

Energy metabolism in goats and sheep and its relationship with productive performance

Metabolismo energético em caprinos e ovinos e sua relação com o desempenho produtivo

SILVA, Bruna Moura⁽¹⁾; DA SILVA, Talita Raquel Rodrigues⁽²⁾; MOTA, Istefani Moreira⁽³⁾; BRITO, Janaina Araujo Moreira⁽⁴⁾; BORBA PEREIRA, Pedro Henrique⁽⁵⁾; ARAÚJO, Cleyton de Almeida⁽⁶⁾.

⁽¹⁾  0000-0003-2832-6689; Universidade Federal do Vale do São Francisco. Petrolina, PE, Brasil. brunamouras@hotmail.com.

⁽²⁾  0009-0004-7115-9358; Universidade Federal do Vale do São Francisco. Petrolina, PE, Brasil. talitazootec@gmail.com.

⁽³⁾  0009-0002-9603-3899; Universidade Federal do Vale do São Francisco. Petrolina, PE, Brasil. istefanimoreira23@gmail.com.

⁽⁴⁾  0009-0006-3980-4841; Universidade Federal do Vale do São Francisco. Petrolina, PE, Brasil. naniamb18@gmail.com.

⁽⁵⁾  0000-0002-3999-4036; Universidade Federal do Espírito Santo. Alegre, ES, Brasil. pedro.b.pereira@ufes.br.

⁽⁶⁾  ORCID: 0000-0003-3636-2890; Universidade Federal do Vale do São Francisco. Petrolina, PE, Brasil. cleyton.araujo@univasf.edu.br.

ABSTRACT

The energy metabolism in goats and sheep comprises a set of physiological and biochemical processes responsible for converting dietary nutrients into usable energy for maintaining vital functions and productive activities of the organism. Thus, this study aims to discuss the main processes related to energy metabolism in goats and sheep and their implications for the productive performance of these animals. In small ruminants, metabolic energy derives predominantly from ruminal fermentation of structural carbohydrates, resulting in the production of short-chain fatty acids (SCFAs), such as acetate, propionate, and butyrate. Propionate stands out as the main gluconeogenic precursor, supplying the glucose required, especially during critical physiological stages such as lactation and gestation. The efficiency of energy metabolism is directly related to diet composition, ruminal microbiota, and environmental conditions, impacting both zootechnical performance and the sustainability of production systems. The energy from feed is fractionated into gross, digestible, metabolizable, and net energy, the latter being responsible for maintenance and production. Energy deficiencies or excesses may compromise animal health, fertility, and weight gain. Therefore, understanding the fundamentals of energy metabolism is crucial for developing more efficient feeding programs adapted to physiological and environmental conditions, particularly in semiarid regions.

RESUMO

O metabolismo energético em caprinos e ovinos constitui um conjunto de processos fisiológicos e bioquímicos responsáveis pela conversão dos nutrientes dietéticos em energia utilizável para a manutenção das funções vitais e atividades produtivas do organismo. Com isso, o objetivo do presente trabalho é discutir os principais processos relacionados ao metabolismo energético em caprinos e ovinos e suas implicações no desempenho produtivo desses animais. Em pequenos ruminantes, a energia metabólica deriva predominantemente da fermentação ruminal de carboidratos estruturais, resultando na produção de ácidos graxos de cadeia curta (AGCCs), como acetato, propionato e butirato. O propionato destaca-se como principal precursor gliconeogênico, suprindo a glicose necessária especialmente em fases fisiológicas críticas, como lactação e gestação. A eficiência do metabolismo energético está diretamente relacionada à composição da dieta, à microbiota ruminal e às condições ambientais, impactando o desempenho zootécnico e a sustentabilidade dos sistemas produtivos. A energia dos alimentos é fracionada em energia bruta, digestível, metabolizável e líquida, sendo esta última responsável pela manutenção e produção. Deficiências ou excessos energéticos podem comprometer a saúde, a fertilidade e o ganho de peso dos animais. Portanto, a compreensão dos fundamentos do metabolismo energético é crucial para o desenvolvimento de programas alimentares mais eficientes e adaptados às condições fisiológicas e ambientais, especialmente em regiões semiáridas.

INFORMAÇÕES DO ARTIGO

Histórico do Artigo:

Submetido: 22/09/2025

Aprovado: 17/03/2026

Publicação: 30/06/2026



Keywords:

Nutritional requirements, metabolizable energy, ruminal fermentation, small ruminants.

Palavras-Chave:

Exigências nutricionais, energia metabolizável, fermentação ruminal, pequenos ruminantes.

Introdução

A produção de caprinos e ovinos tem se destacado na agropecuária devido à rusticidade e adaptabilidade dos animais, assim como a sua eficiência alimentar. O rebanho efetivo de caprinos e ovinos no Brasil está estimado em 12,8 milhões e 21,7 milhões, respectivamente, concentrando-se principalmente na região Nordeste, no qual o estado da Bahia se destaca como principal produtor nacional (IBGE, 2023). Tradicionalmente, a produção de caprinos e ovinos foram direcionadas apenas para a produção de carne, leite e pele nas áreas menos desenvolvidas no país, entretanto, essa atividade tem-se tornado uma alternativa viável na região Semiárida, devido à capacidade adaptativa dessas espécies em condições ambientais adversas (Santos *et al.*, 2023). A produção de caprinos e ovinos apresenta como uma grande fonte econômica, seja para a produção de alimentos (produtos cárneos, leite e derivados) como para produtos de alto valor comercial (couro, lã e insumos) para o setor industrial (Estrada, 2013).

Um dos fatores determinantes para o desempenho produtivo de pequenos ruminantes é o metabolismo energético, que compreende a captação, transformação e utilização da energia proveniente dos alimentos (Berchielli, Pires e Oliveira, 2011). A eficiência com que caprinos e ovinos convertem a energia ingerida em produção de carne ou leite impacta diretamente a viabilidade econômica do sistema de criação (Estrada, 2013). Para que as necessidades nutricionais dos caprinos e ovinos sejam atendidas, a energia e a proteína ofertada devem suprir essa exigência, sendo a primeira necessária para a manutenção e produção desses animais (Moraes, Costa e Araújo, 2011). Considerado o maior fator de impacto na produção animal (representando cerca de 85% dos custos), a alimentação ofertada deve estar intimamente relacionada com o sucesso e a obtenção de índices zootécnicos relevantes (Moraes, Costa e Araújo, 2011).

A energia desempenha papel vital na manutenção da vida e foi descrita por Kleiber (1961) como a “chama da vida”, obtida pelos animais através da digestão e do metabolismo dos nutrientes. Compreender as exigências energéticas requer conhecer como essa energia é processada e utilizada pelo organismo. Segundo o NRC – National Research Council (1981), as exigências de energia para manutenção compreendem o metabolismo basal (ou produção de calor em jejum), o incremento calórico decorrente da ingestão alimentar, e os processos necessários à manutenção da temperatura corporal, à atividade física espontânea e às funções metabólicas vitais como respiração, circulação sanguínea e atividade celular (Silva *et al.*, 2024). A energia metabolizável (EM) é aquela utilizada para a produção, ou seja, que não é utilizada para a manutenção, mas sim retida como tecidos ou produtos, esta é, portanto, a energia que o animal utiliza para o ganho de peso corporal ou para a produção de leite, por exemplo (NRC, 1981).

Compreender os fundamentos e as particularidades do metabolismo energético em caprinos e ovinos é essencial para o desenvolvimento de estratégias nutricionais (como por exemplo, o uso de pastagens nativas ou suplementação energética) que aumentem a eficiência produtiva, reduzam perdas metabólicas e promovam maior sustentabilidade nos sistemas de produção. Assim, esta revisão tem como objetivo discutir os principais processos relacionados ao metabolismo energético em caprinos e ovinos e suas implicações no desempenho produtivo.

Importância zootécnica de caprinos e ovinos

O agronegócio no Brasil tem uma participação considerável na contribuição do produto interno bruto (PIB), com participação na economia brasileira de 23,2% no último trimestre de 2024 de acordo com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA (2025). A atividade agropecuária apresentou um crescimento de 12,2% no primeiro semestre de 2025, quando comparado ao último trimestre de 2024, contribuindo com um avanço de 6,7% para 7,4% (CNA, 2025). Desde 1960, a produção de caprinos e ovinos tem passado por transformações significativas “alavancado por um ambiente institucional mais favorável, bem como pela ampliação dos mercados de exportação” segundo Monteiro, Brisola e Vieira Filho (2021), resultando em bons índices desempenhos zootécnicos.

Atualmente, no Brasil a concentração de cabeças de caprinos e ovinos estão estimadas em 12,8 milhões e 21,7 milhões, respectivamente (IBGE, 2023). No ano de 2019, a caprinocultura apresentou um rebanho de 11,3 milhões de cabeças e a ovinocultura 19,7 milhões de cabeças, ambas as culturas se apresentaram em maior quantidade na região Nordeste, devido a sua alta adaptabilidade as condições ambientais do Semiárido (Magalhães *et al.*, 2020).

