

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO” FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS JABOTICABAL**

**Impacto do transporte rodoviário por 48 horas e da suplementação
com minerais orgânicos e levedura viva sobre o metabolismo e o
desempenho de bovinos Nelore alimentados com forragem de
baixa qualidade durante o período seco**

José Maria Cesar Neto
Zootecnista

2025

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO” FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS JABOTICABAL**

**Impacto do transporte rodoviário por 48 horas e da suplementação
com minerais orgânicos e levedura viva sobre o metabolismo e o
desempenho de bovinos Nelore alimentados com forragem de
baixa qualidade durante o período seco**

Discente: José Maria Cesar Neto

Orientador: Gustavo Rezende Siqueira

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus
de Jaboticabal, como parte das exigências
para a obtenção do título de Doutor em
Ciência Animal.

2025

C421i	Cesar Neto, José Maria Impacto do transporte rodoviário por 48 horas e da suplementação com minerais orgânicos e levedura viva sobre o metabolismo e o desempenho de bovinos Nelore alimentados com forragem de baixa qualidade durante o período seco / José Maria Cesar Neto. -- Jaboticabal, 2025 128 p. : il., tabs. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Gustavo Rezende Siqueira 1. Bovinos de corte. 2. Estresse fisiológico. 3. Cromo levedura. 4. Selênio. 5. Proteinato de zinco. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: IMPACTO DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO POR 48 HORAS E DA SUPLEMENTAÇÃO COM MINERAIS ORGÂNICOS E LEVEDURA VIVA SOBRE O METABOLISMO E DESEMPENHO DE BOVINOS NELORE ALIMENTADOS COM FORRAGEM DE BAIXA QUALIDADE DURANTE PERÍODO SECO

AUTOR: JOSÉ MARIA CESAR NETO

ORIENTADOR: GUSTAVO REZENDE SIQUEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciência Animal, área: Nutrição Animal pela Comissão Examinadora:

Pesquisador Dr. GUSTAVO REZENDE SIQUEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Descentralização do Desenvolvimento / APTA Colina/SP



Documento assinado digitalmente

GUSTAVO REZENDE SIQUEIRA
Data: 01/08/2025 18:34:47-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. RODRIGO DA SILVA MARQUES (Participação Virtual)
Departamento de Ciência Animal / Virginia Tech - Blacksburg/VA



Documento assinado digitalmente

RODRIGO DA SILVA MARQUES
Data: 01/08/2025 19:02:33-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. RODRIGO SILVA GOULART (Participação Virtual)
Departamento de Zootecnia / USP FZEA Pirassununga/SP



Documento assinado digitalmente

RODRIGO SILVA GOULART
Data: 15/08/2025 16:00:47-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Associado JULIANA SILVA DE OLIVEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Zootecnia / Universidade Federal da Paraíba (UFPB) - Areia/PB



Documento assinado digitalmente

JULIANA SILVA DE OLIVEIRA
Data: 21/08/2025 08:38:47-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



Dr. LUIZ FERNANDO COSTA E SILVA (Participação Virtual)
Alltech do Brasil Agroindustrial Ltda / Maringá/PR



Documento assinado digitalmente

LUIZ FERNANDO COSTA E SILVA

Data: 01/08/2025 19:54:30-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jaboticabal, 01 de agosto de 2025

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

José Maria Cesar Neto, nascido em 05 de janeiro de 1995 na cidade de Pilar, Estado da Paraíba, Brasil. Terceiro filho do casal Landoaldo Cesar da Silva e Emília de Rodatt Oliveira Silva, tendo como irmãos Landoaldo Cesar da Silva Filho, João Bosco Cesar de Oliveira Silva, Lucas Cesar de Oliveira Silva, Pedro Cesar de Oliveira Silva. Possui graduação em Zootecnia (2013-2018) pela Universidade Federal da Paraíba – Centro de Ciências Agrárias – Campus II – Areia-PB, CCA/UFPB. Durante a graduação, participou como membro do grupo de estudos em Forragicultura (GEF), sob orientação do Dr. Edson Mauro Santos. Em março de 2018 ingressou no Programa de Pós-graduação em Zootecnia – PPGZ, na Universidade Federal da Paraíba – Centro de Ciências Agrárias – Campus II – Areia-PB. E em julho de 2021, iniciou o doutorado pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campos Jaboticabal, UNESP, no programa de pós graduação em Ciência Animal sob orientação do professor Dr. Gustavo Rezende Siqueira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por todas as bênçãos recebidas ao longo da minha jornada. Sou grato pelas pessoas que Ele colocou em meu caminho — muitas delas me apoiaram, incentivaram e me inspiraram a ser alguém melhor a cada dia. Graças a esse amparo divino e humano, fui capaz de alcançar mais esta conquista e concluir este trabalho com dedicação e sabedoria.

Ao Polo Regional de Desenvolvimento Tecnológico dos Agronegócios da Alta Mogiana (PRDTA-AM) – Colina/SP, minha sincera gratidão pela estrutura e suporte oferecidos ao desenvolvimento deste trabalho. Em especial, agradeço ao meu orientador, Dr. Gustavo Siqueira, pela confiança, orientação e pela oportunidade única de aprendizado e crescimento profissional.

Estendo meus agradecimentos aos profissionais da unidade, que tornaram o ambiente de trabalho mais leve e acolhedor. De modo especial, agradeço ao Luizinho, Roberto, Denilson, Marcelo, Thaís, Rodolfo Toga, Miltinho, Toinzinho, Lori e seu Chico, pelo companheirismo, ajuda constante e amizade sincera.

Deixo aqui uma mensagem de profundo agradecimento a uma pessoa por quem tenho enorme carinho e gratidão: Gabriel David. Obrigado pelas experiências compartilhadas, pela convivência, conselhos e motivações ao longo do caminho. Se em algum momento houve desencontros, peço desculpas sinceras. Saiba que você tem um lugar especial no meu coração.

Agradeço com muito amor à minha família, base de tudo. Aos meus pais, Landoaldo Cesar da Silva e Emília de Rodatt Oliveira Silva, por todo o carinho, esforço e ensinamentos ao longo da vida. A minha filha Layla Vitória, por iluminar a minha vida com seu sorriso, sua alegria e seu amor. A minha namorada Janayara Tavares por todo apoio nessa nova jornada da pós-graduação. Às minhas avós Maria da Conceição Oliveira (in memoriam), Maria José Araújo e Maria da Conceição Silva, por serem fontes inesgotáveis de amor, sabedoria e inspiração. Aos meus tios, tias, primos e a toda a família, meu muito obrigado pelo apoio incondicional.

Aos amigos da APTA, agradeço pelo suporte, pela parceria no trabalho e por cada momento compartilhado. Foi um prazer dividir essa etapa com vocês. Aos colegas da pós-graduação da APTA, deixo minha gratidão por toda convivência e colaboração: Fernanda Sheren, Fernanda Rigon, Luciana, Aline, Mailza, Irene, Karla, Amanda, Mateus, Igor, Giliard, Iorrano, Keuven, Luis, Mariana, Ariane, Karla (novamente), Saulo, Bianca e Anna Lídia — obrigado por tudo!

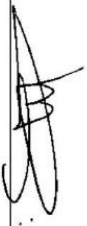
SUMÁRIO

RESUMO GERAL:	3
CAPÍTULO I - CONSIDERAÇÕES GERAIS	7
1. INTRODUÇÃO	7
2. Revisão de Literatura	9
2.1. Infraestrutura logística e implicações para a pecuária de corte	9
2.2. Transporte rodoviário de bovinos	14
2.2.1. Planejamento para o transporte	17
2.2.2. Compartimento de carga e densidade animal	18
2.3. Impactos nutricionais e produtivos do transporte rodoviário em bovinos..	23
2.4. Respostas fisiológicas ao estresse	25
2.5. Nutrição funcional de bovinos: aplicações de cromo, selênio, zinco e leveduras vivas	31
2.5.1. Cromo	32
2.5.2. Selênio	35
2.5.3. Zinco	39
2.5.4. Leveduras	42
3. REFERÊNCIAS	46
CAPÍTULO II - Impacto do transporte rodoviário por 48 horas e da suplementação com minerais orgânicos e levedura viva sobre o metabolismo e o desempenho de bovinos Nelore alimentados com forragem de baixa qualidade durante o período seco	63
RESUMO GERAL:	63
GENERAL ABSTRACT	65
1. INTRODUÇÃO	67
2. MATERIAL E MÉTODOS	69
3. RESULTADOS	85
4. DISCUSSÃO	104
5. CONCLUSÃO	116
6. REFERÊNCIAS	117

CERTIFICADO Nº 008/2025 – CEUA

Certificamos que o projeto apresentado dia 16 de julho de 2025 intitulado “IMPACTO DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO POR 48 HORAS E DA SUPLEMENTAÇÃO COM MINERAIS ORGÂNICOS E LEVEDURA VIVA SOBRE O METABOLISMO E O DESEMPENHO DE BOVINOS NELORE ALIMENTADOS COM FORRAGEM DE BAIXA QUALIDADE DURANTE O PERÍODO SECO”, foi registrado com o protocolo nº 008/2025, está sob a responsabilidade do Pesquisador Científico de Colina **Dr. Gustavo Rezende Siqueira** e envolve a produção, a manutenção e a utilização de animais pertencentes ao filo Chordata, subfilo Vertebrata (exceto humanos), para fins de pesquisa científica e encontra-se de acordo com os preceitos da lei nº 11.794, de oito de outubro de 2008; do decreto nº 6.899, de 15 de julho de 2009; e com as normas editadas pelo Conselho Nacional de Controle de Experimentação Animal (CONCEA), sendo então **APROVADO** pela **Comissão de Ética no Uso de Animais da Apta Regional**, na XXXIV Reunião Ordinária realizada no dia **28 de agosto de 2025**.

Finalidade: (X) Pesquisa científica – () Ensino	
Vigência da autorização	01/09/2025 a 20/12/2025
Espécie/linhagem e/ou raça	Bovinos Nelore
Nº de animais	12 animais canulados (CEUA 0012/2021) + 80 = Total de 92 animais
Sexo/Idade/Peso aprox.	12 Machos / 40 meses / 400 Kg + 80 machos / 15 meses / 301 Kg
Localização/Origem	Apta Regional de Colina - SP
Responsável Técnico	Dr. Gustavo Rezende Siqueira



Maria Izabel Merino de Medeiros
Coordenadora CEUA- APTA REGIONAL



Secretaria de
Agricultura e Abastecimento



SÃO PAULO
GOVERNO DO ESTADO

CAPÍTULO I: Impacto do transporte rodoviário por 48 horas e da suplementação com minerais orgânicos e levedura viva sobre o metabolismo e o desempenho de bovinos Nelore alimentados com forragem de baixa qualidade durante o período seco

RESUMO GERAL: Dois estudos foram conduzidos para investigar como o transporte rodoviário por 48 horas e duas fontes minerais em suplemento adensado afetam o metabolismo, a fermentação ruminal e o desempenho de bovinos Nelore recriados a pasto. No primeiro experimento, 20 novilhos Nelore, canulados no rúmen (peso corporal médio: 530 ± 30 kg; 30 meses) foram blocados por peso corporal e digestibilidade inicial e distribuídos aleatoriamente em baias individuais, em um arranjo fatorial 2×2 . O primeiro fator foi a condição de transporte: (1) animais não submetidos ao transporte rodoviário (NOTRANS) ou (2) animais submetidos ao transporte rodoviário por 48 horas com privação de água e alimento (CTRANS). O segundo fator foi a fonte mineral do suplemento adensado: (1) INOR – suplemento contendo apenas minerais inorgânicos (macro e microminerais inorgânicos, com selenito de sódio como fonte de Se e sem suplementação de Cr); ou (2) INOR+ORG – suplemento contendo macro e microminerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (cromo levedura, levedura enriquecida com selênio, *Saccharomyces cerevisiae* e proteinato de zinco). O período experimental teve duração de 56 dias, dividido em duas fases: (1) adaptação (d-21 a d-1) e (2) avaliação (d0 a d35). O consumo e a digestibilidade foram avaliados em diferentes períodos de coleta (d3–d5, d11–d13 e d32–d34). O transporte não afetou ($P = 0,790$) o consumo de matéria seca e de nutrientes. Entretanto, houve interação Transporte $\times$ Período para a digestibilidade da matéria seca ($P = 0,012$), matéria orgânica ($P = 0,012$), proteína bruta ($P = 0,005$) e fibra em detergente neutro ($P = 0,003$), além da excreção fecal ($P < 0,001$). Animais transportados (CTRANS) apresentaram maior digestibilidade nos dias 3 a 5, porém a digestibilidade foi reduzida e se igualou aos NOTRANS nos períodos de 11 a 13 e 32 a 34. O consumo de suplemento apresentou interação transporte $\times$ período em INOR+ORG ($P < 0,001$). A excreção fecal apresentou interação transporte $\times$ período ($P = 0,001$), sendo menor nos animais CTRANS nos dias 3 a 5, semelhante entre grupos de 11 a 13 dias e superior em CTRANS ao final do período experimental (32 a 34 dias). O metabolismo do nitrogênio também apresentou interação transporte $\times$ período para a relação PB:MOD ($P = 0,045$), consumo de MOD ($P = 0,046$) e excreção urinária de N ($P = 0,047$). Animais transportados (CTRANS) exibiram menor relação PB:MOD nos dias 3 a 5, acompanhada por maior excreção de N urinário nesse período, enquanto a excreção fecal de N mostrou padrão dinâmico, com queda inicial (3 a 5 dias) aumento posterior (32 a 34). Houve interação transporte $\times$ horário ($P \leq 0,006$) para os parâmetros de fermentação ruminal (AGV totais, proporções individuais, pH e N-NH₃). Em CTRANS, observou-se redução dos AGV totais (79,6 para 48,9 mMol/dL) acompanhada de aumento do pH (6,90 para 7,35). O propionato e o butirato apresentaram queda acentuada, enquanto os ácidos graxos ramificados (isobutirato, isovalerato e valerato) aumentaram durante o transporte. O N-NH₃ foi mais elevado em CTRANS nas primeiras 48 h (10,66 vs. 1,61 mg/dL; $P < 0,001$). No segundo experimento, 80 animais Nelore não castrados (PC $301 \pm 20,4$ kg) foram distribuídos em delineamento de blocos casualizados (arranjo fatorial 2×2), considerando o piquete como unidade experimental, com os mesmos tratamentos aplicados no Experimento 1. Os animais foram mantidos em piquetes de *Urochloa brizantha* cv. Marandu sob lotação contínua por 126 dias (21 dias de período de adaptação, e 105 dias de período de coletas). Os

animais foram bloqueados de acordo com o peso corporal inicial e, dentro de cada bloco, distribuídos aleatoriamente entre os tratamentos. Observou-se interação transporte × dia para proteína total ($P = 0,027$), ureia ($P < 0,01$), albumina ($P = 0,03$) e IGF-1 ($P < 0,01$). Animais CTRANS apresentaram maiores concentrações de proteína total nos dias 2 e 5 (7,19 e 6,92 vs. 6,22 e 6,62 g/dL em NOTRANS; $P < 0,01$) e maior concentração de albumina no dia 2 (3,52 vs. 3,06 g/dL; $P < 0,01$). A ureia sérica foi mais elevada em CTRANS no dia 2 (32,8 vs. 12,0 mg/dL; $P < 0,01$), mas posteriormente não diferiu entre grupos. Além disso, verificou-se interação mineral × dia experimental ($P = 0,02$), com menores concentrações de ureia em INOR+ORG nos primeiros dias pós-transporte (2 e 5), sugerindo efeito benéfico da suplementação sobre o metabolismo nitrogenado, ainda que de forma transitória. O IGF-1 foi reduzido em CTRANS nos dias 2 e 5 (140,8 e 175,8 vs. 256,9 e 244,9 ng/mL em NOTRANS; $P < 0,01$), com recuperação parcial a partir do dia 10. Para o desempenho, foi detectada interação Transporte × Período ($P < 0,001$) para peso corporal e GMD. Animais CTRANS apresentaram perda média após as 48 horas de transporte 47,2 kg (14,8% do PV inicial), seguida de recuperação parcial, mas sem alcançar os NOTRANS até o dia 105. Houve efeito da fonte mineral sobre o GMD geral (0 a 105 dias) ($P = 0,004$), com valores superiores para INOR+ORG em comparação a INOR, independentemente da condição de transporte. O transporte rodoviário de 48 horas impactou a digestibilidade, promoveu instabilidade fermentativa, alterações metabólicas e perda persistente de peso corporal, confirmando seu efeito fisiológico e produtivo de longa duração. A suplementação com minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (INOR+ORG) não evitou as alterações agudas no rúmen e no sangue, mas sustentou maior ganho médio diário em relação à suplementação exclusivamente inorgânica. Além disso, a suplementação com INOR+ORG aumentou o GMD acumulado (0,284 vs. 0,212 kg/dia) e melhorou parâmetros metabólicos, confirmando o benefício previsto para essa estratégia nutricional na atenuação dos efeitos negativos do transporte. Assim, conclui-se que o transporte prolongado gera efeitos persistentes sobre o metabolismo e o desempenho, e que a suplementação INOR+ORG os atenua, mas não os elimina.

