



Estresse calórico e reprodução em ovinos: fundamentos e perspectivas tecnológicas

Heat stress on sheep reproduction: fundamentals and technological perspectives

Alexandre Rossetto Garcia^{1*}, Ana Beatriz Bossois Moura², Andréa do Nascimento Barreto³, Messy Hannear de Andrade Pantoja⁴, Marco Antonio Paula de Sousa³, Raimundo José Moraes Junior⁵

¹ Embrapa Pecuária Sudeste, Rod. Washington Luiz, km 234, São Carlos, SP, CEP 13560-970, Brasil

² Universidade Federal Fluminense, Rua Vital Brazil, 64, Niterói, RJ, CEP 24320-340, Brasil

³ Universidade Federal do Pará, Av. dos Universitários, s/n, Castanhal, PA, CEP 68746-630, Brasil

⁴ Universidade de São Paulo, Av. Duque de Caxias, 225, Pirassununga, SP, CEP 13635-900, Brasil

⁵ Agência de Defesa Agropecuária do Pará, Rod. Faruk Salmen, Parauapebas, PA, CEP 68515-000, Brasil

Resumo

A ovinocultura é uma importante atividade que produz proteínas de alto valor biológico, mas seus ganhos podem ser reduzidos em função do estresse ambiental. Isso reforça a importância de se estudar a relação entre o ambiente térmico e o animal, identificando animais mais adaptados e férteis, e melhores práticas de manejo. O ovino (*Ovis aries*) é um animal homeotérmico, que mantém sua temperatura corporal em equilíbrio dinâmico. Quando em estresse calórico, os ovinos usam mecanismos sensíveis e latentes para dissipar o calor acumulado, com destaque para o redirecionamento do fluxo sanguíneo, a ofegação e a sudorese. O escroto desempenha importante crucial na termorregulação dos testículos, os quais precisam funcionar sob em até 6,0°C abaixo da temperatura interna corpórea. A hipertermia testicular compromete a espermatogênese, reduz a concentração seminal, a motilidade progressiva e a viabilidade espermática. Ainda, leva a aumento dos defeitos morfológicos espermáticos, na produção de espécies reativas de oxigênio e na fragmentação do DNA espermático, diminuindo a capacidade fecundante. Tecnologias disruptivas para monitoramento do ambiente de produção, da termorregulação e do bem-estar dos animais já são realidade e se encontram em expansão, favorecendo a tomada de decisões em tempo real e o desempenho reprodutivo dos ovinos.

Palavras-chave: reprodução animal, termorregulação, ovino, qualidade seminal, pecuária de precisão.

Abstract

*Sheep farming is a relevant activity that provides proteins of high biological value, but its gains can be reduced due to environmental stress. This reinforces the importance of studying the relationship between the thermal environment and the animal, identifying more adapted and fertile animals, and better management practices. Sheep (*Ovis aries*) are homeothermic animals and thus maintain their body temperature in a state of dynamic balance. Under heat stress, sheep dissipate accumulated heat through sensitive and latent mechanisms, primarily using redirection of blood flow, panting and sweating. The scrotum plays a crucial role in the thermoregulation of the testicles, which need to be maintained up to 6.0°C below the body core temperature. Testicular hyperthermia impairs spermatogenesis, reduces seminal concentration, progressive motility and sperm viability. Furthermore, it leads to an increase in sperm morphological defects, in the production of reactive oxygen species, and in sperm DNA fragmentation, reducing the fertilizing capacity. Disruptive technologies for monitoring the production systems, animal thermoregulation and welfare are already a reality and are expanding, favoring real-time decision making and the reproductive performance of sheep.*

Keywords: animal reproduction, thermoregulation, ram, semen quality, precision livestock farming.

Introdução

A ovinocultura é uma atividade que desempenha importante papel como fonte de proteínas de alto valor biológico, em virtude da capacidade dos ovinos em produzirem carne, leite, lã e pele de qualidade. Além disso, o ovino é um animal que se adequa tanto a sistemas de produção em pequena escala quanto a criações alternativas exercidas por grandes pecuaristas (Umunna et al., 2014). Contudo, uma das limitações na produtividade ovina é o estresse calórico (Silanikove, 2000). Isto ocorre porque, na

*Correspondência: alexandre.garcia@embrapa.br

Recebido: 11 de setembro de 2021

Aceito: 28 de dezembro de 2021



tentativa de dissipar calor, os animais reduzem sua ingestão de alimentos, e a energia que seria utilizada para o crescimento, produção e reprodução é direcionada para os processos ativos de termorregulação corpórea (Hansen, 2009).

A perda econômica anual resultante do estresse ambiental varia de 0,1% a 4,0% do total dos ganhos obtidos com a produção animal (Chauhan et al., 2014). Essa redução de produtividade devido ao estresse calórico é observada principalmente nas regiões tropicais, onde o clima é predominantemente quente e com alta umidade relativa do ar (Garcia, 2013). Contudo, atualmente, animais criados em países situados na zona temperada também têm sofrido com os efeitos do estresse térmico, em função do incremento das temperaturas no verão e do aumento da ocorrência de ondas de calor nessas regiões (Pasqui e Di Giuseppe, 2019). Evidências científicas apontam que até o ano de 2035 a temperatura média atmosférica aumentará de 0,3 a 0,7°C (IPCC, 2014), indicando que maior atenção ao conforto térmico deverá ser dispensada no planejamento dos sistemas de produção de leite, carne ou lã.

Apesar das diferenças inter-raciais marcantes no ciclo reprodutivo dos ovinos quando comparadas raças originadas de altas e médias latitudes com aquelas provindas de regiões tropicais (Lincoln et al., 1990), algumas distinções podem ser observadas também entre indivíduos do mesmo grupo genotípico (Ortavant et al., 1988). Essas características podem diferir não somente devido à variação da luminosidade diária, mas também ser influenciadas por outros fatores biometeorológicos. Devido às altas temperaturas do ar, os animais podem entrar em estresse calórico e sofrer interrupções na atividade reprodutiva (Hansen, 2009). Isso reforça a importância de se estudar a relação entre o ambiente térmico e o animal, tendo como referência parâmetros fisiológicos e bioindicadores que sirvam para distinguir animais com maior capacidade de termorregulação corpórea e desenvolvimento reprodutivo destacado.

Importância do Ambiente Térmico para os Ovinos

Os ovinos são animais homeotérmicos, pois são capazes de manter a temperatura corporal acima das temperaturas do ambiente e a regulam dentro de limites fisiológicos estreitos, por intermédio da produção e da perda de calor (Randall et al., 2000). A homeotermia requer que a quantidade de calor produzido ou recebido do ambiente deve ser igual ao calor dissipado para o ambiente, como indicado na equação: $M = \pm K \pm C \pm R \pm E$, onde M equivale à produção de calor metabólico, K é a troca de calor por condução, C é a troca de calor por convecção, R é a troca de calor por radiação e E é a troca de calor por evaporação do suor ou evaporação respiratória.

Se o calor gerado pelos processos fisiológicos ou obtido do meio for maior que o calor dissipado pelos mecanismos de termólise, a temperatura interna do animal se elevará. A faixa fisiológica sugerida para a temperatura corporal central interna de ovinos se situa entre 38,5 e 39,9°C (Robinson, 2002). Assim, a termorregulação é um mecanismo que mantém a temperatura corporal relativamente constante, pois permite seu equilíbrio por mecanismos de termogênese e termólise (Renaudeau et al., 2012), apesar das variações de temperatura do ambiente.