A criação de caprinos e ovinos em regiões tropicais e semiáridas (Nordeste) se apresenta como uma estratégia na pecuária, pois estes quando submetidos a ambientes com escassez de água, pastagens de baixa qualidade e altas temperaturas se destacam devido a sua capacidade de adaptação em áreas menos favorecidas, baixo custo de manejo e eficiência na conversão alimentar (Santos *et al.*, 2023). Quando se trata do mercado de produtos e derivados, a produção de caprinos e ovinos apresenta oportunidades crescentes de agregação de valor aos seus produtos, como carne, leite, couro e pele, tanto no mercado interno quanto o externo, favorecendo o desenvolvimento da atividade (Neres *et al.*, 2024).

Apesar de sua rusticidade, a produtividade desses animais está intimamente ligada ao fornecimento adequado de nutrientes, especialmente energia, o que reforça a importância de compreender seu metabolismo energético para alcançar melhores índices zootécnicos e econômicos. O fornecimento adequado da alimentação é de suma importância para obter um bom desempenho produtivo e reprodutivo. Para isso, não apenas o valor nutritivo do alimento, mas também a fisiologia do animal devem ser considerados ao falar sobre o aproveitamento dos nutrientes (Gomes, Leite e Ribeiro, 2007).

Características fisiológicas dos pequenos ruminantes domésticos

Os caprinos e ovinos são considerados ruminantes de acordo com a filogenia evolutiva do gênero *artiodáctilos* (Melo e Silva, 2017), pois o trato gastrointestinal (TGI) desses animais é formado pela boca, faringe, esôfago, estômago e glândulas, e.g., rúmen, retículo e omaso, estômago glandular, e.g., abomaso, intestino delgado, e.g., fração do duodeno, jejuno e íleo, intestino grosso, e.g., fração do ceco, cólon e reto, assim como as glândulas anexas presentes na cavidade oral para produção de saliva, i.e., glândulas salivares, e no conjunto pâncreas/fígado, possuindo como principal função a digestão dos alimentos, absorção dos nutrientes e excreção de componentes indigestíveis (Silva e Leão, 1979).

O rúmen e o retículo atuam como locais de armazenamento e fermentação, em que bactérias decompõem a celulose e a hemicelulose. O omaso absorve boa parte da água e dos minerais presente na dieta, enquanto o abomaso é o verdadeiro estômago glandular, produzindo ácido clorídrico e pepsina para que ocorra a digestão enzimática. O ceco é considerado como uma câmara fermentativa para a digestão de carboidratos estruturais que não foram digeridos no rúmen pelo fluxo da digesta por ação de microrganismos anaeróbicos. O intestino delgado é responsável pela absorção de nutrientes, e o intestino grosso pela absorção de água junto com eletrólitos, resultando na formação das fezes. Com o processo evolutivo, os ruminantes desenvolveram algumas modificações no seu trato digestório, sendo elas físicas, químicas e bioquímicas (Berchielli, Pires e Oliveira, 2011).

Conforme Van Soest (1994), as especializações anatômicas e fisiológicas do TGI dos ruminantes, especialmente a fermentação microbiana no rúmen, promoveram uma maior eficiência na digestão do conteúdo fibroso da dieta. Essas adaptações reduziram significativamente a necessidade de fontes exógenas de vitaminas hidrossolúveis, como as do complexo B e C, bem como de aminoácidos essenciais, uma vez que esses compostos passam a ser sintetizados em quantidade suficiente pela microbiota ruminal. Alterações no ambiente ruminal podem afetar negativamente a utilização de nutrientes e propiciar alterações morfológicas na mucosa ruminal (Costa *et al.*, 2009).

A microbiota ruminal converte o conteúdo dietético passível de fermentação em ácidos graxos de cadeias curtas (AGCCs), principalmente o ácido acético, propiônico e butírico. Esses compostos são a principal fonte de energia para os pequenos ruminantes domésticos. O ácido propiônico, e sua forma iônica denominada de propionato, por exemplo, é fundamental para a gliconeogênese hepática, uma vez que esses animais ingerem poucos monossacarídeos, como a glicose, de forma direta na dieta (Cannas, Tedeschi e Fox, 2004). Assim, a eficiência digestiva e metabólica desses animais depende diretamente do fornecimento equilibrado de nutrientes. Dietas com excesso de fibra indigestível, ou com déficits energéticos e proteicos, comprometem a atividade do microbioma ruminal, reduzindo a produção de AGCCs e a síntese de proteína

microbiana. Essa limitação interfere na absorção de nutrientes essenciais, afetando o metabolismo energético e, por consequência, o desempenho produtivo (BR-Caprinos & Ovinos, 2024).

Fundamentos do metabolismo energético

O metabolismo energético compreende os processos fisiológicos e bioquímicos pelos quais os nutrientes provenientes da dieta são convertidos em energia disponível para as funções celulares do organismo. Essa energia é essencial para manter a homeostase corporal, sustentar funções vitais como crescimento, reprodução, lactação e resposta imune, além de influenciar diretamente o desempenho produtivo dos animais (Kozloski, 2017; NRC, 2007).

Nos caprinos e ovinos, a energia da dieta é majoritariamente derivada da fermentação microbiana de carboidratos complexos, e.g., amido, pectina, beta-clucana, celulose e hemicelulose, no rúmen, um processo conduzido por bactérias, protozoários e fungos, gerando como produto final da fermentação os AGCCs, que representam a principal fonte de energia metabolizável (Van Soest, 1994). As concentrações desses AGCCs estão intimamente relacionadas a utilização de energia pelos ruminantes, uma vez que a produção de metano por *mmol* de hexose fermentada, varia conforme o tipo de AGCCs produzidos.

Morgavi *et al.* (2023) revisa a hipótese de que a redução de emissões entéricas de metano em ruminantes aumentaria a eficiência energética dos animais, assumindo que a energia que seria “escapada” pela produção de metano poderia ser redirecionada para a produção de leite, carne e outros. Embora o metano seja considerado um desperdício energético no cálculo do balanço de energia, este trabalho mostra que o simples bloqueio da metanogênese com a redução de emissões em cerca de 25%, com aditivos inibidores, não resulta em ganhos claros e consistentes na produção animal (Morgavi *et al.*, 2023).

O propionato é de particular importância, pois é o principal precursor da glicose pela via da gliconeogênese. Em contrapartida, o acetato, substrato para lipogênese, importante para animais lactantes, e butirato, fonte direta de energia para os enterócitos, estimula o crescimento das papilas ruminais para animais jovens, são utilizados como fonte de energia localizada, aplicada no TGI para transporte através das membranas, (Berchielli, Pires e Oliveira, 2011; NRC, 2007). Vale lembrar que a forma desses ácidos orgânicos são absorvidos em sua forma iônica sendo relativo ao descrito anteriormente.

Nos pequenos ruminantes, o aporte energético disponível no intestino delgado é, em grande parte, decorrente da digestão de amido, proteínas e ácidos graxos de cadeia longa. Embora a glicose não seja absorvida em grandes quantidades nos ruminantes adultos devido à fermentação pré-gástrica, a digestão enzimática de amido no intestino delgado mantém relevância fisiológica, especialmente em fases produtivas específicas, como por exemplo nas fases de crescimento e de alta produção, quando o amido é uma fonte crucial de energia. Em contraste, para animais não ruminantes, esse processo representa uma via primária de

suprimento de glicose, sendo fundamental para atender às exigências energéticas desses organismos (Resende, Texeira e Fernandes, 2011).

Em animais mantidos sob condições alimentares normais, o propionato é reconhecido como o principal precursor da gliconeogênese hepática, representando a principal via de síntese de glicose nos ruminantes. Além dele, aminoácidos glicogênicos e lactato também desempenham papéis relevantes como substratos para a formação de glicose endógena.

Metabolismo da glicose em caprinos e ovinos

Nos ruminantes, o metabolismo da glicose apresenta características distintas em comparação aos animais monogástricos, em razão da fermentação microbiana que ocorre no pré-estômago. Durante esse processo, a maior parte dos carboidratos ingeridos é fermentada no rúmen, o que impede que a glicose dietética atinja diretamente o intestino delgado em quantidades significativas (Van Soest, 1994; Kozloski, 2017). Como consequência, a glicose circulante nos ruminantes provém, predominantemente, da gliconeogênese, um mecanismo fundamental para a manutenção da homeostase glicêmica.

O propionato, um dos produtos da fermentação ruminal mais relevantes, é o principal precursor de glicogênio hepático em mamíferos. Após sua absorção através da parede ruminal, é transportado ao fígado, o que é convertido em glicose por meio da via gliconeogênica (NRC, 2007). Além do propionato, aminoácidos glicogênicos (como alanina e glutamina) e o lactato também participam como substratos importantes nesse processo, especialmente em situações de maior demanda energética, como no final da gestação e no pico de lactação (BR-Caprinos & Ovinos, 2024).