Palavras-chave: bovinos de corte; estresse fisiológico; cromo levedura; selênio; proteinato de zinco.

Impact of 48-hour road transport and supplementation with organic minerals and live yeast on the metabolism and performance of Nellore cattle fed low-quality forage during the dry season

GENERAL ABSTRACT: Two studies were carried out to investigate how 48-hour road transport and two mineral sources supplementation impact the metabolism, ruminal fermentation and performance of Nellore cattle raised on pasture. In the first experiment, 20 rumen-cannulated Nellore steers (average body weight: 530 ± 30 kg; 30 months) were blocked by body weight and initial digestibility and randomly assigned to individual pens in a 2×2 factorial arrangement. The first factor was the transport: (1) animals not subjected to road transport (NOTRANS) or (2) animals subjected to 48-h road transport with food and water deprivation (CTRANS). The second factor was the mineral source supplementation: (1) INOR – supplement with inorganic minerals (inorganic macro- and microminerals, with sodium selenite as Se source and without Cr supplementation); or (2) INOR+ORG – supplement with inorganic macro and microminerals added from organic sources (yeast chromium, selenium-enriched yeast, *Saccharomyces cerevisiae* and zinc proteinate). The experimental period lasted 56 days and was divided into two phases: (1) adaptation (d-21 to d-1) and (2) evaluation (d0 to d35). Intake and digestibility were evaluated at different periods (d3–d5, d11–d13 and d32–d34). Transportation did not affect ($P = 0.790$) dry matter and nutrient intake. However, there was a Transportation $\times$ Period interaction for the digestibility of dry matter ($P = 0.012$), organic matter ($P = 0.012$), crude protein ($P = 0.005$) and neutral detergent fiber ($P = 0.003$), in addition to fecal excretion ($P < 0.001$). CTRANS animals showed higher digestibility from day 3 to 5, but the digestibility was reduced and was similar to NOTRANS animals from days 11 to 13 and 32 to 34. Supplement intake showed a transportation $\times$ period interaction for INOR+ORG ($P < 0.001$). Fecal excretion showed transport $\times$ period interaction ($P = 0.001$), being lower for CTRANS animals from day 3 to 5, and similar among treatments from day 11 to 13, and higher for CTRANS at the end of the experimental period (from day 32 to 34). Nitrogen metabolism also showed transport $\times$ period interaction for CP:MOD ratio ($P = 0.045$), MOD intake ($P = 0.046$) and urinary N excretion ($P = 0.047$). CTRANS animals showed a lower CP:MOD ratio from day 3 to 5, accompanied by a higher urinary N excretion during this period, while fecal N excretion showed a dynamic pattern, with an initial decrease (from day 3 to 5) and a subsequent increase (from day 32 to 34). There was a transport $\times$ time interaction ($P \leq 0.006$) for ruminal fermentation parameters (total VFA, individual proportions, pH, and N-NH₃ A reduction in total VFA (79.6 to 48.9 mMol/dL) was observed for CTRANS animals, accompanied by an increase in pH (6.90 to 7.35). Propionate and butyrate showed a sharp decrease, while branched fatty acids (isobutyrate, isovalerate, and valerate) increased during transport. N-NH₃ was higher in CTRANS animals in the first 48 h (10.66 vs. 1.61 mg/dL; $P < 0.001$). In the second experiment, 80 non-castrated Nellore animals (BW 301 ± 20.4 kg) were distributed in a randomized block design (2×2 factorial arrangement), considering the paddock as the experimental unit, with the same treatments applied in Experiment 1. The animals were kept in *Urochloa brizantha* cv. Marandu paddocks under continuous stocking rate for 126 days (21-day adaptation period and 105-day collection period). Within each block, the animals were randomly distributed among treatments. A transport $\times$ day interaction was observed for total protein ($P = 0.027$), urea ($P < 0.01$), albumin ($P = 0.03$), and IGF-1 ($P < 0.01$). CTRANS animals had higher total protein concentrations on days 2 and 5 (7.19 and 6.92 vs. 6.22 and 6.62 g/dL in NOTRANS; $P < 0.01$) and higher albumin concentration on day 2 (3.52 vs. 3.06 g/dL; $P < 0.01$). Serum urea was

higher in CTRANS animals on day 2 (32.8 vs. 12.0 mg/dL; $P < 0.01$) but did not differ among treatments thereafter. Furthermore, a mineral $\times$ experimental day interaction was observed ($P = 0.02$), with lower urea concentrations in INOR+ORG on the first day after transport (2 and 5), suggesting a beneficial effect of supplementation on nitrogen metabolism. IGF-1 was reduced in CTRANS animals on days 2 and 5 (140.8 and 175.8 vs. 256.9 and 244.9 ng/mL in NOTRANS; $P < 0.01$), with partial recovery from day 10. It was observed a Transport $\times$ Period interaction ($P < 0.001$) for body weight (BW) and average daily gain (ADG). CTRANS animals showed an average loss of 47.2 kg (14.8% of initial BW) after 48 hours of transport, followed by partial recovery, but without reaching NOTRANS animals until day 105. There was an effect of the mineral source on the overall ADG (0 to 105 days; $P = 0.004$), with higher values for INOR+ORG compared with INOR, regardless of the transport condition. The 48-hour road transport impacted digestibility, promoted fermentative instability, metabolic alterations, and persistent body weight loss, confirming its long-term physiological and productive effect. Inorganic minerals added to organic sources supplementation (INOR+ORG) did not prevent acute changes in the rumen and blood, but sustained greater ADG compared with exclusively inorganic supplementation (INOR). Furthermore, INOR+ORG supplementation increased accumulated ADG (0.284 vs. 0.212 kg/day) and improved metabolic parameters, confirming the predicted benefit of this nutritional strategy in mitigating the negative effects of transportation. Thus, we conclude that prolonged transportation generates persistent effects on metabolism and performance, and that INOR+ORG supplementation mitigates, but does not eliminate, these effects.

Keywords: beef cattle; physiological stress; chromium yeast; selenium; zinc proteinate.

Capítulo I – Considerações Gerais

1. Introdução

Nas últimas décadas, tem crescido de forma expressiva a preocupação e a atenção com os fatores estressores da cadeia produtiva do gado de corte, bem como ao seu impacto sobre o bem-estar animal, o desempenho produtivo e a sustentabilidade do sistema. O gado é inevitavelmente exposto a estressores psicológicos, fisiológicos e físicos decorrentes dos procedimentos de manejo praticados em sistemas de produção de carne bovina (CARROLL e FORSBERG, 2007). Entre esses, o transporte desponta como um dos eventos mais estressantes, sendo reconhecido como um desafio de grande impacto sobre a homeostase e a saúde animal (SWANSON; MORROW-TESCH, 2001; VAN ENGEN e COETZEE, 2018; DETERS; HANSEN, 2020).

No Brasil, o transporte rodoviário de bovinos ocorre frequentemente em longas distâncias, reflexo das dimensões continentais do país e da distribuição geográfica desigual entre as áreas de produção e os frigoríficos. Viagens que ultrapassam 24 horas não são incomuns, especialmente em regiões remotas em rotas para atender demandas específicas de mercado e exportação. Paralelamente, o Código de Trânsito Brasileiro (CTB) e a Lei n.º 13.103/2015 (Lei do Motorista) estabelecem limites de velocidade e períodos obrigatórios de descanso para motoristas, que, somados às condições das rodovias e às pausas durante o trajeto, podem prolongar consideravelmente o tempo de transporte. Esse prolongamento intensifica os efeitos deletérios sobre o metabolismo dos animais, aumentando a privação alimentar e hídrica, a fadiga e a susceptibilidade a enfermidades (WERNER et al., 2012; WERNICK et al., 2014).

Nesse cenário, períodos de até 48 horas no caminhão representam uma condição extrema, porém factível, que configura um desafio fisiológico importante. Essa condição combina privação prolongada de alimento e água com múltiplos fatores estressores, como vibrações, ruídos, variações térmicas, restrição de movimento, mistura de lotes e alterações no espaço social. A ação simultânea e sinérgica desses fatores potencializa o estresse, desencadeando uma resposta neuroendócrina marcada pela ativação do eixo hipotálamo–hipófise–adrenal (HHA), com consequente aumento das concentrações de cortisol, ácidos graxos não esterificados (NEFA) e ureia, além de induzir uma resposta inflamatória sistêmica e oxidativa (MARQUES et

al., 2012; BUCKHAM SPORER et al., 2008; LIPPOLIS et al., 2017).

Essa resposta, promove mobilização das reservas corporais (COOKE et al., 2017) e alterações nos metabólitos séricos (RULE et al., 1985). Tais efeitos ainda estimulam a intensificação da resposta inflamatória e de fase aguda, associada à queda na produtividade e na saúde do rebanho (COOKE et al., 2013; COOKE, 2017; DI FILIPPO et al., 2022). Concomitantemente, a restrição alimentar e hídrica desestabiliza a microbiota ruminal, favorecendo a morte microbiana (MEISKE et al., 1958) e a liberação de endotoxinas, que amplificam a inflamação sistêmica (CARROLL et al., 2009). Nesse contexto, estratégias nutricionais com potencial antioxidante e imunomodulador têm sido investigadas como alternativas promissoras para reduzir os impactos negativos do transporte rodoviário e suas disfunções associadas.

Entre essas, a suplementação com microminerais orgânicos é reconhecida por seus efeitos antioxidantes e imunomoduladores (COOKE, 2017; DANIEL et al., 2020; MORIEL e ARTHINGTON, 2013). Esses compostos apresentam múltiplas vias de atuação: o cromo melhora a sensibilidade à insulina e modula o estresse oxidativo, reduzindo a liberação excessiva de cortisol em situações desafiadoras (REFFETT et al., 1988); o selênio, por sua vez, atua como cofator da glutathione peroxidase, neutralizando radicais livres e fortalecendo a resposta imune humoral (STABEL et al., 1989; LUSEBA, 2005; WEISS, 2005). O zinco integra a estrutura da superóxido dismutase (SOD) e de diversas enzimas, sendo essencial para a manutenção da integridade celular e da resposta imune (GENTHER; HANSEN, 2014; LIPPOLIS et al., 2017).

Associada a esses minerais, a inclusão de leveduras vivas na dieta de ruminantes auxilia na estabilização do pH ruminal, na melhoria da digestibilidade de fibras e na atenuação dos impactos do estresse agudo sobre a fermentação ruminal (AMIN e MAO, 2021; ABREU et al., 2024a). Estudos recentes também apontam que culturas de levedura reduzem a produção de metano e melhoram o equilíbrio redox, reforçando sua aplicabilidade em cenários de desafio fisiológico (YI et al., 2025).

Assim, torna-se necessário aprofundar o conhecimento sobre como essas estratégias modulam o metabolismo e a resposta ao estresse, visando otimizar a recuperação e o desempenho dos animais. Esta revisão de literatura discute os impactos do transporte e as possibilidades de intervenção nutricional com foco na suplementação de microminerais orgânicos e leveduras vivas como aditivos funcionais para bovinos.

2. Revisão de Literatura

2.1. Infraestrutura logística e implicações para a pecuária de corte

No âmbito do sistema agroalimentar global, o Brasil consolidou-se como um dos principais protagonistas na produção de grãos e proteína animal, posição evidenciada pela liderança nas exportações de carne bovina e pela crescente inserção nas cadeias internacionais de commodities (FAO, 2020; ABIEC, 2019). Esse protagonismo foi construído em meio a profundas reconfigurações estruturais e territoriais da agropecuária brasileira ao longo das últimas décadas, com destaque para a bovinocultura de corte, que se firmou como vetor central desse processo (DELGADO, 2012; BUAINAIN et al., 2014). Desde a década de 1950, a expansão de áreas de pastagens constituiu o principal motor do aumento do número de estabelecimentos, sendo que em regiões de ocupação mais antiga, como Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais, verificou-se a substituição de lavouras por pecuária (GARCIA JR., 1989). Já a expansão mais expressiva ocorreu pelo avanço da fronteira agropecuária sobre o Cerrado no Centro-Oeste, processo impulsionado pela modernização tecnológica e pela incorporação de novas áreas aos estabelecimentos rurais (KLINK; MACHADO, 2005; BISCOLA; MALAFAIA, 2025). Esse padrão de crescimento foi condicionado por determinantes socioambientais que moldaram a ocupação do espaço rural, ao mesmo tempo em que integraram a pecuária brasileira às dinâmicas globais de mercado (BISCOLA; MALAFAIA, 2025).

A produção pecuária brasileira também se transformou de forma significativa em paralelo ao setor frigorífico (Tabela 1). Entre 1980 e 2017, o país manteve uma fragmentação fundiária em torno de 5 milhões de estabelecimentos, enquanto o efetivo bovino cresceu de aproximadamente 118 para 215 milhões de cabeças (IBGE, 1980; 2017). Esse crescimento foi acompanhado por uma redistribuição espacial, com maior concentração no Centro-Oeste e expansão para a fronteira Norte (Figura 1). Ao mesmo tempo, os polos de abate se consolidaram em regiões estratégicas (Figura 2), refletindo a modernização e a concentração do setor frigorífico (IBGE, 2019; ABIEC, 2019).

Tabela 1 – Número de estabelecimentos agropecuários, segundo a condição do produtor em relação à terra, e efetivo de bovinos no Brasil (1980–2017).

