Evaluación del confort térmico en bovinos en un sistema de lechería especializada del bosque húmedo montano bajo

Esteban Gil Restrepo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de producción animal

Medellín, Colombia

2017

Evaluación del confort térmico en bovinos en un sistema de lechería especializada del bosque húmedo montano bajo

Esteban Gil Restrepo

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias Agrarias

Director

Dr. Sci, MSc, Zoot Ariel Marcel Tarazona Morales

Línea de Investigación:

Producción animal y gestión ambiental

Grupo de Investigación:

Biogénesis

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Producción Animal

Medellín, Colombia

2017

Así como el agua que se riega no se puede recoger, el agua que se evapora nunca vuelve a caer… en el mismo lugar.

Esteban Gil Restrepo

Agradecimientos

En primera instancia quiero agradecer a mi familia ya que ellos han sido el impulso y el bastón en mis flaquezas.

En segunda instancia al equipo de trabajo del grupo de investigación Biogénesis, especialmente al director de esta tesis, Ariel Marcel Tarazona, por ser un maestro y un amigo.

A los estudiantes de zootecnia que hicieron parte de la investigación, tanto de la Universidad de Antioquia como de la Universidad Nacional.

A los operarios de la Estación Agraria Paysandú.

A los buenos amigos de especie bovina que conocí durante la investigación y me enseñaron mucho sobre ellos.

Y a todos aquellos amigos que debieron soportar largos monólogos y elucubraciones sobre el cambio climático, la problemática del agua y la fisiología de la termorregulación.

Contenido

INTRODUCCIÓN 1

EL AGUA COMO CELDA ENERGÉTICA 5
DOS HIDRÓGENOS Y UN OXÍGENO 8
PANORAMA MUNDIAL 10
CONTEXTO NACIONAL 14
EFECTOS MEDIOAMBIENTALES EN LA PRODUCCIÓN ANIMAL 16
MECANISMOS DE TERMORREGULACIÓN 18
HIPERTERMIA, GOLPE DE CALOR, ESTRÉS CALÓRICO. 20
EL AGUA PARA CONSUMO BOVINO 22
ESTADO DEL ARTE 23
BIBLIOGRAFÍA 26

CAPÍTULO 2 32

RETOS DE LA AGRICULTURA FRENTE AL MANEJO DEL AGUA EN EL CONTEXTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO. 32

RESUMEN 32
LA EXPLOSIÓN DEMOGRÁFICA 34
EL RETO DE DEFINIR LA DISPONIBILIDAD DE AGUA PARA TANTOS SEDIENTOS 37
Índice de requerimientos básicos de agua (Gleick, 1996) 38
Indicador Falkenmark o índice de estrés hídrico (Falkenmark et al., 1989): 38
El índice de vulnerabilidad del recurso hídrico 39
Índice de pobreza hídrica (Sullivan et al., 2003) 40
La importación de cereales y la disponibilidad de recurso hídrico (Yang et al., 2003) 40
El concepto del agua virtual (Allan, 1998) 41
El concepto de huella hídrica (Hoekstra, 2005) 41
REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DE LA HUMANIDAD 42
EL AGUA ESCONDIDA TRAS LOS ALIMENTOS Y LOS RITMOS DE VIDA 44
MECANISMOS DE ADAPTACIÓN Y RESILIENCIA 49

CONCLUSIONES 50
BIBLIOGRAFÍA **51**

CAPÍTULO 3 **57**

EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO EN VACAS HOLSTEIN BAJO CONDICIONES DE TRÓPICO ALTO **57**

RESUMEN **57**
INTRODUCCIÓN **59**
METODOLOGÍA **60**
LOCACIÓN 60
SISTEMA PRODUCTIVO 60
ANIMALES 61
ÍNDICES DE ESTRÉS TÉRMICO (IET) 61
TEMPERATURA CORPORAL (Tc) 62
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO 62
ANÁLISIS ESTADÍSTICO 62
RESULTADOS Y DISCUSIÓN **63**
VARIABLES METEOROLÓGICAS E ÍNDICES DE ESTRÉS TÉRMICO 63
TEMPERATURA CORPORAL 66
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE HEMBRAS BOVINAS LECHERAS BAJO CONDICIONES DE PASTOREO. 69
Eventos comportamentales: Consumo de agua 69
Estados comportamentales: pastoreo, rumia y descanso 70
CONCLUSIÓN 74
BIBLIOGRAFÍA 74

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **79**

CONCLUSIONES **79**
RECOMENDACIONES **80**

ANEXOS **82**

ANEXO 1 **82**
PROCESO DE ELABORACIÓN DE UN IMPLANTE INTRAVAGINAL MODIFICADO PARA EL MONITOREO PERMANENTE DE LA TEMPERATURA CORPORAL EN HEMBRAS BOVINAS DE MANERA NO INVASIVA **82**
Introducción 82
Metodología 83

Lista de figuras

FIGURA 1. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL BALANCE ENERGÉTICO DE LA TIERRA. 6
FIGURA 2. CLASIFICACIÓN DE LOS ESTADOS DEL DÉFICIT HÍDRICO. ADAPTADO DE TARJUELO ET AL. 2010. 37
FIGURA 3. CURVAS PROMEDIO DE TEMPERATURA, HUMEDAD RELATIVA Y RADIACIÓN SOLAR DURANTE 24 HORAS. 64
FIGURA 4. RITMO DE TEMPERATURA CORPORAL PROMEDIO DE UN DÍA PARA LAS VACAS HOLSTEIN (LÍNEA AZUL) Y BON (LÍNEA VERDE). 66
FIGURA 5. PROMEDIO DIARIO DE TEMPERATURA VAGINAL EN VACAS HOLSTEIN (AZUL) Y BON (VERDE) DURANTE CUATRO DÍAS. 67
FIGURA 6. COMPARACIÓN ENTRE LAS CURVAS PROMEDIO DE TEMPERATURAS CORPORALES MÍNIMAS DIARIAS CADA 10 MINUTOS, PARA AMBAS RAZAS. 68
FIGURA 7. COMPARACIÓN ENTRE LAS CURVAS PROMEDIO DE TEMPERATURAS CORPORALES MÁXIMAS DIARIAS CADA 10 MINUTOS, PARA AMBAS RAZAS. 68
FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN PROMEDIO DEL COMPORTAMIENTO DURANTE LA MAÑANA (A) Y LA TARDE (B). .. 70
FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN PROMEDIO DEL COMPORTAMIENTO DIURNO, ENTRE LAS 6:00 AM Y LAS 8:00 PM. 71
FIGURA 10. DISTRIBUCIÓN PROMEDIO DE LOS TRES ESTADOS COMPORTAMENTALES DESDE LAS 7:00 HORAS HASTA LAS 14:00 HORAS. 72
FIGURA 11. DISTRIBUCIÓN PROMEDIO DE LOS ESTADOS DE COMPORTAMIENTO DE VACAS LECHERAS EN TRÓPICO ALTO DESDE LAS 16:00 HORAS HASTA LAS 21:00 HORAS. 72
FIGURA 12. DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA CORPORAL SEGÚN EL CICLO DE COMPORTAMIENTO DIURNO. 73
FIGURA 13. PROCESO DE ACOPLAMIENTO ENTRE EL IMPLANTE Y EL TERMÓMETRO. 83
FIGURA 14. INSERCIÓN DEL IMPLANTE A TRAVÉS DE UN ESPÉCULO VAGINAL. 84
FIGURA 15. TIRILLA DE TRACCIÓN PARA EXTRACCIÓN DEL IMPLANTE. 85
FIGURA 16. TRES DIFERENTES GRADOS DE ALTERACIÓN EN LA SECRECIÓN VAGINAL COMO RESPUESTA A CUERPO EXTRAÑO. 85

Lista de tablas

TABLA 1. HUELLA HÍDRICA PROMEDIO DE ALGUNOS ALIMENTOS DE ORIGEN ANIMAL Y VEGETAL. ---------- 46
TABLA 2. DEMANDA MUNDIAL DE ALIMENTOS PARA LOS PRODUCTOS AGRÍCOLAS (MILLONES DE TONELADAS) ---------- 47
TABLA 3. VARIABLES METEOROLÓGICAS E ÍNDICES DE ESTRÉS TÉRMICO ---------- 63
TABLA 4. RANGOS DE REFERENCIA PARA LOS ÍNDICES Y PARÁMETROS METEOROLÓGICOS CONTEMPLADOS EN LAS FÓRMULAS. ---------- 65
TABLA 5. PROMEDIO DEL TIEMPO DEDICADO POR ANIMAL A CADA ESTADO COMPORTAMENTAL. ---------- 71

Lista de Símbolos y abreviaturas

%	PORCENTAJE
BON	BLANCO OREJINEGRO
°C	GRADOS CELCIUS
Cm	CENTÍMETRO
CO_2	DIÓXIDO DE CARBONO
CONPES	CONCEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL
Et al	Y COLABORADORES
ETI	ÍNDICE DE TEMPERATURA EQUIVALENTE
ETSI	ÍNDICE DE ESTRÉS TÉRMICO EQUIVALENTE
FAO	ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA
FEDEGAN	FEDERACIÓN NACIONAL DE GANADEROS
H	HIDRÓGENO
H_2O	AGUA
HLI	ÍNDICE DE CARGA DE CALOR
HR	HUMEDAD RELATIVA
IPCC	PANEL INTERGUBERNAMENTAL PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO
°K	GRADOS KELVIN
Kg	KILOGRAMO
Km	KILÓMETRO
Km^3	KILÓMETRO CÚBICO
m^2	METRO CUADRADO
m^3	METRO CÚBICO
N	NITRÓGENO
Nm	NANÓMETRO
NRC	NATIONAL RESEARCH COUNCIL
ONU	ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS
P	FÓSFORO
pH	POTENCIAL DE HIDROGENIONES
PIB	PRODUCTO INTERNO BRUTO
R^2	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN
RCTc	RITMO CIRCADIANO DE TEMPERATURA CORPORAL
RR	ÍNDICE DE TASA RESPIRATORIA AJUSTADA
RS	RADIACIÓN SOLAR
Ta	TEMPERATURA AMBIENTAL
THI	ÍNDICE DE TEMPERATURA HUMEDAD
VV	VELOCIDAD DEL VIENTO
Wm-2	VATIO/m^2

Introducción

Actualmente existe una preocupación sobre el futuro de la producción de alimentos de origen animal, por su aporte al calentamiento global, la reducción en la disponibilidad de recursos naturales y el aumento en la demanda de los consumidores tanto en la calidad y la inocuidad del producto final, como en el bienestar animal durante su ciclo de vida. La ganadería ha impactado negativamente los ecosistemas naturales por la deforestación para el establecimiento de pasturas, sedimentación de las aguas, compactación y degradación de los suelos entre otros factores; generando procesos de desertificación y disminuyendo la producción (McDowell, 2008). La FAO ha impulsado la investigación en modelos productivos eficientes y sostenibles, llegando a plantear una propuesta de ganadería climáticamente inteligente, que haga mejor uso de recursos como el agua y reduzca el impacto de la producción sobre el ambiente (LeCoq et al, 2015).

La creciente población humana, que ha alcanzado 7200 millones de individuos en el año 2014 y promete aumentar más de 2000 millones para el año 2050 (ONU, 2014); demanda un significativo aumento en la producción de alimentos, en especial de origen animal (FAO, 2011). Para satisfacer esta urgente necesidad, la humanidad debe superar un fuerte obstáculo que le impone la historia; adaptarse al cambio climático generado por el aumento en la acumulación de gases con efecto invernadero en la atmósfera, donde las actividades antrópicas, y en especial el sector agropecuario han sido determinantes (FAO, 2013).

Los sistemas pecuarios tecnificados, donde se promueve ampliamente la utilización de recursos genéticos de alta selección, tales como las razas *Bos taurus* de aptitud lechera como el Holstein (Combellas, 1981) presentan gran vulnerabilidad a las condiciones

climáticas tropicales y alta susceptibilidad a las enfermedades infecciosas, parasitarias y metabólicas relacionadas con los sistemas productivos; estando las dinámicas epidemiológicas fuertemente ligadas a los eventos meteorológicos (WMO, 2010). Esta situación representa una amenaza para el bienestar animal, la estabilidad económica del sector agroalimentario, la seguridad y la soberanía alimentaria de muchas comunidades.

Los sistemas tradicionales de pastoreo tanto rotacional como extensivo, en monocultivos de gramíneas, permiten una acción directa de factores ambientales como la radiación solar, la velocidad del viento, la temperatura ambiente y la humedad relativa. Los factores mencionados confluyen sinérgicamente desviando al animal de su termoneutralidad, potenciando el estrés calórico y afectando el bienestar de los animales, además, actúan como un limitante en la producción bovina que ha sido históricamente subvalorado, ya que actúa como un ente silencioso y subclínico, es un factor de riesgo, asociado a una amplia gama de patologías (Sejian et al, 2012).

Otros efectos que se presentan al desviar al animal de su termoneutralidad, son la disminución en el consumo de alimento, el agrupamiento y el jadeo, siendo todos comportamientos adaptativos que se presentan a menudo en las horas del día donde la sensación térmica se encuentra por encima de su rango de confort. El estrés calórico afecta el balance hídrico y electrolítico del animal, altera los mecanismos de regulación del pH plasmático, favorece el incremento de radicales libres, disminuye la reactividad enzimática y aumenta significativamente el gasto energético.

Todos los procesos fisiológicos están ligados directa o indirectamente con el agua, entre ellas, todas las reacciones de calor entre el animal y su hábitat se llevan a cabo por transferencias moleculares de agua, entre el individuo y el ambiente, en ambos sentidos. De aquí la importancia de enmarcar el problema del estrés por calor en los sistemas pecuarios dentro de la problemática global que existe alrededor de este recurso. El consumo de agua es uno de los principales mecanismos comportamentales de termorregulación en el bovino, siempre y cuando este recurso se encuentre disponible. Determinar el consumo de agua individual, permite evaluar la eficiencia de dicho sistema de producción en su uso del agua; recurso que toma cada vez más importancia conforme

se hace evidente la escasez y el impacto negativo de los sistemas ganaderos sobre los cuerpos de agua y los suelos (Steinfield etal, 2006).

De los 22,6 millones de semovientes bovinos a largo y ancho de las 30 millones de hectáreas en pasturas dentro del territorio nacional, aproximadamente 12,7 millones son hembras (FEDEGAN, 2015). El 40% de la leche producida corresponde a sistemas de lechería especializada en trópico de altura, a pesar de contar con tan sólo el 2% del inventario total de bovinos en el país. Sector, que se encuentra distribuido principalmente en los altiplanos de Antioquia, Cundinamarca, Boyacá y Nariño (PEGA 2019, 2006); caracterizado por su alta dependencia de fertilizantes, pesticidas y alimentos concentrados. Estos últimos, elaborados con materias primas importadas como el maíz y la soya y/o sorgo a su vez producidos bajo esquemas de agricultura industrializada (PEGA 2019, 2006) y un pastoreo rotacional en franjas de pasturas donde predominan el *Pennisetum clandestinum* y variedades de *Lolium sp*. Comparado a la ganadería doble propósito, que está constituida por el 38% del hato nacional y produce el 60% de la leche (FEDEGAN. 2015).

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de varios factores meteorológicos sobre parámetros fisiológicos y comportamentales de vacas en un sistema de lechería especializada de bosque húmedo montano bajo. Adicionalmente analizar la relación del agua como eje central de la vida y su relación con las problemáticas humanas alrededor de este recurso.

BIBLIOGRAFÍA

McDowell, R.W., 2008. Environmental impacts of pasture-based farming. CABI.

Le Coq, J. F., Rapidel, B., & Fallot, A. (2015). Agricultura climáticamente inteligente: conceptos, retos y perspectivas.

ONU. 2014. La situación demográfica en el mundo. Informe conciso. Nueva York. 2014.

FAO. 2011. Mapping supply and demand for animal-source foods to 2030, by T.P. Robinson & F. Pozzi. Animal Production and Health Working Paper. No. 2. Rome.

Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., ... & Tempio, G. (2013). Hacer frente al cambio climático a través de la ganadería–Evaluación global de las emisiones y las oportunidades de mitigación. *Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO). Roma (Italia)*.

Combellas, J., Martinez, N., & Capriles, M. (1981). Holstein cattle in tropical areas of Venezuela. *Tropical Animal Production*, *6*, 214-220.

Das, H. P., Doblas-Reyes, F. J., Garcia, A., Hansen, J., Mariani, L., Nain, A., ... & Venkataraman, R. (2010). Weather and climate forecasts for agriculture. *Guide to agricultural, meteorological practices*, 57.

Sejian, V., Naqvi, S. M. K., Ezeji, T., Lakritz, J., & Lal, R. (2012).*Environmental stress and amelioration in livestock production*. Springer Berlin Heidelberg.

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T. D., Castel, V., & de Haan, C. (2006). *Livestock's long shadow: environmental issues and options*. Food & Agriculture Org.

FEDEGAN. 2012. Cifras de referencia. La ganadería colombiana y las cadenas cárnicas y lácteas. Plan Estratégico para la Ganadería. PEGA 2019.

Capítulo 1.

La termorregulación bovina y sus implicaciones.

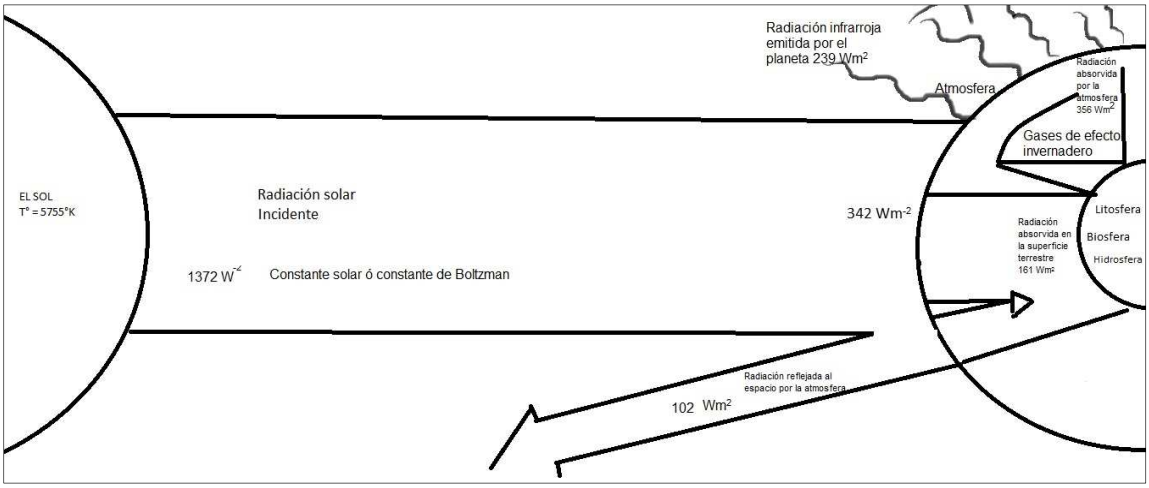
El agua como celda energética

El planeta Tierra es el único en nuestro sistema solar que posee una cobertura externa de agua que abarca alrededor del 70% de su superficie brindándole la capacidad de mantener su temperatura dentro de un estrecho rango (Mölders y Kramm, 2014). Esto, porque las singulares características termodinámicas del agua le permiten absorber gran cantidad de la radiación proveniente del sol, generando el efecto invernadero; fenómeno sin el cual el desarrollo y evolución de la vida tal como la conocemos no habría sido posible (Philander y George, 2008). El vapor de agua y el CO_2 atmosférico son los principales responsables del cambio climático a través de procesos de retroalimentación positiva (Rapp, 2014).

La estructura triatómica del agua le brinda la capacidad de absorber radiación en un amplio rango de longitudes de onda. Sus dos átomos de hidrógeno son bastante livianos, lo que les permite girar y vibrar en diferentes orbitales alrededor del átomo de oxígeno (Bernath, 2002), brindándole la capacidad de absorber una fracción de la radiación incidente del sol y gran parte de la radiación reflejada en la superficie terrestre (Maurellis, Tennyson. 2003). Ambos tipos de radiación constituyen el balance energético de la tierra (Mölders y Kramm, 2014;

Figura 1).

Figura 1. Representación esquemática del balance energético de la Tierra.



Modificado de Trenberth et al 2009.

El agua es el único compuesto químico que existe en la naturaleza en los tres estados de la materia, lo que demuestra su papel fundamental como agente regulador de la temperatura global, circulando por todo el planeta por medio de corrientes eólicas e hídricas formando sistemas dinámicos que intercambian constantemente energía térmica entre la atmósfera, la criósfera, la litósfera, la hidrósfera y la biósfera (Philander y George, 2008;

Figura 1).

Visto desde la teoría Gaia (Margulis y Lovelock, 1974), que propone que todos los elementos orgánicos y sus alrededores inorgánicos del planeta tierra se encuentran integrados en un “super organismo” viviente, los polos congelados y los océanos actúan como estructuras “anatómicas” con funciones definidas en el mantenimiento de la “homeostasis” planetaria. Los primeros reflejan gran parte de la radiación incidente y los segundos absorben esta energía, la almacenan y proveen la mayor parte de la evaporación que humedece la atmósfera. Esta evapotranspiración, aunada a la vegetal, da origen a los grandes depósitos de vapor de agua y aerosoles que constituyen las

nubes (Philander y George, 2008), que fluyen a través de corrientes establecidas, distribuyendo el calor y equilibrando la temperatura. La concentración del vapor de agua decae rápidamente con la altura, manteniendo sus máximas concentraciones por debajo de los primeros 5 km de atmósfera. Cuando las nubes se saturan, el vapor de agua se condensa precipitándose en forma de lluvia o nieve, liberando el calor latente de condensación y calentando la atmósfera (Mölders y Kramm, 2014). Por su parte, los procesos de evaporación, derretimiento y sublimación consumen energía, enfriando la atmósfera (

Figura 1).