A identificação de ambientes térmicos desfavoráveis pressupõe, por oposição, a existência de uma gama de temperaturas mais adequadas à sobrevivência e ao bem-estar dos ovinos. Nesse intervalo de temperaturas, os indivíduos são capazes de se manter em equilíbrio térmico dinâmico com o meio externo, sem realizar de forma ativa e com gasto energético os ajustes necessários para manter a homeotermia (Pereira et al., 2019). Assim, pode-se conceituar como “zona de termoneutralidade” a faixa de temperatura do ambiente, delimitada pelas temperaturas críticas inferior e superior, na qual o animal apresenta sua taxa metabólica mínima e a regulação da homeotermia é realizada através da troca de calor por mecanismos físicos não-evaporativos (Yousef, 1985). Na condição de termoneutralidade, os animais encontram-se sob ótimas condições para expressar seu potencial genético e máxima produtividade (Das et al., 2016).

O estresse por calor é definido como sendo a elevação da temperatura do corpo acima do ponto de ajuste, provocada pela ação do ambiente (Hansen, 2009), o que inclui a atuação de fatores abióticos e bióticos. Os maiores responsáveis pelo estresse térmico nos ovinos são fatores abióticos constitutivos do microclima circundante ao animal, no caso a radiação solar, o vento, a umidade relativa e a temperatura do ar. Por isso, um indicador de conforto térmico bastante utilizado para ovinos é o Índice de Temperatura e Umidade (THI), que representa a combinação da umidade relativa e da temperatura do ar medida em termômetro de bulbo seco, e possibilita mensurar o estresse térmico sentido pelos animais (Thom, 1959). Um índice derivativo do THI e específico para ovinos foi criado por Marai et al. (2007), e pode ser calculado pela equação $THI = AT - \{(0,31 - 0,31 * RH) * (AT - 14,4)\}$, onde AT é a temperatura



do ar e RH é a umidade relativa. Contudo, seu uso quantitativamente tem sido menor que o indicador original. Outro indicador de interesse é o Índice de Temperatura de Globo Negro e Umidade (BGHI), o qual integra os efeitos de energia radiante, da temperatura e velocidade do vento (Buffington et al., 1981). O BGHI já foi utilizado em diferentes regiões do Brasil (Silva et al., 2017) e mostra-se útil para o monitoramento de ovinos (Titto et al., 2016). Esses indicadores têm grande importância para produtores e pesquisadores, pois permitem quantificar o estresse calórico e alertar quando as condições climáticas trazem risco à produtividade dos animais (Moraes Junior et al., 2010).

Estima-se que a faixa de temperatura ambiental de tolerância para ovinos adultos esteja entre 12,0 e 32,0°C (Cwynar et al., 2014). De modo mais extremo, a exposição dos ovinos à radiação solar sob temperaturas ambientes acima de 35,0°C dificulta seu equilíbrio térmico, tornando-se um importante fator de restrição à alta produtividade durante as estações quentes e afetando seu potencial econômico (Liu et al. 2012). O estresse pelo calor também afeta negativamente o *status* antioxidante e a resposta imune de ovinos jovens, com redução das concentrações séricas de glutathione peroxidase, superóxido dismutase e imunoglobulina G, cuja supressão está associada não somente à duração do estresse, mas também a sua severidade (Shi et al., 2020).

Ovinos submetidos a altas temperaturas manifestam esforços para dissipar o excesso de calor corpóreo mediante mudanças nas funções biológicas, apresentando redução no consumo e na eficiência alimentar, modificações no metabolismo ruminal dos ácidos graxos voláteis (Bedford et al., 2020) e no consumo de água (Marai et al., 2007). O estresse térmico diminui em aproximadamente 7 horas a duração do estro em ovelhas, mas aumenta a duração total do ciclo estral, afetando diferencialmente a expressão do comportamento sexual. Além disso, ovelhas sob estresse pelo calor apresentam maiores chances de mortalidade embrionária e redução nas taxas de concepção, além de exibir redução nos pesos da placenta e do feto (Romo-Barron et al., 2019).

No caso dos machos, se forem constantemente submetidos a elevadas temperaturas do ar, podem apresentar redução de sua eficiência reprodutiva devido à ação deletéria do calor sobre a gametogênese (Barros et al., 2016) e a libido. De fato, existe uma relação inversa entre indicadores de estresse térmico e atividade animal (Giro et al., 2019), o que explica a opção dos ruminantes em aumentarem seu período de ócio em condições de desconforto térmico e, conseqüentemente, reduzem o tempo dedicado às interações sociais de cunho reprodutivo.

Respostas Termorregulatórias Sistêmicas

O ideal para o animal se manter em conforto é que o balanço térmico seja nulo, de modo que a somatória do calor produzido pelo organismo e do calor advindo do ambiente seja igual ao calor perdido, por meio da radiação, da convecção, da condução e da evaporação, além do calor contido nas substâncias corporais eliminadas. Sendo o ovino um animal homeotérmico, ao ser exposto ao estresse térmico por calor, este reage inicialmente apresentando vasodilatação periférica, o que redireciona o fluxo sanguíneo para suas extremidades corpóreas e aumenta a perfusão sanguínea cutânea. A elevação no fluxo sanguíneo incrementa a condutividade dos tecidos periféricos e eleva a temperatura da pele, aumentando o gradiente térmico entre esta e o ambiente, resultando em maior perda de calor para o meio circundante por radiação e por convecção (Robinson, 2002).

A diferença entre a temperatura da epiderme e da superfície do pelame pode favorecer o fluxo de energia térmica nos ovinos, sejam estes lanados ou não. Na primavera, sob condições específicas, animais das raças Dorper, Morada Nova e Texel apresentam temperatura de epiderme de 31,5±3,3; 31,3±3,2; e 32,3±2,5°C e temperatura de pelame de 30,5±3,9; 31,1±2,8; e 28,5±4,4°C, respectivamente (Pantoja et al., 2016). Em situação deste gênero, os animais apresentam fluxo centrífugo de calor, ou seja, com transferência de energia térmica da epiderme para o pelame. Contudo, se por um lado a presença de lã branca reflete mais radiação, absorve menos calor e mantém a temperatura do pelame mais baixa, por outro pode criar uma barreira física que dificulta a troca de calor por convecção. Nos casos em que há uma progressiva redução do gradiente térmico entre a temperatura corpórea e a temperatura do ambiente, os processos de condução, convecção e radiação tornam-se menos eficientes e faz-se inevitável recorrer à termólise evaporativa para manter o equilíbrio térmico.

A polipneia térmica, causada pelo aumento da frequência respiratória, possibilita ocorrer o ofego, que é o mecanismo fisiológico primário para dissipação de calor nos ovinos, quando expostos a condições climáticas desfavoráveis (Lees et al., 2019). De fato, quando ovinos Santa Inês foram submetidos a temperaturas do ar extremas, de 40°C, os animais apresentaram média de 173 movimentos respiratórios por minuto, com projeção da língua, na tentativa de perder calor (Eustáquio Filho et al.,



2011). No entanto, esse recurso resulta em aumento de 7 para 25% da demanda energética diária para manutenção de ruminantes, além de também gerar calor (Kadzere et al., 2002).

A elevação da frequência respiratória, quando mantida por tempo prolongado, torna-se um mecanismo ineficiente para a perda de calor (Souza et al., 2005). Diante disso, a sudorese é acionada buscando evitar o acúmulo excessivo de calor no organismo (Titto et al., 2016) e se torna bastante eficiente em condições de alta temperatura e baixa umidade (Luz et al., 2014). Se durante a ofegação a eliminação do excesso de calor é feita na forma de vaporização a partir dos pulmões, na sudorese ocorre perda através da evaporação da água da superfície da pele do animal (Gebremedhin et al., 2008). A troca evaporativa cutânea contribui, em média, com 63% da evaporação total (Silva e Starling, 2003). No entanto, se os animais não conseguem dissipar o excesso de calor através dos mecanismos citados, e a perda de calor não for superior ao ganho, o calor é armazenado, resultando no aumento da temperatura do corpo, refletindo no aumento da temperatura retal (Brosh et al., 1998). Assim, a temperatura retal pode ser usada como um indicador consequente à condição de conforto ou estresse térmico imposta pelo ambiente no qual o animal está inserido (Al-Haidary, 2004). Nesse sentido, a temperatura retal tem sido usada como o bioindicador de referência de estresse calórico a ser predito em modelos matemáticos de diferentes complexidades, a partir do monitoramento de outras variáveis biofísicas (Almeida et al., 2018) e que possam ser incorporadas em aplicações de pecuária de precisão.