	1980	1985	1995	2006	2017
Proprietários	3.233.320	3.539.189	3.393.946	3.928.199	4.108.639
Arrend./Parceiros*	891.317	1.006.020	531.804	359.712	783.367
Ocupantes	852.651	1.025.692	700.708	405.219	104.281
Administradores	182.563	230.908	233.304	277.487	-
Total Estabelecimentos	5.159.851	5.801.809	4.859.865	5.175.636	5.073.324
Bovinos	118.085.608	128.041.757	153.058.275	205.686.000	214.899.796
Rebanho Médio/ Estabelecimento	23	22	31	40	42

Fonte: IBGE – SIDRA, Censos Agropecuários 1980, 1985, 1995–1996, 2006 e 2017.

Obs.: Devido às novas terminologias adotadas a partir de 2017, as categorias “concessionário ou assentado”, “comodatário”, “arrendatário” e “parceiro” substituem a categoria anteriormente denominada “arrend./parceiros”. (Distribuição em 2017: concessionário ou assentado: 258.309; arrendatário: 160.124; parceiro: 115.208; comodatário: 249.726).

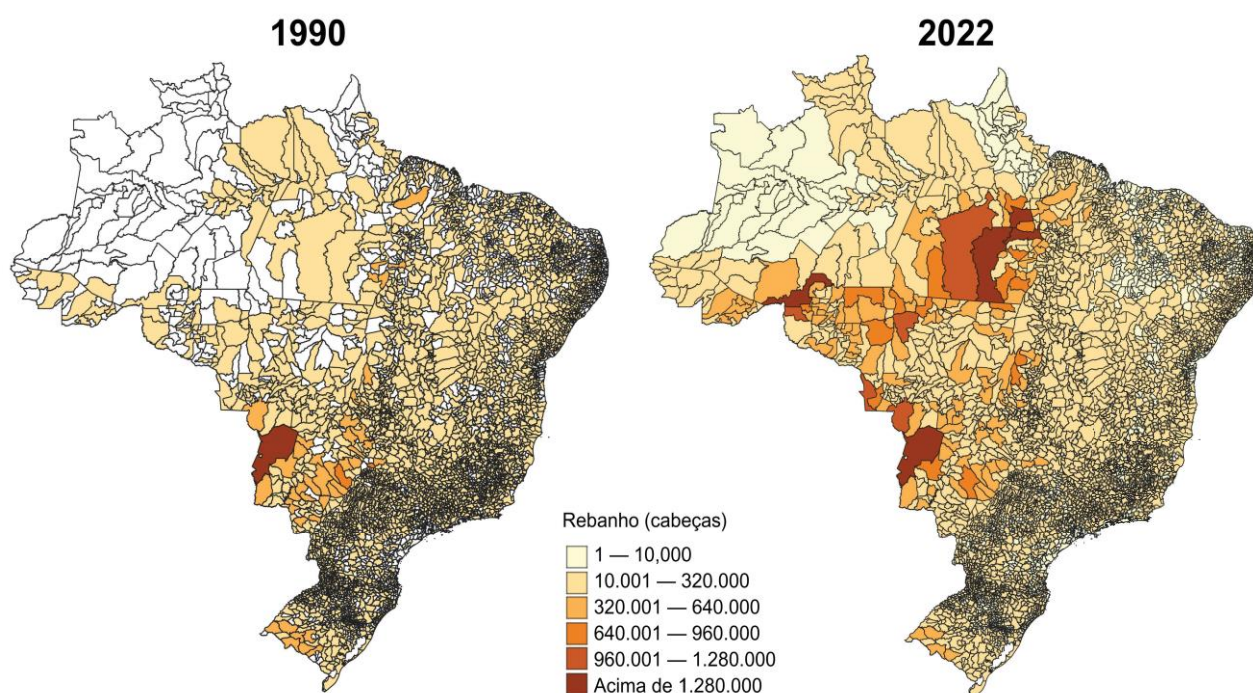


Figura 1. Distribuição do rebanho bovino brasileiro em 1990 e 2022. Fonte: Pereira et al. (2024). Adaptado de IBGE - SIDRA (2023).

A configuração atual da cadeia de carnes no Brasil resulta de um processo histórico de industrialização. A transição das charqueadas/saleiros para os matadouros-frigoríficos consolidou-se nas primeiras décadas do século XX, com a difusão da refrigeração integrando abate, resfriamento/congelamento, desossa/retalho e

aproveitamento de subprodutos. A partir de 1910, estímulos governamentais favoreceram a instalação de plantas modernas e, em 1913, foi inaugurada a Companhia Frigorífica e Pastoril em Barretos (SP), o primeiro frigorífico de capital nacional. Na sequência, a entrada de empresas estrangeiras, como Armour, Swift, Wilson e Anglo/Vestey (1910–1920), consolidou a fase industrial do setor e definiu um padrão locacional das unidades de abate (MAMIGONIAN, 1976; COSTA, 2011).

Esse processo resultou em uma concentração espacial das plantas frigoríficas mais densa nos eixos Centro-Oeste, Sudeste e Sul, e relativamente esparsa nas regiões Norte e Nordeste. Tal configuração impacta diretamente a logística do setor, uma vez que se apoia em uma matriz de transportes desbalanceada, na qual o modal rodoviário responde por 64,7% da movimentação nacional, encarecendo o escoamento da produção e ampliando a exposição dos animais a viagens longas, frequentemente realizadas em rodovias de qualidade heterogênea (CNT, 2021). Ademais, a expansão da agropecuária ocorreu em ritmo mais acelerado do que o investimento em infraestrutura viária, de modo que a rede de estradas não acompanhou as transformações e demandas impostas pela modernização do setor.

No contexto da infraestrutura econômica, o setor de transportes desempenha papel estratégico, ao promover a integração regional por meio da redução de distâncias, da ampliação do acesso a bens e serviços e da diminuição dos custos de movimentação das mercadorias essenciais ao sistema produtivo (ARAÚJO, 2006). A qualidade da malha agrava custos, tempos e riscos. Nesse contexto, a precariedade da infraestrutura rodoviária torna-se um entrave crítico. A Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2023) avaliou mais de 110 mil km de rodovias federais e estaduais, revelando que 67,5% apresentavam problemas de pavimento, 63,4% deficiências de sinalização e 77,1% inadequações na geometria das vias. Esses fatores elevam custos operacionais, aumentam o tempo de viagem e comprometem o bem-estar animal durante o transporte. Em consonância, o Plano Nacional de Logística 2035 reconhece esse descompasso entre organização espacial da oferta e capacidade da rede, recomendando ações intermodais e priorização de investimentos em corredores estratégicos para mitigar gargalos históricos (BRASIL; EPL, 2021).

As projeções do Ministério da Agricultura indicam crescimento contínuo da produção e exportação de carne bovina, com aumento esperado de 1,9% ao ano até 2030, o que reforça a necessidade de infraestrutura eficiente para assegurar competitividade no mercado internacional (MAPA, 2020). Nesse sentido, a logística

de transporte não é apenas um elo operacional, mas um fator determinante da competitividade brasileira.

Na cadeia da carne bovina, os condicionantes logísticos repercutem simultaneamente em custos e em indicadores zootécnicos. Estimativas do ESALQ-LOG apontam que, em 2017, os custos logísticos do agronegócio alcançaram cerca de R\$ 120 bilhões, dos quais R\$ 105 bilhões corresponderam especificamente ao transporte e R\$ 15 bilhões à armazenagem e estoque, evidenciando o peso do deslocamento terrestre na formação de custos setoriais (PÉRA; COSTA; CAIXETA-FILHO, 2018).

Estudos regionais ilustram o desafio de distância entre fazendas e plantas. Fora dos grandes polos do Sudeste, as distâncias fazenda–frigorífico são frequentemente elevadas. Segundo Silva (2008), no Pantanal Sul-Mato-Grossense, caminhoneiros percorrem em média de 272 km por viagem (mín. 6 km; máx. 500 km), com tempo médio de 8 h e casos extremos de até 72 h, em que os animais permaneceram sem acesso a água e alimento durante o trajeto. Silva, Bertoloni e Ribeiro (2016), avaliando 120 bovinos Nelore transportados em diferentes distâncias (75–130 km e 180–250 km) e tipos de caminhão na região de Cuiabá–MT, observou maior frequência e intensidade de hematomas em carcaças provenientes de animais transportados em carretas de dois pisos, além de concentrações mais elevadas de cortisol em viagens mais longas. De forma semelhante, Petroni et al. (2013), ao avaliarem 898 bovinos (24 lotes) em matadouro do centro-oeste paulista, observaram que 98% das carcaças apresentaram lesões, totalizando 3.032 contusões. Os autores relataram um gradiente crescente de contusões por carcaça conforme aumentou a distância fazenda–frigorífico, com médias de 2,53 para <200 km (535/211), 3,37 para 201–400 km (1009/299) e 3,83 para >401 km (1488/388), caracterizando maior dano tecidual em rotas mais longas.

A associação entre maiores distâncias/tempos de viagem e a maior incidência de lesões de carcaça decorre, em parte, das condições do trajeto e da condução veicular: pavimento degradado, vibrações contínuas, manobras bruscas (desvios, frenagens) e irregularidades da via elevam as acelerações impostas aos animais, aumentando a probabilidade de escorregões, perda de apoio e quedas no interior do veículo (WERNICK et al., 2006; WERNICK et al., 2014; DETERS; HANSEN, 2020). Cockram (2007) argumenta que a duração do transporte não deve ser tratada como variável isolada para predição de risco ao bem-estar, mas, na realidade, o determinante

principal é a qualidade da jornada. Quando se realizam triagem zootécnico-sanitária prévia (“fit to travel”), densidade/lotação apropriadas, ventilação e microclima adequados, veículos em bom estado e manejo correto nas etapas de carga, deslocamento e descarga, além de protocolos pré- e pós-transporte, é plausível movimentar determinados grupos de animais por longas distâncias com menor impacto sobre indicadores de estresse, lesões e morbimortalidade.

Esses achados, quando confrontados com a distribuição espacial das plantas (figura 2), reforçam que a combinação de dispersão produtiva, concentração de unidades de abate e gargalos logísticos perpetua ineficiências no escoamento, com impactos econômicos e de bem-estar animal. Em síntese, a expansão produtiva e a concentração frigorífica ocorreram mais rápido do que a modernização da infraestrutura, de modo que o investimento logístico não acompanhou o crescimento da produção, perpetuando gargalos no escoamento e pressionando custos e bem-estar animal. Esse descompasso estrutural configura um oligopsônio, no qual muitos ofertantes (pecuaristas) enfrentam poucos demandantes (frigoríficos) (MOITA; GOLON, 2014).

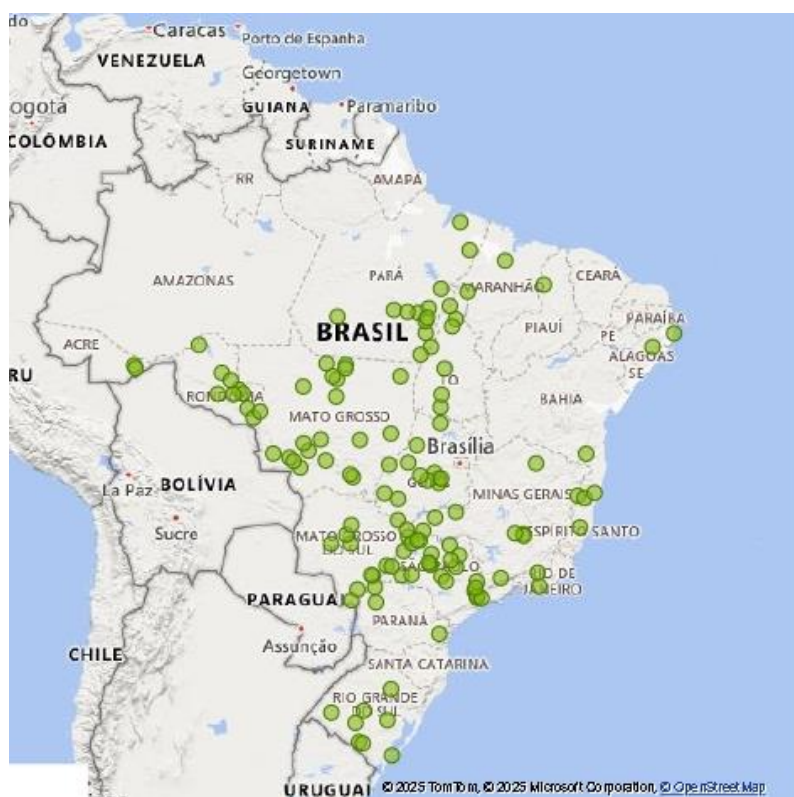


Figura 2 - Distribuição espacial de 160 plantas frigoríficas de bovinos no Brasil. Os pontos verdes indicam unidades de abate georreferenciadas, evidenciando maior concentração nos eixos Centro-Oeste, Sudeste e Sul, com ocorrências pontuais no Norte e Nordeste. Base cartográfica: TomTom/Microsoft/OpenStreetMap, 2025. Fonte: ABIEC/MAPA/Bing

2.2. Transporte Rodoviário Bovino

O deslocamento de bovinos destinados ao abate já foi, durante muito tempo, realizado a pé em extensas jornadas conhecidas como “tropas de gado”. Com a modernização do setor, esse tipo de condução foi substituído pelo transporte rodoviário em caminhões, que garante maior rapidez, mas impõe novos desafios ao bem-estar animal (EMBRAPA, 2012). As condições estruturais e operacionais dos veículos exercem influência direta sobre a resposta fisiológica e comportamental dos animais, sobretudo no período pré-abate, razão pela qual o Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal (RIISPOA) estabelece requisitos mínimos de espaço, ventilação e tempo de jejum (BRASIL, 2000). Paralelamente, iniciativas voltadas à capacitação de motoristas e à adoção de boas práticas de manejo têm contribuído para reduzir contusões, mortalidade e perdas de carcaça durante a viagem (EMBRAPA, 2012).

O transporte rodoviário de bovinos é um estressor agudo multifatorial, envolvendo desafios físicos, térmicos, sociais e comportamentais. Por serem animais gregários, o confinamento e a movimentação podem acentuar conflitos de hierarquia e favorecer respostas de estresse (COCKRAM, 2007). Diferenças raciais e de temperamento também influenciam a reatividade, o que pode favorecer interações negativas durante o manejo, refletindo em maior liberação de catecolaminas e cortisol (FISHER et al., 2010). Além disso, mesmo em curtas distâncias, já foram observadas alterações hematológicas, metabólicas e imunológicas, demonstrando que os efeitos do transporte vão além do comportamento (ZHAO et al., 2021). Cabe destacar que o transporte não se limita apenas ao manejo pré-abate, mas também ocorre em outras situações da cadeia produtiva, como a venda de animais em leilões, a transferência entre propriedades ou o deslocamento para sistemas de recria e engorda.