Em condições fisiológicas normais, a gliconeogênese em ruminantes é contínua e altamente regulada, visto que a glicose é imprescindível para tecidos glicodependentes, como o sistema nervoso central, os glóbulos vermelhos, particularmente, sistema reprodutivo e o tecido mamário em animais em lactação. Em fêmeas caprinas e ovinas em alta produção leiteira, estima-se que mais de 60% da glicose sintetizada seja destinada à galactopoiese (Kozloski, 2017). Esse fato reforça a necessidade de um aporte nutricional adequado que favoreça a produção de propionato no rúmen, principalmente por meio de dietas com teor adequado de carboidratos fermentáveis.

Existem princípios gerais que regem a forma como os animais obtêm energia a partir dos diferentes substratos metabólicos, bem como as vias pelas quais essa energia é transferida ao longo das diversas etapas do metabolismo. Além disso, são bem estabelecidos os mecanismos bioquímicos utilizados pelo organismo para a síntese de novas moléculas, a partir da energia disponível e dos precursores metabólicos (Lehninger, Nelson e Cox, 2017).

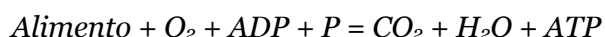
Principais vias metabólicas

O metabolismo energético compreende uma complexa rede de vias bioquímicas que coordenam a produção, o armazenamento e a utilização da energia nos organismos vivos. Essas vias atuam de maneira integrada, assegurando o fornecimento constante de energia para processos celulares essenciais, como síntese proteica, contração muscular, transporte ativo de íons e manutenção da temperatura corporal (Lehninger, Nelson e Cox, 2017).

Entre as principais rotas envolvidas nesse processo, destaca-se inicialmente a glicólise, via responsável pela degradação da glicose em ácido pirúvico (ou lactato, em condições anaeróbias), com geração de pequenas quantidades de ATP.

Adenosina trifosfato – ATP

A adenosina trifosfato (ATP) é a principal moeda energética dos sistemas biológicos, essencial para a realização de processos celulares como síntese de macromoléculas, transporte ativo de íons e contração muscular (Lehninger, Nelson e Cox, 2017). Nos ruminantes, a produção de ATP está intimamente relacionada à eficiência da fermentação ruminal e ao aproveitamento dos ácidos graxos de cadeia curta (AGCCs) gerados nesse processo. Atualmente, está bem estabelecido que nos processos completos de oxidação de um alimento no organismo, parte da energia química do alimento é utilizada para formar a ligação pirofosfato terminal do ATP a partir do difosfato de adenosina (ADP) (Resende, Texeira e Fernandes, 2011). Em sua forma, mais simples a oxidação de um alimento pode ser expressa assim:



A absorção de uma molécula de glicose no intestino delgado resulta na produção de aproximadamente 36 moléculas de ATP, enquanto no rúmen, a fermentação de carboidratos gera AGVs como acetato, propionato e butirato, que também são metabolizados para fornecer energia (Di Marco et al., 2007). Por exemplo, a oxidação de 1 mol de propionato pode gerar até 34 ATP, enquanto o butirato pode fornecer até 25 ATP, dependendo das condições ruminais e da eficiência da absorção e metabolismo desses compostos (Di Marco et al., 2007).

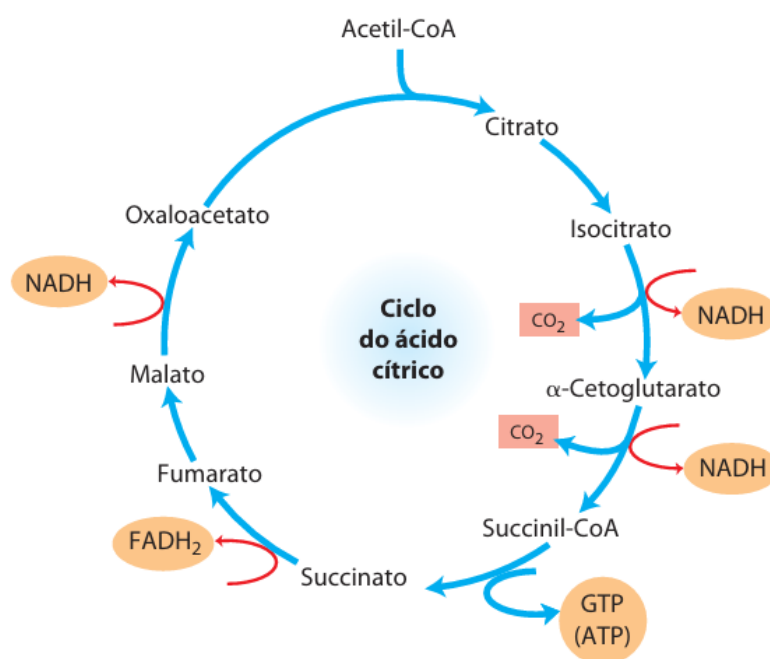
Além disso, a produção de ATP nos ruminantes está sujeita a variações conforme a dieta e a composição da flora microbiana ruminal. Dietas ricas em carboidratos fermentáveis tendem a aumentar a produção de propionato, favorecendo a gliconeogênese hepática, enquanto dietas com maior teor de fibras podem resultar em maior produção de acetato e butirato, que são utilizados diretamente em processos energéticos periféricos (Henriques, 2024).

Ciclo de Krebs

O ciclo de Krebs (CK), e.g. também denominado ciclo do ácido cítrico ou ciclo dos ácidos tricarboxílicos (**Figura 1**), é uma via metabólica central no catabolismo aeróbico das células eucarióticas de mamíferos, responsável por oxidar completamente o acetil-CoA, gerando energia química na forma de NADH, FADH₂ e GTP, que serão utilizados na fosforilação oxidativa para a produção de ATP (Lehninger, Nelson e Cox, 2017).

Figura 1.

Produtos de uma rodada do ciclo do ácido nítrico.



Nota: Leningher et al., 1995

Nos ruminantes, os principais precursores que entram no CK são derivados dos AGCCs, produzidos pela fermentação ruminal de carboidratos estruturais ou não estruturais. Entre esses, o acetato e o butirato são convertidos em acetil-CoA devido a sua quantidade de carbonos em sua estrutura, os quais são metabolizados no CK pelos tecidos periféricos, e.g., fígado, músculo esquelético e tecido adiposo (Kozloski, 2017; BR-Caprilos & Ovinos, 2024).

A função do CK vai além da simples produção de energia. Este mecanismo atua como um ponto de convergência entre o metabolismo de carboidratos, lipídios e proteínas, pois os intermediários do ciclo também servem como precursores para síntese de aminoácidos não essenciais, gliconeogênese e outros processos anabólicos. Em ruminantes em lactação, por exemplo, a geração de energia via CK é essencial para sustentar a alta demanda metabólica do tecido mamário.

Com o direcionamento do acetil-CoA ao ciclo, o fator da disponibilidade de oxaloacetato é determinante para a eficiência dos mecanismos de oxidação do acetil-CoA, que

pode se tornar limitante em situações de restrição energética ou estado fisiológico, como no período transição da gestação e lactação e até mesmo no crescimento fetal e crescimento pós-natal. No caso do período de transição em fêmeas que possuem uma restrição energética no final da gestação, ou em casos de gestação dupla/tripla, i.e., comum em cabras e ovelhas, a mobilização de ácidos graxos leva ao aumento das concentrações de acetil-CoA, mas a escassez de oxaloacetato redireciona esse composto para a formação de corpos cetônicos, contribuindo para quadros de cetose clínica ou subclínica, proporcionando a toxemia da prenhez (Kozloski, 2017; NRC, 2007).

Portanto, os mecanismos contidos no CK não são apenas necessários para a produção de ATP, mas também um elo central na integração metabólica dos nutrientes. Sua atividade eficiente reflete diretamente na performance produtiva e reprodutiva de caprinos e ovinos, sendo modulada por fatores como composição da dieta, estágio fisiológico e estado nutricional do animal.

Digestão e fermentação ruminal

Nos ruminantes, como caprinos e ovinos, a digestão inicia-se com o consumo de alimentos que são primeiramente armazenados no rúmen, o maior compartimento do estômago aglandular. Este órgão abriga uma complexa comunidade microbiana responsável pela fermentação anaeróbia dos carboidratos estruturais e não estruturais, transformando-os em produtos de alto valor energético, como os AGCCs, gases e microrganismos (Van Soest, 1994; Bergman, 1990).

Como descrito anteriormente, fermentação ruminal ocorre pela ação enzimática de microrganismos anaeróbicos em associação simbiótica, que promovem a degradação de polissacarídeos complexos e de compostos solúveis como açúcares e amidos (Flint *et al.*, 2008). A ação enzimática microbiana transforma esses substratos em piruvato, o principal intermediário metabólico da fermentação ruminal. A partir dele, diversas vias levam à formação de AGCCs (Zhang *et al.*, 2023).