La transpiración de las plantas durante la fotosíntesis también captura CO_2, transformándolo en biomasa vegetal, lo que da origen a las cadenas tróficas (D. Rapp, 2014). Así, las plantas cumplen un importante rol en la regulación del ciclo hidrológico, siendo los bosques primarios los mayores captadores del dióxido de carbono, aunque con impactos paradójicos al disminuir el efecto albedo en el cinturón tropical del globo. Aproximadamente 4 billones de hectáreas, equivalentes al 30% de la superficie terrestre, se encuentran cubiertas por bosques. De estos, una tercera parte son bosques primarios e inalterados, con el potencial de disminuir la reflectividad y aumentar la absorbancia lumínica a lo largo y ancho de los meridianos tropicales, aumentando la evaporación y por lo tanto la humedad relativa del aire (Gomes Da Silva y Campos Maia, 2013).

Este ciclo hidrológico se dinamiza por medio de la radiación solar que contiene un amplio rango de longitudes de onda, desde el espectro infrarrojo (ej. el calor corporal >700 nm) pasando por la luz visible (400 – 800 nm) y terminando en el espectro ultravioleta (<400 nm; Flir Systems, 2012). Este baño energético cambia entre el día y la noche, marcando el ritmo de los procesos biológicos de la tierra. La constante solar es la cantidad de energía emitida por el sol que alcanza la atmósfera del planeta, aproximadamente 1375 W/m^2 partiendo de una temperatura superficial aparente de 5755 °K pero alcanzando la tierra con una carga de energía solar de 342 W/m^2 (

Figura 1; Gomes Da Silva y Campos Maia, 2013; Rapp, 2014).

Un 15% de la radiación solar incidente es absorbida y almacenada como energía potencial en las moléculas de vapor de agua, el CO_2, los hidrocarbonos y otras moléculas con efecto invernadero como el metano, el óxido nitroso, los cloroflurocarbones y los aerosoles, que son químicamente reactivos e interactúan a nivel quántico con los fotones provenientes del sol. Otro 15% es esparcido en forma de luz visible. Solamente 37%

alcanza la superficie terrestre y de esta, el 6% es reflejado nuevamente a la atmósfera (Gomes Da Silva y Campos Maia, 2013). Dicha radiación circula mediante transacciones energéticas, dinamizando diferentes factores climáticos a través del H_2O, generando el calentamiento global mediante el efecto invernadero. Este calentamiento es provocado por la baja conductividad térmica de la atmósfera que irradia poca pero absorbe gran cantidad de energía. Sin la atmósfera, la temperatura planetaria sería en promedio 48°C menor, con enormes diferencias entre el día y la noche como sucede en la superficie lunar. Los gases de efecto invernadero (incluido el vapor de agua) disminuyen drásticamente la transferencia de calor por radiación infrarroja hacia el espacio exterior ya que la absorben. El calor emitido por la superficie terrestre es conducido por transferencia de masa mediante los cúmulonimbus tropicales hacia los polos y la estratosfera, donde puede ser emitida como radiación infrarroja y abandonar el sistema hacia el espacio exterior (Rapp, 2014).

A pesar de la amplia distribución de la hidrósfera en la superficie terrestre, esta es bastante irregular en espacio, calidad y tiempo. Por lo tanto, el acceso y/o la disponibilidad al recurso hídrico varía de manera importante a nivel regional; ya que depende de topografía, vientos, ciclo hidrológico y época del año, entre otros (Mölders y Kramm, 2014).

Al comportarse como una celda energética, todos los ecosistemas buscan maximizar la recirculación de agua por medio de diferentes mecanismos ecológicos, aumentando la actividad biológica, es decir, la vida o biosfera (Curtis, 2013). La materia orgánica del suelo y la vegetación actúan como agentes retenedores de humedad, intercambiando energía térmica con todas las superficies orgánicas e inorgánicas, con efecto refrigerante. Así, los hábitats y los seres vivos están comunicados a través del ciclo hidrológico como mecanismo de adaptación al ambiente.

Dos hidrógenos y un oxígeno

Entre 60% y 70% del peso vivo de los animales y el hombre es agua. De hecho, podría considerarse que las células habitan en el agua, al igual que las formas de vida primigenias. En el cuerpo, el agua no es solo un solvente inerte, sino un constituyente activo y estructural; hasta el punto en que un organismo puede agotar al máximo sus reservas de carbohidratos y lípidos, incluso catabolizar el 50% de su proteína estructural y continuar con vida, mientras que la pérdida de una décima parte del agua corporal es incompatible con la vida en los animales domésticos (Willmer, 2005).

Todas las reacciones bioquímicas se llevan a cabo bajo condiciones acuosas dentro de un estrecho margen de concentración electrolítica, pH y temperatura (Willmer et al., 2005). El alto calor específico del agua le permite absorber el calor generado por las reacciones enzimáticas exotérmicas del cuerpo. Por ejemplo, el calor generado por un ejercicio intenso durante 20 minutos podría desnaturalizar y endurecer la albúmina, tal como sucede en los huevos cocidos de no disiparse correctamente ese calor (Cannon, 1932; citado por Maynard et al., 1981). Otras propiedades fisicoquímicas del agua, como su efecto ionizante, la tensión superficial, la constante dieléctrica, el calor de vaporización y la tendencia a formar hidratos, entre otras, son fundamentales para el desenlace de los procesos homeostáticos (Willmer et al., 2005).

Todos los mecanismos de transferencia de calor entre los seres vivos y el hábitat se dan a través de transacciones que involucran agua en cualquiera de sus estados de la materia (Gomes Da Silva y Campos Maia, 2013). Es importante recalcar que los mecanismos termoreguladores de los seres vivos son mecanismos adaptativos por excelencia, pues no sólo determinan la temperatura corporal, sino también el balance hídrico del cuerpo y la concentración de solutos. A su vez, estos factores definen el consumo de alimento, la tasa metabólica y la actividad física del individuo. Todo esto está fuertemente ligado al balance hídrico del hábitat, entendiendo que no se trata de sistemas aislados, sino de sistemas fuertemente dependientes a través del agua en los que los fenómenos de osmosis y difusión son guías de las dinámicas hídricas y electrolíticas que le permiten al ser vivo adaptarse a las condiciones del ambiente. Cabe aclarar que estos mecanismos están regidos por las leyes de la termodinámica, de especial importancia la primera y la segunda ley. Donde se establece que los sistemas

termodinámicos vivos deben reponer la energía liberada en forma de calor ya que todo tiende al desorden y al caos, definiendo de esta manera los flujos de calor (Collier y Collier, 2012).

El mundo humano actual, globalizado, “evolucionado” y tecnológico, se encuentra al borde de una crisis, dado que su recurso más preciado y fundamental escasea a escala global y solamente unos pocos podrán gozar de él ante el descontrolado crecimiento poblacional y el inminente cambio climático que aún hoy, muchos se atreven a negar y desestimar. Infortunadamente. Los gobiernos y entidades internacionales aún no están dándole máxima prioridad a este tema, a la protección de las fuentes hídricas y a la maximización del potencial productivo de los ecosistemas hídricos ante el drástico aumento en la demanda de este recurso (UNESCO, 2015).

Panorama mundial

Las mejoras en los sistemas de producción tanto agrícola como pecuario, han doblado la producción de alimentos, aumentando sólo en un 10% la tierra cultivada. Sin embargo, se teme que el cambio climático empeore los retos ya existentes en la agricultura. La seguridad alimentaria y el cambio climático están estrechamente relacionados en el sector agrícola por la alta dependencia que existe entre ellos, existen oportunidades para transformar el sector hacia sistemas climáticamente inteligentes que aborden ambos campos (FAO 210).

La población mundial creció un 55 % en el periodo comprendido entre 1980 y 2010, y 13 % entre el 2000-2010. Se estima que la población mundial pasará de los 6.700 millones de habitantes actuales a 9.000 millones en 2050, con un especial aumento en el sur de Asia y en el África subsahariana. Teniendo en cuenta los cambios en la composición y el nivel de consumo asociados al aumento de los ingresos de los hogares, se estima que alimentar a la población mundial requerirá un aumento del 70% en la producción agrícola total. El 50% de la población mundial vive hoy en ciudades y se espera que esta proporción aumente hasta el 70% en 2050. Esta gran expansión está provocando la

invasión por parte de la ciudad de los ecosistemas naturales y las tierras agrícolas de los alrededores. Se estima que estas personas gastan hasta el 60% de sus ingresos en comprar alimentos (FAO 2010).

Mientras la agricultura creció a una tasa promedio de 2,4 % anual a escala mundial, la economía creció a una tasa promedio de 2,8 %, esto es 0,4 puntos porcentuales más por año (FAO, 2012).

El cambio climático progresivo se refiere a cambios en el largo plazo sobre el clima de referencia, como las temperaturas absolutas y los regímenes de lluvias durante lapsos de muchas décadas, éste es el reto más grande que enfrenta la agricultura moderna, pues desestabilizará los sistemas de producción cambiando los patrones de productividad y cosecha de los cultivos, la configuración de plagas y enfermedades y la distribución de los cultivos en los diferentes usos del suelo. Existe gran incertidumbre respecto a la dirección y magnitud del cambio climático, que a su vez conduce a la incertidumbre en el ámbito de la producción de alimentos y su impacto sobre los sistemas de producción y la seguridad alimentaria a través de las distintas y complejas geografías del planeta (Vermeulen et al. 2012).

Con el fin de estabilizar la producción y los ingresos, los sistemas de producción han de tener mayor resiliencia, desarrollándose de un modo adecuado frente a rupturas bruscas. Una agricultura más productiva y con mayor resiliencia requiere transformaciones en la gestión de los recursos naturales no renovables como la tierra, el agua, los nutrientes del suelo y los recursos genéticos (FAO 2010).

Los países de vocación agrícola, en que la agricultura resulta crítica para el desarrollo económico (Banco Mundial, 2008), transformar los sistemas de pequeños propietarios resulta importante no sólo para la seguridad alimentaria, sino también para la reducción de la pobreza, así como para el crecimiento agregado y el cambio estructural. En este último grupo de países, aumentar la productividad para alcanzar la seguridad alimentaria es, claramente, una prioridad, lo que se supone traerá consigo un significativo aumento de las emisiones del sector agrícola en los países en desarrollo (IPCC 2007).

La producción, procesamiento y comercialización de bienes agrícolas es básica para la seguridad alimentaria y el crecimiento económico (FAO 2010). Su producción se logra gracias a una serie de sistemas de producción que van desde los sistemas mixtos de ganado y cultivos de los pequeños productores a las prácticas de agricultura intensiva como grandes monocultivos y cría intensiva de ganado. La intensificación sostenible de la producción puede, especialmente en los países en desarrollo, garantizar la seguridad alimentaria y contribuir a mitigar el cambio climático, reduciendo la deforestación y la invasión de la agricultura en los ecosistemas naturales (Bellassen, 2010).

La eficiencia general, resiliencia, capacidad de adaptación y potencial de mitigación de los sistemas de producción pueden reforzarse mejorando sus distintos componentes; tales como la gestión del suelo y de los nutrientes, la captación, retención y utilización de aguas, control de plagas y enfermedades, el manejo del ecosistema y la biodiversidad, la conservación de los recursos genéticos regionales y la cosecha, procesamiento y cadenas de suministro completando la cadena de eventos hasta llegar al consumidor final (FAO 210).

La ganadería da de comer a 1.000 millones de pobres en el mundo, especialmente en las zonas secas poco fértiles donde otras prácticas agrícolas son menos viables. Desempeña un importante rol multifuncional en muchas regiones en desarrollo, suministrando alimento, ingresos, tracción animal para arar y transporte. El ganado aporta directamente alrededor del 12,9 por ciento de las calorías mundiales y del 27,9 por ciento de las proteínas en forma de carne, leche, huevos y despojos. La carne, la leche y los huevos constituyen una fuente de proteínas con una extensa serie de aminoácidos que satisfacen las necesidades humanas, así como de micronutrientes biodisponibles de los que carecen muchas personas malnutridas, como el hierro, el zinc, la vitamina A, la vitamina B12 y el calcio (FAO 2011).

El sector ganadero ha crecido muy rápidamente en las últimas décadas y continuará haciéndolo mientras siga aumentando la demanda de carne y productos lácteos. Se ha estimado un crecimiento del 68% para 2030 respecto a 2000, y esto se debe principalmente al crecimiento demográfico y económico de países en desarrollo (FAO, 2006). El ganado es también el mayor usuario mundial de los recursos de la tierra: los

terrenos de pastoreo ocupan el 26% de la superficie no helada de la tierra y el 33% de la tierra cultivable destinada a la producción de alimentos (FAO, 2009). Los suelos de pastos contienen aproximadamente el 20% de las reservas mundiales de carbono (FAO, 2010a). Sin embargo, estas reservas están en peligro por la degradación del suelo.

La rápida expansión del sector está provocando una sobreexplotación y degradación de la tierra, así como un importante impulso a la deforestación. También es responsable de las emisiones de metano y óxido nitroso derivadas de la digestión de los rumiantes y el manejo de estiércoles, y es la principal fuente de emisión de metano del mundo. Sin embargo, la huella de carbono de la ganadería varía considerablemente entre los sistemas de producción, regiones y productos, debido principalmente a las variaciones en la calidad del alimento, las eficiencias en la conversión de alimento de las distintas especies animales y los impactos en la deforestación y la degradación de la tierra (FAO 2010).

En América Latina y el caribe el PIB creció un 6,2% en 2010, un 4,6 % en 2011 y se estima un crecimiento de 3,4 % para 2012, a diferencia del escaso crecimiento que mostraron las economías europeas y los Estados Unidos. Si se analiza la última década se observa que el PIB regional ha crecido desde 2000 a 2010 a una tasa promedio anual de 3,2 %. En el mismo período se ha registrado una disminución de la pobreza en la región, aunque a tasas menores. Entre 1999 y 2010 la pobreza de América Latina y el caribe se redujo a una tasa de 1,8 % anual, mientras que la pobreza extrema disminuyó a una tasa de 2,4 % anual. Sin embargo, a pesar de estos avances la situación sigue siendo preocupante, ya que según los datos de 2011, 174 millones de personas viven en situación de pobreza en la región, y de ellas 73 millones viven en extrema pobreza. Asimismo, de acuerdo a la última información publicada por la FAO, durante el trienio 2010-2012 el hambre afectaba a 49 millones de personas (FAO, 2012).

La agricultura, como sector primario, representa entre el 3 % y el 41 % del PIB en América Latina con Chile y Guatemala en los extremos del rango respectivamente. Cabe destacar que aquellos países que presentan una alta participación de la agricultura en el PIB no son los que más han crecido, y en contrapartida, países con una participación

relativamente baja de la agricultura en sus economías crecen a tasas superiores al promedio de la región (2,2 %) (FAO, 2012).

La agricultura familiar representa más del 80 % de las explotaciones agrícolas en la región; provee, a nivel país, entre 27 y 67 % del total de la producción alimentaria; ocupa entre el 12 y el 67 % de la superficie agropecuaria y genera entre el 57 y el 77 % del empleo agrícola en la región (FAO, 2012).

Contexto nacional

Desde mediados del siglo XIX se incrementó en Colombia la producción ganadera, como parte de las actividades usuales para la transformación del uso de la tierra están la tala y la quema de bosques nativos para la formación de pastizales, afectando negativamente los ecosistemas tropicales naturales. Según Ausdal (2009) la implementación de una finca ganadera requiere grandes inversiones de capital y otros recursos.

Colombia ocupa el puesto número 13 en el mundo en cuanto a inventario ganadero (23.500.000 de cabezas, de las cuales 15.5 millones son hembras); es el quinto en América y el tercero en América latina (FEDEGAN 2012).

El sector agropecuario colombiano aporta el 7% del PIB nacional, del cual, la ganadería representa el 1.6% del PIB nacional, el 20% del total agropecuario y el 53% del total pecuario. En la distribución del suelo colombiano el 77% del mismo está dedicado a pasturas y sabanas naturales que son aprovechadas en ganadería; ese porcentaje equivale a 39’150.220 millones de hectáreas, de las cuales sólo 5’000.000 están cultivadas en pasturas mejoradas, de estas sólo 19.3 millones tienen vocación ganadera. FEDEGAN 2012.

La relación entre el valor agregado agrícola en el PIB y el ingreso per cápita es inversa. Esto es, los mayores ingresos per cápita a nivel mundial se relacionan de forma negativa con la participación del valor agregado agrícola. Es evidente que el mayor efecto en los países de ingresos altos lo tienen los sectores modernos como la industria manufacturera y los servicios (Cuenca 2008).

Según FEDEGÁN para 2009 el 54.8% del hato nacional se destinó a la producción de carne (cría, levante y ceba), el 38.8% al doble propósito y solo un 6.4% a la lechería especializada. Según esta misma fuente, para el año 2007, el número de predios con actividad ganadera en el país era de 491.334. De estos el 47,4% tiene menos de 10 animales por predio, y el 82% alberga menos de 50 animales, ubicándose dentro de lo que se puede calificar como pequeña ganadería. El grupo de productores medianos (50 a 500 animales) participa con el 17,2% del total de predios y finalmente, sólo el 1.1% (1.645 productores) alberga más de 500 animales (CONPES 2010). En cuanto a los diferentes sistemas o especialidades de producción se refiere, la Cría ocupa el primer lugar con un 38.7% de la actividad, seguida del Doble Propósito con el 34.9%, la Ceba con el 20% y, finalmente, la Leche Especializada con apenas el 6.4%. Esta última confirma el desplazamiento del grueso de la producción lechera hacia el doble propósito, normalmente en zonas de trópico bajo, con menores costos y unos niveles de producción más basados en las economías de escala por un mayor número de animales, que en las altas productividades de un número menor de animales (FEDEGAN 2012).

La carne de res y la leche aportan buena parte de los componentes proteicos de los alimentos de los colombianos; los lácteos equivalen al 2.5% del gasto total familiar. El consumo de carnes en Colombia (res, pollo y cerdo) presentó un crecimiento entre 1990 y 2007 al pasar de 37.5 kg/habitante/año a 43.4 kg/habitante/año, sin embargo la composición por especies ha sufrido cambios importantes; mientras que la carne de pollo ha tenido un aumento de consumo muy importante, la carne bovina ha disminuido de 26.4 kg en 2007 a 18.2 kg en 2009. En este mismo año se estimó que el 6% de la producción nacional tenía como destino las exportaciones mientras que el 5% se destinaba para el consumo industrial. De la demanda interna de carne no procesada, el 85% tiene como destino el consumo en hogares, mientras que el 15% restante se destina al negocio de preparación de comidas (FEDEGAN 2012, CONPES 2010).

La estructura de producción ganadera en Colombia está lejos de ser homogénea, si bien ha mejorado notablemente en nuevas razas, pastos forrajeros, nutrientes, entre otros. En efecto, la producción se caracteriza según la siguiente estructura: Extractivo 6,2%,

pastoreo extensivo tradicional 61,4%, pastoreo extensivo mejorado 28,4%, pastoreo intensivo mejorado (3,5%) y confinamiento menos del 1% (Arango 2000).

El modelo productivo extractivo y extensivo de la ganadería ha llevado a la degradación de los suelos, haciéndolos susceptibles a la erosión pluvial y eólica, utilizando grandes monocultivos de gramíneas y prescindiendo de los servicios ecosistémicos que prestan los árboles, sometiendo a los animales a la radiación solar y temperatura tropical, descubriendo los cuerpos de agua aumentando su evaporación en detrimento de la Mega diversidad biológica que goza nuestra posición geográfica; alterando la regulación hídrica, los microclimas y las emisiones gaseosas de los diferentes procesos biológicos (Murgueitio 2008).

Una alternativa de producción que ha demostrado ser eficiente y sostenible son los sistemas silvopastoriles que se definen como una modalidad de la agroforestería en la que se combinan en el mismo espacio plantas forrajeras como gramíneas y leguminosas rastreras con arbustos y árboles destinados a la alimentación animal y otros usos complementarios (Murgueitio 2008); aprovechando de esta manera los servicios ambientales de la diversidad vegetal y actuando como infraestructura de potreros.

Actualmente existen políticas nacionales reflejadas en proyectos como el de ganadería colombiana sostenible que busca impulsar la adopción de los SSP como herramienta para la transformación de la ganadería colombiana yendo con las políticas públicas a nivel mundial que tienen que ver con el direccionamiento del sector agropecuario y así lograr alcanzar los niveles de seguridad alimentaria, energética y ambiental propuestos (Chará 2011).

Efectos medioambientales en la producción animal

Los factores físico ambientales que afectan al ganado, son una combinación de la temperatura del aire, la radiación solar, la velocidad del viento, la humedad relativa, la precipitación pluvial y la disponibilidad de agua.

La productividad animal se maximiza dentro de un rango estrecho de temperatura, llamado zona termoneutral; que se define como un estado constante de temperatura corporal en la que no hay necesidad de realizar ajustes fisiológicos o comportamentales (Arias 2008). Ésta se ve comprometida cuando la energía y los nutrientes son desviados de la producción de leche/crecimiento/reproducción hacia el mantenimiento de la eutermia cuando las condiciones ambientales no son las ideales para la raza (Mader 2008; Dirksen 2005). Este cambio en las prioridades del uso de nutrientes, afecta negativamente el comportamiento productivo de los animales y puede considerarse uno de los mayores inconvenientes para la producción animal a nivel mundial.