O transporte rodoviário de bovinos é um evento desafiador, pois combina fatores capazes de intensificar o estresse e aumentar a ocorrência de danos às carcaças, como contusões, fraturas, arranhões, exaustão metabólica, desidratação, estresse térmico e até morte (GREGORY, 1994). Entre esses fatores, destacam-se o tipo de veículo, a densidade de lotação, a distância e duração da viagem, as condições das estradas, a habilidade do motorista e as variações de temperatura, que atuam de forma cumulativa no estresse animal. Esses elementos impactam diretamente o bem-estar e a ocorrência de lesões em carcaças (BRENNECKE et al., 2020) e refletem a

complexidade do sistema rodoviário, que integra infraestrutura, veículos, carga e atores interdependentes (VILLELA; TEDESCO, 2011). Na América do Sul, jornadas superiores a 12–24 horas, geralmente sem fornecimento de água e alimento, estão associadas a maior perda de peso, maior incidência de hematomas e ocorrência de “dark cutting” em bovinos, evidenciando a necessidade de adaptar as recomendações internacionais às condições regionais (GALLO, 2008).

Esse conjunto de fatores interfere diretamente na homeostase, desencadeando alterações metabólicas e imunológicas que se refletem em maior frequência respiratória, alterações na temperatura corporal e mobilização de reservas energéticas (ABREU et al., 2024a; CARROLL et al., 2009). Além dos efeitos imediatos, o manejo inadequado pode comprometer a qualidade da carne por meio de contusões, edemas, variações no pH e alterações na textura e coloração, prejudicando diretamente o valor comercial do produto (GALLO, 2008).

As alterações na carga emocional dos animais, somadas ao esforço físico durante embarque, transporte, desembarque e permanência em currais, afetam o metabolismo post mortem, alterando a taxa de glicólise e o pH muscular. Animais deitados durante a viagem apresentam maior risco de contusões, sendo desejável mantê-los em pé mesmo em percursos longos. Após o desembarque, o estresse é agravado pelo jejum iniciado no transporte e pela mistura com indivíduos desconhecidos e agressivos (BATISTA DE DEUS et al., 1999). O prolongamento da viagem e a ausência de descanso intensificam esses efeitos, sobretudo quando associados à restrição alimentar e hídrica, condição que por si só já compromete a homeostase fisiológica (APPLE et al., 1993).

No contexto brasileiro, o transporte rodoviário de bovinos é frequentemente realizado em percursos de longa distância, consequência direta das dimensões continentais do território e da distribuição heterogênea entre as regiões produtoras e os frigoríficos (VILLELA; TEDESCO, 2011). Nessas condições, não são raras as viagens superiores a 24 horas, sobretudo em áreas remotas ou quando se busca atender a demandas específicas de mercado interno e de exportação (BRENNECKE et al., 2020; GALLO, 2008).

Um aspecto fundamental do transporte rodoviário de bovinos é a regulamentação da jornada de trabalho do motorista, conforme a Lei nº 13.103, de 2 de março de 2015. Esta legislação estabelece que a jornada diária do motorista profissional é de 8 horas, com a possibilidade de prorrogação por horas extras. Além disso, determina que o

motorista não pode dirigir por mais de 5 horas e meia ininterruptas, devendo fazer uma pausa de 30 minutos a cada 6 horas de condução. A lei também assegura um intervalo mínimo de 1 hora para refeição e um período de descanso diário de 11 horas, que pode ser fracionado, sendo que, em viagens longas, o repouso diário pode ser realizado no próprio veículo ou em alojamento (BRASIL, 2015). Dessa forma, as longas distâncias, somadas às pausas obrigatórias previstas na legislação, configuram um gargalo logístico que aumenta o tempo total de transporte dos animais até o destino final.

A matriz de transportes brasileira foi historicamente estruturada com base no modal rodoviário, que se consolidou como principal via de escoamento da produção. No entanto, essa predominância ocorreu sem o devido planejamento para atender ao crescimento do agronegócio, resultando em sobrecarga das rodovias, fragmentação do sistema e elevação dos custos logísticos. Essas limitações comprometem a eficiência operacional e a competitividade dos produtos no mercado interno e externo (VILLELA; TEDESCO, 2011; FALCÃO, 2013).

O percurso total até o frigorífico, considerando possíveis desembarques, reembarques e paradas intermediárias, define a distância efetiva do transporte e guarda relação direta com as perdas de qualidade e desempenho (COCKRAM, 2007). Não obstante, os prejuízos não se limitam aos animais destinados imediatamente ao abate. Aqueles transportados para sistemas de recria ou terminação e posteriormente retornados ao pasto também apresentam queda no desempenho, atrasos no ganho de peso e maior susceptibilidade a enfermidades, ampliando os impactos econômicos e zootécnicos do transporte inadequado (COLE et al., 1986; ARTHINGTON, 2003; COOKE et al., 2017).

Embora o principal impacto esteja relacionado à fisiologia e ao bem-estar dos bovinos, não se pode negligenciar que o estresse gerado nessa etapa também repercute de forma direta na qualidade da carne. A perda de peso durante o transporte, conhecida como *shrink*, representa não apenas um reflexo fisiológico da desidratação e da mobilização de reservas energéticas, mas também um indicador econômico imediato do nível de estresse sofrido pelos animais (MARQUES et al., 2012; WERNER et al., 2012). Além disso, a intensidade do *shrink* associa-se a distúrbios metabólicos e imunológicos que comprometem a recuperação pós-transporte, aumentando o risco de doenças respiratórias e enterites em sistemas intensivos de engorda (CARROLL; FORSBERG, 2007; COOKE, 2017).

2.2.1 Planejamento para o transporte

O planejamento adequado do transporte rodoviário de bovinos envolve etapas fundamentais para reduzir o estresse fisiológico e minimizar perdas produtivas. Entre os principais aspectos, destacam-se a formação de lotes homogêneos, a verificação da documentação sanitária, a escolha de rotas adequadas e a checagem das condições do veículo de transporte (MAPA, 2017; GALLO, 2008). A organização prévia dessas medidas possibilita maior segurança e eficiência logística, contribuindo para a preservação do bem-estar animal e para a qualidade final da carne (EMBRAPA, 2012).

Além desses cuidados, fatores estruturais como a densidade adequada de lotação, a ventilação do compartimento e o uso de divisórias internas devem ser considerados no planejamento, pois reduzem a ocorrência de quedas, contusões e estresse térmico durante a viagem (EFSA, 2022; OIE, 2019). Essas medidas preventivas asseguram condições mínimas de bem-estar, especialmente em percursos longos, quando os animais ficam mais suscetíveis ao estresse de transporte (VILLELA; TEDESCO, 2011).

No Brasil, a regulamentação do transporte de animais vivos é de responsabilidade do Conselho Nacional de Trânsito (Contran) e do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (BRASIL, 2020a; BRASIL, 2020b). Para o transporte internacional, os animais são conduzidos inicialmente aos Estabelecimentos de Pré-Embarque (EPE), onde médicos-veterinários do MAPA verificam o atendimento aos requisitos sanitários do país importador. Nessa etapa, também é emitida a Autorização para Emissão do Certificado Zoossanitário Internacional (ACZI). Posteriormente, os caminhões são lacrados e seguem para os portos, onde ocorre a pesagem e a transferência da carga para os navios, sob supervisão oficial (MAPA, 2017).

O transporte de carga viva requer protocolos rigorosos, pois envolve seres vivos que necessitam de condições adequadas para manter seu bem-estar. A Resolução nº 791/2020 do CONTRAN consolidou normas específicas, trazendo diretrizes sobre procedimentos e responsabilidades (BRASIL, 2020a). Entretanto, lacunas na fiscalização, na padronização da frota e na capacitação dos motoristas ainda limitam sua efetividade, tornando o planejamento prévio e o manejo adequado não apenas uma obrigação legal, mas uma condição essencial para eficiência logística (MAPA, 2017; BRASIL, 2020b).

2.2.2 Compartimento de carga e densidade animal

O compartimento de carga representa um dos pontos centrais para o bem-estar de bovinos durante o transporte rodoviário. O dimensionamento adequado do número de animais por veículo é fundamental para evitar superlotação, reduzir o risco de quedas e contusões, além de permitir ventilação e conforto térmico adequados. A densidade animal deve ser calculada levando-se em conta peso, idade, raça e condições climáticas da região do transporte (EFSA, 2022; OIE, 2019).

Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2017), o espaço mínimo recomendado por animal varia entre 0,95 e 1,20 m² para bovinos adultos, valores que podem ser ajustados de acordo com a categoria animal e as condições de viagem. Diretrizes internacionais reforçam essa abordagem: a Organização Mundial de Saúde Animal (OIE, 2019) e a União Europeia (Regulamento CE n.º 1/2005) reforçam que a densidade deve garantir que todos os animais possam permanecer em estação natural, sem sobreposição de corpos e com acesso ao fluxo de ar dentro do compartimento.

A ventilação no transporte de bovinos é crucial, pois veículos fechados favorecem acúmulo de calor e gases, aumentando o risco de estresse térmico e mortalidade. Por isso, recomenda-se o uso de aberturas laterais, iluminação, pisos antiderrapantes e divisórias internas para reduzir quedas e deslocamentos (EFSA, 2022). Silva et al. (2016) verificaram que o design dos veículos, em função da carroceria e da compartimentação, pode elevar o cortisol e a frequência de hematomas, confirmando o impacto direto do projeto do caminhão sobre o bem-estar e a qualidade da carcaça.

No Brasil, as dimensões dos veículos de transporte de bovinos são regulamentadas por órgãos como o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) e o próprio MAPA, visando à segurança viária e ao bem-estar animal (BRASIL, 2015; CONTRAN, 2023). Além das dimensões, a legislação brasileira também estabelece normas sobre densidade de lotação, condições de bem-estar animal, documentação necessária (como a Guia de Trânsito Animal – GTA) e condições do veículo (ventilação, piso antiderrapante etc.) (MAPA, 2017).

Independentemente da marca, modelo ou tipo de carroceria, os caminhões são classificados e regulamentados no Brasil com base em três critérios principais: número de eixos, capacidade de carga e comprimento total (CONTRAN, 2023).

Tabela 3: Classificação de caminhões por eixos, capacidade de carga e comprimento

Critério	Tipo de Caminhão/Configuração	Detalhes/Capacidade/Comprimento
Número de Eixos⁽¹⁾	Caminhão Simples (2 eixos)	Eixo dianteiro e traseiro. PBT limitado.
	Caminhão Toco (2 eixos)	Eixo simples dianteiro, eixo duplo traseiro. PBT maior que o simples.
	Caminhão Truck (3 eixos)	Eixo simples dianteiro, dois eixos traseiros (um de tração, um auxiliar). Maior capacidade de carga e PBT.
	Carretas (Conjuntos articulados)	Soma dos eixos do cavalo mecânico e semirreboque(s). Várias configurações (2, 3, 7, 9 eixos)
Capacidade de Carga ⁽²⁾	Peso Bruto Total (PBT)	Peso máximo do caminhão (tara + carga útil).
	Toco	PBT de até 16 toneladas.
	Truck	PBT de até 23 toneladas.
	Carretas (2 e 3 eixos)	PBT de até 33 e 41,5 toneladas, respectivamente.
	Carreta 3 eixos (cavalo de 3 eixos)	PBT de até 48,5 toneladas.
	Romeu e Julieta, Bitrem, Tritrem, Rodotrem	PBT varia (Romeu e Julieta até 43 t, bitrem até 57t, Tritrem e rodotrem até 74t).
Comprimento Máximo Total ⁽³⁾	Veículos não articulados (Trucks)	Máximo de 14,00 metros.
	Veículos articulados (2 unidades)	Até 18,15m (comum) ou 19,30m (específico sem AET).
	Veículos articulados (>2 unidades)	Até 30 metros (exige AET e rotas específicas).

⁽¹⁾O número de eixos define a capacidade de carga e o Peso Bruto Total (PBT) permitido, pois permite melhor distribuição do peso. ⁽²⁾ O PBT corresponde ao peso máximo do veículo, somando tara e carga útil, variando conforme a configuração. ⁽³⁾O comprimento máximo dos veículos e combinações é regulamentado para segurança viária, podendo exigir Autorização Especial de Trânsito (AET) em casos de bitrens e rodotrens. Altura máxima de 4,70 m (dispensada de AET, conforme Resolução CONTRAN nº 791/2020) e largura padrão de 2,60 m (Resolução CONTRAN nº 210/2006).

Os veículos de transporte de animais vivos (VTAV) utilizados no transporte rodoviário de bovinos no Brasil apresentam diferentes configurações estruturais, que podem variar em altura, número de pisos, compartimentos internos e sistemas de ventilação. Essas características influenciam de forma direta o bem-estar dos animais durante o deslocamento, além de impactarem a eficiência logística.

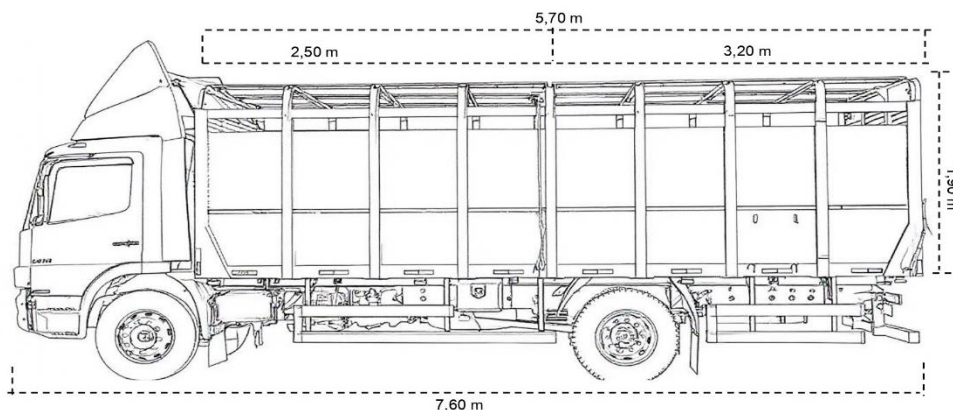


Figura 3: Caminhão toco, classificado como veículo de carga com dois eixos (um dianteiro simples e um traseiro duplo – 4x2). Sua capacidade é de até 6 t, e tem PTB de até 16 toneladas. Seu comprimento varia em média, de 7 a 14 metros, dependendo do modelo e da aplicação. Indicado para percursos de curta e média distância.

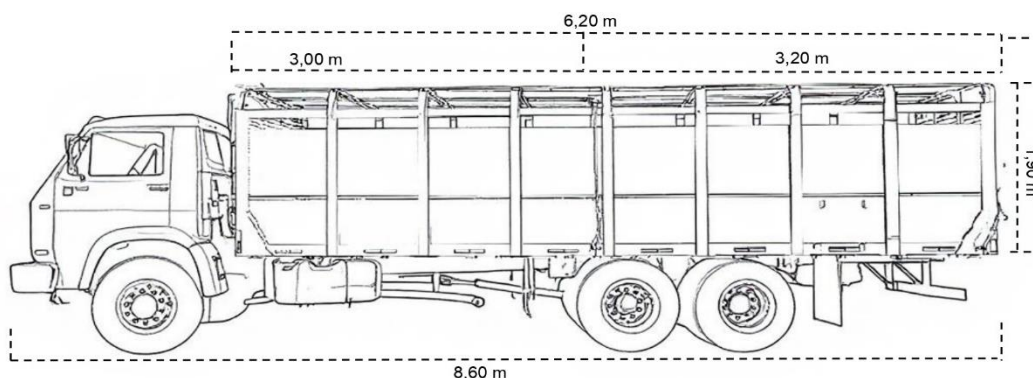


Figura 4. Caminhão truck, classificado como veículo de carga com três eixos (um dianteiro simples e dois traseiros). Possui Peso Bruto Total (PBT) de até 23 toneladas e comprimento variando, em média, de 12 a 14 metros. Indicado para o transporte de cargas mais pesadas e volumosas em médias distâncias.