Formação do acetato

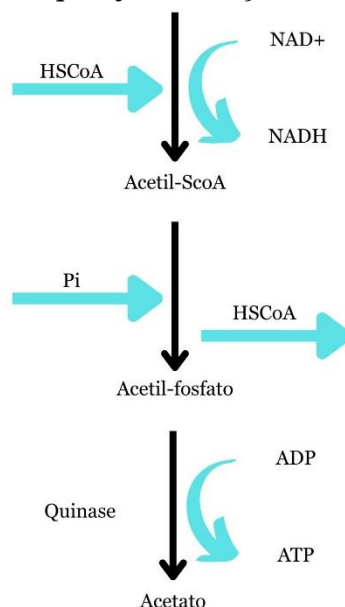
O acetato é o AGCC produzido em maior quantidade no rúmen, especialmente em dietas com alto teor de fibra (forragens). Ele é gerado predominantemente por ação enzimática de bactérias celulolíticas, como *Fibrobacter succinogenes*, *Ruminococcus albus* e *Ruminococcus flavefaciens*, que degradam a celulose em ácido acético, sendo o acetato o principal produto absorvido da fermentação da celulose (Van Soest, 1994).

A conversão do piruvato a acetato pode ser realizada por mecanismos distintos nas bactérias ruminais, sendo elucidados os seus principais mecanismos na **figura 2**. O acetato é predominantemente formado a partir de uma via metabólica em que o piruvato é convertido, por ação enzimática, em acetil-CoA por meio de sua ligação com a coenzima A (CoA). Nesse

processo, ocorre a liberação simultânea de formato como subproduto. Essa conversão representa uma etapa chave na fermentação ruminal, especialmente em dietas ricas em fibra, sendo catalisada por enzimas como a piruvato:formato liase, presentes em microrganismos anaeróbios especializados (Resende, Texeira e Fernandes, 2011).

Figura 2.

Formação de acetato pela fermentação bacteriana ruminal.



Nota: Adaptado de Palmquist; Mattos, 2006

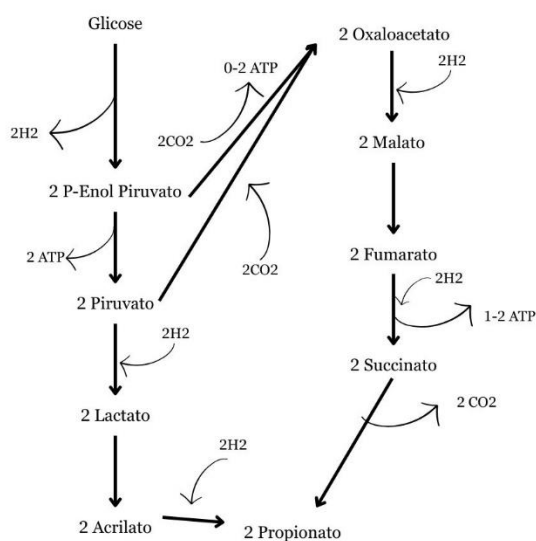
Formação do propionato

O ácido propiônico é produzido principalmente pela ação enzimática de bactérias ruminais, como *Selenomonas ruminantium*, *Succinivibrio dextrinosolvens* e *Prevotella ruminicola*, através de vias metabólicas como a via do succinato, que converte o succinato em propionato. A produção de propionato é favorecida em dietas com maior proporção de concentrados, como grãos de milho, que são fermentados principalmente em propionato (Van Soest, 1994).

A produção do propionato é a principal via de eliminação de H^+ e elétrons no rúmen, sendo feita por dois mecanismos principais (**figura 3**). O primeiro está relacionado a formação do oxalo-acetato e succinato, que reage com a coenzima-A, formando o succinil-CoA no qual é descarbolilado para a formação do propionato. O segundo envolve a formação do acrilato, no qual o piruvato é transformado em lactato, que é convertido em acrilato e posteriormente reduzido a propionato (Resende, Texeira e Fernandes, 2011).

Figura 3.

Rota estequiométrica da produção de propionato no rúmen.



Nota: Adaptado de Ungerfeld; Kohn, 2008

Formação do butirato

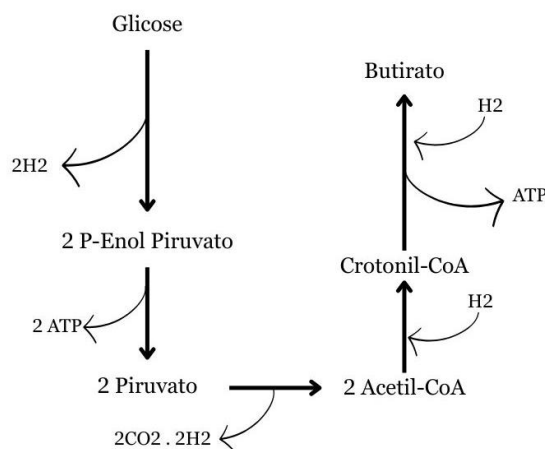
O ácido butírico é produzido por bactérias do rúmen, como *Butyrivibrio fibrisolvens*, *Anaerovorax odorimutans* e *Eubacterium ruminantium*, através da fermentação de carboidratos e proteínas. A produção de butirato é favorecida em dietas com maior proporção de fibra, como forragens, que são fermentadas principalmente em butirato (Van Soest, 1994).

O butirato é formado principalmente a partir da condensação de duas moléculas de acetil-CoA (**figura 4**), resultando em acetoacetil-CoA, que passa por reações de redução e hidratação até formar butiril-CoA, sendo finalmente convertido em butirato por ação da enzima butirato quinase ou da butiril-CoA:acetato CoA-transferase (Bergman, 1990; Zhang *et al.*, 2023).

O butirato é rapidamente absorvido pelas células epiteliais do rúmen, sendo sua principal fonte de energia. Além disso, ele: estimula o desenvolvimento ruminal, modula a expressão gênica, melhora a integridade intestinal, e reduz a colonização por patógenos (Baldwin *et al.*, 2004; Bento *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2023)

Figura 4.

Rota estequiométrica da produção do butirato no rúmen.



Nota: Adaptado de Ungerfeld; Kohn, 2008

Vias fermentativas e produção de energia

A fermentação no rúmen é predominantemente do tipo anaeróbia, e o destino do piruvato depende do perfil da dieta e da composição microbiana. Essa fermentação também gera gases como CO₂, CH₄ e H₂, que são eliminados pela eructação. A síntese microbiana também produz proteína microbiana, que constitui a principal fonte de aminoácidos para os ruminantes, sendo posteriormente digerida no intestino delgado (NRC, 2007).

A eficiência da fermentação ruminal é altamente dependente da composição da dieta, da frequência de alimentação, da disponibilidade de nitrogênio e das condições físico-químicas do rúmen (pH, osmolaridade, taxa de passagem). Por exemplo, dietas com excesso de amido podem favorecer a produção de ácido lático e levar a quadros de acidose ruminal subaguda, prejudicando a microbiota e o aproveitamento energético (Plaizier *et al.*, 2008).

Partição da energia

A energia pode ser definida como a capacidade de realizar trabalho e envolve a manutenção de todos os processos vitais. Essa energia para ruminantes pode ser obtida através dos alimentos, como por exemplo, os alimentos concentrados energéticos. Esses alimentos, são definidos como, aqueles que possuem elevado teor de energia utilizável por unidade de peso, sendo acima de 60% de nutrientes distensíveis totais (NDT) e com menos de 20% de proteína bruta (PB), como por exemplo, o milho, sorgo, melaço, gorduras, entre outros (Bonfim e Barros, 2024; EMEPA, 2018). Porém, vale salientar que a fisiologia e a fermentação ruminal podem variar entre as espécies, o que justifica a necessidade de modelos de predição para cada uma delas.

Com isso, no caso de caprinos e ovinos, ainda se observa uma lacuna na aplicação de modelos de predição do valor energético dos alimentos, impedindo uma formulação precisa de dietas para essas espécies, com isso, o aprimoramento desses modelos de predição é essencial para melhoria do desenvolvimento de dietas mais precisas e eficientes. Atualmente, pelo fato de não existir um modelo de estimativa de (NDT) voltado para caprinos e ovinos, utiliza-se a equação utilizadas para bovinos com algumas modificações. Com isso, o NDT é determinado pela soma das frações digestíveis da proteína bruta (PB), extrato etéreo (EE), fibra em detergente neutro (FDN) e carboidratos não-fibrosos (CNF).

Essa estimativa representa a energia potencialmente disponível após a digestão, mas não considera as perdas adicionais de energia que ocorrem durante o metabolismo, como a produção de metano, a excreção urinária e o calor metabólico (Bonfim e Barros, 2024). Por isso, o NDT expressa apenas a digestibilidade dos nutrientes do alimento, sendo uma estimativa mais ampla do que a energia metabolizável ou líquida. Porém como o próprio nome sugere, o NDT, se baseia somente na quantificação da digestibilidade apenas dos nutrientes do alimento, não levando em consideração as perdas de energia (Bonfim e Barros, 2024).