La humedad relativa es considerada un factor de potencial estrés en el ganado, ya que acentúa las condiciones adversas de las altas temperaturas (Da Silva 2006). Los principales efectos de la humedad relativa están asociados con una reducción de la efectividad en la disipación de calor por sudoración y respiración y están negativamente asociados al consumo diario de agua. La tasa de evaporación depende de la gradiente de presión de vapor que existe entre el animal y el medioambiente circundante, así como de la resistencia al movimiento en contra de la gradiente. Las altas humedades relativas reducen el potencial de disipación de calor tanto de la piel como del aparato respiratorio (Da Silva 2006), afectando a los animales especialmente en ambientes en los que la disipación del calor por vías evaporativas es crucial para mantener la condición homeotérmica. Por esta razón un índice que da cuenta de ambos factores, temperatura y humedad, fue desarrollado originalmente para ser utilizado en seres humanos y extendido posteriormente al ganado por Berry y col (1964). El índice de temperatura-humedad (THI, por sus siglas en inglés) ha llegado a ser un estándar en las prácticas de manejo del ganado en cuanto a la investigación en temperatura. Sin embargo, el THI no da cuenta de importantes factores climáticos como la radiación solar y la velocidad del viento ni tampoco incluye factores de manejo productivo o de genotipo animal (Mader et al. 2006). Las predicciones del THI sobre los efectos del clima en la producción de leche actual subestima la magnitud del estrés térmico, ya que no tiene en cuenta los efectos de la convección y el calor radiante (Gaughan y col. 2007).

Asimismo, Gaughan y col (2007) han propuesto un nuevo índice para ganado en engordas a corral, denominado HLI (heat load index), el cual ha demostrado ser exitoso en ganado de distintos genotipos.

El rol del viento en el bienestar y desempeño productivo de los animales ha sido largamente reconocido por los investigadores (NRC 1981). El viento ayuda a reducir los efectos del estrés por calor durante el verano mejorando los procesos de disipación de calor por vías evaporativas. Cabe señalar que esta respuesta depende del estado en que se encuentra la piel del animal, es decir, seca o húmeda. La transferencia de calor es más eficiente cuando la piel está húmeda que cuando está seca. La importancia de la velocidad del viento fue realizada por Mader y col (2006), quienes la incluyeron como uno de los factores de ajuste del Índice de temperatura humedad. La velocidad del viento tiene además un efecto negativo en el consumo de agua y en la escala de jadeo. La escala de jadeo es una herramienta visual desarrollada para evaluar el estrés por calor en los animales (Mader y col 2006).

La radiación solar (directa e indirecta) es considerada como uno de los factores más importantes que afectan el balance térmico en el ganado. La radiación de onda corta y onda larga tienen un fuerte impacto en la carga total de calor y en el estrés por calor en los animales. También se ha demostrado que la radiación solar tiene un impacto directo en la temperatura rectal y la tasa de respiración (Mader y col 2006). Sin embargo, la cantidad de calor radiante absorbida por un animal depende no sólo de la temperatura del animal, sino también de su color y textura. Superficies oscuras irradian y absorben más calor que superficies claras a una misma condición ambiental (Kadzere 2002).

Mecanismos de termorregulación

La termorregulación animal es un mecanismo neuroendocrino controlado por los núcleos preóptico y supraquiasmático, ubicados en el tálamo encefálico; quien recibe la información de los termoreceptores cutáneos de los animales endotermos como es el caso del bovino (Bicego 2007).

Los endotermos mantienen una temperatura corporal central relativamente constante, denominada homeotermia. Este estado homeotérmico se alcanza mediante mecanismos fisiológicos y conductuales que modifican la velocidad de pérdida de calor por el organismo, de producción de calor por el metabolismo de los alimentos o las reservas corporales de energía. Para que la temperatura corporal se mantenga constante durante las modificaciones de los ambientes térmicos, la velocidad de pérdida de calor debe ser equivalente a la velocidad de ganancia de calor. La temperatura corporal es un reflejo del equilibrio entre la ganancia de calor (debida a la absorción a partir del entorno y la actividad metabólica) y la pérdida de calor. La absorción de calor del entorno se produce cuando la temperatura externa aumenta por encima de la del organismo (Radostits 1999).

La pérdida de calor se debe a fenómenos físicos de convección, conducción, radiación y evaporación de la humedad, representada por el sudor, la perspiración insensible y la humedad vaporizada por la vía respiratoria. Las pérdidas por evaporación de la humedad varían entre las especies dependiendo del desarrollo del sistema de glándulas sudoríparas y son menos importantes en los animales que en el hombre, iniciándose sólo a temperaturas corporales relativamente elevadas (Radostits 1999). La magnitud de la pérdida de calor sensible, vía conducción y convección es dependiente de la superficie de área por unidad de peso vivo, la magnitud del gradiente de temperatura entre el animal y el aire y la conductancia de calor del interior del cuerpo a la piel y de esta al aire circundante. El intercambio de calor por radiación depende tanto del área de superficie como de las propiedades reflectivas del pelaje del animal. Los pelajes lisos, claros y cortos reflejan una proporción mayor de radiación solar incidente que los pelajes de color oscuros, densos y lanudos; incluso una exposición crónica a los rayos solares y altas temperaturas puede causar un aclaramiento del pelaje. Una respuesta fisiológica al estrés calórico es una reducción en la producción de calor mediante una disminución en la ingesta de alimento, producción de leche, secreción de la hormona tiroidea y movimiento corporal (Hansen 2004).

En el caso de los bovinos de origen europeo (Bos *Taurus*) no se considera la sudoración como un mecanismo eficaz de pérdida de calor; mientras que en el ganado cebú (Bos

indicus), la mayor concentración de glándulas sudoríparas cutáneas indica que la sudoración puede ser más importante. La salivación abundante y la respiración exagerada, incluida la respiración bucal o “jadeo” son mecanismos importantes para la disipación del calor corporal excesivo en los animales. Existen diferencias entre las razas de ganado bovino en cuanto a las características del pelaje y la piel que afectan a la absorción de calor procedente de la radiación solar y la pérdida de calor por enfriamiento evaporador; también hay diferencias en la tasa metabólica que influye en la carga básica de calor (Radostits 1999). Claramente, las menores ratas metabólicas que se traducen en menores ganancias de peso y producción de leche son una ventaja en cuanto a la termo tolerancia (Hansen 2004). El interés que ha suscitado este tema procede de la demanda de animales de gran producción en los países en vía de desarrollo de las zonas tropicales (Radostits 1999).

El equilibrio entre la pérdida y la ganancia de calor se controla mediante las funciones hipotalámicas reguladoras de calor. Los impulsos aferentes proceden de los receptores periféricos de frío y calor. Los impulsos eferentes controlan la actividad del centro respiratorio, el calibre de los vasos sanguíneos cutáneos, la actividad de las glándulas sudoríparas y el tono muscular. Se produce la acumulación de calor y un aumento de la temperatura corporal, con reducción de la frecuencia y profundidad de la respiración, constricción de los vasos sanguíneos cutáneos, interrupción de la transpiración y aumento del tono muscular. La pérdida de calor tiene lugar cuando se invierten estas funciones (Radostits 1999).

Hipertermia, golpe de calor, estrés calórico.

La hipertermia es la elevación de la temperatura corporal debido a la producción o absorción excesiva de calor, o a una pérdida deficiente de calor, cuando las causas de esas alteraciones son puramente físicas. El golpe de calor es la entidad clínica que se observa con más frecuencia. Las principales causas son temperatura elevada y ejercicio muscular intenso y prolongado, especialmente cuando el grado de humedad es elevado. Las diferencias raciales en cuanto a la tolerancia al calor parecen deberse a la capacidad

para aumentar la evaporación cutánea en condiciones de estrés por calor (Radostits 1999, Collier et al, 2012).

El estrés calórico es favorecido por la falta de sombra, circulación deficiente de aire, ausencia de viento, alto peso corporal (engrasamiento), alta producción de leche, preñez, esfuerzos corporales y excitaciones durante el manejo (arreos, persecuciones, masificación en lugares estrechos, transporte, entre otros), suministro insuficiente de agua, así como una menor tolerancia al calor por enfermedades o características fenotípicas raciales, como el color del pelo y la pigmentación de la piel. La capacidad de adaptación al clima y la distribución de la misma a los distintos mecanismos de defensa, está ligada a la raza e individualmente anclada a la genética (Dirksen 2005, DaSilva y Maia, 2012).

El estrés calórico se produce en cuanto la absorción de temperatura sobrepasa la capacidad para ceder calor; es decir que la sumatoria de todas las circunstancias ambientales que aportan calor y la propia temperatura generada por el metabolismo, sobrepasan las medidas fisiológicas de pérdida como la dilatación de los vasos cutáneos para irradiar calor, la evaporación por sudor y vías aéreas superiores, pérdidas de calor a través de orina y heces, la activación del centro de la sed en el hipotálamo y el aumento de secreción de saliva. Cuando la temperatura cerebral alcanza una temperatura de 40 – 41°C, los bovinos pasan de la respiración nasal a la bucal. Por otro lado están las medidas fisiológicas para disminuir la generación de calor; entre ellas la reducción en la ingesta, la rumia, la producción de leche, la actividad motora y estral. Así mismo aumentan la temperatura cutánea y la frecuencia respiratoria (Dirksen 2005).

La sudoración excesiva puede causar graves pérdidas de sodio y cloruros, mientras que la respiración intensificada puede provocar alcalosis metabólica, que acompañada de una deficiencia de agua; producirá una disminución del K plasmático, Cl y Na eritrocitario. El estrés calórico crónico provoca disminución del metabolismo basal, aumento del nivel hemático de la vasopresina y descenso de la aldosterona, tiroxina, somatotropina y cortisol (Dirksen 2005).

Los efectos negativos del estrés calórico, tienden incluso a empeorar; como consecuencia del cambio climático; sumado a esto, el incremento en la población mundial con su inherente aumento en la demanda de alimento particularmente en las zonas tropicales. Adicionalmente los programas de mejoramiento genético de incremento en los parámetros productivos aumentan la susceptibilidad animal al estrés calórico ambiental; debido a la relación directa entre la generación de calor metabólico y el nivel de producción (O'brien y col 2010).

El Agua para consumo bovino

El agua es el factor más crítico en la alimentación de los seres vivos; está involucrada directa o indirectamente con todos los procesos fisiológicos que se llevan a cabo dentro del organismo. Factores productivos como crecimiento, desarrollo, reproducción y producción de leche presentan una relación positiva con el acceso al agua en cantidad y calidad. Los requerimientos hídricos pueden variar de acuerdo a la edad, los estados productivo y fisiológico, el peso del individuo, el nivel de actividad, el consumo de materia seca y sal, la temperatura, la humedad relativa del ambiente y la velocidad del viento (Morgan 2011, Meyer y col 2006). El consumo de agua puede estar influenciado por la calidad físico química y biológica (Fraser 2013). Los requerimientos fisiológicos se suplen mediante el agua de bebida en un 83%, el otro 17% a través del agua presente en el forraje y el agua que resulta de la oxidación metabólica de los tejidos (NRC 2001). Las pérdidas de agua se dan principalmente a través de la orina, las heces y la evaporación cutánea y pulmonar. Los principales efectos de la deficiencia aguda de agua son la disminución en el consumo de alimento y la excreción de agua (Meyer y col 2006). Una pérdida de alrededor del 20% en el agua corporal es fatal para cualquier animal endotermo. El agua corporal está dividida entre los compartimientos extracelular o intersticial e intracelular, siendo este último el de más capacidad, con alrededor de dos tercios del agua que compone el organismo. Las pérdidas de agua en el cuerpo se dan a través de procesos fisiológicos como la producción de leche, la excreción urinaria y fecal, la secreción de saliva, el sudor y la perspiración respiratoria; estos últimos representan un 18% de las pérdidas de agua en el organismo (NRC 2001).

El agua es el nutriente más importante durante los periodos de estrés calórico. Las propiedades físicas del agua como la conductividad térmica y el calor latente de vaporización, son esenciales para la transferencia de calor del cuerpo al ambiente. El aumento en la temperatura ambiental de 18 a 30°C, aumentó el consumo de agua en un 29%, disminuyendo la humedad de las heces en un 33%, e incrementando las pérdidas de agua por orina, sudor y respiración en un 15, 59 y 50% respectivamente (Mcdowell 1967).

Además de la temperatura del aire, el efecto de la exposición directa a la luz del sol ha mostrado afectar el consumo voluntario de agua. Durante los meses de verano, los bovinos sin acceso a sombra bebieron 18% más agua que los bovinos sin acceso a sombra (Muller et al 1994).

Estado del arte

Actualmente el estrés calórico representa un gran reto para los productores ganaderos en todo el mundo, llevando a los países industrializados a invertir en sistemas de producción intensivos con sistemas de enfriamiento artificial como duchas, aspersores de agua y diferentes formas de sombrío (53). Schutz y col. en el 2011 (54), concluyeron que las vacas de leche prefieren el uso de la sombra sobre las duchas y la intemperie, y que esta preferencia aumenta con el calor, a pesar de que las duchas fueron más eficientes en reducir la carga de calor. Encontrando una disminución de la frecuencia respiratoria del 38% y del 17% para las duchas y la sombra respectivamente, mientras que para la temperatura corporal, una disminución de 0.07 y 0.01 respectivamente. Desafortunadamente, estas soluciones no son adaptables a la realidad de la ganadería colombiana; sin embargo, poseemos características climáticas que favorecen el crecimiento de los árboles durante todo el año, que podrían actuar como bioinfraestructura moduladora de las variables climáticas.

Como recomendación de la IPCC en su informe del 2014 (Gerbens-Leenes *et al*., 2010), los países deben invertir recursos modelando y prediciendo los impactos del cambio climático sobre los sistemas de producción de alimentos con el propósito de tomar

medidas que puedan mitigar algunos efectos y sobre todo, permitir la adaptación de los agroecosistemas a los cambios esperados.

Aunque esencialmente casi todos los países están participando en el mercado global del agua virtual, a través del comercio de bienes transables o *comodity trade;* pocos gobiernos consideran explícitamente la opción de salvaguardar o hacer uso de sus recursos hídricos mediante la importación/exportación de productos intensivos en el uso del agua, dentro de sus manejos ambientales del recurso. Adicionalmente, cuando las fuentes de agua sean reconocidas como el recurso más importante, la sostenibilidad de la provisión de agua solo puede ser alcanzada mediante el enfoque global del uso del agua. En este contexto, un conocimiento riguroso del perfil del agua virtual global con motivo de establecer cuál es la provisión de agua con importantes implicaciones como el aseguramiento de la seguridad hídrica de las naciones y el mantenimiento de la sostenibilidad hídrica del planeta Murgueitio *et al.* (2001).

La noción de que el consumo de carne y productos lácteos, son importantes contribuyentes a la problemática de la escasez de agua a nivel mundial ha sido ampliamente discutido y hoy es más vigente que nunca (55; 56; 57). La apropiación insostenible del recurso hídrico en los ambientes naturales, es ahora reconocida como un tema prioritario al tener impactos irreversibles sobre el bienestar del ser humano (58). Estas afirmaciones basadas en el concepto de Contenido de Agua Virtual (VWC por sus siglas en inglés) en los productos animales, el cual es el volumen total de agua utilizado en la producción animal. Incluyendo el agua de bebida para los animales, el agua utilizada para lavar instalaciones tanto en el sistema de producción como en el centro de beneficio y la cadena de distribución del alimento, y sobre todo, las pérdidas por evapotranspiración en las pasturas y cultivos de alimentos para los animales. Este último es abrumadoramente el más representativo, con un 99% del VWC. Sin embargo, *Mekonnen y Hoekstra*, 2010 afirman que el 98% de la huella hídrica de los productos animales está en la producción de los alimentos concentrados, sosteniendo que el 52% de esta, corresponde a la ganadería 33% y 19% para la carne y la leche bovina respectivamente. Aunque estos autores no toman en cuenta la evapotranspiración del sistema para establecer la huella hídrica de la ganadería, por lo tanto es un indicador que

no refleja el impacto que tiene la deforestación sobre el ciclo hidrológico del cual depende en gran medida, la resiliencia del sistema.

Resiliencia se define como la habilidad de un sistema de retener su estructura organizacional y su productividad tras una perturbación (PNUD, 2014). Esta tiene dos dimensiones: resistencia a los shocks (eventos extremos) y la capacidad de recuperación del sistema (Lin et al, 2008). Un agroecosistema es resiliente si es capaz de seguir produciendo alimentos, a pesar del gran desafío de una severa sequía o una tormenta. La biodiversidad de los agroecosistemas provee un enlace entre stress ponerlo en español y resiliencia, porque una diversidad de organismos es clave para que los ecosistemas funcionen y provean servicios. Si un grupo funcional de especies, o un nivel trófico son removidos, puede afectar el ecosistema, disminuyendo su capacidad de funcionar y prestar servicios. Especialmente al perderse la redundancia funcional de las especies que habitan dicho nicho, siendo así, los agroecosistemas insertos en una matriz ambiental más compleja son más resilientes.

En ese orden de ideas, según Cuartas y col. 2014 los mecanismos que favorecen la adaptación y mitigación del cambio climático por los sistemas silvopastoriles son:

1. Captura de CO_2 en diferentes estratos del sistema silvopastoril.
2. Mejoramiento de la fertilidad del suelo.
3. La promoción de buenas prácticas al reducir la dependencia de agroquímicos.
4. La reducción de la estacionalidad en la producción animal y vegetal, haciéndolas menos vulnerable al cambio climático.
5. Contribución a la preservación de ecosistemas frágiles y la recuperación de la biodiversidad.
6. Disminución de los costos de producción al aumentar la utilización de recursos locales.
7. Reducción de las emisiones entéricas de metano, en el ganado

Sin embargo, estos mecanismos ejercen un efecto sobre el confort térmico de los animales que habitan el agroecosistema, principalmente los bovinos, quienes gastarán menos energía disipando el calor, pudiéndola invertir en la producción (Ravagnolo et al.

2000). De esta manera el monitoreo de las variables fisiológicas relacionadas con la termorregulación y el metabolismo, son definitivas para establecer el efecto de las variables atmosféricas y microclimáticas sobre los habitantes del ecosistema.

Durante una medición experimental de temperatura corporal en animales en pastoreo, la presencia humana puede a menudo alterar el comportamiento animal y sus respuestas fisiológicas, dificultando la obtención de los datos individuales de temperatura, activando en muchos casos, la respuesta al estrés en los animales y alterando los índices endocrinos, inmunológicos y de temperatura. Además, los métodos para medir la temperatura corporal en animales de forma continua sin la necesidad de la presencia humana, son una herramienta invaluable para muchos investigadores. Otras metodologías que buscan este mismo fin, como los monitores de temperatura ruminales y abdominales, son muy invasivos y presentan gran susceptibilidad de alteración por factores externos, como por ejemplo la ingesta de agua ¿Cuál otro? en el caso de los monitores ruminales.

Burdick y col. en el 2012, proponen el uso de *data loggers* intravaginales con una alta correlación a la temperatura rectal, representando una opción de relativo bajo costo en la medición de este importante parámetro fisiológico en los animales.

El mejoramiento de las técnicas de monitoreo remoto puede significar una gran ayuda en el diagnóstico temprano de patologías o eventos fisiológicos y comportamentales como el estro o el estrés térmico.

Bibliografía

Aguilar, J. S., & Castillo, E. M. (2011). Proyectos forestales de mecanismo de desarrollo limpio en Colombia: Una mirada desde el desarrollo sostenible local. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, *19*(1), 125-140.

Arévalo, D., Lozano, J., & Sabogal, J. (2011). Estudio nacional de huella hídrica Colombia sector agrícola. *Revista Internacional de sostenibilidad, tecnología y humanismo*, (6), 101-126.

Arias, R. A., Mader, T. L., & Escobar, P. C. (2008). Factores climáticos que afectan el desempeño productivo del ganado bovino de carne y leche. *Archivos de medicina veterinaria*, *40*(1), 7-22.

Berman, A., & Horovitz, T. (2012). Radiant heat loss, an unexploited path for heat stress reduction in shaded cattle. *Journal of dairy science*, *95*(6), 3021-3031.

Berry, I., Shanklin, M. D., & Johnson, H. D. (1961). Dairy shelter design data based on milk production decline as affected by temperature and humidity. In *ASAE Winter Meeting, Chicago, Illinois. December* (pp. 12-15).

Bicego, K. C., Barros, R. C., & Branco, L. G. (2007). Physiology of temperature regulation: comparative aspects. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, *147*(3), 616-639.

Brew, M. N., Myer, R. O., Hersom, M. J., Carter, J. N., Elzo, M. A., Hansen, G. R., & Riley, D. G. (2011). Water intake and factors affecting water intake of growing beef cattle. *Livestock Science*, *140*(1), 297-300.

Burdick, N. C., Carroll, J. A., Dailey, J. W., Randel, R. D., Falkenberg, S. M., & Schmidt, T. B. (2012). Development of a self-contained, indwelling vaginal temperature probe for use in cattle research. *Journal of Thermal Biology*, *37*(4), 339-343.

Chará, J., Murgueitio, E., Zuluaga, A., & Giraldo, C. (2011). Ganadería colombiana sostenible. *Mainstreaming Biodiversity in Sustainable Cattle Ranching. Cali, Colombia: CIPAV Foundation*.

Chen, Z. M., & Chen, G. Q. (2013). Virtual water accounting for the globalized world economy: national water footprint and international virtual water trade. *Ecological Indicators*, *28*, 142-149.