Termorregulação Escrotal e Testicular no Calor

Na maioria dos mamíferos domésticos que possuem testículos alojados em escrotos pendulares e localizados na região externa à cavidade abdominal, a espermatogênese normal é dependente da manutenção da temperatura testicular entre 2,0 e 6,0°C mais baixa que a temperatura interna corpórea (Waites, 1970; Kastelic et al., 1996). Existe um gradiente de temperatura no escroto e nos testículos, que aumenta quanto mais distante estiver a estrutura relativamente à cavidade abdominal e mais eficiente for o sistema de termorregulação escrotal. Esta condição é imperativa para a normalidade da espermatogênese, visto que testículos expostos a temperaturas elevadas apresentam uma série de alterações que concorrem para a redução na qualidade seminal (Setchell, 1998). Nos ovinos, a diferença entre a temperatura abdominal e testicular está próxima a 4,0°C (Marai et al., 2007). Para animais deslanados, o gradiente de temperatura entre a temperatura retal e a temperatura do funículo espermático durante o verão varia de 5,5 a 6,0°C e este apresenta correlação positiva com a integridade de membrana plasmática dos espermatozoides ($r=0,62$) (Kahwage et al., 2018), o que interfere na capacidade fertilizante do animal.

Vários mecanismos de termorregulação escrotal e testicular estão envolvidos na manutenção da temperatura dos testículos em níveis adequados. O escroto desempenha papel fundamental na termorregulação testicular, pois, por ser um órgão pendular, pode se distanciar do abdômen e facilitar a radiação do calor pela região do colo escrotal. Isso é possível porque o escroto possui um sistema vascular e linfático extenso, muito próximo à pele, o que facilita a perda de calor. Além disso, o escroto é um órgão de irrigação expressiva e sujeito a apresentar vasodilatação arteriolar, em resposta ao aumento da temperatura percebida pelos termorreceptores (Kastelic et al., 1997). Carneiros que possuem escroto recoberto por lã apresentam temperatura de superfície, temperatura subcutânea e temperatura intratesticular maiores do que as observadas quando a região escrotal é tosquiada. Presume-se que o recobrimento por lã da região proximal da bolsa escrotal impeça a perda de calor (Kastelic et al., 1999). Contudo, nota-se também que a lã na região escrotal assume função protetiva contra radiação térmica (Waites e Voglmayr, 1962).

O mecanismo mais importante de troca de calor no escroto é aquele que se dá por contracorrente no cone vascular testicular. Este ocorre pela transferência de calor do sangue arterial para o sangue venoso, via justaposição da artéria testicular e do plexo venoso pampiniforme (Kastelic et al., 1997). Isto permite que o sangue arterial refrigerado possa chegar ao testículo, enquanto o calor contido no sangue venoso seja dissipado via superfície escrotal (Durairajanayagam et al., 2015). Além disso, para garantir que a temperatura do parênquima testicular seja uniforme, existe um gradiente de temperatura oposto entre o escroto e o testículo, conferido pelo suprimento vascular, no qual o escroto apresenta gradiente de temperatura positivo, enquanto o testículo possui gradiente negativo (Kastelic et al., 1997).

O mecanismo de perda de calor por contracorrente torna-se mais eficiente na medida em que se reduz o fluxo sanguíneo pela artéria testicular, a qual tem conformação longa e sinuosa (Brito et al., 2004). Contudo, o fluxo sanguíneo pode sofrer variações conforme as mudanças na temperatura testicular e do ambiente (Waites e Moule, 1961). Achados recentes em ultrassonografia Doppler em ovinos



mostram que se durante os meses de primavera e verão houver um aumento substancial na resistência vascular da artéria testicular, o que leva à deficiência na microcirculação testicular, pode haver deterioração da qualidade do sêmen durante esses períodos (Hedia et al., 2019).

A perda de calor pelo distanciamento do escroto em relação ao abdômen ocorre devido ao relaxamento do músculo cremaster e da túnica dartos, em resposta a estímulos gerados por termorreceptores presentes na superfície escrotal (Shafik, 1991). O músculo cremaster possui menor capacidade de contração que a túnica dartos e não pode manter a contração por períodos prolongados. A túnica dartos é um músculo liso localizado logo abaixo da pele escrotal que atua sob inervação simpática lombar e responde às mudanças na temperatura ambiental. Seu relaxamento aumenta a superfície de contato para a troca de calor favorecendo o arrefecimento testicular. Portanto, esse músculo define a magnitude da troca de calor (Marai et al., 2007), sendo sua atividade controlada pela temperatura do escroto, porém modulada pela temperatura corporal (Maloney e Mitchell, 1996).

As glândulas sudoríparas localizadas no escroto proporcionam redução da temperatura local por intermédio da evaporação do suor secretado. As glândulas sudoríparas escrotais apresentam menor tempo de latência para ejeção do suor em resposta ao aumento da temperatura do ar, quando comparadas às glândulas situadas na superfície lateral do corpo (Waites e Voglmayr, 1962). As glândulas apócrinas escrotais proporcionam redução na temperatura corporal e estão envolvidas na interrupção do reflexo de polipneia em carneiros por meio da secreção de suor (Waites, 1962). Este mecanismo é mediado por receptores α -adrenérgicos, uma vez que a adrenalina estimula a atividade das glândulas sudoríparas (Waites e Voglmayr, 1962). Estas glândulas, por sua vez, possuem potencial distinto de secreção ao longo de todo escroto, tendo por preferência as áreas distais, próxima à cauda do epidídimo, onde apresentam maior volume (Blazquez et al., 1988). Isto permite adequada função da cauda do epidídimo, visto que este é considerado um órgão termossensível, onde a temperatura ideal para realização da sua função é inferior a apresentada no testículo (Moura et al., 2019).

Elevação da Temperatura Testicular e Qualidade Seminal

A herdabilidade das características espermáticas em ovinos varia de muito baixa a moderada, indicando que estas sofrem grande influência do ambiente (Serrano et al., 2021). Por certo, sabe-se que um aumento da temperatura testicular diminui a qualidade do sêmen produzido. Segundo o Colégio Brasileiro de Reprodução Animal, são características desejáveis em um ejaculado ovino: volume que varia de 0,5 a 3,0 mL, concentração espermática de 1 a 3 bilhões de espermatozoides por mL, turbilhonamento mínimo de 3 (escala de 0 a 5), motilidade espermática igual ou maior a 80%, vigor de pelo menos 3 (escala de 1 a 5), mais de 80% de espermatozoides móveis com progressão retilínea e mais de 80% de espermatozoides com morfologia normal (CBRA, 2013).

Em ovinos adultos, existe uma variação da atividade sexual e da qualidade seminal em função da época do ano, em indivíduos de raças originárias de altas latitudes, sem, contudo, haver azoospermia (Gerlach e Aurich, 2000). Modificações estacionais nas concentrações plasmáticas de testosterona, LH, FSH, prolactina (El-Alamy et al., 2001), inibina (Lincoln et al., 1990) e hormônios da tireoide (Zamiri e Khodaei, 2005) também podem ocorrer. Todavia, essas variações seminais são menos perceptíveis em ovinos de raças tropicais, de modo que carneiros Santa Inês e Morada Nova são capazes de manter a produção de sêmen de alta qualidade ao longo do ano todo, sem apresentar oscilações significativas que comprometam sua fertilidade (Kahwage et al., 2018).