No entanto, para fins de formulação de dietas e avaliação precisa da eficiência energética, é necessário considerar o fracionamento progressivo da energia dos alimentos, desde a energia bruta até a energia líquida efetivamente utilizada pelos animais. Assim, a energia destinada à nutrição de ruminantes é convencionalmente dividida em energia bruta (EB), energia digestível (ED), energia metabolizável (EM) e energia líquida (EL) (Figura 4).

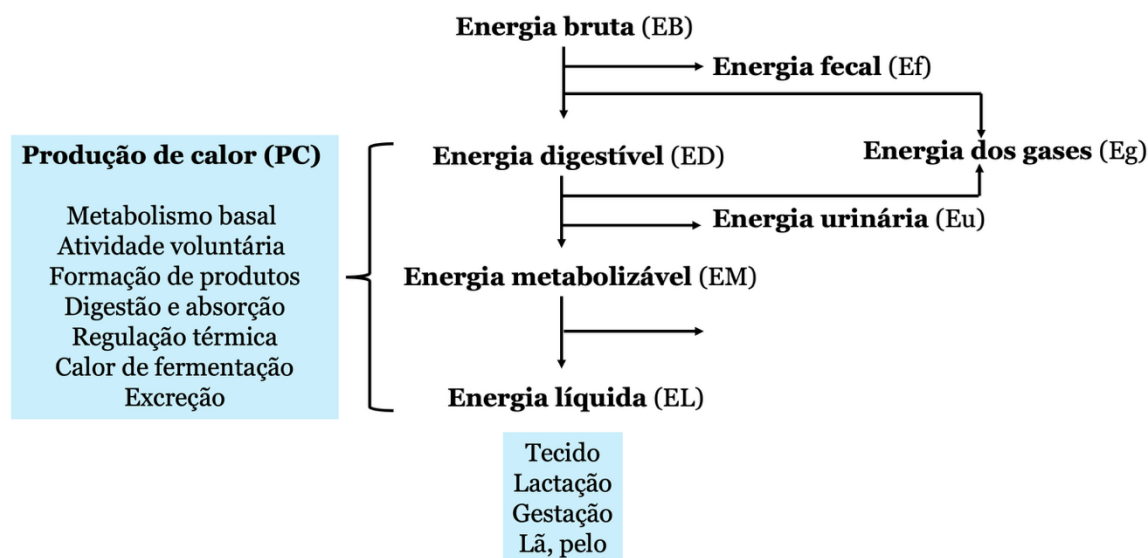
A energia bruta (EB) é definida como a energia presente no alimento ou na dieta. Ela é liberada na forma de calor à medida que uma substância orgânica é inteiramente oxidada a dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O) (Berchielli, Pires e Oliveira, 2011; Kleiber, 1972).

A energia digestível (ED) corresponde à fração da energia dos alimentos que é efetivamente digerida e absorvida pelo animal. A primeira perda energética ocorre pela eliminação de nutrientes não digeridos nas fezes. Portanto, a energia digestível, também chamada de energia aparentemente digestível, é calculada pela diferença entre a energia bruta ingerida e a energia perdida nas fezes (Berchielli, Pires e Oliveira, 2011; Bonfim e Barros, 2024).

A Energia metabolizável (EM) é determinada através das perdas de energia pela urina e dos gases produzidos no rúmen, ou seja, uma parte da energia aparentemente digestível que é absorvida pelo animal é perdida devido a produção de gases, essa perda significa cerca de 8% da energia do alimento. Outra parte da energia é excretada pela urina, que inclui os compostos que foram absorvidos, mas não utilizados. Com isso, a energia metabolizável se dá pela subtração das perdas de energia dos gases e urina e da energia aparentemente digestível (Berchielli, Pires e Oliveira, 2011; Bonfim e Barros, 2024).

Figura 4.

Esquema de utilização de energia pelos ruminantes.



Nota: Adaptado de Berchielli et al., 2011.

A energia líquida (EL) é determinada pela diferença das perdas da energia metabolizável com as perdas devido aos processos de digestão, fermentação e metabolismo, então ela é definida por a parte da energia do alimento que é aproveitada pelo animal, ou seja, a energia retida na forma de produto útil que é destinada para produção dos tecidos, produção de leite, gestação, feto, entre outros. A EL ainda pode se dividir para manutenção (EL_M) e para lactação (EL_L) e energia líquida para ganho de peso (EL_G), denominadas como energia líquida para produção (EL_P). A energia para manutenção, que é utilizada no metabolismo basal, apresenta um incremento calórico (IC) equivalente a 25% de energia metabolizável; aquela que se refere a energia de produção, comporta um IC de 10-60% de energia metabolizável. Para atender as necessidades do metabolismo em jejum, da atividade e da manutenção se utiliza EL_P . já para crescimento, engorda e produção de leite, de lã e gestação, utiliza-se EL_L e EL_G (Berchielli, Pires e Oliveira, 2011; Bonfim e Barros, 2024).

A partir das definições a cima, é possível então determinar a eficiência de utilização para entender a proporção de energia que é ofertada no alimento e o que é retida no animal, usando a requinte relação:

$$\frac{\text{Total de energia retida no ganho} \times 100}{\text{Total de energia no alimento}}$$

Relação do metabolismo energético e desempenho produtivo

Sabe-se que a energia é vital para a produção animal e a obtenção dessa energia se dá através da interação de nutrientes, como os carboidratos, lipídeos e proteínas quando metabolizados (Resende *et al.*, 2006). Essa energia é usada para manutenção, crescimento, engorda, reprodução, gestação e lactação, então quando o fornecimento dela é deficiente pode

gerar alguns problemas no desenvolvimento dos animais, como redução no crescimento, atraso no ganho de peso, assim como no início da puberdade, diminui a fertilidade, além de serem mais susceptíveis a doenças. Da mesma forma, quando existe o consumo energético em excesso também há prejuízos, como a alta deposição de gordura, podendo ocasionar desbalanço de outros nutrientes (Estrada, 1998; 2013). Dessa forma, é essencial que o animal consuma a quantidade necessária de energia para garantir o bom funcionamento dos processos fisiológicos vitais de acordo com a fase que está (Da Silva *et al.*, 2010).

Animais em manutenção, precisam de níveis mínimos de energia para que os processos fisiológicos funcionem sem que ganhe ou perca peso, ou seja, o fornecimento na quantidade adequada permite que se mantenha no peso adequado e satisfaça apenas as necessidades fisiológicas e metabólicas, como termorregulação, respiração, digestão, circulação sanguínea, manutenção de calor, entre outros, com isso, é importante que os animais recebam dietas calculadas de acordo com sua exigência e estado fisiológico (Estrada, 2013; Moraes *et al.*, 2016).

Já para animais que estão em ganho de peso, crescimento e engorda, os requerimentos energéticos estão relacionados com a deposição de proteína e gordura no corpo do animal. A partir do momento que o consumo de energia ultrapassa o que é gasto na manutenção se obtém então energia disponível para o ganho de peso (César e Souza, 2007). Sabe-se que a medida em que o animal vai crescendo e se desenvolvendo mudanças acontecem nos tecidos do corpo, ou seja, os tecidos corporais vão sofrendo alterações e essas intensas alterações dependem de alguns fatores, como por exemplo a nutrição (Yáñez *et al.*, 2006). A exigência energética também pode variar de acordo com raça, sexo, entre outros. De acordo com Marcondes *et al.* (2010), as fêmeas depositam gordura mais rapidamente quando comparado a machos, sendo necessário maior demanda energética para o ganho de peso. Além disso, Pereira, (2017), comprovou em seu trabalho que as fêmeas necessitam de maiores quantidades de energia para o ganho de peso em comparação machos inteiros e castrados.

Ao se tratar de questões reprodutivas, sabe-se que o desempenho reprodutivo é fundamental para o sucesso da produção e ao se tratar das exigências nutricionais energéticas, umas das primeiras funções a serem afetadas quando existe uma falha no manejo nutricional é a reprodução, tanto para animais que já estão em reprodução, quanto para animais que vão iniciar a vida reprodutiva (Bonfim *et al.*, 2014). De acordo com Scaramuzzi e Martin (2008), a nutrição tem efeitos nos ovários, podendo estimular ou inibir o ciclo reprodutivo. Além disso, da mesma forma, a nutrição tem efeito no eixo hipotalâmico hipofisário determinando o desbloqueio ou não do eixo, implicando na ocorrência ou não da ovulação, tem ação também sobre os folículos, bem como consequentemente no crescimento folicular e na taxa ovulação (Bonfim *et al.*, 2014).