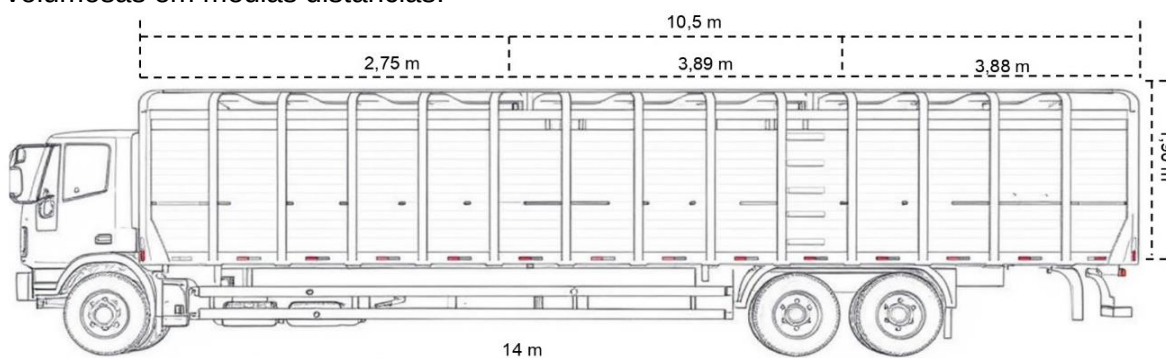


Figura 5: Caminhão truck alongado, possui chassi estendido para melhor distribuição de peso, também com três eixos. Sua capacidade é de 10 a 14 t, possui um PBT de até 23 toneladas e comprimento dentro do limite de 14 m para veículos não articulados. Indicado para transporte de animais/carga volumosa em médias distâncias.

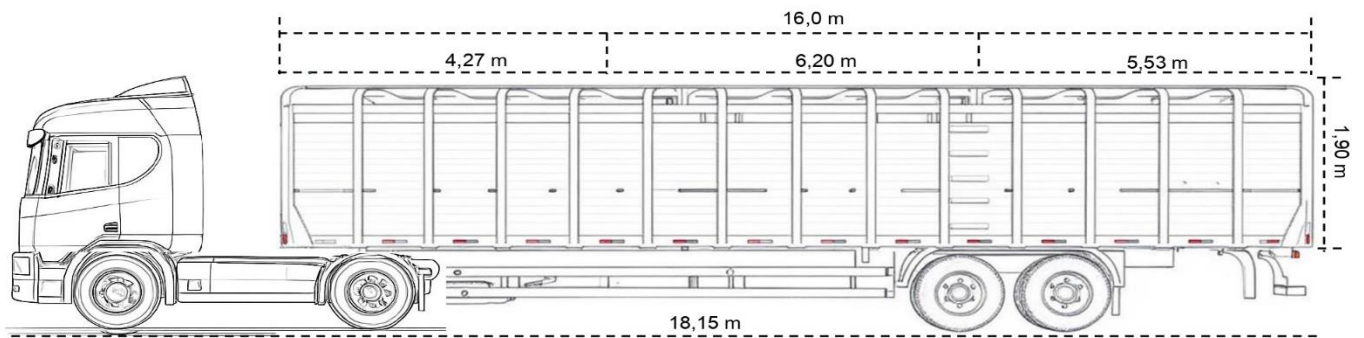


Figura 6: Carreta Articulada (Cavalo Mecânico + Semirreboque): Esta imagem mostra um veículo articulado, composto por um cavalo mecânico de 2 eixos e um semirreboque de 2 eixos. O comprimento total pode chegar a 18,15 metros e o Peso Bruto Total (PBT) varia conforme a configuração, sendo permitido no máximo a 33 toneladas. Indicado para transporte de animais/carga volumosa em médias distâncias.

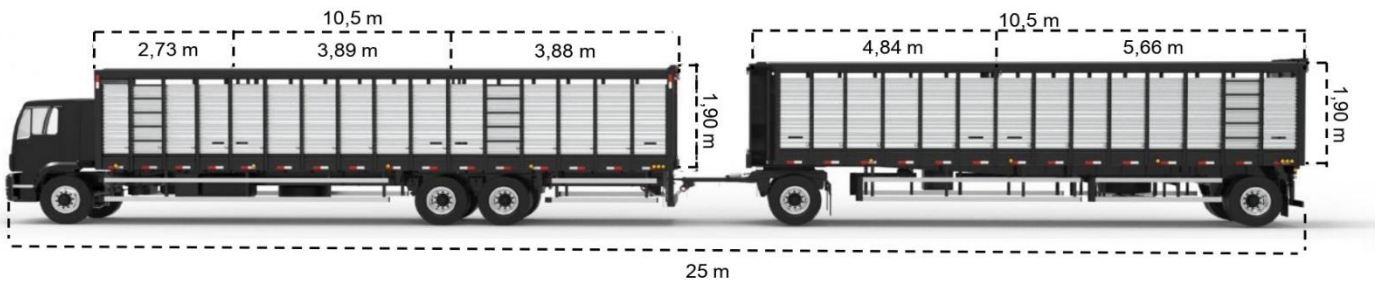


Figura 7: Caminhão boiadeiro Romeu e Julieta boiadeira (caminhão rígido + reboque com barra de tração). Conjunto com 5 eixos (3 no caminhão e 2 no reboque). O PBT do conjunto varia conforme eixos e distribuição de peso; sendo o conjunto projetado para um Peso Bruto Total Combinado (PBTC) de até 43 toneladas. O comprimento total pode atingir até 25 m (exigindo observância das condições regulamentares e, quando aplicável, AET). Indicado para longas distâncias, sendo uma configuração eficiente para o transporte de grandes volumes.

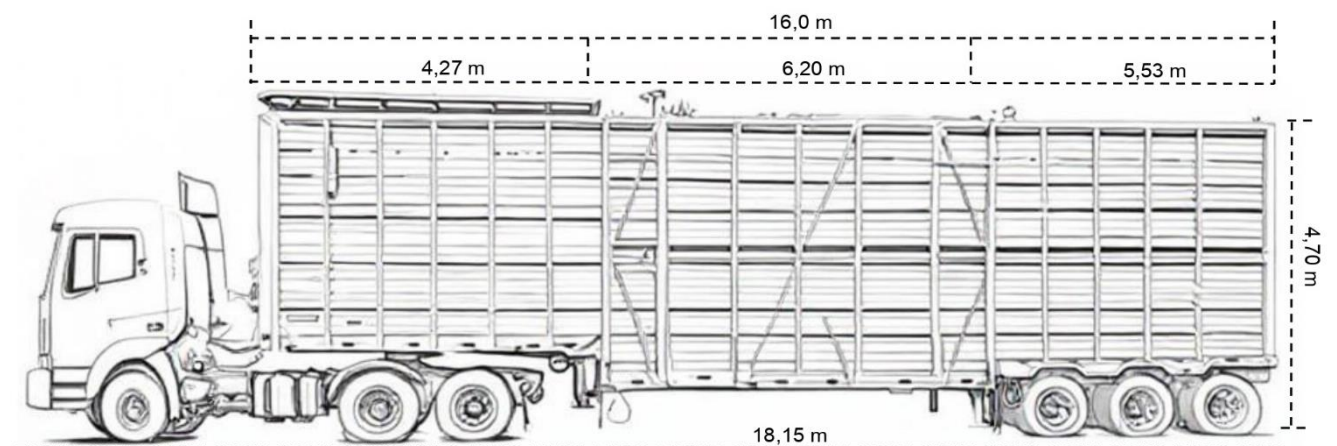


Figura 8: Carreta 3 Eixos (Cavalo Mecânico + Semirreboque Boiadeiro). VTAV articulado de grande porte, formado por um cavalo mecânico trucado (3 eixos no total) e um semirreboque boiadeiro com 3 eixos, totalizando 6 eixos. A carroceria de dois andares é projetada para o transporte de animais vivos, otimizando a capacidade em longas distâncias (otimização de custo e logística). Esta configuração permite um Peso Bruto Total Combinado (PBTC) de até 48,5 toneladas e seu comprimento total pode chegar a 18,15 metros.

A densidade de carga animal durante o transporte constitui fator determinante para o conforto e para a ocorrência de contusões e lesões (TARRANT; GRANDIN, 1993). No contexto brasileiro, caracterizado por mão de obra muitas vezes não especializada e por rodovias de qualidade heterogênea, densidades mais elevadas podem, paradoxalmente, favorecer maior estabilidade no interior do veículo, reduzindo quedas e, conseqüentemente, problemas relacionados ao bem-estar e à qualidade da carne (VILLELA; TEDESCO, 2011; DETERS; HANSEN, 2020). Além disso, a densidade ideal é influenciada por fatores como peso corporal, tipo de carroceria utilizada e exigências legais (MAPA, 2022).

Os efeitos do transporte prolongado tendem a ser mais acentuados em categorias jovens. Bezerros desmamados submetidos a longas viagens para recria ou engorda apresentam desempenho reduzido e maior incidência de enfermidades no destino (GRANDIN; GALLO, 2007). Corroborando esses achados, White et al. (2009) observaram, após deslocamentos de aproximadamente 1.000 km, menor morbidade nos primeiros 40 a 60 dias e menor necessidade de tratamentos sanitários em bezerros transportados em compartimentos com até 15 animais, quando comparados àqueles movimentados em grupos de 16 a 30 cabeças.

Tabela 4: Recomendações para densidade máxima de carga viva em veículos de transporte terrestre de bovinos e bubalinos (MAPA, 2022).

Espécie	Peso (kg)	Espaço (m ² /cabeça)	Nº de animais/m ²
Bovinos/Bubalinos	100	0.31	3
	150	0.42	2
	200	0.53	2
	250	0.77	1
	300	0.86	1
	350	0.98	1
	400	1.05	1
	450	1.13	1
	500	1.23	1
	550	1.34	1
	≥600	1.63	Máximo de 2 animais a cada 3m ²

2.3 Impactos nutricionais e produtivos do transporte rodoviário em bovinos

O transporte rodoviário representa um desafio não apenas ao bem-estar animal, mas também ao metabolismo energético e proteico dos bovinos. A combinação entre jejum, esforço físico e estressores ambientais gera desequilíbrios homeostáticos que podem reduzir a eficiência digestiva e produtiva, com efeitos que se estendem além do período imediato da viagem (COCKRAM, 2007; CARROLL et al., 2009; COOKE, 2017). Nesse contexto, compreender os mecanismos fisiológicos desencadeados pelo transporte é essencial para identificar pontos críticos de manejo e direcionar estratégias nutricionais que minimizem perdas zootécnicas e econômicas.

Marques et al. (2012) relataram que bovinos transportados por 24 horas a uma distância de 1.200 km apresentaram perda média de 9,6% do peso corporal, valor superior ao observado em animais submetidos à privação de alimento e água pelo mesmo período (8,1%). Esse fenômeno, conhecido como *shrink*, é atribuído principalmente à perda de fluídos corporais, urina, fezes e conteúdo gastrointestinal, intensificada pelos estímulos físicos e ambientais inerentes ao transporte. Estudos clássicos (WARRISS, 1990; KNOWLES et al., 1999) demonstram que a magnitude do *shrink* é altamente variável, podendo oscilar entre 3% e 11% do peso vivo nas primeiras 24 horas de transporte, dependendo da duração, das condições de manejo e do estado fisiológico dos animais. Essas perdas decorrem sobretudo do esvaziamento gastrintestinal, da redução do peso do fígado e da maior fluidez do conteúdo ruminal, frequentemente associadas ao aumento da osmolaridade plasmática e da ureia, indicativos de desidratação. Além disso, verificou-se que o tempo de transporte exerce maior influência que a distância percorrida, e que a recuperação do peso corporal pode demandar até cinco dias após a realimentação e reidratação. Schaefer et al. (1997) reforçam que parte substancial dessas perdas decorre também de tecidos corporais e líquidos intersticiais, e não apenas do enchimento gastrintestinal, o que acentua os impactos produtivos. Em estudo com novilhas Angus × Hereford submetidas a 24 h de privação de alimento e/ou água, Marques et al. (2018) observaram perda de aproximadamente 5,7% do peso vivo, com recuperação parcial do consumo e do desempenho ao longo da primeira semana após a realimentação e reidratação; os efeitos agudos incluíram elevação transitória de cortisol, NEFA e proteínas de fase aguda.

O transporte rodoviário desencadeia também uma resposta imunometabólica

significativa, marcada pela liberação de lipopolissacarídeos (LPS) resultante da lise bacteriana no ambiente ruminal. Esses LPS atuam como potentes ativadores do sistema imune inato, estimulando a síntese de proteínas inflamatórias de fase aguda, como haptoglobina e amiloide A sérica (BUCKHAM SPORER et al., 2008; DETERS e HANSEN, 2020). Esse processo inflamatório está fisiologicamente associado ao estresse oxidativo, uma vez que a ativação de leucócitos e o aumento da atividade mitocondrial durante a resposta imune favorecem a produção de espécies reativas de oxigênio (ERO). A liberação exacerbada dessas moléculas pode comprometer a integridade de lipídios de membrana, proteínas funcionais e material genético, intensificando os efeitos deletérios do estresse sistêmico (COOKE, 2017; DETERS e HANSEN, 2020).

Fisher et al. (2010) classificam os riscos do transporte em três grandes categorias: (1) estresse psicológico, relacionado ao embarque, manuseio e novidade do ambiente; (2) desafios fisiológicos, como privação de alimento e água, desidratação, fadiga e mobilização energética; e (3) riscos térmicos e físicos, como calor, frio, quedas, escorregões e lesões decorrentes de densidade inadequada. Esses autores ainda destacam que animais de temperamento mais dócil sofrem menor perda de peso e recuperam-se mais rapidamente em comparação a animais mais reativos.

O estresse associado ao transporte compromete também a função ruminal, interferindo na fermentação microbiana. Durante a privação alimentar que acompanha o transporte, observa-se redução na produção de ácidos graxos voláteis (AGV) e elevação do pH ruminal, reflexo da menor disponibilidade de substratos fermentáveis e da consequente desaceleração da atividade microbiana. Essa interrupção temporária da fermentação afeta a eficiência digestiva e pode comprometer o desempenho produtivo nas fases subsequentes (BUCKHAM SPORER et al., 2008; ABREU et al., 2024a). Nesse sentido, Schaefer et al. (1997) ressaltam que os efeitos do jejum são potencializados quando combinados ao transporte, representando até 68% da perda transitória de peso observada nos animais. Além disso, foram observadas alterações hematológicas como neutrofilia e linfopenia, que resultam em imunossupressão, e desequilíbrios ácido-básicos e eletrolíticos, incluindo queda do pH sanguíneo e da glicose, acompanhadas por aumento de cloretos, hemoglobina e osmolalidade urinária. Tais distúrbios evidenciam que os animais permanecem em estado de desequilíbrio metabólico mesmo após o término da viagem.