Coimbra, P. A. D., Machado Filho, L. C. P., & Hötzel, M. J. (2012). Effects of social dominance, water trough location and shade availability on drinking behaviour of cows on pasture. *Applied Animal Behaviour Science*, *139*(3), 175-182.

CONPES (2010). Consejo nacional de política económica y social. *Consolidación de la política sanitaria y de inocuidad para las cadenas láctea y cárnica*. Ministerio de Agricultura y

Desarrollo Rural, Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA, DNP - Dirección de Desarrollo Rural Sostenible. Bogotá.

Cuenca Jiménez, N. J., Chavarro Miranda, F., & Diaz Gantiva, O. H. (2008). El sector de ganadería bovina en Colombia. Aplicación de modelos de series de tiempo al inventario ganadero. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, *16*(1), 165-177.

Da Silva, R. G. (2006). Weather and climate and animal production. *Update of the guide to agricultural meteorological practices*, 563-567. Silva, R. G., & Maia, A. S. C. (2012). *Principles of animal biometeorology* (Vol. 2). Springer Science & Business Media.

DANE (2005). Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Censo General 2005.

De Rensis, F., & Scaramuzzi, R. J. (2003). Heat stress and seasonal effects on reproduction in the dairy cow—a review. *Theriogenology*, *60*(6), 1139-1151.

Dirksen, G., Gründer, H. D., & Stöber, M. (2005). *Medicina interna y cirugía del bovino* (No. 619: 636.2). Inter-Médica,.

FEDEGAN (2012). Federación Colombiana de Ganaderos. La ganadería colombiana y las cadenas cárnicas y lácteas: Cifras de referencia. Plan Estratégico para la Ganadería. PEGA 2019.

FEDEGAN (2006). Federación Colombiana de Ganaderos. Plan estratégico para la ganadería colombiana.

FEDEGAN (2004). Federación Colombiana de Ganaderos. Modelo de gestión de desarrollo ganadero regional. Lineamientos generales. Bogotá, Colombia.

Fraser, D., Duncan, I. J., Edwards, S. A., Grandin, T., Gregory, N. G., Guyonnet, V., ... & Mench, J. A. (2013). General principles for the welfare of animals in production systems: the underlying science and its application. *The Veterinary Journal*, *198*(1), 19-27.

Gaughan, J. B., Mader, T. L., Holt, S. M., & Lisle, A. (2008). A new heat load index for feedlot cattle. *Faculty Papers and Publications in Animal Science*, 613.

Gerbens-Leenes, P. W., Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2013). The water footprint of poultry, pork and beef: A comparative study in different countries and production systems. *Water Resources and Industry*, *1*, 25-36.

Gerbens-Leenes, P. W., Nonhebel, S., & Krol, M. S. (2010). Food consumption patterns and economic growth. Increasing affluence and the use of natural resources. *Appetite*, *55*(3), 597-608.

Hansen, P. J. (2004). Physiological and cellular adaptations of zebu cattle to thermal stress. *Animal reproduction science*, *82*, 349-360.

Kadokawa, H., Sakatani, M., & Hansen, P. J. (2012). Perspectives on improvement of reproduction in cattle during heat stress in a future Japan. *Animal Science Journal*, *83*(6), 439-445.

Kadzere, C. T., Murphy, M. R., Silanikove, N., & Maltz, E. (2002). Heat stress in lactating dairy cows: a review. *Livestock production science*, *77*(1), 59-91.

Kendall, P. E., & Webster, J. R. (2009). Season and physiological status affects the circadian body temperature rhythm of dairy cows. *Livestock Science*, *125*(2), 155-160.

Londoño, G. A. (1993). *Estructura económica colombiana*. Universidad Javeriana.

Mader, T. L., Davis, M. S., & Brown-Brandl, T. (2006). Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. *Journal of Animal Science*, *84*(3), 712-719.

Martin, P., Bateson, P. P. G., & Bateson, P. (1993). *Measuring behaviour: an introductory guide*. Cambridge University Press.

McDowell, R. E., & Weldy, J. R. (1967). Water exchange of cattle under heat stress. *Biometeorol*, *2*, 414.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2010). A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat.

Meyer, U., Stahl, W., & Flachowsky, G. (2006). Investigations on the water intake of growing bulls. *Livestock Science*, *103*(1), 186-191.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo rural (2012). Anuario estadístico agropecuario.

Mojica-F, T. R., Castellanos, D., & Bernal, N. Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico de la cadena láctea colombiana. Ministerio de Agricultura y desarrollo rural. Bogotá DC.

Morgan, S. E. (2011). Water quality for cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, *27*(2), 285-295.

Muller, C. J. C., Botha, J. A., & Smith, W. A. (1994). Effect of shade on various parameters of Friesian cows in a Mediterranean climate in South Africa. 1. Feed and water intake, milk production and milk composition. South African Journal of Animal Science, 24(2), 49-55.

Murgueitio, E. (1999). Reconversión ambiental y social de la ganadería bovina en Colombia. *World Animal Review (FAO) Revue Mondiale de Zootechnie (FAO) Revista Mundial de Zootecnia (FAO)*.

Murgueitio, E., & Calle, Z. (1998). Diversidad biológica en sistemas de ganadería bovina en Colombia. In *Conferencia electrónica de la FAO sobre Agroforestería para la producción animal en Latinoamérica*.

Murgueitio, E., Cuartas, C., & Naranjo, J. (2008). Ganadería del futuro: Investigación para el desarrollo. *Fundación CIPAV, Colombia*.

Murgueitio, R. E., Hernández, M. C., Riascos, V. M., Cuartas, C., Uribe, T. F., & Lopera, J. J. (2007). Montaje de modelos ganaderos sostenibles basados en sistemas silvopastoriles en seis subregiones lecheras de Colombia. *Proyecto Piloto departamento del Cesar, Hacienda El Porvenir. Fundacion centro para la investigación en sistemas sostenibles de producción agropecuaria-CIPAV*.

Murgueitio, R., Rosales, E., & M Gómez, M. E. (1999). *Agroforestería para la producción animal sostenible* (No. Doc. 19575)* CO-BAC, Bogotá).

National Research Council, NRC. (2001). *Nutrient requirements of dairy cattle: 2001*. National Academies Press.

O'brien, M. D., Rhoads, R. P., Sanders, S. R., Duff, G. C., & Baumgard, L. H. (2010). Metabolic adaptations to heat stress in growing cattle. *Domestic animal endocrinology*, *38*(2), 86-94.

Radostits, O. M. G., Blood, C. C., Hinchcliff, D. C., Arundel, K. W., Jacobs, J. H., Leslie, D. E., ... & Isabel, M. G. (2002). *Medicina veterinaria: tratado de las enfermedades del ganado bovino, ovino, porcino, caprino y equino*.

Ravagnolo, O., Misztal, I., & Hoogenboom, G. (2000). Genetic component of heat stress in dairy cattle, development of heat index function. *Journal of dairy science*, *83*(9), 2120-2125.

Rodriguez, R., Novo, P., & Garrido, A. (2009). La huella hídrica de la ganadería española. *Papeles de Agua Virtual*, (4).

Sabogal, J., & Moreno, E. (2011). Proyectos forestales de mecanismo de desarrollo Limpio en Colombia: una mirada desde el desarrollo sostenible local. *Universidad Militar Nueva Granada*.

Van Ausdal, S. (2009). Potreros, ganancias y poder. Una historia ambiental de la ganadería en Colombia, 1850-1950/Pasture, Profit, and Power. An Environmental History of Cattle Ranching in Colombia, 1850-1950. *Historia Crítica*, 126-149.

West, J. W. (2003). Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *Journal of dairy science*, *86*(6), 2131-2144.

Wolfenson, D., Roth, Z., & Meidan, R. (2000). Impaired reproduction in heat-stressed cattle: basic and applied aspects. *Animal reproduction science*, *60*, 535-547.

Bolivia, P. N. U. D. (2014). Informe sobre Desarrollo Humano 2014. Sostener el Progreso Humano: reducir vulnerabilidades y construir resiliencia. *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Ed. Naciones Unidas, Nueva York (Estados Unidos)*.

Lin, B. B., Perfecto, I., & Vandermeer, J. (2008). Synergies between agricultural intensification and climate change could create surprising vulnerabilities for crops. *Bioscience*, *58*(9), 847-854.

Capítulo 2

Retos de la agricultura frente al manejo del agua en el contexto del cambio climático.

Challenges facing agriculture water management in the context of climate change.

Esteban Gil Restrepo[1], Rolando Barahona-Rosales[2], Ariel Tarazona Morales[1,2*]
[1]BIOGENESIS Research Group, [2]Departamento de Producción Animal, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

Resumen

Las propiedades físico-químicas del agua la hacen el elemento integrador de los factores bióticos y abióticos, permitiendo el intercambio de energía y favoreciendo el dinamismo de la materia. A pesar de ser un recurso renovable, su disponibilidad en el tiempo está sujeta a ciclos biogeoquímicos cada vez más saturados ante las demandas de las poblaciones humanas en crecimiento, cuyos ciclos de vida tienden a ser mucho menores que los ciclos de reciclaje de los recursos naturales. Los ritmos y dinámicas sociopolíticas del mundo globalizado deben coincidir con los ritmos naturales para asegurar el bienestar de las poblaciones más vulnerables ante el inminente cambio climático. Esto implica la caída de grandes paradigmas en la agricultura y la economía, donde los recursos naturales y los servicios ecosistémicos sean valorados como patrimonio no sólo de la humanidad, sino también de las demás especies con las que cohabitamos.

Palabras clave: escasez hídrica, globalización, cambio climático, huella hídrica.

Abstract

The physicochemical properties of water make it the integrator element of biotic and abiotic factors, allowing the interchange of energy and the dynamism of matter. In spite of being a renewable resource, his availability on time is bond to biogeochemical cycles that often overcome human lives. The sociopolitical dynamics of globalized world most agree with natural rhythms to ensure the welfare of most vulnerable populations in the face of climate change. All this implies the fall of big paradigms in agriculture and economy; where the natural resources and ecosystem services be valued as a heritage, not only for humans, but also, the rest of live species with which we cohabit.

Key words: water scarcity, globalization, climate change, water footprint.

Introducción

El estudio del agua es de gran importancia ya que es un componente fundamental para la vida, es el compuesto químico que quizá interactúa en mayor cuantía en la biosfera y todos los procesos biológicos se relacionan con ella directa o indirectamente (Willmer et al., 2005). Su estudio es prioritario debido a la demanda creciente de este recurso y los retos emergentes por el calentamiento global donde el vapor de agua es el principal gas con efecto invernadero en la atmosfera (Rapp, 2014), aun cuando este papel se ha subestimado en la literatura científica.

Es evidente que el cambio climático está alterando los regímenes de precipitación, la distribución de las cosechas, las plagas y las enfermedades (FAO, 2010; IPCC, 2014), repercutiendo negativamente sobre el acceso al recurso hídrico en muchas regiones y comprometiendo el futuro nutricional y alimentario de los asentamientos humanos, cuya disponibilidad de agua para consumo y utilización en cultivos es bastante variable. Ya en 1992 se concluyó que "*es imperativo para la especie humana realizar un manejo eficiente de los recursos hídricos; para lograrlo, se requiere una aproximación holística que reúna el desarrollo socioeconómico con la protección de los ecosistemas naturales*" de manera que no es algo nuevo (ICWE, 1992).

Un factor de gran interés es que en las economías emergentes ha aumentado la capacidad adquisitiva de las personas, cambiando la composición de la dieta y aumentando el consumo de productos de origen animal lo que conlleva a incrementar considerablemente los requerimientos de agua para los procesos productivos (Popkim, 2002). Se ha calculado que de la huella hídrica humana, el 92% corresponde a las actividades agrícolas y que la carne es el alimento con mayores requerimientos hídricos durante toda la cadena productiva (Mekonnen y Hoekstra, 2012). Esto es particularmente importante en los sistemas extensivos de producción con monocultivos de gramíneas, donde la evaporación de agua del suelo contribuye a una importante pérdida de recursos en el sistema, generando erosión, compactación y sedimentación, conduciendo a procesos de desertificación (Weber y Gokhale, 2011).

Por otro lado, la implementación de sistemas intensivo-industrializados de producción animal resulta en mayor consumo de insumos externos (concentrados, agroquímicos y combustibles fósiles; FAO, 2005). En consecuencia, se ha expandido la frontera agropecuaria para elaborar alimentos concentrados, agrocombustibles o establecer pasturas para ganadería extensiva, sustituyendo ecosistemas nativos por monocultivos de gramíneas, granos y cereales, en detrimento de los recursos naturales y la biodiversidad (Murgueitio et al., 2010).

A pesar de la dependencia humana al recurso agua, existen pocos pensamientos acerca de su disponibilidad, aun cuando este es un recurso renovable cada vez más escaso, ya que sólo 0,003% del volumen total del agua de nuestro planeta es agua dulce potencialmente accesible para el consumo humano. Irónicamente, cerca del 70% de esta es destinada a la irrigación de cultivos y otros usos difíciles de valorar como la minería y el sector energético (Lundqvist et al., 2008).

En este documento se discute la problemática del agua desde diferentes enfoques; entendiendo que la arquitectura química del agua ha moldeado el funcionamiento de los ecosistemas y la fisiología de los seres vivos; y que nuestra dependencia natural a ella, determina las dinámicas económicas, políticas y sociales de las poblaciones humanas.

La explosión demográfica

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) estimó la población mundial en 7200 millones de personas en el 2014. La población humana viene creciendo a una tasa de 82 millones anuales. Se prevé que se alcanzarán los 8100 millones para 2025 y 9600 millones para el año 2050. Esta explosión demográfica comenzó con la revolución industrial, cuando éramos solamente 1000 millones de habitantes a inicios del siglo XIX. En 1927, se alcanzaron los 2000 millones. Treinta años después fueron 3000 millones y después de los años sesenta la población comenzó a crecer a razón de 1000 millones por década hasta llegar a los 7000 millones en 2011 (Van Bavel. 2013;

Figura 2).

China e India hospedan un tercio de la población mundial, y un 60% de los habitantes del mundo habitan en el continente Asiático. Luego sigue África, que cuenta con el 15%, Europa con 11%, América Latina con 6%, Norteamérica con 5% y Oceanía con 3% (ONU 2014). El 80% de los seres humanos pertenecen a países en desarrollo con altos índices de desnutrición y grandes dificultades para el acceso al recurso hídrico, mientras los países más desarrollados tienen una curva de crecimiento poblacional estable y con tendencia a decrecer (PNUD 2014). El crecimiento poblacional ha mostrado una desaceleración global del 0,3% en lo que va de la segunda década del siglo XXI, al pasar de un crecimiento de 1,5% en la década de los 90 a 1,2% en el período 2010 – 2015 (ONU 2014). Se espera que al 2050 la población aumente a una tasa de tan sólo 49 millones de habitantes anuales. La fertilidad también disminuyó en la mayoría de países, desde 4,5 hijos/mujer en la década de los setenta a 3 en los noventa y 2,5 en la segunda década del siglo XXI (ONU 2014). Curiosamente, los 50 países menos desarrollados registran las más altas tasas de crecimiento poblacional, con una media del 2,4% anual (ONU, 2005).

El crecimiento poblacional se encuentra fuertemente relacionado con la disminución en las tasas de mortalidad y el aumento de la esperanza de vida al nacer; debido a mejoras en los servicios de salud, la tecnología médica y las prácticas de higiene (PNUD, 2014) y las prácticas de inmunización contra diversas enfermedades (como la polio y la viruela) (Pruss, 2002). También obedece a las tasas de fertilidad asociadas al alto porcentaje de población juvenil, especialmente en países en desarrollo donde existen graves carencias en acceso a la educación y métodos de anticoncepción (PNUD, 2014). Otros factores como la urbanización, el aumento en la eficiencia agrícola y las vías de distribución para el comercio de alimentos y la disponibilidad constante de los mismos en los mercados internacionales han favorecido el crecimiento poblacional (FAO, 2015). Más de la mitad de la población mundial habita en centros urbanos y de estos, el 30% habita en tugurios (WWAP, 2015), mientras que los habitantes rurales muestran una clara tendencia a la contracción poblacional (PNUD, 2014; ONU, 2014). Esto es de especial importancia ya que en las áreas rurales se producen la mayoría de alimentos y se da la expansión de la frontera agropecuaria, importantes cambios en los usos del suelo con fuertes impactos sobre los ecosistemas y los recursos naturales como los bosques y las fuentes de agua. Las ciudades por otro lado, ocupan tan solo el 2% de la superficie terrestre, pero consumen el 75% de los recursos naturales extraídos por el hombre y producen el 75% de los desechos.

Según el PNUD en el 2014, el 92% de la infancia mundial se encuentra en los países en vía de desarrollo, donde de cada 100, 7 no superarán los 5 años de edad, 25 vivirán en la pobreza y 30 sufrirán trastornos del crecimiento asociados a la desnutrición e infecciones como el sarampión, la neumonía, la malaria y la diarrea. Es innegable que el aumento poblacional humano genera un fuerte impacto sobre los recursos naturales, especialmente las fuentes de agua que no sólo actúan como abrevadero, sino que también hacen parte fundamental de sectores de la sociedad como la agricultura, el sector energético y la industria. Es necesario un ejercicio de planeación y la gobernanza del agua en un mundo con suministros limitados y población en crecimiento.

Figura 2. Clasificación de los estados del déficit hídrico. Adaptado de Tarjuelo et al. 2010.

El reto de definir la disponibilidad de agua para tantos sedientos

Definir la disponibilidad y/o escasez del agua puede representar un gran reto, ya que no es un recurso estático como el suelo, sino que por el contrario está fluyendo constantemente a través de un ciclo dinámico de evaporación, precipitación, escorrentía y lixiviación, lo que puede hacer variar su disponibilidad espacio-temporal y su calidad. Ésta última, determina de manera importante su valor para las comunidades y los ecosistemas que de ella dependen.

Para comprender el fenómeno de la escasez del agua es imperativo comprender de dónde proviene, cómo se extrae, cómo se almacena, cómo se distribuye y de qué formas se consume. Esto permite analizar las diferentes rutas del agua en el ciclo hidrológico global determinando su futura disponibilidad. Existen tres estados donde el acceso al agua es limitado: aridez, sequía y escasez (Figura 3).

Cuando un individuo carece de acceso suficiente al agua para satisfacer sus necesidades de bebida, higiene y sustento, se encuentra en un estado de *inseguridad hídrica*. Asimismo, cuando esta situación prima en una región se determina un estado de *escasez hídrica* o *estrés hídrico* para dicha comunidad (Rijsberman, 2006). Aproximadamente 1600 millones de personas que habitan en cuencas hidrográficas sufren de escasez de agua por incapacidad económica para desarrollar sistemas de infraestructura que les permitan acceder de manera segura y constante a este recurso. Una inadecuada gobernanza de los acuíferos regionales está directamente ligada a los fenómenos de estrés y escasez hídrica (Tarjuelo et al., 2010).

Se han desarrollado múltiples indicadores para establecer cuantitativamente el nivel de vulnerabilidad de los recursos hídricos. Es necesario utilizar con cuidado los términos escasez hídrica o estrés hídrico, que han sido utilizados indistintamente en la literatura sin tener en cuenta qué tipo de parámetros e indicadores se utilizaron para aplicar este calificativo, que no necesariamente hace referencia a una ausencia física del elemento agua. A continuación se describen los principales indicadores de escasez hídrica citados en la literatura:

Índice de requerimientos básicos de agua (Gleick, 1996)

El agua necesaria para satisfacer sus necesidades básicas de consumo, de higiene, servicios sanitarios y otros usos domésticos en la vida diaria de una persona se ha calculado en 50 litros/día. De estos, basándose en datos del NRC (National Research Council), se estableció que una persona bajo condiciones climáticas y un nivel de actividad “normales” consume alrededor de 5 litros/día. Por otro lado, se han calculado 35 litros/día para servicios sanitarios e higiene, a pesar de la gran variabilidad sociocultural que existe alrededor de este factor. Y por último, se calcula que para la preparación de los alimentos de una persona se requieren diariamente 10 litros de agua.

Indicador Falkenmark o índice de estrés hídrico (Falkenmark et al., 1989):

Este indicador es utilizado con gran frecuencia gracias a su simpleza y fácil comprensión. Éste propone un umbral de 1700 m^3/per cápita/año de recurso hídrico renovable, basado en estimaciones de requerimientos domésticos, agrícolas, energéticos, industriales y ambientales. Cuando el suministro está entre 1000 – 1700 m^3, esta condición se denomina como estrés hídrico; cuando está entre 500 – 1000 m^3 se denomina escasez hídrica; y por debajo de 500 m^3 se denomina escasez absoluta. Esta información resulta útil para analizarla desde el punto de vista nacional. Sin embargo, aún si se cuenta con esta información, pueden permanecer interrogantes importantes como las diferencias regionales en la disponibilidad o accesibilidad al recurso, la infraestructura desarrollada para la gestión del mismo, el estado de calidad e inocuidad del recurso o las diferencias en la demanda relacionadas con el estilo de vida y las condiciones meteorológicas (Rijsberman, 2006).