É amplamente conhecido que as fêmeas em gestação apresentam elevadas demandas energéticas, uma vez que o crescimento dos tecidos uterinos, o desenvolvimento fetal,

formação placentária e a preparação das glândulas mamárias são processos metabolicamente intensivos (Berchielle *et al.*, 2006). Quando essas fêmeas enfrentam períodos de subnutrição durante a gestação, como ocorre frequentemente durante a estação seca, podem ocorrer comprometimentos significativos no desenvolvimento fetal, particularmente em órgãos vitais como fígado, coração e gônadas. Essas alterações morfofuncionais têm consequências duradouras, afetando o desempenho produtivo e reprodutivo da prole na vida adulta (Greenwood *et al.*, 2000; Thomas e Kott, 1995).

Durante a lactação, o foco das exigências energéticas desloca-se para a produção láctea, sendo o período inicial que engloba, a produção de colostro e o pico de produção de leite, particularmente crítico (Ferelli, 2021). Estudos demonstram que a ingestão de dietas ricas em carboidratos não fibrosos pode melhorar significativamente a produção de leite. Evidências indicam que matrizes alimentadas com dietas contendo maiores concentrações de CNF apresentam maior produção de leite quando comparadas a dietas com baixos teores de carboidratos não fibrosos (Bovera *et al.*, 2004).

Estratégias nutricionais para otimizar o metabolismo energético

Considerando que a otimização do metabolismo energético em pequenos ruminantes é essencial para melhorar o desempenho produtivo e aumentar a eficiência alimentar, tem se buscado o uso de estratégias nutricionais que otimizem o metabolismo energético através de suplementações. A suplementação tem como objetivo melhorar o consumo de energia através da adição de nutrientes a uma dieta basal, evitando que haja quedas no desempenho produtivo e no peso dos animais, como também permite que estes atinjam metas em menos tempo, como por exemplo, o ganho de peso.

De acordo com Vechiato e Ortolani, (2008), as dietas que apresentam elevados teores de energia possibilitam aos animais um maior ganho de peso nos sistemas intensivos. Normalmente, a principal fonte energética nesses sistemas é o milho e o sorgo, não sendo tão aceita pelos produtores devido ao elevado custo, quando comparado com a suplementação proteica. Porém, por mais que não seja tão aceita, ela apresenta um alto potencial de modificar o desempenho do animal (Silveira *et al.*, 2007). Por outro lado, quando essas fontes energéticas são fornecidas em excesso, pode causar problemas na saúde dos animais, como problemas digestivos e distúrbios metabólicos. No entanto, sua utilização de forma adequada/equilibrada apresenta um elevado potencial de modificar o desempenho do animal. Dessa forma, para atender a demanda dos produtores, se tem como alternativa o uso de alimentos alternativos não convencionais, como exemplo os subprodutos agroindustriais, provenientes da lavoura de grãos e da fruticultura (Deminicis *et al.*, 2012; Tigre, 2012), a palma forrageira, gorduras inertes, entre outros.

Esses subprodutos podem ser incluídos na alimentação de ruminantes devido a sua capacidade em converter esses alimentos em fonte de energia e na subsequente produção de alta qualidade do leite ou da carne (Tigre, 2012). Como exemplos de subprodutos se tem a polpa cítrica (Quinto e Bizzuti, 2020), melaço de soja (Arruda *et al.*, 2021; Rodrigues *et al.*, 2020; Pereira *et al.*, 2019), caroço de algodão (Maia, 2011), entre outros.

De acordo com Tigre, (2012) a polpa cítrica é oriunda da indústria citrícola, composta pela casca, sementes e bagaço da laranja e pode ser fornecida a ruminantes na fase de crescimento ou lactação. Além disso, apresenta na sua composição a pectina, um carboidrato não fibroso (CNF), que pode ser absorvida mais rápido pelo trato gastrointestinal devido ser um carboidrato de rápida degradação ruminal. O uso de CNF em dietas tem como finalidade o fornecimento energético e consequente aumento da produtividade (Cañizares *et al.*, 2009). Dessa forma, Tigre (2012) em seu trabalho mostrou que a poupa cítrica pode ser utilizada em substituição tanto ao milho, quanto a outros ingredientes da dieta de ruminantes.

Já o melaço de soja é um subproduto oriundo do farelo de soja, onde após alguns processos apresenta aspecto viscoso e sabor agridoce. Ele apresenta elevada qualidade energética e se encaixa como alternativa barata e sustentável para alimentação de ovinos (Rodrigues, 2017). Rodrigues *et al.*, (2020) ao estudar os efeitos das concentrações do melaço de soja no desempenho em confinamentos e na qualidade da carne de cordeiros, mostraram que a substituição do grão de milho pelo melaço de soja é uma alternativa barata para produtores, diminuindo o uso de grãos, onde puderam mostrar que o custo da dieta foi reduzido para R\$0,09/kg usando o melaço de soja quando comparado com o grupo controle que foi de R\$0,10/kg. Também puderam concluir que o melaço pode melhorar a qualidade da carne devido ao seu alto potencial quando incluído em até 300 g/kg.

Em regiões áridas e semiáridas a busca por alternativas que sejam eficientes atendendo as necessidades dos animais e que seja de baixo custo ainda é um desafio, porém já existe opções viáveis como o uso da palma forrageira. Ela se torna viável devido a sua resistência a seca, conseguindo armazenar até 90% de água, apresenta alta palatabilidade e alta produção de biomassa, além disso, é considerada uma ótima fonte de energia na alimentação animal, (Da frota *et al.*, 2015; Spínola *et al.*, 2020) apresentando cerca de 64,66% de NDT (Melo, 2006). Porém, vale salientar que as dietas para ruminantes não podem ser exclusivamente a base de palma devido as deficiências no valor proteico e de fibra, além de provocar distúrbios metabólicos, como por exemplo diarreias. De acordo com Brito *et al.*, (2020) a palma apresenta baixos teores de matéria seca, em torno de 10 a 13 % e certa de 4,2 a 6,2 % de proteína bruta. Com isso, a palma forrageira deve ser ofertada associada a outros alimentos que possuam fonte de fibra e proteína (Santos, 2006; Silva e Santos, 2006).

Os lipídeos são tidos como um produto de alta concentração energética pela grande proporção de ácidos graxos, apresentando 2,25 vezes mais energia que os carboidratos (Silva *et al.*, 2007). Conforme o NRC (2007), apresentam maior valor energético quando comparado

com outros nutrientes e acaba sendo considerado a fonte de energia mais importante para os animais. Porém, a inclusão da gordura na alimentação dos ruminantes deve ser utilizada com cautela, visto que o uso de gordura pode prejudicar os microorganismos importantes para a fermentação (Ibrahim et al., 2021). Dessa forma, o uso desses lipídeos não pode ultrapassar mais que 5% da dieta devido os ruminantes não possuem mecanismos para digerir-los de forma eficiente como fazem com as proteínas e carboidratos e por esse motivo pode desencadear problemas no ambiente ruminal, como a redução na digestão ruminal da fibra, além de desencadear os processos de hidrólise e bio-hidrogenação no rúmen (Ikwuegbu e Sutton, 1982; Silva *et al.*, 2007; Kumar, 2017; Wettstein *et al.*, 2000). Para sanar esse problema, tem se utilizado a gordura protegida ou gordura inerte, a qual é composta por ácidos graxos insaturados de cadeia longa, ácidos graxos saturados, triglicerídeos, fosfolipídios e outros componentes (Prohmann, 2015). Essa gordura protegida por sua vez vai ter ação diretamente no intestino delgado, onde passará pelos processos de digestão e absorção e consequentemente será utilizada como fonte energética e manterá a saúde dos ruminantes (Andrade, 2010; Da Freiria et al., 2022).

Distúrbios metabólicos associados ao metabolismo energético

O metabolismo energético garante uma homeostase e sinergia nas funções celulares e no contexto geral do organismo. No entanto, o seu desbalanço pela falta de energia ou excesso pode proporcionar aos animais um comprometimento da saúde e consequentemente da sua produção. Em pequenos ruminantes domésticos, os distúrbios metabólicos associados ao metabolismo energético estão associados com fêmeas em período de transição, i.e., terço final e início da lactação, e animais destinados para a reprodução.

O metabolismo de cabras e ovelhas gestantes e lactantes depende de maior mobilização da glicose para o tecido nervoso, tecidos fetais e tecido mamário, e a ação de disponibilizar este tipo de molécula ocorre pelos mecanismos endócrinos (Gonzalez e Silva, 2017). Assim, para que ocorra a gliconeogênese hepática e uso da glicose para os tecidos específicos, a fosforilação do glicogênio pela ação das epinefrinas condicionam a liberação da glicose e um estado de hiperglicemia (Kolnes et al., 2014).

Observando que no terço final da gestação existe uma maior demanda energética e limitação do consumo de energia das fêmeas de pequenos ruminantes domésticos, e dependendo da raça, nutrição, e genótipo existe uma prevalência de gestações gemelares, a necessidade de glicose para os tecidos aumenta, e mecanismos fisiológicos podem condicionar os animais a uma cetose, uma vez que a demanda energética é superior e a disponibilidade de glicose não comporta essa demanda ocorrendo a produção de β -hidroxibutirato, a qual desmembra para uma toxemia da prenhez e um maior estresse oxidativo (Marteniuk and Herdt, 1988; Cali, Trana e Claps, 2010; Huang et al., 2021).