No metabolismo do nitrogênio, o transporte rodoviário pode promover maior

mobilização de proteínas corporais, especialmente musculares, como resposta adaptativa ao estresse. Esse processo resulta em aumento da desaminação hepática de aminoácidos, com consequente elevação das concentrações plasmáticas de ureia e comprometimento do balanço nitrogenado. Estudos indicam que bovinos submetidos a estresse nutricional ou ao transporte prolongado apresentam aumento significativo da ureia plasmática, acompanhado de redução nos níveis de insulina, o que reflete um estado de resistência periférica à insulina e a priorização do catabolismo proteico como fonte alternativa de energia (RULE et al., 1985; COLE et al., 1986). Schaefer et al. (1997) acrescentam que a depleção de glicogênio muscular durante o transporte contribui para a maior incidência de carne escura (*dark, firm and dry beef – DFD*), associada ao pH elevado e à menor vida útil da carne.

A recuperação fisiológica de bovinos após o transporte rodoviário pode ser lenta e incompleta, mesmo com a retomada imediata da alimentação. Marques et al. (2012) demonstraram que bezerros transportados por 24 horas apresentaram ganho médio diário (GMD) de 0,91 kg/dia nos 28 dias subsequentes, enquanto os animais não transportados atingiram 1,27 kg/dia, ou seja, um desempenho 39,6% superior. Além disso, os bovinos transportados exibiram concentrações plasmáticas significativamente elevadas de haptoglobina e ceruloplasmina, indicando a presença de inflamação sistêmica persistente, mesmo após a reidratação e realimentação. Esses efeitos residuais comprometem a eficiência da recria e podem limitar o desempenho produtivo em sistemas que demandam rápida recuperação pós-estresse.

Cooke (2017) e Lippolis et al. (2017) ressaltam que o transporte compromete a integridade da mucosa intestinal, o metabolismo energético e a imunidade inata, o que justifica o uso de estratégias nutricionais antioxidantes e anti-inflamatórias. A suplementação com minerais orgânicos de alta biodisponibilidade, associada a aditivos funcionais, tem se mostrado promissora para mitigar os efeitos do transporte e favorecer a recuperação fisiológica e produtiva (MORIEL; ARTHINGTON, 2013; SGOIFO ROSSI et al., 2017; ABREU et al., 2024b). Ainda assim, sua efetividade prática depende do status mineral inicial e das condições de manejo, podendo gerar benefícios imunometabólicos sem necessariamente refletir em desempenho imediato (GENTHER-SCHROEDER; HANSEN, 2015).

2.4 Respostas fisiológicas ao estresse

Associado ao estresse (e.g., desmame, transporte e consequente privação de água e alimentos, interrupção abrupta da ordenha em vacas de leite etc.), existem repostas neuroendócrinas para tentar lidar com o evento estressor. De maneira geral, o corpo responde ao estresse ativando dois eixos hormonais principais. Para estresses agudos (i.e., curto prazo), a ativação do eixo simpático-adrenal-medular inicia a liberação de catecolaminas (adrenalina e noreadrenalina), aumentando a frequência cardíaca, a pressão arterial e a disponibilidade de glicose por meio da estimulação da glicogenólise hepática (HIMMS-HAGEN, 1967).

Por outro lado, em situações de estresse prolongado, predomina a ativação do eixo hipotálamo–hipófise–adrenal. Nesse mecanismo, o hormônio liberador de corticotrofina e a vasopressina liberados pelo hipotálamo estimulam a hipófise a secretar hormônio adrenocorticotrófico, o qual induz a secreção de glicocorticoides (principalmente cortisol em mamíferos) do córtex adrenal. Os glicocorticóides (e.g., cortisol) estimulam a lipólise e a proteólise, promovendo a liberação de glicerol, ácidos graxos e aminoácidos do músculo que são direcionados ao fígado para síntese de enzimas e gliconeogênese (BAXTER; FORSHAM, 1972).

Esse aumento da disponibilidade de substratos energéticos, associado ao metabolismo aeróbico, intensifica a geração de espécies reativas de oxigênio (ERO) no metabolismo mitocondrial, em razão do maior fluxo de elétrons e do vazamento destes para o oxigênio molecular (MURPHY et al. 2009). Sorensen et al. (2006) observaram efeitos prejudiciais do jejum alimentar e hídrico, em que as mitocôndrias do fígado de ratos em jejum por 72 h exibiram aumento no vazamento de elétrons e geração de radicais livres no complexo III da cadeia de transporte de elétrons, o que resultou em maior dano oxidativo.

A oxidação no organismo exerce funções essenciais à vida aeróbica, estando envolvida na geração de energia, fagocitose, sinalização intercelular, regulação de processos celulares como a apoptose, e na produção de substâncias biológicas relevantes (SCHIEBER e CHANDEL, 2014). Contudo, os radicais livres podem ser formados por desequilíbrio, ou seja, excesso relativo de radicais livres em detrimento dos antioxidantes, constituindo o estresse oxidativo (EO) (BARREIROS et al., 2006). O EO pode ser benéfico nos casos de infecção, quando ocorre produção de radicais livres por células fagocitárias para “matar” microrganismos invasores. Porém, torna-

se prejudicial quando a inflamação atinge o estágio sistêmico e a ausência do controle da produção dos radicais livres pode causar lesões distantes do seu ponto de origem, configurando um processo deletério.

O EO está associado à peroxidação lipídica de membranas celulares, além de causar lesões estruturais em proteínas, carboidratos, DNA e enzimas (BARREIROS et al., 2006). Esse desequilíbrio redox compromete a integridade funcional de macromoléculas essenciais, afetando diretamente o metabolismo celular. Adicionalmente, há relatos de que o EO prejudica a funcionalidade de diferentes populações de células imunocompetentes, reduzindo a eficiência da resposta imune e aumentando a suscetibilidade dos animais a infecções e doenças (SORDILLO e AITKEN, 2009). Consequentemente, é plausível que o estresse oxidativo esteja envolvido na fisiopatologia de diversas condições que afetam o desempenho e a saúde do gado, como doenças inflamatórias, distúrbios metabólicos e disfunções reprodutivas (ARMSTRONG, 2010).

Outro ponto importante é que o EO representa um custo energético elevado para o organismo, uma vez que a regeneração ou degradação de biomoléculas oxidativamente danificadas exige consumo considerável de ATP (BOTTJE, 2019). Nesse sentido, Bottje (2019) demonstrou uma associação negativa entre o estresse oxidativo e a eficiência alimentar em bovinos, indicando que animais sob maior carga oxidativa tendem a apresentar menor conversão alimentar, possivelmente em função da alocação de energia para mecanismos de defesa e reparo oxidativo.

No controle do equilíbrio redox os antioxidantes enzimáticos, como a superóxido dismutase (SOD) e a glutathione peroxidase (GSH-Px), representam os principais componentes enzimáticos antioxidante na proteção das células contra o aumento de radicais livres (McCORD; FRIDOVICH, 1978). A SOD catalisa a partição do radical superóxido (O_2^-) em peróxido de hidrogênio, que é posteriormente reduzido a água pela enzima GSH-Px. Em ruminantes, uma alta atividade de SOD no dia do parto tem sido associada a um maior grau de EO devido a uma menor capacidade antioxidante (BERNABUCCI et al., 2005). A atividade da enzima GSH-Px depende da concentração corporal de selênio. Além de servir como antioxidante corporal, o selênio é necessário para a manutenção de outras funções biológicas relevantes, como função imunológica, metabolismo dos hormônios tireoidianos e reprodução (SORDILLO, 2013).

São vários os marcadores de estresse oxidativo e estão disponíveis em grande

variedade de fluidos fisiológicos, mas os mais investigados são o malondialdeído (MDA), catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD), glutathione reduzida (GSH) óxido nítrico (NO) (SHONO et al. 2020; NOGUEIRA et al. 2021). Demonstrou-se que tanto o cortisol quanto o MDA em bezerros aumentam após serem transportados por 2 h, sendo que o cortisol atingiu o pico no dia 1 e retornou ao valor basal no dia 16 após o trânsito, e o MDA atingiu o pico no dia 3 e retornou ao valor basal no dia 9 após o trânsito (WERNICKI et al. 2006).

A privação dietética também pode causar morte na microbiota ruminal (MEISKE et al., 1958). Assim, há liberação de endotoxinas (e.g., lipopolissacarídeos de membranas [LPS]), que quando chegam na corrente sanguínea são reconhecidas pelas células de defesa, que por sua vez, liberam citocinas próinflamatórias (interleucina [IL] 6, IL-1 e fator de necrose tumoral alfa [TNF α]) e estimulam a produção de proteínas de fase aguda (CARROLL et al., 2009). Uma redução no consumo de alimentos pode ocorrer durante reações inflamatórias agudas e crônicas, pois as citocinas pró-inflamatórias podem afetar o sistema nervoso central e endócrino, perturbando a função gastrointestinal (LIPPOLIS et al., 2017). De fato, os animais podem reduzir o consumo voluntário após a chegada a um novo ambiente após o transporte (DETERS; HANSEN, 2020).

De modo geral, a inflamação é iniciada pelo reconhecimento de macrófagos por patógenos. Os macrófagos então recrutam outras células imunes fagocíticas através da secreção de quimiocinas e citocinas (GRIFFIN et al., 2012). Após a ativação dos fagócitos, a formação do complexo NADPH oxidase na membrana celular é estimulada (NAUSEEF, 2004) que, por sua vez, utiliza um elétron do NADPH intracelular para reduzir o O₂ extracelular em O₂⁻ (BABIOR et al., 1973). Como as espécies reativas ao oxigênio (ERO) são produtos e estimuladores de processos inflamatórios, um ciclo de feedback deletério pode exacerbar condições de inflamação e estresse oxidativo, amplificando o desequilíbrio metabólico.

A Figura 9 ilustra as principais vias fisiológicas de produção de ERO induzidas por um evento estressor que é o transporte animal, envolvendo estresse psicológico, privação alimentar e esforço físico. Esses fatores convergem para o aumento da biossíntese de eicosanoides, inflamação e ativação mitocondrial, resultando na liberação de radicais livres que alimentam um ciclo inflamatório deletério.

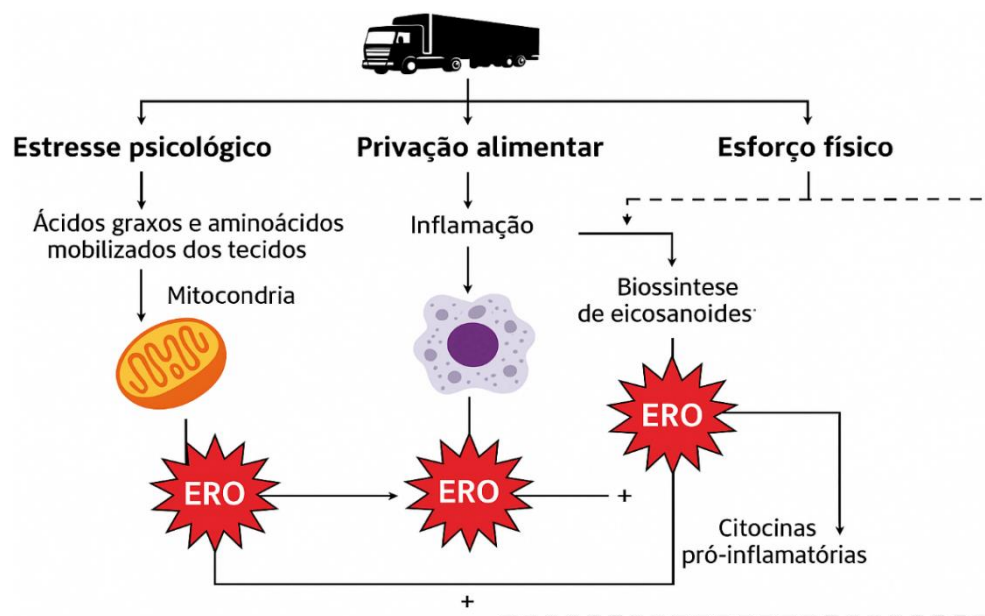


Figura 9. Fontes potenciais de produção de espécies reativas ao oxigênio (ERO) induzidas pelo transporte, privação alimentar e estresse físico em bovinos. Adaptado de Deters & Hansen (2020).

De maneira geral, o estresse metabólico em bovinos, mediado pelo estresse físico (e.g., privação de alimento e água durante o transporte rodoviário) é caracterizado por disfunção imunológica e inflamatória e EO. Considera-se esses três processos intrinsecamente ligados (Figura 2). Representando a tríade do estresse metabólico, destacando as interações entre estresse oxidativo, mobilização de ácidos graxos não esterificados (AGNEs) e desregulação imunológica. Evidencia-se como o TNF- α e o β -hidroxibutirato (BHB), participam do processo, exacerbando a lipólise e o desequilíbrio redox, com consequente impacto negativo sobre o consumo alimentar e a homeostase dos bovinos em sistemas intensivos (ABUELO et al., 2019).

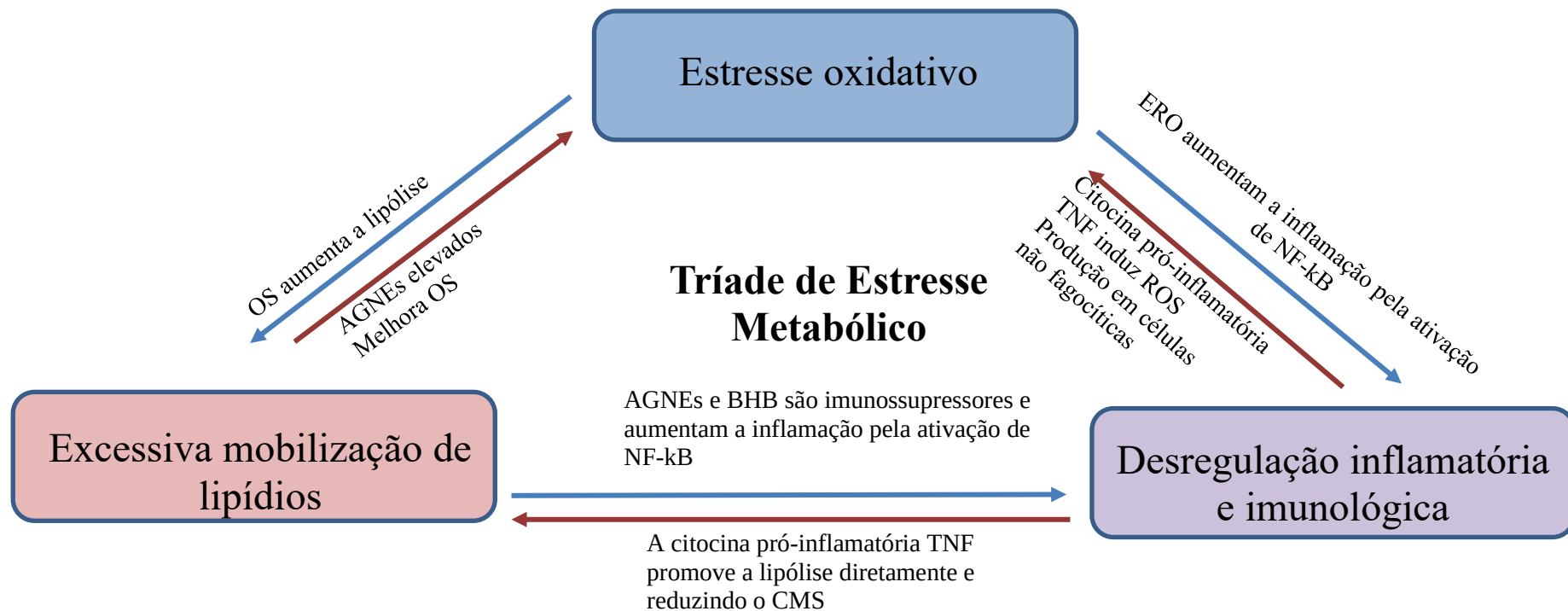


Figura 10. Representação esquemática das relações intrínsecas entre os componentes da tríade do estresse metabólico (Adaptado de Abuelo et al. 2019).