Além das respostas sistêmicas, o estresse térmico causa resposta em nível celular, que inclui a ativação dos fatores de transcrição de choque térmico 1 e 3 (HSF1 e HSF3), aumento na expressão de proteínas de choque térmico (HSPs) e diminuição na expressão e síntese de outras proteínas. Ocorre, também, aumento da oxidação de glicose e aminoácidos e redução do metabolismo de ácidos graxos, ativação do sistema endócrino de resposta ao estresse e ativação do sistema imune pela secreção extracelular de HSPs (Collier, et al., 2008). Estas geralmente entram na circulação sanguínea durante o dano tecidual e causam necrose ou morte celular. Além disso, a hipertermia é associada à elevação na produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), que causam degradação de proteínas e redução da síntese proteica. Além disso, tem sido sugerido que altas temperaturas ambientais levam ao aumento da sinalização inflamatória nos tecidos por meio da ativação do fator nuclear kappa B (NF- κ B) e do fator de necrose tumoral alfa (TNF- α), bem como pela alteração da expressão de genes relacionados à cor da pele (MC1R-receptor de melanocortina 1 e PMEL- premelanossoma de proteína) (Abdelnour et al., 2019).

Por isso, o aumento na temperatura escrotal pode causar diversos efeitos negativos sobre a qualidade seminal, principalmente nos parâmetros relacionados à celularidade espermática. Estes são

observados quando os testículos são sujeitos ao aumento da temperatura ambiente, ou de forma induzida pela insulação escrotal ou pelo criptorquidismo (Kastelic et al., 1997). Achados recentes demonstram que o gradiente térmico entre a temperatura interna corpórea e a temperatura de superfície do funículo espermático de ovinos varia de 6,5 a 7,0°C na primavera-verão, com tendência de aumento durante as estações mais frias do ano. Ainda, o gradiente térmico entre os polos testiculares dorsal e ventral em carneiros férteis varia de 2,3 a 2,9°C, característica que se relaciona negativamente com total de defeitos morfológicos no ejaculado ($r=-0,19$) e positivamente com a integridade de membrana plasmática dos espermatozoides ($r=0,29$) (Moura et al, 2019). Assim, quanto maior for o gradiente térmico entre os polos testiculares, maior será a habilidade testicular em prover um microambiente adequado para a produção de gametas masculinos com morfologia e funcionalidade normais.

Assim, o aumento na temperatura da superfície escrotal, por causas patológicas ou fisiológicas, pode comprometer a qualidade espermática, de modo que a elevação em um grau Celsius basta para que as alterações espermáticas sejam observadas (Durairajanayagam et al., 2015). Em carneiros, essas alterações compreendem redução do movimento de massa, vigor e motilidade progressiva, bem como na concentração e viabilidade espermática. A morfologia espermática é prejudicada, com aumento na porcentagem de células portadoras de defeitos maiores e/ou defeitos menores. Em casos severos, pode ser observada azoospermia (Moreira et al., 2001; Rocha et al., 2015; Hamilton et al., 2016). Estas alterações não são verificadas imediatamente, mas sim dentro de 21 dias após a exposição testicular a elevadas temperaturas (Alves et al., 2016). As primeiras alterações celulares podem ser visualizadas após uma semana, devido à injúria epididimária (Cruz Junior et al., 2015). Em média, 47 dias são necessários para que os efeitos da hipertermia testicular sejam observados no ejaculado, compreendendo em um ciclo espermático (Hamilton et al., 2016). Contudo, o período de recuperação da qualidade seminal pode variar conforme a extensão da injúria (Moreira et al., 2001) e a sensibilidade da raça ou do indivíduo ao estresse pelo calor.

O tipo de anormalidade morfológica celular observada guarda correspondência com a fase do processo espermatogênico em que as células germinativas se encontravam quando os testículos sofreram incremento na temperatura (Thundathil et al., 2012; Gonçalves et al., 2021). As injúrias dos túbulos seminíferos são visualizadas no ejaculado dos ovinos após sete semanas da exposição, com maiores porcentagens de subpopulações de células espermáticas com cabeça em elipse (Armengol et al., 2015). Por outro lado, as alterações causadas por disfunções epididimárias são vistas mais rapidamente (Moreira et al., 2001), em geral uma semana após o estresse calórico, podendo perdurar por longo período. As fragmentações no DNA espermático relacionadas ao aumento de temperatura escrotal podem ocorrer no período do trânsito epididimário, 12 dias em ovinos, uma vez que a estabilização da cromatina do espermatozoide se completa durante a maturação no epidídimo pela formação de pontes dissulfeto dentro e entre as moléculas de protamina (Malama et al. 2013).

As principais patologias espermáticas associadas ao aumento da temperatura testicular em ovinos consistem em cabeças isoladas, cauda dobrada/enrolada, gota citoplasmática proximal e cabeça pequena anormal (Moreira et al., 2001). Outras anormalidades podem surgir com maior frequência à medida que aumenta o intervalo entre o término da exposição ao agente estressor e a obtenção do sêmen, a saber, cabeça piriforme, cabeça com contorno anormal e defeito de peça intermediária (Rocha et al. 2015).

As células germinativas são mais vulneráveis a oscilações na temperatura do que as células somáticas, pois possuem elevada atividade mitótica (Malama et al., 2013). Dentre elas, as mais suscetíveis encontram-se na fase de espermátocitos paquíteno e espermátides em fase inicial (Durairajanayagam et al., 2015). Estas estão sujeitas ao aumento de espécies reativas de oxigênio, principais responsáveis por causar dano ao DNA espermático e que levam aos mecanismos de apoptose e autofagia destas células. Contudo, nem todos os espermatozoides com DNA danificado são eliminados. Assim, justificam-se os casos de subfertilidade/infertilidade e baixo desenvolvimento embrionário quando se utiliza sêmen de indivíduos sujeitos ao estresse calórico (Kim et al., 2013).

A apoptose das células germinativas é a principal causa da redução no peso testicular, e, dependendo da extensão dos efeitos das altas temperaturas, os testículos podem não se recuperar completamente (Marai et al., 2008). O comprometimento da integridade do epitélio seminífero, a depender de sua extensão, pode culminar em redução do tônus testicular e diminuições expressivas na biometria dos testículos, achados clínicos compatíveis com quadro de degeneração testicular. Achados histopatológicos testiculares envolvem vacuolização e desaparecimento da linha no epitélio seminífero, presença intratubular de células gigantes, fibrose intersticial, espermatogênese interrompida nas fases de espermátocito e diminuição nas camadas do epitélio germinativo (Rasooli et al., 2010). As células somáticas também podem ser afetadas, prejudicando o desenvolvimento adequado das células



germinativas, uma vez que estas são responsáveis por proporcionar suporte físico e regular à esteroidogênese (Durairajanayagam *et al.*, 2015). Entretanto, estas não demonstram ser danificadas pela curta exposição ao calor moderado (Rao *et al.*, 2016).

Como já exposto, o aumento da temperatura causa produção excessiva de espécie reativas de oxigênio, as quais, quando em equilíbrio, possuem ação benéfica sobre os espermatozoides. No entanto, o desequilíbrio entre ROS e os antioxidantes, ambos produzidos pelos testículos, causam o estresse oxidativo (Kim *et al.*, 2013), considerado prejudicial à fertilidade (Sharma e Agarwal, 1996). Este desequilíbrio na produção de ROS também pode ser explicado por disfunções mitocondriais causados pelo estresse calórico (Hamilton *et al.*, 2016). Os efeitos deletérios das espécies reativas de oxigênio, além dos efeitos sobre o DNA espermático, causam redução na motilidade espermática e na capacidade de ligação entre espermatozoide e oócito, devido à peroxidação lipídica da membrana plasmática. Isso compromete a integridade estrutural da membrana (Sharma e Agarwal, 1996), a qual é essencial para que haja capacitação espermática e reação acrossômica (Rao *et al.*, 2016).