Nas condições de restrição energética ou supernutrição o metabolismo da glicose nas fêmeas pode comprometer a fisiologia reprodutiva, podendo deixar cabras e cordeiras fora da ciclagem devido os mecanismos hormonais, e.g., como o efeito da leptina e insulina na reprodução (Chilliard, Delavaud e Bonnet, 2005). O monitoramento das exigências na fase reprodutiva, associado com o escore de condições corporais (ECC), garante com que ocorra uma sincronia no eixo hipotálamo-hipófise-gonadal e a produção dos gametas masculinos e femininos de forma que possa ocorrer uma fecundação e posteriormente uma gestação (Gallego-Calvo et al., 2015).

Considerações finais

O conhecimento sobre o metabolismo energético em caprinos e ovinos é essencial para melhorar o desempenho produtivo e a eficiência alimentar desses animais. A fermentação ruminal e a produção de ácidos graxos voláteis são processos-chave para o aproveitamento energético. A formulação adequada de dietas, com uso de ingredientes alternativos e balanceamento nutricional, contribui para a saúde metabólica e produtividade, assim como a redução de custos. Dessa forma, estratégias nutricionais bem planejadas promovem sistemas mais sustentáveis e economicamente viáveis.

REFERÊNCIAS

- Andrade, E. N. (2010). Influência da utilização de lipídio protegido na dieta sobre o perfil de ácidos graxos e qualidade da carne de bovinos jovens Nelore Angus. 98 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- Arruda, M. C. G., Almeida, M. T. C., Bertoco, J. P. A., Pereira-Junior, S. A., Castro-Filho, E. S., Feliciano, A. L., ... & Ezequiel, J. M. (2021). Melaço de soja em substituição ao milho em cordeiros confinados no desempenho de crescimento, características de carcaça e qualidade da carne. *Ciência Animal Translacional*, 5(1), txa230.
- Baldwin, R. L., McLeod, K. R., Klotz, J. L., & Heitmann, R. N. (2004). Rumen development, intestinal growth and hepatic metabolism in the pre- and postweaning ruminant. *Journal of Dairy Science*, 87(E. Suppl), E55–E65. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)70061-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)70061-2).
- Berchielli, T. T., Pires, A. V., & Oliveira, S. G. D. (2011). *Nutrição de ruminantes*.
- Berchielli, T. T., Pires, A. V., & Oliveira, S. G. (2011). Nutrição de ruminantes. In K. T. Resende, I. A. M. A. Teixeira, & M. H. M. R. Fernandes, *Metabolismo de energia* (pp. 323–344). FUNEP.
- Bergman, E. N. (1990). Energy contributions of volatile fatty acids from the gastrointestinal tract in various species. *Physiological Reviews*, 70(2), 567–590. <https://doi.org/10.1152/physrev.1990.70.2.567>.
- Bento, H. S., Reis, M. M., Silva, R. R., & Mendes, F. B. L. (2020). O uso do butirato na nutrição animal: mecanismos de ação e aplicações. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, 21(1), 1–13. <https://doi.org/10.1590/S1519-99402020000100001>.

- BR-Caprinos & Ovinos. (2024). *Exigências nutricionais de caprinos e ovinos* (1ª ed.). Universidade Federal do Ceará. <https://brcaprinoseovinos.ufc.br>.
- Brito, G. S. M. S., Santos, E. M., Araújo, G. G. L., Oliveira, J. S., Zanine, A. D. M., Perazzo, A. F., ... & Cavalcanti, H. S. (2020). Silagens mistas de palma forrageira e gliricídia: composição química, características fermentativas, população microbiana e estabilidade aeróbia. *Relatórios Científicos*, 10(1), 6834. 10.1038/41598.2045-2322.
- Bonfim, M. A. D., & Barros, N. N. (2005). *Exigências nutricionais de caprinos e ovinos leiteiros*.
- Bovera, F., Cutrignelli, M. I., Calabrò, S., Piccolo, G., Tudisco, R., Zicarelli, F., ... & Infascelli, F. (2004). Efeito do conteúdo de carboidratos não estruturais na dieta sobre o desempenho produtivo de ovelhas primíparas da raça Sarda. *Revista Italiana de Ciência Animal*, 3(1), 61–70.
- Cañizares, G. I. L., Rodrigues, L., & Cañizares, M. C. (2009). Metabolismo de carboidratos não estruturais em ruminantes. <https://doi.org/10.5380/avs.v3oi2.98304>.
- Cannas, A., Tedeschi, L. O., & Fox, D. G. (2004). Predicting the nutrient requirements and feed biological values for small ruminants. *Journal of Animal Science*, 82(suppl_13), E149–E158. https://doi.org/10.2527/2004.8213_supplE149x.
- Cezar, M. F., & Sousa, W. D. (2007). Carcaças ovinas e caprinas: obtenção, avaliação e classificação. *Uberaba: Agropecuária Tropical*, 147.
- Conera, V. (2014). Papel da nutrição sobre a reprodução ovina. *Acta Veterinaria Brasílica*, 8, 372-379.
- Da Frota, M. N. L., Carneiro, M. D. S., Carvalho, G. M. C., de Araújo Neto, R. B., & Carneiro M. S. S., U. F. C. (2015). Palma forrageira na alimentação animal.
- Di Marco, O., et al. (2007). *Metabolismo energético e proteico*. Editora UFSM.
- Emepa. (2018). *Dietas para cordeiros e cabritos de corte terminados em confinamento*. (1ªed.) <https://empaer.pb.gov.br/pdf/livro-dietas-para-cordeiros-e-cabritos-010629291854-compactado.pdf>.
- Estrada, L. (1998). Exigências de energia e proteína para caprinos. *SIMPÓSIO NORDESTINO DE ALIMENTAÇÃO DE RUMINANTES*, 7, 125-142.
- Estrada, L. H. C. (2013). Exigências de Energia e Proteína em Caprinos e Ovinos para as Condições Brasileiras. *Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal*, v. 07, n. 2, p. 345-389. DOI: 10.5935/1981-2965.20130028.
- Ferelli, K. L. S. M. (2021). Suplementação proteico-energética para ovelhas em reprodução, gestação e lactação mantidas em pastagens de capim-Braquiária.
- Flint, H. J., Bayer, E. A., Rincon, M. T., Lamed, R., & White, B. A. (2008). Polysaccharide utilization by gut bacteria: potential for new insights from genomic analysis. *Nature Reviews Microbiology*, 6(2), 121–131. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1817>.
- Greenwood, PL, Hunt, AS, Hermanson, JW, & Bell, AW (2000). Efeitos do peso ao nascer e da nutrição pós-natal em ovinos neonatais: II. Crescimento e desenvolvimento do músculo esquelético. *Journal of animal science*, 78 (1), 50-61.
- Henriques, T. B. (2024). *Nutrição de ruminantes*. Universidade Federal do Ceará.
- Hu, J., et al. (2018). Short-chain fatty acids in control of energy metabolism. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(8), 1243-1249. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1245650>

- Ikwuegbu, OA, & Sutton, JD (1982). O efeito da variação da quantidade de suplementação de óleo de linhaça no metabolismo ruminal em ovinos. *British Journal of Nutrition*, 48 (2), 365-375.
- Kleiber, M. (1961). *The fire of life: An introduction to animal energetics*. New York, NY: Wiley.
- Kleiber, M. (1972). *Bioenergética animal: El fuego de la vida*. 1º ed. Zaragoza: Editorial Acribia. (pp. 428).
- Kozloski, G. V. (2017). *Bioquímica dos ruminantes* (3ª ed.). Santa Maria, RS: UFSM.
- Lehninger, A. L., Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2017). *Princípios de bioquímica de Lehninger* (7ª ed.). Artmed.
- Maia, M. D. O. (2011). Efeito da adição de diferentes fontes de óleo vegetal na dieta de ovinos sobre o desempenho, a composição e o perfil de ácidos graxos na carne e no leite.
- Marcondes, M. I., Paulino, P. V. R., & de Campos, S. *Predição Da Composição Química Corporal E Da Carcaça De Animais Nelore Puros E Cruzados*.
- Morgavi, D. P., et al. (2023). Review: Reducing enteric methane emissions improves energy metabolism in livestock: is the tenet right? *Animal*, 17(S3), 100830. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100830>.
- Melo, AAS, Ferreira, MA, Vêras, AC, Lira, MA, Lima, LE, Pessoa, RAS, Bispo, SV, Cabral, AMB, Azevedo, M. (2006). Desempenho leiteiro de vacas alimentadas com caroço de algodão em dieta à base de palma forrageira. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41, 1165-1171.
- Monteiro, M. G., Brisola, M. V. & Vieira Filho, J. E. R. (2021). Diagnóstico da cadeia produtiva de caprinos e ovinos no Brasil. *Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA*. DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/td2660>.
- Morais, M. G., Fernandes, H. J., Oliveira, L. B., Ribeiro, C. B., Souza, A. R. D. L., Franco, G. L., ... & Walker, C. C. (2016). Exigências de energia de borregas mestiças alimentadas com níveis crescentes de concentrado na dieta. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 68(04), 1023-1032.
- National Research Council (NRC). (1981). *Effect of environment on nutrient requirements of domestic animals*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/4963>.
- National Research Council (NRC). (2007). *Nutrient requirements of small ruminants: Sheep, goats, cervids, and new world camelids*. National Academies Press.
- Neres, C. P., Pinho, E. B., Brito, E. C. S., Santos, J. S., Barros, K. G., Gonçalves, R. S., Ferreira, S. A., Meireles, W. A. & Rosanova, C. (2024). O agronegócio da carne ovina e caprina no Brasil, uma revisão sobre produção, perspectivas e desafios. *Revista multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, v. 11, ISSN 2178-6925.
- Palmquist, D.L.; Mattos, W.R.S. (2006). Metabolismo de lipídeos. In: *Nutrição de Ruminantes*. Jaboticabal: Funep, p. 151-182.
- Pereira, ES, Lima, FWR, Marcondes, MI, Rodrigues, JPP, Campos, ACN, Silva, LP, ... & Oliveira, RL (2017). Exigências energéticas e proteicas de cordeiros Santa Inês, raça de ovinos deslançados. *Animal*, 11 (12), 2165-2174.
- Pereira Junior, S. A. G. Melaço de soja na terminação e metabolismo de ovinos em confinamento. 2019. 74 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.