2.5 Nutrição Funcional de Bovinos: Aplicações de Cromo, Selênio, zinco e associação a Leveduras Vivas

A intensificação dos sistemas de produção expõe os bovinos a múltiplos estressores fisiológicos, nutricionais e ambientais, sobretudo em fases críticas como desmame, transporte e adaptação ao confinamento. Esses desafios comprometem a homeostase e desencadeiam alterações hormonais, inflamatórias e metabólicas que reduzem o desempenho, aumentam a imunossupressão e aumentam a susceptibilidade a enfermidades (GENTHER; HANSEN, 2014; CARROLL et al., 2009).

Nesse cenário, a nutrição funcional surge como alternativa para atenuar tais efeitos, utilizando nutrientes capazes de modular respostas fisiológicas e sustentar a eficiência produtiva. Embora presentes em pequenas quantidades, os microminerais exercem funções indispensáveis na atividade enzimática, no metabolismo energético, na defesa antioxidante e na imunidade, tornando-se ainda mais críticos em condições de estresse (COSTA; SILVA, 2016; NRC, 2016; BR-CORTE, 2023). Entre eles, destacam-se o cromo (Cr), o selênio (Se) e o zinco (Zn), que apresentam funções complementares na regulação da resposta imunometabólica e no equilíbrio redox.

A forma de suplementação influencia diretamente sua eficiência: sais inorgânicos, apresentam maior reatividade com antagonistas ruminais, o que reduz sua absorção e biodisponibilidade. Em contrapartida, microminerais complexados a aminoácidos ou proteínas apresentam maior estabilidade no rúmen, melhor absorção intestinal e maior acúmulo tecidual, refletindo em respostas fisiológicas mais consistentes (PECHOVÁ; PAVLATA, 2007; DANIEL et al., 2020).

De forma complementar, a utilização de leveduras vivas (*Saccharomyces cerevisiae*) tem sido associada à melhoria da fermentação ruminal, maior estabilidade do pH, estímulo à microbiota fibrolítica e reforço da imunidade. Quando associadas a microminerais biodisponíveis, potencializam a digestibilidade de fibras e a síntese de proteína microbiana, oferecendo suporte metabólico adicional em períodos de maior produção de ERO (DURAND; KOMISARCZUK, 1988; AMIN; MAO, 2021; NZEYIMANA et al., 2023).

Assim, a combinação entre microminerais orgânicos e leveduras vivas caracteriza uma estratégia de nutrição funcional capaz de reduzir os impactos do estresse, estimular enzimas antioxidantes, fortalecer a imunidade e favorecer a recuperação produtiva de bovinos (MORIEL; ARTHINGTON, 2013).

2.5.1 Cromo

O cromo (Cr) foi reconhecido como micromineral essencial a partir dos estudos de Mertz (1969, 1992), que identificaram seu papel como componente ativo do fator de tolerância à glicose (GTF). Sua principal função é atuar como cofator da insulina, potencializando a sinalização insulínica e facilitando a captação de glicose e aminoácidos pelas células-alvo, especialmente em condições de estresse metabólico (RODRIGUES et al., 2020; ANDERSON; MERTZ, 1977). A cromodulina, forma biologicamente ativa do Cr^{3+} , foi posteriormente caracterizada como um oligopeptídeo de baixo peso molecular capaz de se ligar ao receptor de insulina e amplificar sua atividade intracelular, promovendo a continuidade da cascata de fosforilações e aumentando a sensibilidade celular ao hormônio (MERTZ, 1992; PECHOVÁ; PAVLATA, 2007).

Sua importância na nutrição animal foi evidenciada por estudos que demonstraram que a suplementação com Cr pode melhorar a homeostase glicêmica (ANDERSON et al., 1987), modular a resposta imunológica (BURTON, 1995) e favorecer o desempenho de ruminantes sob desafio fisiológico (SPEARS, 2000). Além disso, a atuação sinérgica entre cromo e insulina permite não apenas maior síntese proteica, mas também a modulação de efeitos catabólicos mediados pelo cortisol, com potencial benefício em situações como transporte, desmame e restrição alimentar (ANDERSON et al., 1987; BURTON, 1995; MORRIS et al., 1993).

Os mecanismos pelos quais o Cr influencia a produção de cortisol ainda não estão totalmente elucidados. Contudo, acredita-se que sua ação como cofator da insulina possa modular a liberação de glicocorticoides, uma vez que o cortisol inibe a secreção insulínica e o Cr amplifica a ação do hormônio, podendo inibir de forma indireta a excreção de cortisol (CHANG; MOWAT, 1992; ANDERSON, 1998). Embora o cromo possa aumentar a atividade da insulina, ele não pode substituí-la. No entanto, na presença de cromo orgânico, níveis mais baixos de insulina são suficientes para alcançar uma resposta biológica semelhante (ANDERSON, 1998). Além desses efeitos endócrinos, em situações de estresse fisiológico ocorre também maior excreção urinária de Cr, frequentemente correlacionada a elevações nas concentrações séricas de cortisol (ANDERSON et al., 1990; ANDERSON et al., 1991). Esse processo compromete sua disponibilidade endógena (PECHOVÁ; PAVLATA, 2007), sugerindo que a exigência de Cr pode ser maior em animais submetidos a

desafios metabólicos.

Assim, a presença de cromo biodisponível pode atenuar a liberação exacerbada de cortisol, promovendo homeostase endócrina em fases críticas de transição. Estudos demonstram que a suplementação com formas orgânicas de Cr, como o picolinato ou a cromo levedura, aumenta significativamente sua absorção e biodisponibilidade em relação às fontes inorgânicas, cuja taxa varia entre 0,4 e 2%, enquanto as fontes orgânicas podem apresentar biodisponibilidade mais de dez vezes superior (PECHOVÁ; PAVLATA, 2007). Anderson, Brantner e Polansky (1978) desenvolveram um método para avaliar formas biologicamente ativas de Cr e observaram que extratos de levedura ricos no mineral potencializaram a ação da insulina em mais de 300%, enquanto sais inorgânicos apresentaram efeito mínimo. Essa maior eficiência permite que doses menores de Cr levedura promovam efeitos fisiológicos relevantes, com menor excreção urinária e melhor retenção tecidual.

Os efeitos positivos da suplementação com Cr tornam-se mais evidentes em condições de estresse fisiológico (ZANETTI et al., 2003). Diversos estudos corroboram esse padrão: Chang e Mowat (1992), avaliando o efeito do cromo em ruminantes após fortes estresses de leilão e transporte, observaram que animais suplementados com cromo complexado à molécula orgânica apresentaram ganho médio diário (GMD) de 790 g/dia, contra 610 g/dia nos animais não suplementados, nas primeiras semanas de recuperação. Esses efeitos foram atribuídos à menor resposta inflamatória e à maior imunocompetência. De forma semelhante, Moonsie-Shageer e Mowat (1993) relataram que doses crescentes de Cr levedura (0 a 1 ppm) reduziram linearmente os níveis séricos de cortisol e aumentaram em 27% o GMD de bezerros. Luseba (2013) também identificou melhora nos parâmetros séricos de glicose e redução de cortisol em bovinos suplementados com cromo e selênio orgânicos. Adicionalmente, Yari et al. (2010) demonstraram que a suplementação de Cr em bezerros submetidos a estresse térmico reduziu a frequência respiratória, modulou glicose e cortisol séricos e melhorou a eficiência insulínica, mesmo sem grandes alterações no crescimento. De maneira integrada, Anderson (1998) destacou que os efeitos do Cr sobre metabolismo glicídico, lipídico e resposta imune tendem a ser mais pronunciados em animais submetidos a desafios fisiológicos, sendo menos consistentes em indivíduos em condições normais.

Essa diferença entre animais sob desafio ou não também foi confirmada em estudos posteriores. Genther e Hansen (2014) observaram que bovinos não

submetidos a estressores fisiológicos não responderam à suplementação com Cr, ao passo que aqueles expostos a estresse apresentaram maior ganho de peso e menor morbidade. Burton, Mallard e Mowat (1993) também demonstraram aumento da resposta de anticorpos e da proliferação linfocitária em vacas leiteiras suplementadas no periparto, enquanto Burton et al. (1995) verificaram que o soro sanguíneo de vacas suplementadas com Cr apresentava atividade imunomodulatória independente de insulina ou cortisol. Esses resultados confirmam que, além de favorecer o metabolismo energético, o Cr atua diretamente na modulação imunológica em situações de maior demanda fisiológica.

Em estudo conduzido a pasto, Polizel Neto et al. (2009) demonstraram que bovinos Nelore e F1 Brangus × Nelore suplementados com cromo complexado à molécula orgânica (levedura de picolinato de cromo) apresentaram maior ganho médio diário (494 vs. 420 g) em relação ao grupo controle, resultando em acréscimo de 14,2 kg de peso vivo durante o período experimental. Esses animais também apresentaram maior peso de carcaça quente (238,8 vs. 231,3 kg) e superioridade no rendimento de carcaça (52,9 vs. 51,2%). Resultados semelhantes foram descritos por Vellini et al. (2020), que observaram maior eficiência alimentar, tendência de aumento da área de *Longissimus dorsi* e melhora de 12,3% na maciez da carne em novilhos Nelore confinados suplementados com Cr metionina associado a Zn aminoácido.

Do ponto de vista nutricional, o NRC (2000) não estabelece exigências específicas de Cr para bovinos, limitando-se a indicar que suplementações em torno de 0,2 a 0,4 mg/kg de MS podem favorecer parâmetros metabólicos e imunológicos, embora sem considerar perdas urinárias ou variações de retenção. Até a última edição do BR-CORTE (2010) não havia recomendações oficiais para o Cr. No entanto, com base no estudo conduzido por Costa e Silva et al. (2015a) em novilhos Nelore, o BR-CORTE (2016) passou a incluir exigências nacionais, estimando uma exigência líquida de manutenção de 22,9 µg/kg de PV, um coeficiente de retenção verdadeira de 78,4% e uma exigência líquida para ganho de $0,23 \times PCVZ^{0,61}$ (mg/kg de EBG), resultando em uma exigência dietética aproximada de 2,53 mg/kg de MS. Considerando que a absorção do mineral é naturalmente baixa, mesmo em formas orgânicas (PECHOVA; PAVLATA, 2007), a utilização de fontes de maior biodisponibilidade, como o cromo levedura, torna-se estratégica para garantir impacto fisiológico efetivo.

2.5.2 Selênio

O selênio (Se) é um micromineral essencial cuja importância nutricional foi reconhecida a partir da associação entre sua deficiência e distúrbios como degeneração muscular, retenção de placenta e maior suscetibilidade a infecções (ARTHUR; MCKENZIE; BECKETT, 2003; SHINI; SULTAN; BRYDEN, 2015). Suas funções são exercidas principalmente por meio das selenoproteínas, entre as quais se destacam as glutathione peroxidases (GSH-Px), enzimas antioxidantes que neutralizam peróxidos lipídicos e de hidrogênio, protegendo as estruturas celulares contra danos oxidativos. Essa atividade é particularmente relevante em situações de estresse fisiológico e inflamatório, quando a demanda por defesa antioxidante é intensificada (ARTHUR; MCKENZIE; BECKETT, 2003; WEISS, 2005; SHINI; SULTAN; BRYDEN, 2015).

Os primeiros estudos trouxeram evidências marcantes da essencialidade do mineral. Sharman (1960) descreveu o Se como o “fator 3”, cuja ausência resultava em distrofias musculares, encefalomalácia e necrose hepática, destacando ainda sua interação sinérgica com a vitamina E. Posteriormente, Shirley et al. (1966) demonstraram que a administração de selenito em vacas de corte e ovelhas prevenia a doença do músculo branco, mas não alterava significativamente o peso ao desmame, sugerindo que os benefícios do mineral iam além do crescimento imediato. Shively (1967) ampliou a compreensão ao associar a deficiência de Se a distúrbios reprodutivos, como retenção de placenta e natimortalidade, evidenciando que a suplementação materna melhorava a viabilidade dos recém-nascidos. Complementarmente, Gardiner (1969) destacou a estreita margem entre exigência e toxicidade do Se, apontando tanto seu papel vital na prevenção da necrose muscular quanto os riscos de selenose em áreas com solos ricos no mineral. Esses achados pioneiros consolidaram a visão de que o Se atua de forma integrada na saúde muscular, reprodutiva e imunológica dos ruminantes.

A biodisponibilidade do Se é determinada pela forma química suplementada. Fontes orgânicas, como a selenometionina (SeMet) presente na levedura enriquecida (Se-yeast), apresentam maior eficiência de absorção e incorporação tecidual quando comparadas às formas inorgânicas, como selenito e selenato de sódio, que são suscetíveis à redução a compostos insolúveis no rúmen (GIERUS, 2007; WEISS, 2005; SHINI; SULTAN; BRYDEN, 2015). Em ruminantes, a digestibilidade verdadeira

do Se proveniente do selenito situa-se em torno de 50%, enquanto valores próximos de 66% são relatados para o Se oriundo da levedura (SHINI; SULTAN; BRYDEN, 2015; WEISS, 2005). Essa diferença pode ser explicada pelo raciocínio de Weiss (2005), que estimou que cerca de 90% do Se presente na levedura está na forma de SeMet; considerando um escape ruminal de 60% e digestibilidade de 80% para esse aminoácido, a digestibilidade global do Se-yeast alcança aproximadamente 66%, valor cerca de 30% superior ao do selenito. Além disso, a absorção de SeMet frequentemente ultrapassa 80%, ao passo que a de sais inorgânicos pode cair para 40–50% e, em ruminantes, atingir apenas 11–35% (SÁNCHEZ et al., 2019). Um diferencial adicional da SeMet é sua incorporação inespecífica em proteínas corporais, formando uma reserva liberada gradualmente durante o turnover proteico, o que prolonga sua disponibilidade metabólica e potencializa seus efeitos fisiológicos (GIERUS, 2007; WEISS, 2005).

A superioridade metabólica das formas orgânicas de selênio (Se) repercute diretamente sobre o status antioxidante e imune. Shini, Sultan e Bryden (2015) destacaram que o Se proveniente de leveduras é mais eficiente e seguro que as formas inorgânicas, resultado confirmado por Huang et al. (2023), que observaram maior concentração sérica de IgM e menor acúmulo de malondialdeído em bovinos suplementados com Se orgânico. Em contrapartida, Wang et al. (2020) verificaram que baixos níveis séricos do mineral reduzem a atividade da glutathione peroxidase (GSH-Px) e aumentam a contagem de células somáticas, ampliando o risco de mastite subclínica.