Além disso, o calor pode causar alterações na composição do fluido na cauda do epidídimo, afetando a composição de proteínas responsáveis por atividades catalíticas, antioxidantes e reguladoras, envolvidas na proteção espermática, maturação e fertilização (Durairajanayagam *et al.*, 2015). Dentre estas encontram-se as proteínas de choque térmico, chaperonas que conferem ação protetiva contra a degradação de proteínas causada pelo estresse oxidativo (Durairajanayagam *et al.*, 2015). Alterações nestas proteínas são frequentemente relacionadas a modificações nos parâmetros seminais (Rocha *et al.*, 2015), as quais, em associação aos desvios de comportamento e libido, são capazes de causar subfertilidade ou mesmo infertilidade nos animais (Durairajanayagam *et al.*, 2015).

Tecnologias Digitais para Favorecer o Conforto Térmico

A reprodução é a atividade biológica mais importante para qualquer espécie animal, pois a partir dela são originados os indivíduos da próxima geração, o que garante a sobrevivência da espécie no meio. O ato da reprodução pode constituir-se no principal compromisso da energia adquirida e estocada, de modo que imensa percentagem da ingestão de energia anual é usada na produção de gametas e no cuidado com a prole (Randall *et al.*, 2000). Assim, todo mecanismo fisiológico que necessite mobilizar reservas de energia é um potencial concorrente dos processos reprodutivos. De forma inequívoca, a termorregulação corpórea em ovinos é um mecanismo complexo que envolve processos ativos (Fonsêca *et al.*, 2019). Por isso, o uso de tecnologias para monitoramento dos fatores ambientais bióticos e abióticos, bem como do próprio metabolismo animal, pode constituir recurso útil para a manutenção do conforto térmico animal e consequente elevação da sua eficiência reprodutiva, por partição mais adequada da energia metabólica.

As condições de estresse ou de conforto térmico dos ovinos nas propriedades rurais ou durante o transporte podem ser avaliadas com uso de inteligência artificial. Um sistema biométrico livre de contato baseado em imagens de câmeras nos espectros visível e termal foi usado para o desenvolvimento de um modelo de aprendizado de máquina capaz de estimar com 96% de acurácia as frequências respiratória e cardíaca de ovinos adultos (Fuentes *et al.*, 2020). Atualmente, também é realista imaginar que um sensor do tipo fotoplethysmógrafo possa ser integrado a um brinco auricular para animais de médio porte, a fim de monitorar continuamente e com alta precisão seus batimentos cardíacos (Nie *et al.*, 2020). Sendo as frequências cardíaca e respiratória bioindicadores importantes de estresse calórico em ovinos, a utilidade dessas tecnologias é evidente.

No domínio da calorimetria, que trata da averiguação da dinâmica da energia térmica corporal, a termografia por infravermelho tem se mostrado muito eficiente para quantificar a perda de calor de forma não invasiva (Labeur *et al.*, 2017). Os sensores de infravermelho são equipamentos que possuem receptores capazes de reagir à emissão de raios infravermelhos, os quais são emanados de todo corpo que apresenta temperatura acima do zero absoluto (0 grau Kelvin ou -273,15°C). Como não necessitam estar em contato direto com a superfície avaliada, modernamente esses sensores têm demonstrado grande utilidade prática na Medicina Veterinária e na Zootecnia, permitindo o monitoramento da condição térmica dos indivíduos e dos ambientes de criação.

A termografia é capaz de medir e mapear a perda de calor corporal pela radiação infravermelha da superfície da pele de forma segura, gerando dados de rápida e fácil aquisição, fornecendo um novo parâmetro de obtenção de dados fisiológicos (Zhang *et al.*, 2020) ou espaciais. O método permite avaliar o animal em estação ou em movimento, assim como vários animais de forma simultânea, possuindo precisão, elevada repetibilidade e confiabilidade. Por isso, os sensores de infravermelho de alta resolução em câmeras portáteis têm sido usados com sucesso no monitoramento da temperatura de superfície



corpórea de ovinos de raças lanadas ou deslanadas, sendo capazes de discriminar, associados a técnicas complementares, animais e genótipos com maior habilidade de termorregulação corpórea (Pantoja *et al.*, 2017), tanto em ovinos adultos (Seixas *et al.*, 2017) como em cordeiros (Menant *et al.*, 2020).

Apesar de haver algumas limitações durante seu uso (Zhang *et al.*, 2020), como por exemplo interferências quanto a luz solar, alta umidade, fluxo convectivo do ar e eventuais sujidades sobre a pelagem do animal (Kotrba *et al.*, 2007), a termografia usada em modo proximal tem sido válida como recurso diagnóstico complementar em avaliações andrológicas, principalmente para mapeamento da termorregulação escrotal de ovinos adultos (Alves *et al.*, 2016; Moura *et al.*, 2019). Por sua vez, a termografia infravermelha usada em sensoriamento distal assume dimensão diversa do uso clínico, embora igualmente útil. Quando embarcados em veículos aéreos tripulados, os sensores termográficos são capazes de indicar as diferenças espaço-temporais nas temperaturas de superfície em áreas de produção de animais a pasto, em áreas naturalmente sombreadas ou não, ao longo das diferentes estações climáticas (Laurenti *et al.*, 2019). Essa modalidade de uso é disruptiva na produção animal e favorece a determinação de épocas e zonas de maior oferta de conforto térmico, o que permite a alocação e manejo de animais visando maior condição de maior bem-estar.

Evidentemente, a linha que separa os mundos virtual e físico está se aproximando, e essa nova condição traz novos paradigmas e desafios para a consolidação de uma agricultura digital completa. O cenário futuro para a produção animal aponta para uma expansão acelerada de novas tecnologias, de maior controle e precisão dos sistemas de produção, principalmente pela adoção de equipamentos e sistemas inteligentes. Devido ao custo decrescente das tecnologias, o uso de dispositivos associados à microeletrônica tem se tornado cada vez mais acessíveis aos produtores rurais, independentemente do tamanho da propriedade, modificando o cenário atual para a expansão tecnológica na ovinocultura. O advento da Internet das Coisas (IoT) fará com que cada elemento físico no mundo real, animais inclusive, seja equipado com sensores que o conectam ao mundo virtual (Mateo-Fornés *et al.*, 2021). Os dados gerados por esses sensores podem alimentar modelos preditivos, modelos prescritivos ou algoritmos de inteligência artificial, para gerar informações e novas abordagens que possam auxiliar o processo de tomada de decisão por parte dos técnicos e dos produtores rurais.

Considerações Finais

Com base no conhecimento científico hoje existente, as mensagens mais importantes para se tomar, quando se considera a susceptibilidade dos ovinos ao estresse calórico, especialmente dos reprodutores, são:

- a) O ovino é um animal homeotérmico capaz de regular sua temperatura interna corpórea, independentemente das variações da temperatura do meio ambiente, e para tal lança mão de mecanismos de troca de calor sensível e latente.
- b) A termorregulação escrotal é um fenômeno complexo que depende de elementos intrínsecos ao animal e de fatores abióticos. Seu perfeito funcionamento é crucial para a normalidade da gametogênese, qualidade seminal e fertilidade do reprodutor.
- c) O escroto dos ovinos apresenta importantes mecanismos que atuam sinergicamente para sua termorregulação, como sintopia, contratilidade muscular, perfusão profunda e do tegumento, estrutura glandular e recobrimento da pele escrotal.
- d) Dada a sensibilidade dos eventos reprodutivos aos efeitos do ambiente, devem ser adotadas estratégias para fenotipagem de animais termotolerantes, de modo a prevenir a incidência de distúrbios reprodutivos induzidos pelo estresse calórico e permitir a seleção de reprodutores de maior qualidade seminal, mesmo quando criados em ambientes desafiadores.
- e) A prevenção ao estresse térmico deve considerar a relação entre o animal e o ambiente, de modo que não somente a escolha da raça torne-se primordial, mas sobretudo a arquitetura do sistema e a adoção de estratégias de manejo que contribuam para a ambientação do animal e seu bem-estar.
- f) A incorporação de tecnologias inovadoras para monitoramento dos animais e de seu ambiente de produção deve ser buscada, pois permite a geração de dados e análise instantânea, favorecendo a tomada de decisões em tempo real, o desempenho produtivo e a qualidade dos produtos finais.