- Plaizier, J. C., Krause, D. O., Gozho, G. N., & McBride, B. W. (2008). Subacute ruminal acidosis in dairy cows: The physiological causes, incidence and consequences. *The Veterinary Journal*, 176(1), 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2007.12.016>.
- Prohmann, G. R. (2015). Fermentação e parâmetros ruminais de ovinos alimentados com gordura protegida. 2015. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Zootecnia), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos.
- Quinto, A. C. & Bizzuti, B. E. (2020). Subprodutos da agroindústria podem ser reaproveitados na alimentação de ruminantes. *Jornal da USP*. Disponível em: Acesso em: 3 de junho de 2025.
- Resende, K. T., Teixeira, I. A. M. A., & Fernandes, M. H. M. R. (2006). Metabolismo de energia. *Nutrição de ruminantes*. São Paulo: FAPESP/FUNEP, 311-331.
- Rodrigues, JL, Pereira-Junior, SAG, Castro Filho, ES, Costa, RV, Barducci, RS, van Cleef, EHCB, & Ezequiel, JMB (2020). Efeitos de concentrações elevadas de melaço de soja no desempenho em confinamento e na qualidade da carne de cordeiros. *Livestock Science*, 240, 104155.
- Rodrigues, MS, Moreira, FS, Cardoso, VL, & de Resende, MM (2017). Melaço de soja como substrato de fermentação para a produção de biossurfactante utilizando *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 10145. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 18699-18709. <https://doi.org/10.1007/BF02981237>.
- Santos, DC, Farias, I, Lira, MA, Santos, MVF, Arruda, GP, Coelho, RSB, Dias, FM, Melo, JN. Manejo e utilização da palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) em Pernambuco. Recife: IPA, 2006. 48p. (IPA. Documentos, 30).
- Santos, W. S., Albuquerque, H. J. O., Albuquerque, H. O., Cabral, A. M. D., Ferreira, F. F. S., Santos, E. S. S., Nascimento, M. I. S. S. & Santos, G. C. L. (2023). Diagnóstico da cadeia produtiva de caprinos e ovinos no Brasil e na Região Nordeste. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.9, n.7, p. 21283-21303. DOI:10.34117/bjdv9n7-006.
- Scaramuzzi, RJ, & Martin, GB (2008). A importância das interações entre nutrição, sazonalidade e fatores sociosexuais no desenvolvimento de métodos livres de hormônios para o controle da fertilidade. *Reprodução em Animais Domésticos*, 43, 129-136.
- Silva, A. M. DA, Santos, E. M. D., Pereira Filho, J. M., Bakke, O. A., Gonzaga Neto, S., & Costa, R. G. D. (2010). Composição corporal e exigências nutricionais de proteína e energia para ganho de peso corporal de cordeiros pastando em região semiárida tropical. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39, 210-216.
- Silva, C. C. F., & Santos, L. C. (2007). Palma Forrageira (*Opuntia Ficus-Indica* Mill) como alternativa na alimentação de ruminantes. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, 8(5), 1-11.
- Silva, F. C., Monteiro, A. L. G., Resende, K. T., & Sá, H. C. M. (Orgs.). (2024). *Exigências nutricionais de caprinos e ovinos – BR-Caprinos & Ovinos* (1ª ed.). Universidade Federal do Ceará. <https://brcaprinoseovinos.ufc.br/pt/pagina-de-introducao/>.
- Silva, J.F.C.; Leão, M.I. (1979). Fundamentos de nutrição dos ruminantes. *Piracicaba: 1ª ed., Livroceres*, 384p.
- Silva, M. M. C. D., Rodrigues, M. T., Branco, R. H., Rodrigues, C. A. F., Sarmento, J. L. R., Queiroz, A. C. D., & Silva, S. P. D. (2007). Suplementação de lipídios em dietas para cabras em lactação:

- consumo e eficiência de utilização de nutrientes. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 36, 257-267.
- Silveira, A. L. F. D. (2007). Efeitos associativos da suplementação energética e protéica de volumoso de baixa qualidade em ovinos.
- Spinola, AM, Neves, FL, Küster, IS, de Oliveira, EF, Ramos, EL, Figueiredo, MRP, Pereira, SL, Neves, JDC. Palma-forrageira: potencialidades para as propriedades rurais do Espírito Santo.
- Thomas, VM, & Kott, RW (1995). Uma revisão da pesquisa sobre nutrição de ovelhas criadas em pastagens de inverno em Montana.
- Tigre, J. S. (2012). Use of citrus pulp in ruminant feed-review. <https://doi.org/10.31533/pub-vet.v19n05>.
- Van Soest, P.J. (1994). Nutritional ecology of the ruminant. 2. ed. *Ithaca: Comstock*, 476p.
- Vechiato, T. A. F., & Ortolani, E. L. (2008). Dieta de alto grão vs urolitíase em pequenos ruminantes. *Consultado em, 03 de junho de 2025*.
- Wettstein, HR, Machmüller, A., & Kreuzer, M. (2000). Efeitos de lecitinas de canola cruas e modificadas em comparação com óleo de canola, semente de canola e lecitina de soja na fermentação ruminal medida com técnica de simulação ruminal. *Ciência e tecnologia da alimentação animal*, 85 (3-4), 153-169.
- Yáñez, E. (2006). Restrição alimentar em caprinos: rendimento, cortes comerciais e composição da carcaça. *Revista Brasileira de Zootecnia*.
- Zhang, X., et al. (2023). New biochemical pathways for forming short-chain fatty acids during fermentation in rumen bacteria. *Nature Communications*, 14(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41199-4>.
- Chilliard, Y., Delavaud, C., M. Bonnet (2005). Leptin expression in ruminants: Nutritional and physiological regulations in relation with energy metabolism. *Domestic Animal Endocrinology*, 29, 3–22.
- Gallego-Calvo, L., Gaticab, M.C., Guzmána, J.L., Zarazaga, L.A. (2015). Reproductive performance response to the male effect in goats is improved when doe live weight/body condition score is increasing. *Animal Reproduction Science*, 156 (2015) 51–57.
- Marteniuk, J.V. and Herdt, T.H. (1988). Pregnancy Toxemia and Ketosis of Ewes and Does. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 4:2, 307-315.
- Huang, Y., et al. (2021). Oxidative status in dairy goats: periparturient variation and changes in subclinical hyperketonemia and hypocalcemia. *BMC Veterinary Research*, (2021) 17:238.
- Cali, P., Trana, A., Claps, S. (2010). Effects of plane of nutrition on oxidative stress in goats during the peripartum period. *The Veterinary Journal* 184 (2010) 95–99.
- Kolnes, A.J.; Birk, J.B.; Eilertsen, E.; Stuenkel, J.T.; Wojtaszewski, J.F.P.; Jensen, J. (2014). Epinephrine-stimulated glycogen breakdown activates glycogen synthase and increases insulin-stimulated glucose uptake in epitrochlearis muscles. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, v. 308, 231-240.
- González, F.H.D.; Silva, S.C. (2017). *Introdução À Bioquímica Clínica Veterinária*. 3. ed., revisada e ampliada – Porto Alegre, Editora da UFRGS.
- Melo, P.A., Silva, J.C.S. (2017). A evolução dos ruminantes. *Diversitas Journal*, 2:2, 191-202.