1986. Effect of body condition at calving on the health and performance of dairy cows. *Anim. Prod.* 43:1-6.
- Trout, J. P., L. R. McDowell, and P. J. Hansen. 1998. Characteristics of estrous cycle and antioxidant status of lactating Holstein cows exposed to heat stress. *J. Dairy Sci.* 81:1244-1250.
- Tsenkova, R., S. Atanassova, K. Itoh, Y. Ozaki, and K. Toyoda. 2000. Near infrared spectroscopy for biomonitors: Cow milk composition measurement in a spectral region from 1,100 to 2,400 nanometers. *J. Anim. Sci.* 78:515-522.
- Turner, L. W., J. P. Chastain, R. W. Hemken, R. S. Gates, and W. L. Crist. 1992. Reducing heat stress in dairy cows through sprinkler and fan cooling. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 8 (2):251-256.
- Tyrrell, H. F. and J. T. Reid. 1965. Prediction of the energy values of cow's milk. *J. Dairy Sci.* 48:1215-1223.
- Van Amburgh, M. E., D. M. Galton, D. G. Fox, and D. E. Bauman. 1991. Optimizing heifer growth. *Proc. Cornell Nutr. Conf. Feed Manuf. Conf.* pp. 85-93.
- Vanjonack, W. J. and H. D. Johnson. 1975. Effects of moderate heat and milk yield on plasma thyroxine in cattle. *J. Dairy Sci.* 58:507-511.
- Vonderhaar, B. K., and A. E. Greco. 1979. Lobulo-alveolar development of mouse mammary glands is regulated by thyroid hormones. *Endocrinology* 104:409-418.

- West, J. W., G. M. Hill, J. M. Fernández, P. Mandebvu, and B. G. Mullinix. 1999. Effects of dietary fiber on Intake, milk yield, and digestion by lactating dairy cows during cool or hot, humid weather. *J Dairy Sci.* 82:2455-2465.
- West, J. W. 2003. Effects of heat stress on production in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 86:2131-2144.
- Wildman, E. E., G. M. Jones, P. E. Wagner, R. L. Boman, H. F. Troutt Jr., and T. N. Lesch. 1982. A dairy cow body condition scoring system and its relationship to selected production characteristics. *J. Dairy Sci.* 65:495-501.
- Wilks, D. L., C. E. Coppock, J. K. Lanham, K. N. Brooks, C. C. Baker, W. I. Bryson, R. G. Elmore, and R. A. Stermer. 1990. Responses of lactating Holstein cows to chilled drinking water in high ambient temperatures. *J. Dairy Sci.* 73:1091-1099.
- Wise, M. E., D. V. Armstrong, J. T. Huber, R. Hunter, and F. Wiersma. 1988. Hormonal alterations in the lactating dairy cow in response to thermal stress. *J. Dairy Sci.* 71:2480-2485.
- Yousef, M. 1985. Basic principles. In: M. Yousef (ed.) *Stress Physiology in Livestock* (Vol. 1). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Zhao, F., W. M. Moseley, H. A. Tucker, and J. J. Kennelly. 1996. Regulation of glucose transporter gene expression in mammary gland, muscle, and fat of lactating cows by administration of bovine growth hormone and bovine growth hormone-releasing factor. *J. Anim. Sci.* 74:183-189.