El índice de vulnerabilidad del recurso hídrico

Este indicador, propuesto por Shiklomanov (1991) y modificado por Raskin et al. (1997), toma como base la función entre la disponibilidad y la extracción del recurso de sus fuentes para satisfacer las necesidades humanas. Se considera un país tiene escasez de agua cuando su extracción se encuentra entre el 20 - 40% del suministro anual; y con escasez severa cuando esta proporción excede el 40%. Otros indicadores con metodologías similares y algunas variaciones han sido propuestos por Alcamo et al. (1997) y Vorosmarty et al. (2000). Las limitaciones de este tipo de análisis es que no se tiene en cuenta si el agua consumida ha sido evaporada o contaminada, de manera que no es posible calcular o predecir cuánta de ella puede reciclarse a través de un flujo de retorno, ser tratada o destinada a otros usos. Tampoco se tiene idea de la capacidad de una sociedad de adaptarse o recuperarse de una crisis por escasez de agua (Rijsberman, 2006), es decir, la resiliencia hídrica del sistema.

Índice de pobreza hídrica (Sullivan et al., 2003)

Este indicador intenta reflejar tanto la disponibilidad física del agua, como el grado en que los humanos se sirven de ella teniendo en cuenta el mantenimiento de la integridad ecológica. Agrupa componentes en cinco dimensiones: acceso al recurso en cantidad, calidad y variabilidad de la misma; volúmenes destinados a la alimentación, procesos productivos, capacidad de manejo del recurso e impactos ambientales (Rijsberman, 2006). Este indicador permite evaluar regiones, comunidades y países tomando en cuenta factores físicos y socioeconómicos; donde la denominada “pobreza hídrica” tiene una estrecha relación con bajos ingresos económicos y problemas de salud (Lawrence, 2002).

La importación de cereales y la disponibilidad de recurso hídrico (Yang et al., 2003)

Existe una fuerte correlación entre las importaciones de alimentos, especialmente granos y cereales, y los recursos hidrológicos de una nación, puesto que a nivel mundial, el 70% de la extracción de agua de sus fuentes naturales corresponde a usos agrícolas (FAO, 2010). Se consideró un umbral de 5000 m^3/persona/año para países con poblaciones superiores al millón de habitantes. Sin embargo, aunque existe una relación inversa entre la disponibilidad de tierras para cultivo e importación de cereales (Brown y Matlock. 2011), esta no ha sido tenida en cuenta en este análisis y por lo tanto actúa como factor de confusión.

Como se puede ver, existe gran diversidad de indicadores que han surgido de la urgente necesidad para diagnosticar el estatus y la disponibilidad del recurso hídrico. De igual manera, existe muy poco consenso acerca de una definición unificada de la escasez y el estrés hídrico de una sociedad globalizada.

A partir de la urgente necesidad de medir la disponibilidad del agua, surgieron otros indicadores para establecer el consumo, que puede aplicarse a las naciones, los sectores económicos, los productos y las personas.

El concepto del agua virtual (Allan, 1998)

El agua virtual comprende el volumen de agua necesario para elaborar un producto a lo largo de toda su cadena productiva, una vez este entra en el mercado internacional y es cuantificada como m^3/kg de producto. Este concepto permite establecer el impacto que generan las diferentes naciones sobre los recursos hídricos de otras regiones a partir de sus dietas y estilos de vida. Se cuantifican las transacciones internacionales del agua, convirtiendo dicho recurso en una mercancía virtual asociada principalmente al comercio de alimentos y otros artículos relacionados con actividades agrícolas que tienen alto impacto ambiental como es el caso de los agrocombustibles y los textiles.

El concepto de huella hídrica (Hoekstra, 2005)

Este concepto es un indicador de requerimientos hídricos en relación a los bienes de consumo; es decir, el volumen de agua fresca utilizada a lo largo de toda una cadena de producción para generar un bien o servicio. Es un término análogo de la huella ecológica (cantidad de tierra y océano bioproductivo necesarios para solventar la vida de una persona) y de la huella de carbono (cantidad de equivalentes de CO_2 liberados a la atmósfera durante un proceso productivo ó ciclo de vida determinado). La huella hídrica se divide en tres componentes:

Huella azul: Es el volumen de agua dulce extraída de un cuerpo de agua superficial o subterránea que se evapora durante un proceso productivo o es incorporada a un producto.

Huella verde: Es el volumen de agua de precipitación, almacenada en el suelo, que es evaporada durante un proceso productivo o incorporada a un producto.

Huella gris: Es la cantidad de agua contaminada durante el proceso productivo; cuantificada como el volumen de agua necesario para diluir los contaminantes hasta el punto en que la calidad de la misma retorne a los estándares aceptables para su consumo o reutilización.

Requerimientos hídricos de la humanidad

Durante el siglo XX se triplicó la población mundial, mientras que el consumo de agua se sextuplicó (Rijsberman, 2006). Esto indica que el crecimiento demográfico no es el único factor que determina el consumo de agua. El nivel de industrialización en los centros urbanos, el grado de tecnificación agrícola, la deforestación y el estilo de vida de las personas; son tal vez los factores que más determinan las necesidades hídricas de una sociedad (*Hanjraa y Quresh. 2010)*. A nivel mundial, se utiliza el 54% del agua fresca disponible en el planeta para un año, previendo que para el 2025 se utilizará el 70% de este recurso. Suponiendo que todos los países tuvieran un consumo per cápita similar al de los países desarrollados, se consumiría el 90% (Rijsberman, 2002). Naciones como Alemania, EU y Reino Unido consumen alrededor del 65% de su reserva de agua disponible en el sector energético y otros usos industriales, mientras que los países en vía de desarrollo consumen el 10% (Molden, 2007).

Los patrones de crecimiento y expansión de las poblaciones humanas han conllevado a cambios en el uso de los suelos. Antes del siglo XIX, la deforestación se dio principalmente en las zonas templadas (Asia, Europa y Norte América), durante el florecimiento de diferentes civilizaciones. Sin embargo, la deforestación luego se trasladó a las zonas tropicales alcanzando las 16 millones de Ha por año durante la última década del siglo XX. Iniciando el siglo XXI, la deforestación se desaceleró a 13 millones de hectáreas de bosque talado por año (Scott, 2014). Sin embargo, la FAO (2015) reportó una pérdida de bosque anual de 7,6 millones de ha versus una ganancia de 4,3 millones de ha de bosque anuales; lo que resulta en una pérdida neta de 3,3 millones de ha de

bosque al año, estimando que a la fecha el mundo contaba con 3.999 millones de ha de bosques naturales.

Aunque ha habido una disminución importante en la deforestación, las tasas actuales continúan siendo preocupantes y de gran impacto sobre las emisiones de efecto invernadero y la captura de los mismos, así como la desprotección de acuíferos. La mayor parte de la regeneración natural de los bosques se está dando en las regiones templadas y boreales, donde la presión antrópica para cultivos y minería es menor (Scott, 2014). Esta dinámica es importante dado que los bosques naturales son la principal "bioinfraestructura" de retención de agua en los ecosistemas, al actuar como agentes refrigerantes disminuyendo la evaporación de agua en el suelo, aumentando la absorbancia lumínica, protegiendo las fuentes de agua de la eutrofización, reteniendo los sedimentos generados a partir de la escorrentía superficial y previniendo la sedimentación de acuíferos e inhibiendo la pérdida de humedad al bloquear las corrientes de viento. Los bosques son además los principales fijadores de dióxido de carbono atmosférico, entre otras funciones vitales para la biodiversidad y la conservación del agua en un ecosistema.

En 1955, sólo siete países se encontraban clasificados en condiciones de estrés hídrico. Para 1990, este número ascendió a 20 y se espera que de 10-15 naciones se sumen a la lista para el año 2025, incluso para el año 2050 se predice que 2/3 de la población mundial enfrente condiciones de escasez de agua (Gosaín et al., 2006). Entre estos, se encuentran los países de África Subsahariana y el Medio Oriente, caracterizados por ecosistemas áridos. Rosegrant et al., 2002 afirmaron que para el 2025, el 64% de la población mundial vivirá en zonas con privación hídrica.

Para el 2003, se estimaba que alrededor de 1200 millones de personas carecían de acceso al agua potable (WHO, 2003) y que para el 2025 alcanzarían los 2700 millones. Esta carencia en el acceso al agua potable está asociada a precarios hábitos de higiene, uno de los factores de riesgo con mayores impactos sobre la salud pública global, donde las enfermedades diarreicas son responsables de la muerte de 1´609.000 personas cada año (Prus et al., 2002), de las cuales un tercio de ellas son niños menores de cinco años (Prus et al., 2002; PNUD, 2014). Las personas de bajos recursos son las de mayor

vulnerabilidad, cayendo en un círculo vicioso de pobreza, desnutrición y enfermedad (Prus et al., 2002). Vulnerabilidad debe entenderse como un estado de fragilidad del ser humano donde su autonomía, integridad y dignidad son susceptibles de ser amenazadas, siendo los niños, las mujeres y los ancianos los grupos más vulnerables (WWAP, 2012).

Hoekstra y Mekonnen (2012) al estudiar la huella hídrica de la humanidad, calcularon un consumo global per cápita/año de 1385 m^3 de agua, para el periodo 1996-2005, encontrando grandes diferencias entre los países desarrollados y los países en vía de desarrollo. Para los primeros, el rango estuvo entre 1250-2850 m^3; mientras que los segundos mostraron un rango mucho más amplio, entre 550-3800 m^3. Esto demuestra importantes diferencias en la eficiencia en el uso del agua, la eficiencia productiva y los patrones de consumo entre países.

Los diferentes usos del recurso hídrico exigen diferentes tipos de agua. No es lo mismo usar agua para consumo humano o usos domésticos que para consumo animal, irrigación de cultivos o generación de energía hidroeléctrica y otros fines industriales. Las características microbiológicas y fisicoquímicas pueden variar enormemente entre los diferentes usos, durante y luego de su utilización.

Estas circunstancias plantean el problema de la globalización frente a un recurso natural limitado aunque renovable. Es necesario cuestionar el papel de las regiones con abundancia del recurso y ponderar sobre el futuro de la seguridad alimentaria y la seguridad hídrica frente al cambio climático. También se debe revisar y comprender las interrelaciones entre las corrientes demográficas, la utilización y demanda de los recursos naturales y los mercados de materias primas concernientes a los alimentos con sus implicaciones biológicas.

El agua escondida tras los alimentos y los ritmos de vida

Hasta la fecha aún se considera el agua como un recurso cuya medida de consumo es la extracción de las cuencas para su uso *in situ,* sin considerar que los problemas

asociados a su disponibilidad y/o escasez hacen parte intrínseca de la estructura económica mundial. Bajo este panorama, existen múltiples ejemplos de productores y consumidores favoreciendo el empobrecimiento y contaminación de acuíferos a costa de comunidades locales y ecosistemas (Hoekstra. 2012). Paradójicamente, el agua necesaria para satisfacer los requerimientos de bebida de un ser humano se encuentra entre 2 y 5 litros, mientras que el agua necesaria para producir la comida que este ingiere puede ser 1000 veces mayor (FAO, 2005). Paralelamente, sólo el 4% de la huella hídrica humana corresponde al uso doméstico del agua, mientras que el 27% corresponde al consumo de productos de origen animal como carne, leche y huevos. Así, una importante fracción de la problemática del agua está asociada a los sistemas de producción agropecuarios y a la dieta de las personas (Hoekstra 2012). Como lo demuestra la Tabla 1, donde se expone la relación entre los alimentos y el agua necesaria para producirlos.

Se ha estimado que la agricultura consume el 70% del agua dulce utilizada a nivel global (FAO, 2005). Por su parte, Gerbens-Leenes et al. (2011) atribuyeron un 92% de la huella hídrica antrópica a la agricultura; de la cual, un tercio corresponde a productos de origen animal. Existen grandes diferencias en el uso de agua para agricultura entre países y/o diferentes regiones de un mismo país, ya que los sistemas de crianza animal varían enormemente en respuesta a niveles socioeconómicos, culturas, topografía y características agroecológicas y meteorológicas.

Renault y Wallender (2000) calcularon que producir un kg de cereal requiere 1.000 litros de agua evapotranspirada, mientras que producir un kg de carne bovina en los sistemas industrializados de Estados Unidos requiere unos 13.500 litros. Un buen porcentaje de este consumo, está asociado a la producción de los alimentos concentrados. Bajo esta lógica, cuando un país importa un millón de toneladas de un cereal, está aprovechando un millón de km^3 de agua de otro país para alimentar a su pueblo sin comprometer sus propias fuentes hídricas (FAO, 2002), lo que supone un reto internacional para la gobernanza del recurso. Por otro lado, los requerimientos de agua para producir un kg de cereales en un país árido puede ser tres veces mayor que los requeridos para producir ese mismo cereal en un país tropical con abundancia de agua (Hoekstra, 2003).

Tabla 1. Huella hídrica promedio de algunos alimentos de origen animal y vegetal.

	Huella hídrica por unidad de peso, L/kg			
Alimento	**Verde**	**Azul**	**Gris**	**Total**
Vegetales	194	43	85	322
Frutas	726	147	89	962
Cereales	1.232	228	184	1.644
Legumbres	3.180	141	734	4.055
Leche	863	86	72	1.02
Huevos	2.592	244	429	3.265
Carne pollo	3.545	313	467	4.325
Mantequilla	4.695	465	393	5.553
Carne ovino caprina	8,253	457	53	8.763
Carne bovina	14.414	550	451	15.415
Carne de cerdo	4.907	459	622	5.988

Adaptado de Mekonen y Hoekstra. 2010.

A inicios del siglo XXI, el 37% de la producción mundial de granos era destinada a la alimentación animal (670 millones de toneladas de cereales; ONU, 2005). Esta constituye el 98% de la huella hídrica de los productos pecuarios (Mekonnen y Hoekstra, 2011), mientras que el agua de bebida para los animales representa solo el 1% (Hoekstra, 2012).

A medida que ha aumentado la población, ha aumentado la demanda de alimentos, especialmente los de origen animal en los países en vía de desarrollo donde ha aumentado la capacidad adquisitiva de las personas (Latham, 2000; ONU 2005, FAO

2011). La Tabla 2 ilustra la demanda global de alimentos, diferenciando entre los países desarrollados y los países que se encuentran en vía de desarrollo.

Tabla 2. Demanda mundial de alimentos para los productos agrícolas (millones de toneladas)

Año	Cereales			Otros cultivos			Productos de origen animal		
	1989	**2025**	**2050**	**1989**	**2025**	**2050**	**1989**	**2025**	**2050**
Menos desarrollados	940	1882	2419	1870	3950	5502	307	903	1405
Desarrollados	754	952	961	1110	1298	1262	565	666	660
El mundo entero	1694	2834	3380	2980	5248	6764	872	1569	2065

Fuente: Modificado de Hanjra & Qureshi, 2010

El consumo de carne se duplicó con el cambio de siglo y se espera que se duplique nuevamente para el 2050, pasando de 229 millones de toneladas en el año 2000 a 465 millones de toneladas en el 2050 (FAO, 2005). En los países desarrollados sucede más del 40% de la ingesta de proteína de origen animal, aunque el consumo ha sido estable en los últimos treinta años. Sin embargo, en los países en vía de desarrollo asiáticos este consumo aumentó en 140%, seguido de América Latina donde el consumo per cápita aumentó en 32%.

La producción agrícola deberá incrementarse en un 70% en los próximos 30 años para satisfacer los requerimientos alimentarios de una población que se espera aumente en 40% en tan solo treinta años (FAO, 2011). Eso equivaldría a producir anualmente mil millones de toneladas de cereales y 200 millones de toneladas de carne anuales adicionales a las producidas hoy. En algunos países en vía de desarrollo, este incremento de la producción agrícola deberá ser del 100%. Eso, sin tener en cuenta las

pérdidas y desperdicio de alimento por malas técnicas de siembra, cosecha, transporte, procesamiento, distribución y uso doméstico; que según Lundqvist, 2008 podrían estar alrededor del 50% a nivel global. Otra cifra alarmante en un mundo donde coexisten graves problemas de desnutrición y obesidad.

Existe entonces una gran problemática hídrica alrededor de la producción de alimentos en respuesta al crecimiento demográfico y ante el inminente cambio climático que generará fuertes cambios en las condiciones de cultivo por cambios en las distribuciones e intensidad de las precipitaciones y aumentos de temperatura. Es claro que algunas regiones se verán fuertemente afectadas, mientras que las regiones templadas podrían verse beneficiadas; algunas regiones lidiarán con sequías mientras que otras sufrirán inundaciones (IPCC, 2014). Además de los problemas sanitarios, los sistemas agropecuarios deberán enfrentar problemas abióticos, que a su vez generarán cambios en la biota con graves repercusiones sobre las poblaciones de plagas y favorecerán la aparición de múltiples enfermedades, especialmente aquellas transmitidas por vectores y asociadas al agua y los alimentos (Herrero et al., 2009).

Estas situaciones representan un reto complejo en vista de las diferentes aptitudes económicas de las naciones y tratados económicos para la producción de materias primas y su transformación. Cabe preguntar ¿Que posiciones asumirán los países con abundancia de recurso hídrico y aptitud agrícola frente a los cambios meteorológicos? ¿De qué manera cambiarán las tecnologías agropecuarias para adaptarse a los nuevos retos que impone el calentamiento global? ¿Qué estrategias económicas surgirán para solucionar el hambre y la desnutrición humana en las regiones con escasez hídrica y dificultades para el establecimiento de sistemas agrícolas resilientes y sostenibles?

Es evidente que se deberán desarrollar sistemas productivos que hagan un uso responsable de los recursos naturales, especialmente del agua. A partir de allí, los demás sectores económicos y políticos deberán establecer estrategias legislativas y comerciales que permitan generar seguridad hídrica y alimentaria de la población humana mundial.

Mecanismos de adaptación y resiliencia

Desde tiempos inmemoriales, la vegetación nativa se ha ligado a los cuerpos de agua. Hoy, se deben priorizar los esfuerzos sociales y gubernamentales para proteger las cuencas hidrográficas, las cabeceras de las montañas, los humedales, los bosques de galería, las vegas de los ríos, los nacimientos de agua, etc. Es necesario aumentar la reforestación y la conservación de la flora a fin de garantizar nuestro acceso el agua, disminuir la evaporación edáfica, la erosión del suelo y la sedimentación de las aguas, secuestrar dióxido de carbono y promover la biodiversidad y el reciclaje de nutrientes. Es necesario incorporar estas cualidades a los sistemas de producción agropecuaria, que se han caracterizado por ser monocultivos simplificados incapaces de sostener las complejas interrelaciones bióticas y abióticas de los ecosistemas naturales, conservar adecuadamente la energía del sistema, soportar múltiples y diferentes formas de vida y regular los ciclos biogeoquímicos. Para lograr esto es fundamental generar políticas públicas acordes con los hechos científicos y las necesidades sociales.

Actualmente se especula sobre la mitigación del cambio climático mientras paralelamente, los principales captadores de estos gases, están siendo exterminados indiscriminadamente; sustituidos por tierras de monocultivo, ganadería, minería o urbanización, como política de desarrollo agrícola en los países en vía de desarrollo (Harris y Roa-García, 2013). Los árboles son fábricas de agua y transformadores de CO_2 en biomasa útil para el hombre y los demás animales. La conservación de los bosques nativos y la reforestación estratégica e intensiva de los campos de cultivo en la forma de sistemas silvopastoriles y agroforestales, capaces de secuestrar hasta 26,6 ton CO_2 eq/ha/año (Naranjo et al., 2013); son estrategias fundamentales en nuestra adaptación al cambio climático, ya que en este punto, la mitigación del calentamiento global es poco probable. La adecuada gobernanza de los recursos y la generación de políticas públicas orientadas a fomentar dichos sistemas de producción primaria son primordiales para evitar los colapsos sociales, económicos y políticos que promete el calentamiento global.

Conclusiones

Las propiedades físico-químicas del agua la hacen el elemento integrador de los factores bióticos y abióticos, permitiendo el intercambio de energía y favoreciendo el dinamismo de la materia. A pesar de ser un recurso renovable, su disponibilidad en el tiempo está sujeta a ciclos biogeoquímicos cada vez más saturados ante las demandas de las poblaciones humanas en crecimiento.

El direccionamiento de las estrategias de solución a esta problemática es a menudo en el ámbito político, debido a que la valoración del recurso hídrico como una mercancía intercambiable entre naciones influirá sobre los precios de las materias primas. Esto podría llevar a decisiones gubernamentales para la privatización del recurso, generando desigualdad socioeconómica en el acceso al agua. Por otro lado, la necesidad de disminuir la huella hídrica de los alimentos de origen animal, apunta a mejorar la eficiencia del uso del agua a través del aumento en la productividad por unidad de área. Esto no es posible para todos los productores, especialmente en los países en desarrollo donde hay carencia en el acceso a los fondos de inversión pública y privada para desarrollo tecnológico e infraestructura. Además es aquí donde existe mayor presión sobre los bosques naturales debido a la expansión de la frontera agropecuaria. Sin embargo, el incremento en la productividad aumentará la presión de extracción y uso de este recurso.

En el ámbito científico se deben concentrar los esfuerzos para encontrar métodos eficientes, para condensar el vapor de agua atmosférico y crear un gradiente hídrico capaz de generar un flujo continuo de agua, y así, crear una tasa de extracción acorde con las emisiones generadas a partir de las actividades antrópicas.

Los ritmos y dinámicas sociopolíticas del mundo globalizado deben coincidir con los ritmos naturales para asegurar el bienestar de las poblaciones más vulnerables ante el inminente cambio climático. Esto implica la caída de grandes paradigmas en la agricultura y la economía, donde los recursos fundamentales de la sociedad se

encuentren valorados en unidades donde la capacidad adquisitiva de los singulares sea insuficiente al ser un recurso común a todo el planeta, no sólo de la especie humana.

Bibliografía

Alcamo, J., Doll, P., Kaspar, F., Siebert, S., (1997). Global change and global scenarios of water use and availability: an application of WaterGAP 1.0. University of Kassel, CESR, Kassel, Germany.