Agradecimentos

À Embrapa-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Universidade Federal Fluminense, Universidade Federal do Pará pelo suporte financeiro que gerou parte dos resultados e informações ora



compilados. O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. ARG é bolsista de produtividade do CNPq.4

Referências

- Abdelnour SA, Abd El-Hack ME, Khafaga AF, Arif M, Taha AE, Noreldin AE.** Stress biomarkers and proteomics alteration to thermal stress in ruminants: A review. *J Therm Biol*, v.79, p.120-134, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.013>.
- Al-Haidary AA.** Physiological responses of Naimey sheep to heat stress challenge under semi-arid environments. *Int J Agric Biol*, v.6, n.2, p.307-309, 2004. <https://doi.org/1560-8530/2004/06-2-307-309>.
- Almeida JTB, Barioni Junior W, Moura ABB, Pantoja MHA, Romanello N, Botta D, Giro A, Barreto AN, Garcia AR.** In: Jornada Científica da Embrapa São Carlos, 10, 2018, São Carlos, SP. Anais... São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação; Embrapa Pecuária Sudeste, p.13, 2018. Disponível em <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1096477>. Acesso em 27 ago. 2021.
- Alves MB, Andrade AF, Arruda RP, Batissaco L, Florez-Rodriguez SA, Oliveira BM, Torres MA, Lançoni R, Ravagnani GM, Prado Filho RR, Vellone VS, Losano JD, Franci CR, Nichi M, Celeghini EC.** Recovery of normal testicular temperature after scrotal heat stress in rams assessed by infrared thermography and its effects on seminal characteristics and testosterone blood serum concentration. *Theriogenology*, v.86, p.795-805, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.02.034>.
- Armengol MFL, Sabino GA, Forquera JC, Casa A, Aisen EG.** Sperm head ellipticity as heat stress indicator in Australian Merino rams (*Ovis aries*) in Northern Patagonia, Argentina. *Theriogenology*, v.83, n.4, p.553-559, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2014.10.020>.
- Barros DV, Silva LKX, Kahwage PR, Lourenço Júnior JB, Sousa JS, Silva AGM, Franco IM, Martorano LG, Garcia AR.** Assessment of surface temperatures of buffalo bulls (*Bubalus bubalis*) raised under tropical conditions using infrared thermography. *Arq Bras Med Vet Zootec*, v.68, n.2, p.422-430, 2016. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-8327>.
- Bedford A, Beckett L, Harthan L, Wang C, Jiang N, Schramm H, Guan LL, Daniels KM, Hanigan MD, White RR.** Ruminal volatile fatty acid absorption is affected by elevated ambient temperature. *Sci Rep*, n.10, v.1, p.13092, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69915-x>.
- Blazquez NB, Mallard GF, Wedd SR.** Sweat glands of the scrotum of the bull. *J Reprod Fertil*, v.83, p.673-677, 1988. doi:10.1530/jrf.0.0830673.
- Brito LFC, Silva AED, Barbosa RT, Kastelic JP.** Testicular thermoregulation in *Bos indicus*, crossbred and *Bos taurus* bulls: relationship with scrotal, testicular vascular cone and testicular morphology, and effects on semen quality and sperm production. *Theriogenology*, v.61, p.511-528, 2004. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(03\)00231-0](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(03)00231-0).
- Brosh A, Aharoni Y, Degen AA, Wright V, Young BA.** Effects of solar radiation, dietary energy, and time of feeding on thermoregulatory responses and energy balance in cattle in a hot environment. *J Anim Sci*, n.76, p.2671-2677, 1998. <https://doi.org/10.2527/1998.76102671x>.
- Buffington DE, Colazzo-Arocho A, Caton GH, Pitt D, Thatcher WW, Collier RJ.** Black globe humidity comfort index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. *Trans ASAE*, v.24, p.711-714, 1981. Colégio Brasileiro de Reprodução Animal, 2013. Manual Para Exame Andrológico e Avaliação de Sêmen Animal. 3. ed. Belo Horizonte: CBRA, 2013, p.104.
- Chauhan S, Celi P, Leury B, Clarke I, Dunshea F.** Dietary antioxidants at supranutritional doses improve oxidative status and reduce the negative effects of heat stress in sheep. *J Anim Sci*, v.92, p.3364-74, 2014. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-7714>.
- Collier RJ, Collier JL, Rhoads RP, Baumgard LH.** Invited Review: genes involved in the bovine heat stress. *Int J Dairy Sci*, v.91, p.445-454, 2008. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0540>.
- Cruz Júnior CA, Lucci CM, Peripolli V, Silva AF, Menezes AM, Morais SRL, Araújo AMS, Ribeiro LMCS, Mattos RC, McManus C.** Effects of testicle insulation on seminal traits in rams: preliminary study. *Small Rumin Res*, v.130, p.157-165, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2015.06.014>.
- Cwynar P, Kolacz R, Czernski A.** Effect of heat stress on physiological parameters and blood composition in Polish Merino rams. *Berl Munch Tierarztl Wochenschr*, v.127, p.177-82, 2014.
- Das R, Sailo L, Verma N, Bharti P, Saikia J.** Impact of heat stress on health and performance of dairy animals: A review. *Vet World*, n.9, v.3, p.260-268, 2016. <https://doi.org/10.14202/vetworld.016>.



- Durairajanayagam D, Agarwal A, Ong C.** Causes, effects and molecular mechanisms of testicular heat stress. *Reprod Biomed Online*, v.30, p.14-27, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rbmo.2014.09.018>.
- El-Alamy MA, Foote RH, Hare E.** Sperm output and hormone concentrations in Finn and Dorset rams exposed to long and short day lighting. *Theriogenology*, v. 56, p. 839-854, 2001. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(01\)00612-4](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(01)00612-4).
- Eustáquio Filho A, Teodoro SM, Chaves MA, Santos PEF, Silva MWR, Murta RM, Carvalho GGP, Souza LEB.** Zona de conforto térmico de ovinos da raça Santa Inês com base nas respostas fisiológicas. *Rev Bras Zootec*, v.40, n.8, p.1807-1814, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982011000800026>.
- Fonsêca VFC, Maia ASC, Saraiva EP, Costa CCM, Silva RG, Abdoun KA, Al-Haidary AA, Samara EM, Fuller A.** Bio-thermal responses and heat balance of a hair coat sheep breed raised under an equatorial semi-arid environment. *J Therm Biol*, p.83-91, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.05.024>.
- Fuentes S, Gonzalez Viejo C, Chauhan SS, Joy A, Tongson E, Dunshea FR.** Non-invasive sheep biometrics obtained by computer vision algorithms and machine learning modeling using integrated visible/infrared thermal cameras. *Sensors*, n.6, v.20, p.6334, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20216334>.
- Garcia AR.** Conforto térmico na reprodução de bubalinos criados em condições tropicais. *Rev Bras Reprod Anim*, v.37, n.2, p.121-130, 2013.
- Gebremedhin KG, Hillman PE, Lee CN, Collier RJ, Willard ST, Arthington JD, Brown Brandl TM.** Sweating rates of dairy cows and beef heifers in hot conditions. *Trans ASABE*, v.51, p.2167-2178, 2008. <https://doi.org/10.13031/2013.25397>.
- Gerlach T, Aurich JE.** Regulation of seasonal reproductive activity in the stallion, ram and hamster. *Anim Reprod Sci*, v. 58, p. 197-213, 2000. [https://doi.org/10.1016/s0378-4320\(99\)00093-7](https://doi.org/10.1016/s0378-4320(99)00093-7).
- Giro A, Pezzopane JRM, Barioni Junior W, Pedroso AF, Lemes AP, Botta D, Romanello N, Barreto ADN, Garcia AR.** Behavior and body surface temperature of beef cattle in integrated crop-livestock systems with or without tree shading. *Sci Total Environ*, v.684, p.587-596, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.377>.
- Gonçalves AA, Garcia AR, Rolim Filho ST, Silva JARD, Melo DN, Guimarães TC, Tavares HR, Silva TVG, Souza EB, Santos SDS, Ohashi OM.** Scrotal thermoregulation and sequential sperm abnormalities in buffalo bulls (*Bubalus bubalis*) under short-term heat stress. *J Therm Biol*, v.96, p.102842, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.102842>.
- Hamilton TRS, Mendes CM, Castro LS, Assis PM, Siqueira AFP, Delgado JC, Goissis MD, Muño-Blanco T, Cebriá-Pérez JA, Nichi M, Visintin JA, Assumpção MEOD.** Evaluation of lasting effects of heat stress on sperm profile and oxidative status of ram semen and epididymal sperm. *Oxidative Med Cell Longev*, p.1-12, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/1687657>.
- Hansen PJ.** Effects of heat stress on mammalian reproduction. *Philos Trans R Soc B*, v.364, p.3341-3350, 2009. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0131>.
- Hedia MG, El-Belely MS, Ismail ST, Abo El-Maaty AM.** Monthly changes in testicular blood flow dynamics and their association with testicular volume, plasma steroid hormones profile and semen characteristics in rams. *Theriogenology*, v.123, p.68-73, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2018.09.032>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. Climate change 2014: Summary for Policymakers. Disponível em: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf. Acesso 02 de set. de 2021.
- Kadzere CT, Murphy MR, Silanikove N, Maltz E.** Heat stress in lactating dairy cows: a review. *Livest Prod Sci*, p.59-91, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(01\)00330-X](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(01)00330-X).
- Kahwage PR, Esteves SN, Jacinto MAC, Barioni W, Machado R, Romanello N, Passeri LF, Mendonça KL, Garcia AR.** Assessment of body and scrotal thermoregulation and semen quality of hair sheep rams throughout the year in a tropical environment. *Small Rumin Res*, v.160, p.72-80, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2018.01.015>.
- Kastelic JP, Cook RB, Coulter GH.** Contribution of the scrotum, testes and testicular artery to scrotal and testicular thermoregulation in bulls at two ambient temperatures. *Science*, v.45, p.255-261, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0378-4320\(96\)01587-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4320(96)01587-4).
- Kastelic JP, Cook RB, Coulter GH.** Contribution of the scrotum and testes to scrotal and testicular thermoregulation in bulls and rams. *J Reprod Fertil*, v.108, p.81-85, 1996. <https://doi.org/10.1530/jrf.0.1080081>.
- Kastelic JP, Cook RB, Coulter GH.** Effects of ambient temperature and scrotal fleece cover on scrotal



- and testicular temperatures in rams. *Can J Vet Res*, v.63, p.157-160, 1999.
- Kim B, Park K, Rhee K.** Heat stress response of male germ cell. *Cell Mol Life Sci*, v.70, p.2623-2636, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00018-012-1165-4>.
- Kotrba R, Knizková I, Kunc P, Bartos L.** Comparison between the coat temperature of the eland and dairy cattle by infrared thermography. *J Therm Biol*, v.32, p.355-359, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2007.05.006>.
- Labour L, Villiers G, Small AH, Hinch GN, Schmoelzl S.** Infrared thermal imaging as a method to evaluate heat loss in newborn lambs. *Res Vet Sci*, v.115, p.517-522, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2017.09.023>.
- Laurenti N, Bueno AO, Pezzopane JRM, Garcia AR, Bernardi ACC.** Termografia de superfície por sensoriamento remoto em sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta. In: Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária 2019, 2019, São Carlos-SP. Anais do Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária 2019. São Carlos-SP: Embrapa Instrumentação, 2019. v.1. p. 78-82.
- Lees AM, Sullivan ML, Olm JCW, Cawdell-Smith AJ, Gaughan JB.** A panting score index for sheep. *Int J Biometeorol*, v.63, p.973-978, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01711-3>.
- Lincoln GA, Lincoln CE, McNeilly, AS.** Seasonal cycles in the blood plasma concentration of FSH, inhibin and testosterone, and testicular size in rams of wild, feral and domesticated breeds of sheep. *J Reprod Fertil*, v.88, p.623-633, 1990. <https://doi.org/10.1530/jrf.0.0880623>.
- Liu HW, Cao Y, Zhou DW.** Effects of shade on welfare and meat quality of grazing sheep under high ambient temperature. *J Anim Sci*, v.90, p.4764-4770, 2012. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5361>.
- Luz CS M, Fonseca WJL, Barros Junior CP, Sousa GGT, Amorim RB, Silva LA, Lima LA, Sousa Júnior SC, Santos KR.** Estimativas de características termorreguladoras de ovinos em período seco e chuvoso criados na região do vale do Gurguéia, sul do estado do Piauí. *Acta Vet Bras*, v.8, n.1, p.19-24, 2014. <https://doi.org/10.21708/avb.2014.8.1.3233>.
- Malama E, Bollwein H, Taitzoglou IA, Theodosiou T, Boscós CM, Kiossis E.** Chromatin integrity of ram spermatozoa relationships to annual fluctuations of scrotal surface temperature and temperature-humidity index. *Theriogenology*, v.80, n.5, p.533-41, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2013.05.019>.
- Maloney SK, Mitchell D. Regulation of ram scrotal temperature during heat exposure, cold exposure, fever and exercise. *J Physiol*, v.496, p.421-430, 1996. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1996.sp021695>.
- Marai IFM, El-Darawany AA, Fadiel A, Abdel-Hafez MAM. Physiological traits as affected by heat stress in sheep - A review. *Small Rumin Res*, v.71, p.1-12, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2006.10.003>.
- Marai IFM, El-Darawany AA, Fadiel A, Abdel-Hafez MAM.** Reproductive performance as affected by heat stress and its alleviation in sheep. *Trop Subtrop Agroecosystems*, v.8, p.209-234, 2008.
- Mateo-Fornés J, Pagès-Bernaus A, Plà-Aragonés LM, Castells-Gasia JP, Babot-Gaspa D.** An Internet of Things Platform based on microservices and cloud paradigms for livestock. *Sensors*, n.4, v.21, p.5949, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21175949>.
- Menant O, Ungerfeld R, Pérez-Clariget R, Freitas-de-Melo A.** Is body surface temperature measured on the single lambs' back a reliable indicator of the ewe-lamb bond around birth? *J Therm Biol*, v.93, p.102699, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102699>.
- Moraes Júnior RJ, Garcia AR, Santos NFA, Nahúm BS, Lourenço Junior JB, Araújo CV, Costa NA.** Conforto ambiental de bezerros bubalinos (*Bubalus bubalis* Linnaeus, 1758) em sistemas silvipastoris na Amazônia Oriental. *Acta Amaz*, v.40, p.629-640, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672010000400001>.
- Moreira EP, Moura AD, Araujo AA.** Effects of scrotal insulation on testis size and semen criteria in Santa Ines hairy sheep raised in the state of Ceará, Northeast of Brazil. *Braz J Vet Res Anim Sci*, v. 30, p.1704-1711, 2001. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982001000700007>.
- Moura ABB, Brandão FZ, Esteves SN, Souza GN, Fonseca JFD, Pantoja MHA, Romanello N, Botta D, Giro A, Garcia AR.** Differences in the thermal sensitivity and seminal quality of distinct ovine genotypes raised in tropical conditions. *Theriogenology*, n.1, v.123, p.123-131, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2018.09.037>.
- Nie L, Berckmans D, Wang C, Li B.** Is continuous heart rate monitoring of livestock a dream or is it realistic? A review. *Sensors*, n.17, v.20, p.2291, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20082291>.
- Ortavant R, Bocquier F, Pelletier J, Ravault JP, Thimonier J, Volland-Nail P.** Seasonality of reproduction in sheep and its control by photoperiod. *Aust J Biol Sci*, v.41, p.69-85, 1988. <https://doi.org/10.1071/bi9880069>.