Allan, J.A. (1998). Virtual water: a strategic resource. Global solutions to regional deficits. Groundwater36(4):545–546.

Brown, A. Matlock, M. D. (2011). A review of water stress indices and methodologies. University of Arkansas. Sustainability consortium. Food, beverage and agriculture. White paper # 106. April. 2011.

Cosgrove, W.J., Rijsberman, F.R., (2000). Challenge for the 21st century: making water everybody's business.Sustain. Develop. Int. 2, 149–156

Doreau, M., M. S. Corson, and S. G. Wiedemann. (2012). Water use by livestock: A global perspective for a regional issue? Anim. Front. 2(2):9–16.

Falkenmark M., Lundquist J., Widstrand C., (1989). Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: aspects of vulnerability in semi-arid development. National Resource Forum 13, 258–267.

FAO. (2005). Value of virtual water: Principles and virtues. Roma, Italia. 2005.

FAO. (2010). Agricultura climáticamente inteligente. Políticas, prácticas y financiación para la seguridad alimentaria, adaptación y mitigación. Roma, Italia.

FAO. (2011). Mapping supply and demand for animal-source foods to 2030, by T.P. Robinson & F. Pozzi. Animal Production and Health Working Paper. No. 2. Rome.

FAO. (2015). Statistical pocketbook. Roma, Italia. 2015.

Fraiture, C. de; Cai, X.; Amarasinghe, U.; Rosegrant, M.; Molden, D. (2004). Does international cereal trade save water? The impact of virtual water trade on global water use.Comprehensive Assessment Research Report 4. Colombo, Sri Lanka: Comprehensive Assessment Secretariat.

Gerbens-Leenes, P.W., Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. (2011) A comparative study on the water footprint of poultry, pork and beef in different countries and production systems, Value of Water Research Report Series No. 55, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.

Gleick, Peter H. (1996). "Basic Water Requirements for Human Activities: Meeting Basic Needs." Water International (IWRA) 21 (1996): 83-92.

Gosaín, A.K., Rao, Sandhya, Basuray, Debajit. (2006). Climate change impact assessment on hidrology of Indian river basins. Curr. Sci. 90 (3), 346-356.

Hanjraa. M; Quresh E. (2010). Global water crisis and future food security in an era of climate change. Food Policy 35 (2010) 365–377.

Herrero, M.P.K., Thornton P, Gerber S, Reid RS. (2009) Livestock, livelihoods and the environment: understanding the trade-offs. Curr Opin Environ Sustain 2009; 1:111-120.

Hoekstra, A. Y., and P. Q. Hung (2005), Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade,Global Environ. Change,15, 45–56.

Hoekstra, A.Y., Mekonnen, M.M. (2012). The water footprint of humanity, Proceedings of the National Academy of Sciences 109 (9) (2012) 3232–3237.

Hoekstra A.Y. (2012). The hidden water resource use behind meat and dairy, Animal Frontiers 2 (2) (2012) 3–8.

Hong, Y., Reichert, P., Abbaspour, K.C., Zehnder, A.(2003). "A water resources threshold and its implications for food security." Environmental Science & Technology (American Chemical Society) 37 (2003): 3048-3054.

ICWE (International Conference on Water and the Environment). "The Dublin statement and record of the Conference." WMO. Geneva, 1992.

IPCC, 2014: Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs.

Latham, J.R. (2000). There's enough food for everyone, but the poor can't afford to buy it, Nature 404 (2000) 222.

Lawrence, P; Meigh, J; Sullivan, C. (2002). The water poverty index: an international comparison. Keele economics research paper. Keerp 2002/19. www.keele.ac.uk/depts/ec/web/wpapers/kerp0219.pdf.

Lundqvist, J., C. de Fraiture and D. Molden. (2008). Saving Water: From Field to Fork – Curbing Losses and Wastage in the Food Chain. SIWI Policy Brief. SIWI.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, *15*(3), 401-415.

Molden, D. (2007). Water for food. Water for life. A comprehensive assessment of water management in agriculture. International Water Management Institute (IWMI) and FAO.

Murgueitio, E., et al., (2010). Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. Forest Ecol. Manage. (2010), doi:10.1016/j.foreco.2010.09.027.

Naranjo J.F, Cuartas C.A, Murgueitio E, Chará J, Barahona R. Balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* en Colombia. Livest Res Rural Dev 2013; [access date: May 15, 2013] URL: http://www.lrrd.org/lrrd24/8/nara24150.htm.

ONU. (2005). World Population Prospects. The 2004 Revisión. Naciones Unidas, Nueva York, USA. www.un.org/esa/population/publications/WPP2004/2004Highlights_finalrevised.pdf.

ONU. (2014). La situación demográfica en el mundo. Informe conciso. Nueva York.

PNUD. (2014). Resumen. Informe sobre desarrollo humano: reducir vulnerabilidades y construir resiliencia. Nueva York 2014.

Popkin, B,M. (2002). The dynamics of the dietary transition in the developing world, in: B. Caballero, B.M. Popkin (Eds.), The Nutrition Transition: Diet and Disease in the Developing World, Food Science and Technology International Series. Academic Press, London 2002, pp. 111–129.

Pruss, A., Day, K., Fewtrell, L., Bartram, J.,(2002). Estimating the global burden of disease from water, sanitation and hygiene at a global level. Environ. Health Perspect. 110, 537542.

Rapp, D. (2014). © Springer International Publishing Switzerland, Assessing Climate Change, Springer Praxis Books.

Raskin, P., Gleick, P., Kirshen, P., Pontius, G., Strzepek, K., (1997). Water Futures: Assessment of Long-range Patterns and Prospects. Stockholm Environment Institute, Stockholm, Sweden.

Renault, D., Wallender, W.W., (2000). Nutritional water productivity and diets. Agric. Water Manage. 45, 275–296.

Rijsberman, F.R., (2002). Troubled waters, water troubles: overcoming an important constraint to food security. In: IFPRI. Sustainable Food Security for All by 2020:

Proceedings of an International Conference, 4–6. September 2001. Bonn, IFPRI, Washington, DC, pp. 141–144.

Rijsberman F.R., (2006). Water scarcity: fact or fiction? Agr Water Manage 80, 5-22.

Rosegrant, M. W., X. Cai, and S. A. Cline. (2002). Global Water Outlook to 2025: Averting an Impending Crisis, A Report. Summary (Indianapolis, Indiana) 2020. Vision for Food, Agriculture and the Environment Initiative, International Food Policy Research Institute, Washington, DC, and International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.

Scott. E. C. (2014). The Biogeochemical impacts of forests, and the implications for global climate change. Springer books. Leeds. UK.

Shiklomanov, I.A., (1991). The world's water resources. In: Proceedings of the International Symposium to Commemorate 25 Years of the IHP, UNESCO/IHP, Paris, France, pp. 93–126.

Sullivan, C.A., Meigh, J.R., Giacomello, A.M., Fediw, T., Lawrence, P., Samad, M., Mlote, S., Hutton, C., Allan, J.A., Schulze, R.E., Dlamini, D.J.M., Cosgrove, W.J., Delli Priscoli, J., Gleick, P., Smout, I., Cobbing, J., Calow, R., Hunt, C., Hussain, A., Acreman, M.C., King, J., Malomo, S., Tate, E.L., O'Regan, D., Milner, S., Steyl, I.,(2003).The water poverty index: development and application at the community scale. Nat. Resour. Forum 27, 189–199.

Tarjuelo J.M., De-Juan J.A., Moreno M.A., Ortega J.M. (2010). Review: Water resources déficit and water engineering. Spanish Journal of Agricultural Research 2010 8(S2), S102-S121. www.inia.es/sjar.

Van Bavel. J. (2014). The world population explosion: causes, backgrounds and projections for the future. FVV inOBGyn, 2013, 5 (4): 281-291.

Vorosmarty, C.J., Green, P., Salisbury, J., Lammers, R.B.,(2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. Science 289, 284–288.

Weber, K. T., & Gokhale, B. S. (2011). Effect of grazing on soil-water content in semiarid rangelands of southeast Idaho. *Journal of Arid Environments*, *75*(5), 464-470.

WHO. (2003). WaterSanitationandHealth.http://www.who.int.

Willmer, P. Stone,G. Johnston, I. *(*2005*). Environmental physiology of animals. 2nd ed.* Blackwell publishing*.*

WWAP (World Water Assessment Programme). 2012. The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk. Paris, UNESCO.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2015). The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris, UNESCO. http://en.unesco.org/open-access/.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2015. The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris, UNESCO.

Capítulo 3

Evaluación del confort térmico en vacas Holstein bajo condiciones de trópico alto

Evaluation of thermal comfort in Holstein cows under high tropic conditions

Esteban Gil Restrepo[1], César Cuartas, Ariel Tarazona Morales[1,2*] , Martha Olivera

[1]BIOGÉNESIS grupo de investigación, [2]Departamento de Producción Animal, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

Resumen

La meteorología y sus efectos sobre los animales juegan un papel importante ante el panorama del cambio climático. Determinar la vulnerabilidad de los animales al clima, relacionado a la interacción genética ambiente, debe convertirse en un criterio de selección importante. El objetivo de este estudio fue describir algunos procesos adaptativos de vacas en primer tercio de lactancia en un sistema de lechería

especializada de trópico de altura. Durante 4 meses en 35 vacas Holstein y 9 vacas raza BON en condiciones de bosque húmedo montano bajo, se midió el ciclo circadiano de temperatura corporal (CCTc), temperatura corporal (Tc) y se evaluó el comportamiento de rumia, pastoreo, descanso y consumo de agua, usando el método de barrido focal con intervalo de 10 minutos y registro instantáneo; además se midieron las condiciones microclimáticas (Ta, HR, RS, VV) y se calcularon cuatro índices de estrés térmico (ITH, ETI, ETSI, RR). Las Tc de las vacas Holstein fue mayor 0,3°C por encima del BON ($p>0.5$). No se encontró relación entre las condiciones ambientales, los índices de estrés térmico (IET) y la temperatura corporal o los comportamientos de R, P, D. Se encontró diferencia ($p<0,05$) entre las Tc de los animales durante el pastoreo y las Tc durante la rumia y el descanso (38,63°C y 38,37°C, respectivamente). Se describe el CCTc del grupo estudiado y se generan recomendaciones técnicas para su aplicación en campo. El bosque húmedo montano bajo se comportó como un ambiente termoneutral para las vacas Holstein en primer tercio de lactancia bajo las condiciones de este estudio.

Palabras clave: Bienestar animal; ciclo circadiano; confort térmico; lechería especializada

Abstract

Between all the environmental conditions, meteorology and his effects above animals, play an important role in the face of climate change. Establish climate vulnerability relative to genetic – ambient interactions in domestic animals, most become an important selection parameter. The aim of this study was describe some adaptive process like the temperature circadian rhythm in dairy cattle during their first third of lactancy, under a specialized milking system in high tropical conditions. Microclimatic conditions were measured (solar radiation, air temperature, relative humidity, wind speed). Four thermal comfort indexes were calculated (temperature humidity index, equivalent temperature index, equivalent stress temperature index and adjusted respiratory rate index). Body temperature (Tb) was measured in 35 Holstein cows and 9 black eared cattle cows (BON). The rumination(R), grazing (G), resting (Re) and water consumption behaviors were evaluated using the focal scan method with a 10 minute interval and instantaneous recording; between the months of july to november of 2015. The Tb of the two breeds

presented statistically significant differences, with Holstein presenting the highest Tb, 0.3 ° C above the BON. There was no statistically significant relationship between environmental conditions, thermal stress index (IET) and body temperature or R, G, Re behaviors. Although, a statistically significant difference ($p < 0.05$) was found between the Tb of the animals during grazing and Tb during rumination and rest, the latter two being similar in Tb. Additionally the RCTc of the studied group is described and technical recommendations are generated for its application in the field. The low montane wet forest behaved as a thermoneutral environment for Holstein cows in the first third of lactation under the conditions of this study.

Additional keywords: Animal welfare; circadian rhythm; thermal comfort; specialized milking system.

Introducción

Entre los factores que influyen sobre la productividad ganadera, el clima y la localización geográfica están entre los más determinantes, influyendo directamente sobre la disponibilidad de los recursos alimentarios y la composición botánica de la dieta a lo largo del tiempo; así como la distribución espacio temporal de las dinámicas epidemiológicas (Sejian et al., 2012; FAO 2010).

Los programas de mejoramiento genético deben introducir los parámetros de bienestar animal, como lo estipulan las directrices sanitarias de la OIE (Fraser et al., 2013) y siguiendo las exigencias de los consumidores en cuanto a los aspectos en la calidad de vida de los animales de interés zootécnico (Blokhuis et al., 2008).

Para evaluar la vulnerabilidad de los animales al clima es necesario considerar los parámetros meteorológicos y sus efectos sobre la fisiología. Entender los mecanismos de adaptación ante el estrés térmico y las variables que lo afectan, permite diseñar modelos predictivos basados en regresiones que combinan tanto los parámetros fisiológicos, como los ambientales; estos modelos definen la importancia relativa de cada variable sobre los efectos medidos, logrando así, una modelación de la respuesta del animal a determinadas condiciones ambientales (Da Silva & Campos Maia, 2013).

La mayoría de índices para evaluar el estrés calórico y el confort han sido desarrollados bajo condiciones controladas, en cámaras climáticas o en zonas templadas, por lo que se deben generar índices que se ajusten a las condiciones tropicales (Da Silva & Campos Maia, 2013), y puedan ser aplicados en sistemas de pastoreo. Con éstos se podrían desarrollar estrategias de mitigación y resiliencia en los sistemas productivos.

El estrés por calor es considerado uno de los principales limitantes productivos (Arias et al., 2006), ya que interfiere con el crecimiento, la reproducción, la lactancia y en general, cualquier proceso anabólico (Das et al., 2010).

El objetivo de este estudio fue describir el ciclo circadiano de temperatura de vacas Holstein en primer tercio de lactancia en un sistema de lechería especializada en trópico de altura, y su relación con parámetros meteorológicos.

Metodología

Locación

El estudio se llevó a cabo en la estación agraria Paysandú perteneciente a la Universidad Nacional de Colombia, ubicada a 2500 msnm en Santa Elena, corregimiento del municipio de Medellín, Antioquia, Colombia, 6°12´ 37´´ de latitud norte y 75° 30´ 11´´ de longitud oeste. Clasificada como bosque muy húmedo montano bajo (bmh – MB) según Holdridge (2000). La precipitación promedio es de 2000 mm/año.

Sistema productivo

Es un sistema de producción de leche con bovinos bajo pastoreo en praderas de pasto kikuyo *Pennicetum clandestinus (Hochst. ex Chiov.),* con un tiempo de descanso que oscila entre 35 y 45 días, rotacional en franjas que se abren luego de cada uno de los dos ordeños realizados diariamente con diferencia de 12 horas a las 2:00 am y las 14:00. Las vacas se suplementaron con sal mineralizada *ad libitum* al 8% y concentrado comercial con 18% de proteína cruda suministrado durante los ordeños en una relación leche concentrado 3,5:1. La topografía del terreno es ondulada con pendientes menores al 20%. La densidad de pastoreo es de 5 UGG/ha. Los animales tienen acceso a agua a voluntad en un bebedero circular con capacidad de 250 litros. Los animales hacen su

rotación en 9 potreros, de los cuales 6 tienen acceso a sombra en la periferia, gracias a la presencia de corredores de bosque nativo dispersos por el predio.

Animales

La muestra poblacional fue de 35 hembras bovinas raza Holstein entre 36 y 70 meses y 9 vacas de la raza criolla colombiana Blanco orejinegro (BON), entre 45 a 90 días del primer tercio de lactancia. La producción de leche promedio fue de 28 litros/día para las vacas Holstein, dicho dato no se evaluó en las vacas BON, ya que no fueron ordeñadas durante el estudio. El peso vivo estaba en 603±12 kg con una condición corporal entre 2,75-3,25 en una escala (1,0-5,0). Los criterios de exclusión en el estudio fueron la evidencia clínica de mastitis, problemas podales, parto distócico, metritis u otros problemas de salud. Para realizar las mediciones de temperatura corporal se escogieron los animales del grupo que además no reportaran hasta ese momento servicios reproductivos, aun cuando hubiesen presentado estro.

Índices de estrés térmico (IET)

Se midieron los siguientes parámetros meteorológicos cada 10 minutos, entre los meses de julio y noviembre de 2015: Temperatura de bulbo seco (Ta), humedad relativa (HR), radiación solar (RS) y velocidad del viento (VV). Para esto, se instaló una estación meteorológica Rainwise LR® en el área de pastoreo de los animales. Con los datos obtenidos se calcularon 4 índices de estrés térmico:

1. Índice de temperatura humedad (Thom, 1959)

   $ITH = T° + 0{,}36T°dp + 41{,}5$

2. Índice de temperatura equivalente (Baeta et al., 1987)

   $ETI = 27{,}88 - 0{,}456\ Ta + 0{,}010754\ T^2_a - 0{,}4905HR + 0{,}00088\ HR^2 + 1{,}1507\ VV + 0{,}126447\ VV^2 + 0{,}19876\ T_a^{2\ HR} - 0{,}46313\ TaVV$

3. Índice de temperatura equivalente al estrés (Moran et al., 2003)

   $ESTI = 0{,}63Ta - 0{,}03HR + 0{,}002RS + 0{,}0054TaHR - 0{,}073\ (0{,}1 + RS)^{-1}$

4. Índice de tasa respiratoria ajustada (Eigenberg et al., 2005)

$$RR= 5,4Ta + 0,58\ HR – 0,63\ VV + 0,024\ RS – 110,9$$

Temperatura corporal (Tc)

La Tc se evaluó en 35 hembras a través de la implantación de termómetros datta logger (vemco Minilog TX II®) adaptados a un dispositivo intravaginal modificado e insertados en el fundus, programados para hacer registro cada 10 minutos según la metodología propuesta por Burdick et al. (2012). Las mediciones se realizaron en grupos de 7 animales durante 6 días por grupo Se le realizó el mismo procedimiento a 9 vacas BON, como población contrastante, ya que se encontraban ubicadas en el mismo predio pero no consumían concentrado y pastoreaban praderas de *Pennisetum clandestinum* sin fertilización; sin embargo, presentaban las mismas condiciones geográficas, reproductivas y etarias.

Evaluación del Comportamiento

Se evaluó el comportamiento de rumia, pastoreo, descanso y consumo de agua, usando los criterios descriptivos de Tarazona (2012), usando el método de barrido focal con intervalo de 10 minutos y registro instantáneo de las frecuencias de actividades desde las 7h hasta las 22h (Martin & Bateson, 1993). Esto, se realizó a cada uno de los animales en los cuales se midió la temperatura corporal. En paralelo, se realizó el etograma del lote completo (35 animales) registrando los animales que se encontraban en cada actividad.

Análisis estadístico

Los datos se evaluaron con el software *Stathgraphics Centurión*® mediante análisis de regresión lineal y ANAVA.

Para describir la relación entre Consumo de agua y Radiación solar se empleó el modelo Y-inversa X-cuadrada. La ecuación del modelo ajustado fue:
Consumo agua = 1/(0.0115759 - 5.76108E-9*Radiación solar^2).

Para discriminar entre las medias de Tc entre diferentes niveles de actividad (pastoreo, rumia y descanso) se usó la prueba de Tukey.
El análisis para diferenciar las medias de la Tc entre ambos grupos raciales se realizó mediante un análisis de muestras pareadas y prueba de *t student*.

Resultados y discusión

Variables meteorológicas e índices de estrés térmico

La Tabla 3 resume los promedios, rangos, desviación estándar y coeficiente de variación de los parámetros meteorológicos medidos y los índices de estrés térmico calculados.

Tabla 3. Variables meteorológicas e índices de estrés térmico.

Parámetro	Unidad de medida	Promedio ± DE	Máx	Min
Temperatura del aire	°C	15 ± 2.8	21,5	8,5
Radiación solar	wm^{-2}	411 ± 282	1141	3
Humedad relativa	%	80 ±16	100	37
Velocidad del viento	m/s	1.72 ±0,9	5,8	0
Precipitación	mm/día	1.97 ± 3,26	16,3	0
ITH	*	60 ± 2,7	68	39
ETI	*	13 ± 0,6	30	3
ETSI	*	13 ± 0,7	29	0
RR	*	17 ±3	19,3	0

* Ver tabla 2.

Las condiciones microclimáticas del sitio de evaluación presentadas en la Figura 3, muestran las variables de Ta, la HR y la RS durante 24 horas donde se observa la conocida relación inversa entre la Ta y la HR asociadas al pico de radiación solar que se presenta alrededor de una hora antes. Los parámetros estuvieron dentro de los rangos de referencia para la especie (Tabla 4), lo cual propició un ambiente adecuado para la producción láctea en vacas en pastoreo. A pesar de los altos niveles de humedad relativa, la temperatura del aire no superó los 22°C durante ningún momento de las mediciones realizadas, por lo cual no hubo interferencia con la pérdida de calor evaporativo en el animal, favoreciendo su termorregulación, la cual se dificulta a partir de los 30°C de temperatura ambiental (Arias, 2007).

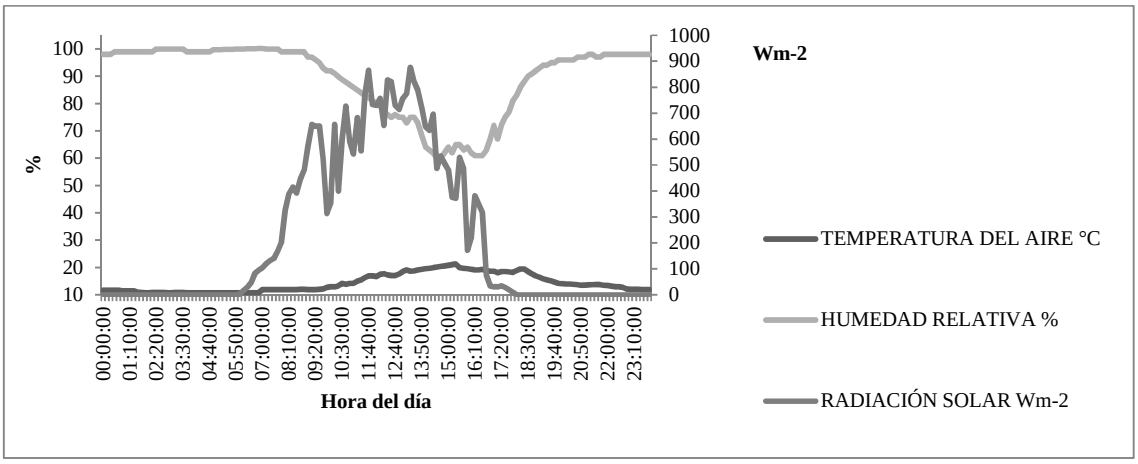


Figura 3. Curvas promedio de temperatura, humedad relativa y radiación solar durante 24 horas en el lugar de estudio.

Como se observa en la Tabla 3, los parámetros meteorológicos mostraron que los animales permanecieron dentro del rango de termoneutralidad para la raza Holstein (Tabla 4), que según Mader et al. (2006) se encuentra entre 5 y 25 °C Los cuatro índices calculados en este estudio concordaron con este resultado de estrés térmico que tienen en cuenta diferentes parámetros meteorológicos como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Rangos de referencia para los índices y parámetros meteorológicos contemplados en las fórmulas.

	ITH	**ETI**	**ETSI**	**RR**
Comfort	< 70	< 27	<70	<85
Alerta	71 – 73	28 – 32	>70	85 – 110
Peligro	74 – 78	33 – 44	NA	110 – 130
Peligro extremo	>79	> 45	NA	>130
Referencia bibliográfica	Thom1959	Baeta et al.,. 1987	Moran et al.,. 2003	Eigenberg et al.,. 2005
Humedad relativa	X	X	X	X
Temperatura ambiental	X	X	X	X
Radiación solar		X	X	X
Velocidad del viento			X	X

NA: no aplica. X: parámetro incluido en el índice.

Las condiciones atmosféricas presentaron muy baja variación entre días; de manera que los factores abióticos fueron muy homogéneos en esta zona geográfica durante el tiempo del estudio, lo cual pudo ser favorable para la economía energética de los procesos termoreguladores en los animales.

Durante el día, los picos de temperatura ambiente y radiación solar coincidieron con los nadires de humedad relativa y viceversa (Figura 3). Los índices de estrés térmico mostraron muy baja correlación con la Tc, demostrando que el ritmo circadiano de temperatura corporal (RCTc) es independiente de las condiciones meteorológicas cuando el animal se encuentra en su zona termoneutral. Además, no se encontró correlación entre los índices evaluados con los estados comportamentales, ni la producción de leche.

Los índices empleados en este estudio no reportan rangos inferiores de referencia, por lo tanto, no sirven como indicadores para estrés por frío, aunque se presume que en el

lugar de este estudio no se padece este problema debido a que la temperatura crítica mínima establecida para la raza Holstein se encuentra en -5°C (Mader et al., 2006). Los índices utilizados para medir las condiciones biometeorológicas de los animales, no mostraron ninguna relación estadística con la temperatura corporal, ni el comportamiento. Por lo tanto, se presume que estos subvaloran las condiciones medioambientales en que se realizó el experimento, ya que sólo poseen un umbral superior, lo cual nos indica que sólo evalúa el estrés calórico.

Temperatura corporal

En la Figura 4 se muestra el ciclo diario de temperatura corporal promedio para ambas razas, donde se observa que las vacas BON, presentan mayor cantidad de oscilaciones durante el día, aunque la amplitud del ritmo es menor que el de la raza Holstein (0,3°C de diferencia).

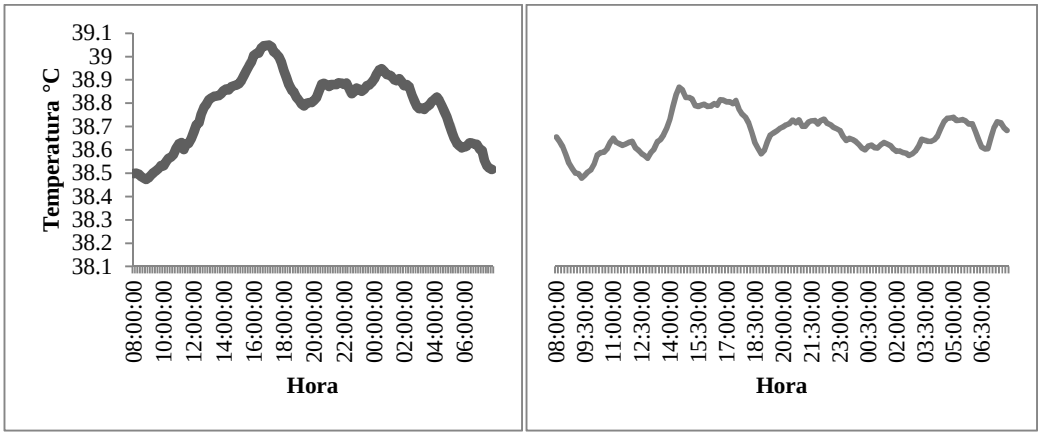


Figura 4. Ritmo de temperatura corporal promedio de un día para las vacas Holstein (línea negra) y BON (línea gris).

El RCTc del Holstein mantiene un patrón constante que consiste en una elevación progresiva de la temperatura que comienza alrededor de las 8:00 am, llegando a su punto máximo (39°C) entre las 16h y las 17h, punto en el cual comienza su descenso, prolongándose durante toda la noche y parte de la mañana hasta llegar a 38,5°C alrededor de las 8h nuevamente.

La Figura 5 presenta el ciclo circadiano de temperatura promedio para el grupo medido durante 96 horas, esta ritmicidad está regulada por el reloj biológico localizado en los núcleos supraquiasmáticos del hipotálamo anterior, donde se coordina la respuesta al fotoperiodo (Bicego et al., 2007). En este caso, los bovinos presentaron hábitos diurnos, los picos de actividad y temperatura se dieron en las horas de la tarde, posterior al segundo ordeño que se realizó desde las 14h hasta las 16h.

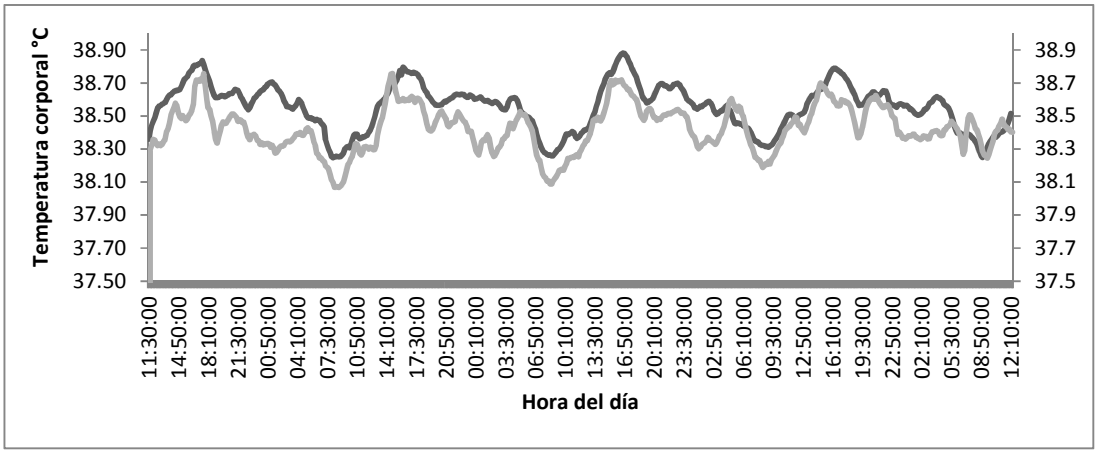


Figura 5. Promedio diario de temperatura vaginal en vacas Holstein (línea negra) y BON (gris) durante cuatro días.

Los animales estudiados presentaron variaciones de temperatura típicas de los homeotermos, caracterizados por mantener la temperatura corporal dentro de un estrecho rango, siguiendo un patrón que se ha descrito ampliamente en la literatura (Vaidya et al., 2011, Bicego et al., 2007). Para este estudio se tomó las 8:00 am como hora de inicio del ciclo (Figura 4), como propuesta para analizar el ciclo diario de temperatura como un ciclo monofásico.

Se encontró diferencia estadística de las medias de Tc entre las razas Holstein y BON. Esto se aprecia en las figuras 4 y 5. Es interesante resaltar, cómo la hora de mayor temperatura ambiental durante el día corresponde a la intersección de ambas curvas promedio de Tc como muestra las figuras 4 y 5, posiblemente porque ambas razas en ese momento tienen activos sus mecanismos fisiológicos y comportamentales de

termorregulación. Sin embargo, la Tc del Holstein continúa su ascenso hasta la 16:00 horas, mientras que el BON continúa oscilando durante la tarde con tendencia al descenso.

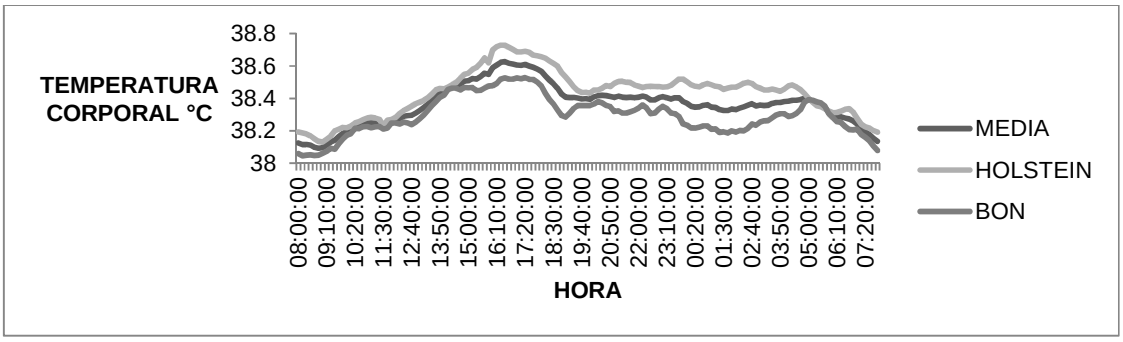


Figura 6. Curvas promedio de temperaturas corporales mínimas diarias cada 10 minutos.

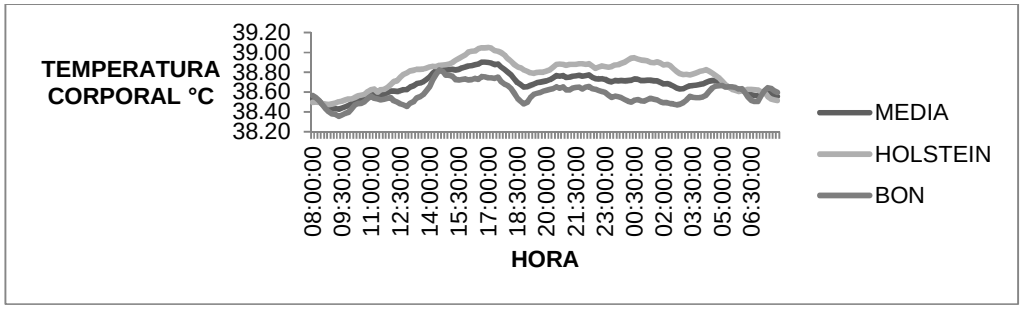


Figura 7. Curvas promedio de temperaturas corporales máximas diarias cada 10 minutos.

Para que el RCTc se desvíe de su curva normal a causa de factores climáticos es porque estos son extremos y superan los mecanismos de termorregulación, comportamentales y fisiológicos, haciendo que la tasa de ganancia de calor sea mayor que la tasa de pérdida. Al no encontrar correlación de Tc con los parámetros meteorológicos se concluye que esta variable dependiente es muy poco sensible a los cambios ambientales cuando el animal se encuentra en su rango de termoneutralidad, ya que bajo estas condiciones, las oscilaciones diarias de la temperatura responden a las dinámicas endocrinas que regulan el metabolismo de acuerdo al fotoperiodo.

Evaluación del comportamiento de hembras bovinas lecheras bajo condiciones de pastoreo.

Eventos comportamentales: Consumo de agua

Las primeras respuestas fisiológicas a los cambios ambientales son de tipo comportamental, como lo mostró el análisis de regresión simple donde se realizó una transformación de Box y Cox al consumo de agua individual, encontrando una relación estadísticamente significativa ($P<0.05$) de este con la radiación solar, ($R^2=0.24$), siendo el parámetro meteorológico que tuvo mayor relación con este efecto comportamental, considerado como uno de los principales mecanismos de termorregulación. Este R^2 bajo con alta significancia estadística es adecuado como un modelo explicativo, más no como un modelo predictivo. El grupo de animales estudiado (n=35) mostró un consumo total promedio de 3.28 m^3 de agua/día. Lo que representa un consumo individual promedio de 93.85 litros de agua al día, con un mínimo de 70.1 litros/animal/día y un máximo de 124.3 litros de agua/animal/día. Esta variación en el consumo de agua puede interpretarse como una respuesta a la perspiración insensible que se da a través de la piel, afectando el balance hídrico del animal de una manera imperceptible por los observadores, pero para el animal representa un mecanismo adaptativo primario que se presenta incluso antes de comenzar a mostrar cualquier otro signo de comportamientos de termorregulación.

Estos hallazgos coinciden con Steinfeld et al. (2006) donde reportan necesidades de consumo de 102.8 litros de agua/animal/día con temperaturas ambientales de 15°C, en animales de 680 kg y 35 litros de producción diaria. La radiación solar hallada se considera muy benevolente con los animales, cabe resaltar que los picos de radiación alcanzaron los 1141 Wm^{-2}, que no superaron los 60 minutos de sumatoria en el día, teniendo en cuenta que la radiación promedio fue de 411 Wm^{-2} (Tabla 3). Esto se considera una carga radiante baja (Tucker et al., 2008).

Existen diversos factores que determinan el consumo de agua en las vacas lecheras, entre ellos, las características de la ración, tales como el contenido de agua del forraje, el

consumo de materia seca, el balance de minerales en la sal, el balance nutricional del alimento concentrado, las condiciones atmosféricas, la temperatura y la calidad del agua, el estado fisiológico, la producción de leche, el color y densidad del pelaje, incluso la disponibilidad del recurso hídrico, según la forma en que este se suministra a los animales (Murphy, 1992). Por lo tanto, encontrar que la intensidad de la radiación solar podría explicar un 24% de la variación en el consumo de agua, siendo un parámetro sobre el cual intervienen tal cantidad de variables; se considera un efecto significativo que se debe considerar prioritario en los sistemas pecuarios, especialmente en los sistemas tecnificados.

Estados comportamentales: pastoreo, rumia y descanso

A continuación se muestran las figuras 6 y 7 donde se representa la distribución promedio del tiempo invertido en cada estado comportamental discerniendo dos momentos; la mañana (6:00 am – 14:00 pm).

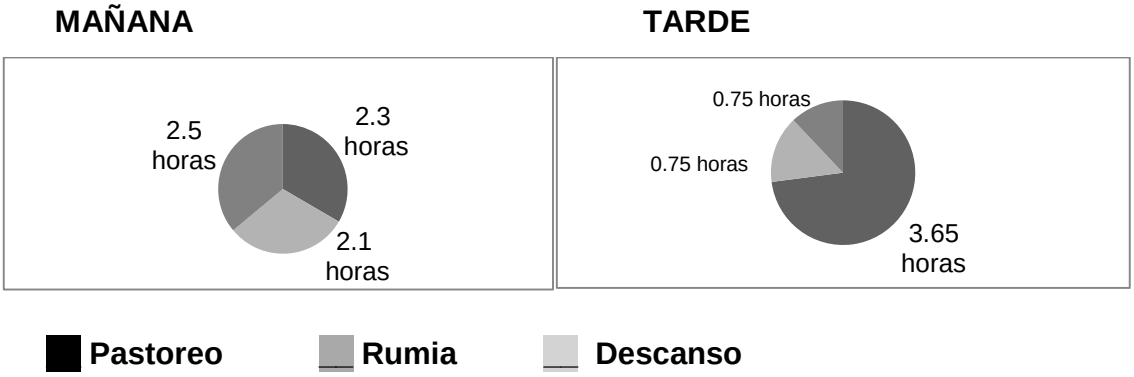


Figura 8. Distribución promedio del comportamiento durante la mañana y la tarde.

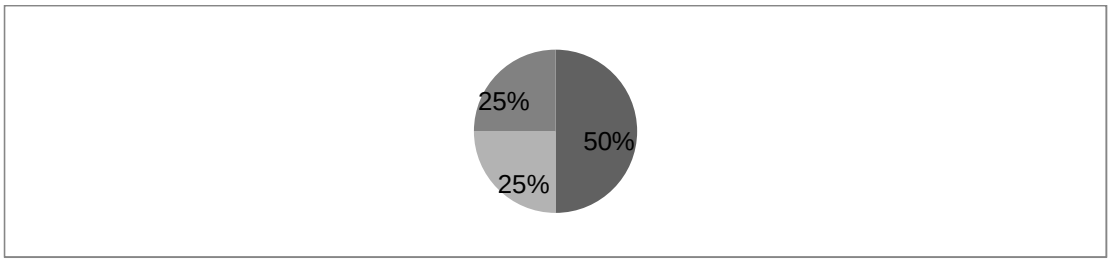


Figura 9. Distribución promedio del comportamiento diurno entre las 6:00 am y las 8:00 pm.

Tabla 5. Promedio del tiempo (horas) dedicado por animal a cada estado comportamental.

	Mañana	**Tarde**	**Total**
Pastoreo	2.3	3.65	5.95
Rumia	2.1	0.75	2.85
Descanso	2.5	0.75	3.25
Horario	(7:00 am – 14:00)	(16:00 – 21:00)	12

Como se aprecia en las figuras 8 y 9, se representa la distribución promedio del comportamiento diario en la mañana y la tarde respectivamente; existe asimetría entre los momentos. Durante la mañana, los comportamientos se distribuyen en tercios poblacionales. Mientras que en la tarde se presenta un furor del pastoreo, comenzando justo a la salida del segundo ordeño, se prolonga hasta las 18.5 h y comienza a descender hasta las 22h, donde se invierten los comportamientos, predominando la rumia y el descanso durante la noche.

Observando como coinciden el momento del día con mayor Tc y el momento de mayor intensidad del pastoreo, se puede entender por qué los animales disminuyen el consumo de alimento ante el estrés térmico, puesto que el desplazamiento y el pastoreo con semejantes magnitudes corporales requieren de un esfuerzo físico considerable, tanto,

que logra desviar la curva de temperatura corporal. De acuerdo con lo anterior es posible suponer acerca de la curva de Tc, que las actividades nocturnas están distribuidas entre la rumia y el descanso.

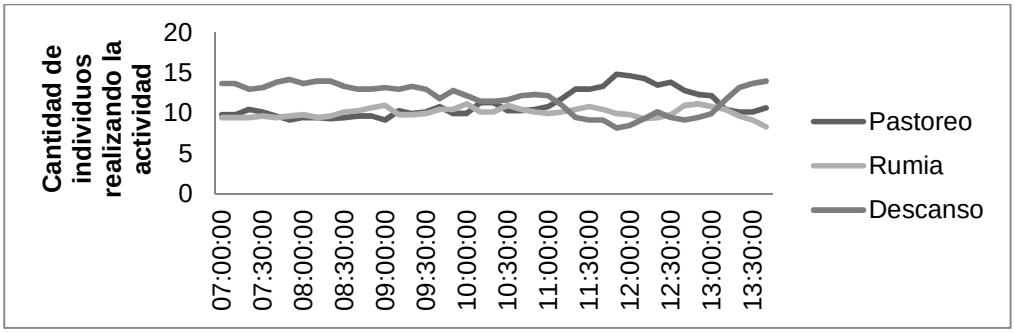


Figura 10. Distribución promedio de los tres estados comportamentales desde las 7:00 horas hasta las 14:00 horas (Mañana).

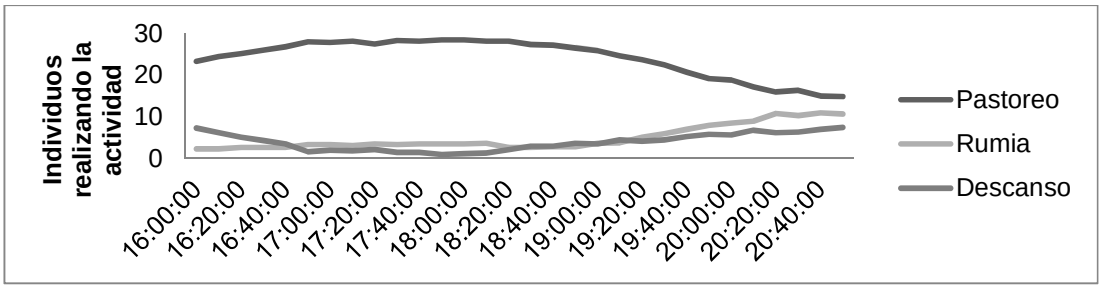


Figura 11. Distribución promedio de los estados de comportamiento de vacas lecheras en trópico alto desde las 16:00 horas hasta las 21:00 horas (Tarde).