- Pantoja MHA, Esteves SN, Jacinto MAC, Pezzopane JRM, Paz CCP, Silva JARD, Lourenço Junior JB, Brandão FZ, Moura ABB, Romanello N, Botta D, Garcia AR.** Thermoregulation of male sheep of indigenous or exotic breeds in a tropical environment. *J Therm Biol*, v.69, p.302-310, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.09.002>.
- Pantoja MHA, Moura ABB, Romanello N, Esteves SN, Barioni Junior W, Garcia AR.** Termorregulação de ovinos naturalizados ou exóticos avaliada por termometria de infravermelho em duas estações do ano. In: Congresso de Zootecnia de Precisão, 1, 2016, Florianópolis. Anais... Florianópolis, SC: STCAS, 2016.
- Pasqui M, Di Giuseppe E.** Climate change, future warming, and adaptation in Europe. *Anim Front*, n.3, v.9, p.6-11, 2019. <https://doi.org/10.1093/af/vfy036>.
- Pereira AMF, Titto EAL, Almeida JAA.** Adaptação dos Ruminantes aos Climas Quentes. 1.ed. Curitiba: Appris, 2019. 187p.
- Randall D, Burggren W, French K.** Fisiologia Animal - Mecanismos e Adaptações, 4. ed. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 2000.
- Rao M, Xia W, Yang J, Hu LX, Hu SF, Lei H, Wu YQ, Zhu CH.** Transient scrotal hyperthermia affects human sperm DNA integrity, sperm apoptosis, and sperm protein expression. *Andrology*, v.4, n.6, p.1054-1063, 2016. <https://doi.org/10.1111/andr.12228>.
- Rasooli A, Taha Jalali M, Nouri M, Mohammadian B, Barati F.** Effects of chronic heat stress on testicular structures, serum testosterone and cortisol concentrations in developing lambs. *Anim Reprod Sci*, v.117, p.55-59, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2009.03.012>
- Renaudeau D, Collin A, Yahav S, Basilio V, Gourdine JL, Collier RJ.** Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in Livestock Production. *Animal*, v.6, n.5, p.707-728, 2012. <https://doi.org/10.1017/S1751731111002448>.
- Robinson NE.** Hemostasis. In: Cunningham JG (ed.). Textbook of veterinary physiology. St Louis: WB Saunders Company, 2002. p.516-544.
- Rocha DR, Martins JAM, Tilburg MF, Oliveira RV, Moreno FB, Monteiro-Moreira ACO, Moreira RA, Araújo AA, Moura AA.** Effect of increased testicular temperature on seminal plasma proteome of the ram. *Theriogenology*, v.84, p.1291-1305, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2015.07.008>.
- Romo-Barron CB, Diaz D, Portillo-Loera JJ, Romo-Rubio JA, Jimenez-Trejo F, Montero-Pardo A.** Impact of heat stress on the reproductive performance and physiology of ewes: a systematic review and meta-analyses. *Int J Biometeorol*, v.63, p.949-962, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01707-z>.
- Seixas L, de Melo CB, Tanure CB, Peripolli V, McManus C.** Heat tolerance in Brazilian hair sheep. *Asian-Australas J Anim Sci*, v.30, p.593-601, 2017. <https://doi.org/10.5713/ajas.16.0191>.
- Serrano M, Ramón M, Calvo JH, Jiménez MÁ, Freire F, Vázquez JM, Arranz JJ.** Genome-wide association studies for sperm traits in Assaf sheep breed. *Animal*, v.15 p.100065, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100065>.
- Setchell BP.** The Parkes Lecture. Heat and the testis. *J Reprod Fertil*, v.114, p.179-194, 1998. <https://doi.org/10.1530/jrf.0.1140179>.
- Shafik A.** Testicular suspension: effect on testicular function. *Andrologia*, v.23, p.297-301, 1991. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0272.1991.tb02565.x>.
- Sharma RK, Agarwal A.** Role of reactive oxygen species in male infertility. *Urology*, v.48, p.835-850, 1996. [https://doi.org/10.1016/s0090-4295\(96\)00313-5](https://doi.org/10.1016/s0090-4295(96)00313-5).
- Shi L, Xu Y, Mao C, Wang Z, Guo S, Jin X, Yan S, Shi B.** Effects of heat stress on antioxidant status and immune function and expression of related genes in lambs. *Int J Biometeorol*, v.64, p.2093-2104, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02000-0>.
- Silanikove N.** Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. *Livest Prod Sci*, v.67, p.1-18, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(00\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(00)00162-7).
- Silva RG, Starling JMC.** Evaporação cutânea e respiratória em ovinos sob altas temperaturas ambientes. *Rev Bras Zootec*, v.32, n.6, p.1956-1961, 2003. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982003000800020>.
- Silva LKX, Sousa JS, Silva AOA, Lourenço Junior JB, Faturi C, Martorano LG, Franco IM, Pantoja MHA, Barros DV, Garcia AR.** Testicular thermoregulation, scrotal surface temperature patterns, and semen quality of water buffalo bulls reared in a tropical climate. *Andrologia*, v.50, p. 12836, 2017. <https://doi.org/10.1111/and.12836>.
- Souza ED, Souza BB, Souza WH, Cezar MF, Santos JRS, Tavares GP.** Determinação dos parâmetros fisiológicos e gradiente térmico de diferentes grupos genéticos de caprinos no Semi-árido. *Cien Agrotec*, v.29, n.1, p.177-184, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542005000100022>.
- Thom EC.** The discomfort index. *Weatherwise*, v.12, p.57-60, 1959.



<https://doi.org/10.1080/00431672.1959.9926960>.

Thundathil JC, Rajamanickam GD, Kastelic JP, Newton LD. The effects of increased testicular temperature on testis-specific isoform of Na⁺/K⁺ -ATPase in sperm and its role in spermatogenesis and sperm function. *Reprod Domest Anim*, v.47, p.170-177, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2012.02072.x>.

Titto CG, Verissimo CJ, Pereira AMF, Mira Geraldo A, Katiki LM, Titto EAL. Thermoregulatory response in hair sheep and shorn wool sheep. *Small Rumin Res*, v.144, p.341-345, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2016.10.015>.

Umunna MO, Olafadehan OA, Arowona A. A small ruminant production and management systems urban area of southern Guine savanna of Nigeria. *Asian J Agric Sci*, v.2, p.2321-1571, 2014. <https://doi.org/10.24203/AJAFS.V2I2.1041>.

Waites GMH. The effect of heating the scrotum of the ram on respiration and body temperature. *Q J Exp Physiol*, v.47, p.314-323, 1962.

Waites GMH, Moule GR. Relation of vascular heat exchange to temperature regulation in the testis of the ram. *J Reprod Fertil*, v.2, p.213-224, 1961. <https://doi.org/10.1530/jrf.0.0020213>.

Waites GMH, Voglmayr JK. Apocrine sweat glands of the scrotum of the ram. *Nature*, v. 196, p. 965-967, 1962. <https://doi.org/10.1038/196965a0>.

Waites GMH. Temperature regulation and the testis. In: Johnson, AD, Gomes, WR, Vandermark, NL. (ed.). The testis. Nova Iorque, EUA: Nova Iorque Academic Press. 1970, p. 241-279.

Yousef MK. Thermoneutral zone. In: Stress Physiology in Livestock, vol. 1, Basic principles, Yousef MK. ed. CRC Press, Boca Raton, Fla, 1985.

Zamiri MJ, Khodaei HR. Seasonal thyroidal activity and reproductive characteristics of Iranian fat-tailed rams. *Anim Reprod Sci*, v.88, p.245-255, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2004.12.005>.

Zhang C, Xiao D, Yang Q, Wen Z, Lv L. Application of infrared thermography in livestock monitoring. *Trans ASABE*, v.63, n.2, p.389-399, 2020. <https://doi.org/10.13031/trans.13068>.