El tiempo de permanencia promedio por animal en cada estado comportamental se expone en la Figura 9. Distribución promedio del comportamiento diurno entre las 6:00 am y las 8:00 pm.

Tabla 5.

Se encontró que los estados comportamentales están relacionados con la temperatura corporal a través de sus diferentes niveles de actividad, ya que existe diferencia estadística (p=0) entre la Tc durante el pastoreo versus la rumia y el descanso, siendo estos últimos similares, como se aprecia en la Figura 12.

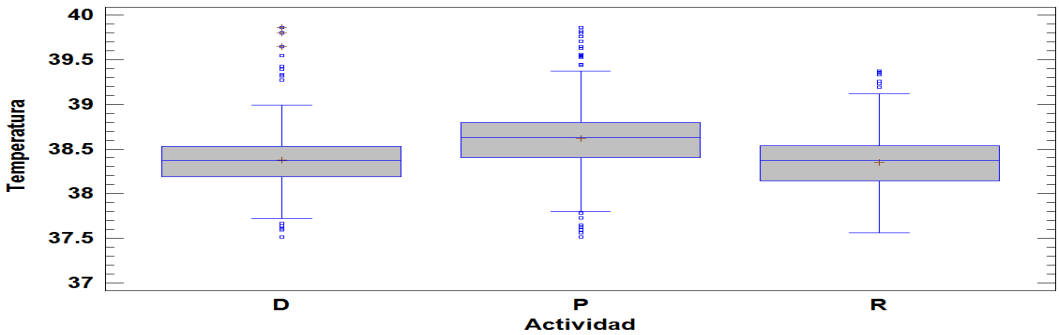


Figura 12. Distribución de la temperatura corporal según el ciclo de comportamiento diurno.

La clasificación comportamental “descanso” abarca una amplia gama de expresiones corporales, posturas e incluso otros estados como el sueño, que a su vez presenta diferentes estadíos, posturas y distribución temporal. Siendo el sueño un estado fisiológico tan importante para el balance energético del individuo y sus procesos metabólicos, y teniendo en cuenta que el balance energético negativo es quizá la principal limitante productiva en la lechería especializada de trópico alto; se plantea la necesidad de profundizar en las interacciones ambientales que propician, inhiben o desplazan el tiempo de sueño, que se reporta cercano a 4 horas durante la noche por Ternman et al. (2012). Es importante resaltar la disponibilidad de zonas para el descanso, ya que el bovino muestra preferencia por este encima del alimento cuando ha sido privado de ambos (Munksgaard. et al., 2005), lo cual lleva a pensar en las

ganaderías Antioqueñas de alta pendiente, donde muchas veces los animales no pueden satisfacer esta necesidad.

Los animales utilizan la sombra cuando ésta es disponible, en el 100% de los casos el total de los animales utilizó la sombra en algún momento del día para realizar cualquiera de sus actividades rutinarias. Esto indica que a pesar que el animal se encuentra dentro de su zona de confort térmico, continúa mostrando preferencia por la protección de la radiación solar. Esto se hace manifiesto al evaluar un comportamiento presentado por los animales de manera rutinaria y simétrica, ya que desde las 10:30 am en promedio, extendiéndose hasta el comienzo del segundo ordeño, mostraron un agrupamiento conformado por dos tercios del rebaño, a su vez dividido simétricamente entre animales rumiando y otros descansando, esto se observa en la Figura 9. Distribución promedio del comportamiento diurno entre las 6:00 am y las 8:00 pm.

Tabla 5 y Figura 10.

Conclusión

Bajo las condiciones de este estudio, se demostró que los animales se encontraron dentro de su rango de termoneutralidad, así los índices no cuantifican el confort térmico. La radiación afectó el consumo de agua y en algunos animales el pastoreo.

Agradecimientos

Universidad de Antioquia y al grupo de Investigación Biogénesis.

Bibliografía

Arias RA, Mader TL, Escobar PC. 2008. Factores climáticos que afectan el desempeño productivo del ganado bovino de carne y leche. *Archivos de medicina veterinaria*, *40*(1), 7-22.

Baeta FC, Meador NF, Shanklin MD, Johnson HD. 1987. Equivalent temperature index at temperatures above the thermoneutral for lactating dairy cows. In: Summer Meeting of American Society of Agricultural Engineers. Baltimore, MD, June 28–July 1, 21 p. ASAE, St. Joseph, MI.

Benzaquen ME, Risco CA, Archbald LF, Melendez P, Thatcher MJ, Thatcher WW. 2007. Rectal temperature, calving-related factors, and the incidence of puerperal metritis in postpartum dairy cows. *Journal of dairy science*, *90*(6), 2804-2814.

Blokhuis HJ, Keeling LJ, Gavinelli A, Serratosa J. 2008 Animal welfare's impact on the food chain Trends in Food Science & Technology. 19. *Suppl. 1*: 79-87.

Bicego KC, Barros RC, Branco LG. 2007. Physiology of temperature regulation: comparative aspects. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, *147*(3), 616-639.

Burdick NC, Carroll JA, Dailey JW, Randel RD, Falkenberg SM., Schmid TB.2012. Development of a self-contained, indwelling vaginal temperature probe for use in cattle research. Journal of Thermal Biology 37 (2012) 339–343.

Burfeind O, Suthar VS, Heuwieser W. 2012. Effect of heat stress on body temperature in healthy early postpartum dairy cows. *Theriogenology*, *78*(9), 2031-2038.
Collier RJ, Gebremedhin KG. 2015. Thermal biology of domestic animals. *Annual Review of Animal Biosciences*, *3*(October), 513–532.

Da Silva RG, Maia AS. 2013. Principles of Animal Biometeorology. Ed. Springer. Science & Business Media. DOI 10.1007/978-94-007-5733-2. Volume 2, 261 pg.

Das HP, Doblas-Reyes FJ, Garcia A, Hansen J, Mariani L., Nain AS, Ramesh K, Rathore LS, Venkataraman S. 2010. Weather and climate forecasts for agriculture. Guide to agricultural ,meteorological practices, Chap. 5. Geneva: World Meteorological Organisation; p. 57.

Eigenberg RA, Brown-Brandl TM, Nienaber JA., Hahn GL. 2005. Dynamic indicators of heat stress in shaded and non-shaded feedlot cattle. Part 2. Predictive relationships. Biosyst. Eng. 91, 111–118.

FAO. (2010). Agricultura climáticamente inteligente. Políticas, prácticas y financiación de la seguridad alimentaria, adaptación y mitigación. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma.

FEDEGAN. (2012).La ganadería colombiana y las cadenas lácteas y cárnicas. Cifras de referencia, Plan Estratégico de la ganadería Colombiana. Federación Colombiana de Ganaderos. PEGA 2019.

Fraser D, Duncan IJ, Edwards SA, Grandin T, Gregory NG, Guyonnet V, Mench JA. 2013. General principles for the welfare of animals in production systems: the underlying science and its application. *The Veterinary Journal*, *198*(1), 19-27.

Holdridge LR. 1987. *Ecología basada en zonas de vida* (No. 83). Agroamérica. Quinta reimpresión. San José: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura; 2000. p. 216.

Kilgour RJ. 2012. In pursuit of “normal”: A review of the behaviour of cattle at pasture. *Applied Animal Behaviour Science*, 2012, vol. 138, no 1, p. 1-11.

Mader TL, Davis MS, Brown-Brandl T. 2006. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. *Journal of Animal Science*, *84*(3), 712-719.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2012). Anuario Estadístico Agropecuario. Colombia.

Moran DS, Pandolf KB, Shapiro Y, Laor A, Heled Y, Gonzalez RR. 2003. *Evaluation of the environmental stress index for physiological variables.* J. Therm. Biol.28, 43–49.

Munksgaard L, Jensen MB, Pedersen LJ, Hansen SW, Matthews L. 2005. Quantifying behavioural priorities—Effects of time constraints on behaviour of dairy cows, Bos taurus. *Applied Animal Behaviour Science.* Vol. 92, no 1, p. 3-14.

Murphy MR. 1992. Water metabolism of dairy cattle. *Journal of Dairy Science*. 75(1), 326-333.

Scharf B, Johnson JS, Weaber RL, Spiers DE. 2012. Utilizing laboratory and field studies to determine physiological responses of cattle to multiple environmental stressors. *Journal of Thermal Biology*, *37*(4), 330–338.

Sejian V, Naqvi SM., Ezeji T, Lakritz, J, Lal R. 2012. *Environmental stress and amelioration in livestock production* (pp. 469-499). Springer Berlin Heidelberg.

Silva, R.G., Maia, A.S.C., Costa, L.L.M. (2011). *A thermal stress index for dairy cows in intertropical regions*. In: Proceedings of the 19th International Congress of Biometeorology, 4–8 December. Auckland, New Zealand. Submission #016.

Smith BI, Risco CA. 2005. Management of periparturient disorders in dairy cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, *21*(2), 503-521.

Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, Castel V, Rosales M, de Haan C. (2009). *La larga sombra del ganado. Problemas ambientales y soluciones.* Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. *LEAD–FAO. Viale delle Terme di Caracalla 00153 Roma, Italia. 464 p*. ISBN 978-92-5-305571-5.

Sunil BV, Ajeet K, Meena K. 2011. *Effect of Heat Stress in Tropical Livestock and Different Strategies for Its Amelioration*. Effect of Heat Stress in Tropical Livestock and, 7(1), 45–54.

Tarazona, AM. (2012). Efecto de diferentes arreglos silvopastoriles sobre el comportamiento de consumo y el bienestar animal y su relación con la disipación de la

energía en sistemas de producción bovina [PhD thesis]. Doctorado en Ciencias Animales. Medellín. Universidad de Antioquia.

Ternman E, Hänninen L, Pastell M, Agenäs S, Nielsen PP. 2012. Sleep in dairy cows recorded with a non-invasive EEG technique. Applied Animal Behaviour Science, 2012, vol. 140, no 1, p. 25-32.

Theurer ME, Amrine DE, White BJ. 2013. Remote noninvasive assessment of pain and health status in cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, *29*(1), 59-74.

Thom EC. 1959.The discomfort index.*Weatherwise12, 57–60.*

Tucker CB, Rogers AR., Schütz KE. 2008. Effect of solar radiation on dairy cattle behaviour, use of shade and body temperature in a pasture-based system. Applied Animal Behaviour Science, 109(2–4), 141–154.

Vaidya MM., Kumar P, Singh SV, Suryawanshi P, Wakchaure RS, Pathan MM., Singh AK, Kushwaha R. 2011. Management of Dairy Animals for Improved Health and Production during Circadian Pattern: A Review. Wayamba Journal of Animal Science. Vol3.

Wagner SA, Schimek DE, Cheng FC. 2008. Body temperature and white blood cell count in postpartum dairy cows. Bovine Practitioner, 42(1), 18

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

La biometeorología puede contribuir de manera importante a estudios en diversas áreas como epidemiologia, producción animal, etología, impacto ambiental entre otros. En Colombia, es evidente la carencia en las facultades de ciencias agrarias, en especial, la medicina veterinaria y la zootecnia, donde existe un vacío en el estudio de la biometeorología. Esta es un área del conocimiento fundamental para el desarrollo de planes de adaptación y resiliencia al cambio climático, tema prioritario en las agendas de investigación de muchos países, especialmente de aquellos más vulnerables (como Colombia).

La comprensión de los efectos meteorológicos sobre los animales bajo las condiciones específicas de cada región, permitirá identificar los focos de vulnerabilidad climática que pueden obedecer a una gran variedad de factores asociados como la topografía, el tipo de suelo, la cobertura vegetal y la composición botánica, la dirección de los vientos, la concentración de aerosoles en la atmósfera, la altura sobre el nivel del mar, entre muchos otros. Siempre comportándose como un efecto sinérgico multicausal, que afecta directamente las dinámicas biológicas alterando la estabilidad enzoótica.

En las reacciones bioquímicas que permiten la vida, la temperatura y el pH son determinantes; desde el nivel celular hasta el macroscópico. Así mismo, los diferentes parámetros meteorológicos modulan la fisiología de todos los seres vivos que se encuentran bajo su influencia. Así mismo, el confort térmico debe ser identificado como una prioridad para los sistemas de producción animal, ya que en este punto existe una

optimización de la energía que permite al animal aprovecharla para los procesos anabólicos en beneficio del ser humano y la sociedad.

Recomendaciones

Los resultados expuestos en el capítulo 2, evidencian la necesidad de desarrollar nuevos índices con mayor especificidad para las condiciones microclimáticas de cada sistema productivo y para medir el confort y el estrés térmico, que tengan en cuenta la radiación solar en condiciones tropicales, donde la temperatura radiante promedio es mayor que la temperatura ambiental; a diferencia de las regiones templadas donde se han desarrollado los índices evaluados; creados además para medir la sensación térmica en seres humanos y con énfasis en interiores, ya que el ITH, que ha sido uno de los índices más utilizados desde hace 50 años, sólo tiene en cuenta la temperatura del aire y la humedad relativa. El ETI, adiciona la velocidad del viento a su fórmula; mientras que los índices ETSI y RR tienen en cuenta los 4 parámetros (Ta, HR, RS, VV).

Existen otros índices que involucran otras mediciones como los termómetros de globo negro, bulbo húmedo y bulbo seco que permiten calcular el índice de estrés térmico propuesto por Silva et al. (2010). Desarrollado bajo condiciones de pastoreo tropical obteniendo buenas correlaciones con significancia estadística. Se hace necesario el desarrollo de un índice que busque un rango central para definir el confort, donde la tendencia central es el máximo confort y los extremos indican disconfort por frío o calor.

Por otro lado Collier et al. (2008) reportan que la frecuencia respiratoria y la tasa de sudoración son parámetros más sensibles que logran explicar con mayor precisión los cambios en los balances de carbono, oxígeno y agua para mantener la homeostasia en relación al hábitat.

Es claro que las rutinas de manejo en las lecherías especializadas de Antioquia se manejan horarios extremos durante las madrugadas, como en este caso, donde el primer ordeño comienza desde la 1h. Desde el punto de vista biológico, vale la pena preguntarse si estos horarios de las rutinas de manejo son acordes a los ritmos fisiológicos de los animales. Hasta qué punto se pueden ver afectados los ritmos

metabólicos, entre ellos, la temperatura corporal, con la luz del establo en la madrugada, sustituyendo valiosas horas de descanso y sueño por una actividad ajena a su naturaleza. Qué pasaría si los horarios de ordeño fueran más acordes con los ritmos biológicos tanto de los operarios como de los animales; cómo cambiaría la rutina comportamental de las vacas en potrero, y que influencia tendría sobre el ritmo circadiano de temperatura corporal.

Una propuesta basada en las premisas anteriores es realizar los ordeños a las 6h y las 18h. Generando una ampliación del estímulo lumínico al final del periodo diurno con las lámparas de la sala de ordeño, lo que ampliaría el fotoperiodo y podría aumentar la tasa metabólica diaria, sin sacrificar las valiosas horas de descanso durante la oscuridad. La actividad de desplazamiento durante el ordeño matutino adelantaría el pico de cortisol en dos horas y por lo tanto, la temperatura ascendería más temprano en el día, así mismo, decayendo más tarde en la noche, lo que podría estimular el sueño nocturno que favorece los procesos anabólicos y homeorréticos, generando impactos benéficos sobre el sistema inmune, la sanidad del hato, la producción de leche y la rentabilidad del sistema.

Es interesante preguntar si las variaciones individuales del RCTc están correlacionadas con las variaciones individuales de la tasa metabólica en vacas lactantes. Entender estos fenómenos puede ayudar a iluminar el difícil problema del balance energético negativo en vacas lecheras, problemática que tanto afecta el rendimiento productivo de la lechería especializada en Antioquia.

Anexos

Anexo 1

Proceso de elaboración de un implante intravaginal modificado para el monitoreo permanente de la temperatura corporal en hembras bovinas de manera no invasiva

Introducción

La temperatura corporal es un importante indicador del estado de los procesos biotermodinámicos y se considera uno de los principales parámetros para determinar la diferencia entre la salud y la enfermedad de un individuo. Así mismo, existen en el organismo múltiples mecanismos de termorregulación y osmoregulación que actúan sinérgicamente en orquestadas maniobras con el fin de mantener la homeostasia.

En un estado de termoneutralidad con el ambiente, la temperatura se logra mantener dentro de un estrecho rango; presentando una curva que responde al fotoperiodo como estímulo, para aumentar el metabolismo en los animales de hábitos diurnos como el bovino. Sin embargo, para lograr medir este parámetro en campo, ha sido necesario manipular al animal, restringir su movimiento y desviarlo de su cotidianidad; lo cual puede generar estrés, alterando la medición; especialmente cuando se pretende medir y describir el ritmo circadiano de temperatura bajo condiciones de pastoreo.

Este es el motivo por el cual se vio la necesidad de desarrollar un dispositivo intravaginal al que se le pudiera adaptar un termómetro datta logger, para medir la temperatura corporal múltiples veces durante el día sin intervenir en el comportamiento normal de los animales. La utilización de estos sensores ha sido ampliamente reportada en la literatura para estudios de bienestar animal y biometeorología, no obstante, la forma en que estos se adaptan al implante intravaginal no es clara y puede actuar como una fuente importante de variación al generar procesos irritativos o hipersecretores de la mucosa vaginal, con posibles implicaciones negativas sobre la salud reproductiva de la hembra. El tamaño, forma y material del implante son determinantes para establecer la inocuidad del dispositivo.

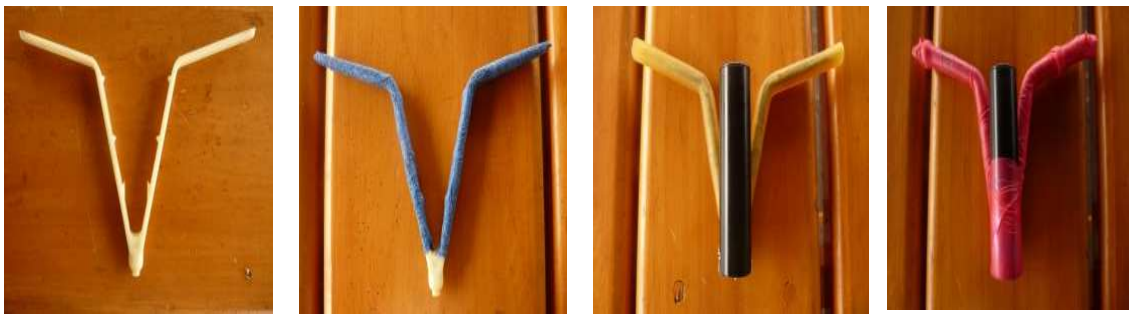
Este anexo busca describir el proceso de fabricación del implante intravaginal equipado con termómetro datta logger.

Metodología

Fabricación del implante

Se utilizó un implante intravaginal comercial, el cual está recubierto con una cobertura siliconada impregnada de progesterona, la cual fue retirada. Se desinfectaron en una solución de yodo y alcohol durante 12 horas. Luego, se recubrió con una manguerilla de latex de un diámetro de 0.7 cm. Y cubierto posteriormente por una banda elástica de látex (TeraBand®), con la cual se acopló el termómetro datta logger al implante después de haberlo programado para realizar la medición cada diez minutos. El proceso se detalla en las figuras a continuación.

Figura 13. Proceso de acoplamiento entre el implante y el termómetro.



La longitud del implante no debe exceder los 12 cm, puesto que puede salirse de la vagina por distención abdominal cuándo la vaca se posiciona en decúbito ventral; con una posible contaminación fecal que se asciende en la vagina una vez el animal se pone de pié.

Aplicación del implante

Al animal se le realiza una evacuación manual de las heces del recto, seguido por una limpieza de la cola y toda la zona perineal.

Se realiza apertura de los labios vulvares y se ingresa el espéculo vaginal tubular cónico que se encontraba sumergido en una solución de yodo alcohol a 40 °C. Una vez localizado el fundus vaginal se toma una fotografía del cérvix (Figura 14) insertando el implante adaptado al termómetro y se retira finalmente el espéculo vaginal.

Figura 14. Inserción del implante a través de un espéculo vaginal.

Retirada del implante

Una vez se ha cumplido el plazo de medición establecido previamente, la extracción del implante debe hacerse manualmente, ya que éste no está provisto de una tirilla que sobresalga de la vagina para su extracción (Figura 15); bajo el supuesto de contaminación fecal de la vagina como lo ilustran las imágenes a continuación:

Figura 15. Tirilla de tracción para extracción del implante.

Con una manga de palpación muy bien lubricada, previa limpieza y desinfección de la zona perineal, se ingresa el brazo del operario por la vagina del animal. Se asegura el implante por su parte caudal y se realiza ligera tracción hacia atrás. Es necesario evaluar las características del moco que recubre el implante al ser retirado, ya que es un importante indicador del estado sanitario de la cavidad vaginal como respuesta a la presencia del implante. Para lo anterior se fijó una calificación de 0 – 3 con la cual se evalúa cualitativamente la transparencia del moco vaginal.

Figura 16. Tres diferentes grados de alteración en la secreción vaginal como respuesta a cuerpo extraño.

A) **B)** **C)**

(A) secreción vaginal de 0+. (B) secreción vaginal 2+. (C) secreción vaginal 3+.

0 = secreción transparente sin presencia de pus

1 = secreción mucosa con pus < 50%

2 = secreción mucosa con pus > 50%

3 = secreción mucopurulenta = 100%