Essas evidências reforçam que a suplementação com Se contribui para a estabilidade redox, o metabolismo da tireoide e a modulação da resposta imune (ARTHUR; MCKENZIE; BECKETT, 2003; WEISS, 2005), refletindo-se também em melhor desempenho produtivo em diferentes espécies (DALIA et al., 2020; RASHNOO et al., 2020). Em bovinos leiteiros, Hogan et al. (1993) demonstraram que a suplementação de Se associada à vitamina E aumentou o influxo de neutrófilos no úbere após desafio intramamário, elevou a capacidade bactericida intracelular e reduziu a gravidade clínica da mastite, além de diminuir a contagem de células somáticas.

Em contraste, a deficiência do mineral compromete a eficácia da defesa inata. Embora não altere o número de neutrófilos circulantes, ela reduz sua viabilidade e atividade bactericida devido à menor proteção contra os radicais livres produzidos no

burst respiratório (ARTHUR; MCKENZIE; BECKETT, 2003). Complementando esse achado, Zhang et al. (2021) verificaram que a carência de Se intensifica o acúmulo de espécies reativas de oxigênio, reduz a atividade de enzimas antioxidantes e ativa as vias de sinalização NF- κ B e MAPK, promovendo maior secreção de citocinas pró-inflamatórias (TNF- α , IL-1 β e IL-6). Esse processo amplifica a resposta inflamatória e agrava o quadro clínico da mastite.

Em condições de desafio sanitário e nutricional, os efeitos da suplementação orgânica tornam-se mais evidentes. Em novilhos Limousin $\times$ Charolês recém-chegados ao confinamento, a inclusão de 0,32 mg Se/kg MS na forma de levedura enriquecida resultou em maior ganho médio diário, maior consumo de matéria seca, melhor conversão alimentar e tendência de redução da incidência de doenças respiratórias (BRD). Além disso, os animais suplementados apresentaram maiores concentrações séricas de Se, melhor status antioxidante e resposta vacinal superior contra o BHV-1, quando comparados aos suplementados com selenito de sódio (SGOIFO ROSSI et al., 2017). Resultados semelhantes foram descritos por Reffett, Spears e Brown (1988), que observaram títulos de anticorpos mais elevados em bezerros suplementados, e por Stabel et al. (1989), que relataram aumento de IgM sérica em bezerros estressados desafiados com *Pasteurella haemolytica*. Esses achados reforçam a associação entre Se, atividade da GSH-Px e resposta imune.

No desempenho produtivo, enquanto Muegge et al. (2016) não observaram diferenças significativas em vacas Angus $\times$ Simmental suplementadas com 3 mg/dia de Se nas formas orgânica ou inorgânica durante a gestação e lactação, avaliando consumo de matéria seca, peso corporal, condição corporal, produção e composição do leite, com apenas tendência de menor teor de proteína e maior lactose em vacas recebendo Se orgânico, Weiss (2005) verificou incrementos expressivos de até 20% no Se sérico, 16% na atividade da GSH-Px e 90% no Se do leite em vacas suplementadas com levedura enriquecida, evidenciando que a superioridade fisiológica das fontes orgânicas torna-se mais evidente em condições de maior exigência metabólica. Dalia et al. (2020) acrescentaram ainda que a suplementação com Se melhora o metabolismo energético dos animais por reduzir o estresse oxidativo, o que contribui indiretamente para maior eficiência produtiva.

Além do papel antioxidante e imune, o Se exerce influência positiva sobre a reprodução e o metabolismo materno-fetal. Sua presença em selenoproteínas contribui para a viabilidade espermática e proteção das membranas celulares

(ARTHUR; MCKENZIE; BECKETT, 2003; WEISS, 2005). Em bezerros desmamados, Li et al. (2023) demonstraram que a deficiência do mineral compromete a integridade da barreira intestinal, favorecendo inflamações graves, reduzindo a absorção de nutrientes e modulando negativamente a imunidade da mucosa, com reflexos no desempenho. Em pequenos ruminantes, Erdoğan et al. (2017) observaram que a suplementação materna com Se orgânico aumentou a transferência placentária e via colostro, elevando o Se sérico e a atividade da GSH-Px em cordeiros e cabritos, enquanto Rashnoo et al. (2020) destacaram que essa transferência também pode ser potencializada pelo uso de *bolus* intraruminais de liberação lenta, capazes de manter aporte contínuo de Se, melhorar o status antioxidante das mães e ampliar a disponibilidade do mineral para a progênie.

A escolha da forma suplementar deve considerar não apenas a eficiência de incorporação, mas também as condições regionais. Em áreas cujas pastagens apresentam teores naturalmente baixos de selênio, como o interior do estado de São Paulo (LUCCI et al., 1984) e o norte de Roraima (MORAES et al., 1999), a carência do mineral compromete a saúde e o desempenho dos rebanhos, tornando a suplementação essencial para prevenir distúrbios produtivos e reprodutivos.

No aspecto de segurança, destaca-se que o selênio apresenta uma estreita margem entre exigência e toxicidade, exigindo formulações equilibradas nas dietas de zebuínos. O NRC (2001) recomenda níveis dietéticos de 0,1 a 0,3 mg/kg de MS para bovinos, enquanto o BR-CORTE (2016), a partir de dados obtidos em condições tropicais, estimou exigências dietéticas próximas a 0,57 mg/kg de MS para animais Nelore, valor superior ao preconizado internacionalmente. Essa diferença reflete o uso do coeficiente de retenção verdadeira no BR-CORTE, que considera perdas urinárias de até 35% do mineral, desconsideradas pelo NRC.

Silva et al. (2020) verificaram que mesmo níveis supranutricionais de 2,7 mg/kg de MS não comprometeram o desempenho, as características de carcaça ou a qualidade da carne de bovinos, independentemente da fonte de Se utilizada. Assim, a suplementação deve ser cuidadosamente ajustada, levando em consideração tanto os referenciais internacionais (NRC) quanto os dados obtidos em condições tropicais (BR-CORTE), de modo a garantir eficiência produtiva e reduzir riscos de toxicidade.

2.5.3 Zinco

O zinco (Zn) é um micromineral essencial que exerce funções catalíticas, estruturais e regulatórias no organismo animal. Estima-se que mais de 300 enzimas dependam do Zn para sua atividade, abrangendo processos como síntese de DNA, metabolismo energético, estabilidade de membranas e resposta imune (TAPIERO; TEW, 2003). Além disso, estudos de genômica funcional demonstram que o Zn é o cofator de aproximadamente 2.000 fatores de transcrição associados a domínios *zinc finger*, correspondendo a 3–10% de todas as proteínas codificadas em eucariotos (MARET, 2013). Essa ampla participação evidencia seu papel central na homeostase celular e na adaptação a estressores fisiológicos (BONAVENTURA et al., 2015; GOFF, 2018).

Nos ruminantes, o Zn é amplamente distribuído, com maiores concentrações em tecidos queratinizados, como pele e pelos, além de níveis relevantes em fígado, pâncreas e rins (UNDERWOOD; SUTTLE, 1999; MILLER, 1970). As exigências nutricionais variam conforme categoria e condição produtiva: o NRC (2000) recomenda cerca de 30 mg Zn/kg de MS para bovinos de corte e o NRC (2001) sugere 40–50 mg Zn/kg de MS para vacas leiteiras. No Brasil, o BR-CORTE (2016) estimou exigências mais elevadas (61 mg Zn/kg MS), refletindo a menor digestibilidade das forragens tropicais e particularidades do metabolismo mineral em ambientes tropicais.

A deficiência de Zn em bovinos foi descrita por Miller (1970), associada a atraso de crescimento, alopecia, paraceratose e distúrbios reprodutivos. Em nível celular, envolve apoptose e necrose devido à redução da atividade de metaloenzimas e à instabilidade de membranas (CLEGG et al., 2005). De acordo com Miller (1970), níveis próximos de 9 ppm em dietas purificadas são suficientes para atender às exigências de bovinos jovens; entretanto, em condições práticas de campo, são necessários de 20 a 40 ppm para garantir desempenho adequado. Apesar da regulação homeostática de absorção e excreção intestinal, deficiências marginais podem reduzir discretamente o desempenho, tornando o diagnóstico clínico difícil.

Por outro lado, bovinos apresentam ampla tolerância ao mineral. Miller (1970) relatou ausência de sinais clínicos em dietas com até 500 ppm, embora níveis próximos a 1.000 ppm comprometam o desempenho produtivo e o metabolismo de elementos como cobre e ferro. Em estudo clássico de toxicidade, Ott et al. (1966) forneceram níveis extremamente elevados de Zn (0,1 a 3,0 g/kg de dieta, como óxido

de zinco) para bezerros de corte e constataram que concentrações acima de 1,0 g/kg reduziram o consumo de matéria seca e o ganho de peso, com agravamento dos sinais clínicos em doses de 1,7 a 3,0 g/kg.

Do ponto de vista funcional, o Zn atua tanto na resposta imune quanto na defesa antioxidante. Participa da diferenciação e ativação de linfócitos T, da atividade fagocítica de neutrófilos e macrófagos e da síntese de citocinas pró-inflamatórias, como IL-1 β e TNF- α (SPEARS, 2000; BONAVENTURA et al., 2015). É também essencial para a atividade da timulina, hormônio tímico dependente de Zn que regula a maturação de linfócitos T. No sistema antioxidante, integra a enzima Cu/Zn-superóxido dismutase (GOFF, 2018), além de estimular a síntese de metalotioneínas, proteínas de baixo peso molecular com potente ação antioxidante e detoxificante (MARREIRO et al., 2017; BONAVENTURA et al., 2015). Essas funções são especialmente relevantes em situações de estresse fisiológico, como desmame, manejo intensivo e transporte rodoviário prolongado, nas quais há maior produção de radicais livres e risco de inflamação sistêmica (LIPPOLIS et al., 2017).

A biodisponibilidade do Zn depende da fonte utilizada. As formas inorgânicas, como óxido, sulfato, carbonato e cloreto, embora amplamente utilizadas em suplementos devido ao custo e disponibilidade, apresentam menor aproveitamento biológico, por interagirem com antagonistas (Ca, Fe, Cu) no rúmen, formando complexos insolúveis e reduzindo a absorção intestinal (SPEARS, 1996; ARTHINGTON; RANCHES, 2021). Em contraste, fontes orgânicas, como Zn-metionina, Zn-lisina e proteinatos, apresentam maior estabilidade no ambiente ruminal, utilizando rotas de absorção de aminoácidos e peptídeos, o que aumenta a absorção, reduz a excreção fecal e favorece a retenção tecidual (PALMA et al. 2015; ARTHINGTON; RANCHES, 2021).

Do ponto de vista experimental, os resultados variam conforme dose, fonte e condições de manejo. Em bovinos confinados, Malcolm-Callis et al. (2000) avaliaram a inclusão de sulfato de zinco (ZnSO₄) em diferentes níveis (20, 100 e 200 mg/kg MS) e não observaram efeito significativo sobre ganho de peso ou eficiência alimentar, embora doses mais altas tenham reduzido o consumo de matéria seca e alterado discretamente características de carcaça. Por outro lado, em estudo de longo prazo, AHOLA et al. (2005) verificaram que a suplementação com Cu, Zn e Mn, desde o pré-natal até a terminação, aumentou as concentrações hepáticas desses minerais em bovinos de corte. No primeiro ano, a suplementação com minerais orgânicos

promoveu melhor eficiência alimentar em comparação às fontes inorgânicas, embora esse efeito não tenha sido consistente entre os anos avaliados.

Em cenários de desafio fisiológico, a suplementação mineral pode modular respostas imunometabólicas. Lippolis et al. (2017) relataram que bezerros suplementados com microminerais (Co, Cu, Mn e Zn) apresentaram maiores concentrações hepáticas de Cu, Zn e Co quando receberam a fonte orgânica, em comparação à inorgânica. Além disso, os animais suplementados com minerais orgânicos apresentaram menores concentrações plasmáticas de cortisol (31,3 ng/mL) em relação aos que receberam a fonte inorgânica (36,5 ng/mL) durante o transporte e a entrada no confinamento. Apesar desses efeitos positivos da forma orgânica, não foram observadas diferenças consistentes entre as fontes quanto ao ganho médio diário ou à imunidade humoral, avaliada pela resposta vacinal.

Além disso, a suplementação com Zn tem sido associada a efeitos benéficos sobre a saúde intestinal e da glândula mamária. Em bezerros, melhora a integridade das vilosidades e reduz a permeabilidade intestinal, além de ajustes melhora na composição do microbioma, o que contribui para menor incidência de diarreia e melhor desempenho inicial (DUFFY; YIN; REDDING, 2023). Em bezerros Nelore em pastejo de *Urochloa brizantha* na seca, a suplementação com Zn, Cu e Mn orgânicos aumentou o consumo de suplemento (0,92 kg/animal/dia) em relação aos inorgânicos, sem alterar o ganho médio diário (0,136 kg/animal/dia) ou os parâmetros de carcaça. Ainda assim, os minerais orgânicos mantiveram as concentrações séricas de Zn (0,895 mg/L), Cu (0,519 mg/L) e Mn (0,151 mg/L) dentro da normalidade, indicando maior eficiência de utilização (PALMA et al. 2015). Garcia (2007), ao suplementar vacas com 750 mg/dia de zinco orgânico, verificou reduções expressivas da CCS: em vacas Holandêsas, os valores diminuíram de $970,32 \times 10^3$ para $530,15 \times 10^3$ céls/mL, estabilizando em $604,03 \times 10^3$ céls/mL, enquanto em vacas Girolando a queda foi ainda mais acentuada, de $515,73 \times 10^3$ para $288,21 \times 10^3$ e, posteriormente, $116,29 \times 10^3$ céls/mL, confirmando o papel do Zn na saúde da glândula mamária.

Portanto, o Zn é indispensável para o metabolismo, a integridade celular e a imunocompetência dos bovinos. As fontes orgânicas apresentam vantagens em biodisponibilidade e estabilidade, configurando uma estratégia nutricional eficaz para otimizar desempenho, reforçar a imunidade e reduzir os efeitos de estressores comuns na pecuária de corte, como o transporte, o desmame e o manejo intensivo.

2.5.4 Leveduras

Evidências iniciais da presença de leveduras no trato digestivo de bovinos foram descritas por Farley (1958), que isolou diferentes espécies em epitélio lingual e conteúdo ruminal, incluindo *Candida*, *Trichosporon*, *Pichia* e *Sporobolomyces*, sugerindo que tais microrganismos compunham a microbiota transitória do hospedeiro. Esse achado estimulou a hipótese de que leveduras poderiam interagir com a microbiota ruminal. Complementarmente, Johnson et al. (1956) demonstraram que a eficiência dos microrganismos ruminais dependia não apenas de energia, nitrogênio e minerais, mas também de vitaminas e ácidos graxos voláteis, evidenciando que fatores específicos eram capazes de estimular a celulólise e a utilização de ureia. Esses trabalhos pioneiros estabeleceram as bases para a hipótese de que aditivos, entre eles as leveduras, poderiam modular o ambiente ruminal e impactar a digestibilidade e o metabolismo.

A inclusão de leveduras vivas na dieta de ruminantes tem sido amplamente investigada como estratégia funcional para promover a estabilidade ruminal, melhorar o aproveitamento dos nutrientes e fortalecer a resposta imunológica, especialmente em contextos de estresse metabólico e sanitário. Entre as cepas estudadas, destaca-se *Saccharomyces cerevisiae*, capaz de interagir com a microbiota autóctone e modular positivamente a fermentação ruminal, mesmo sendo um microrganismo alóctone (FONTY e CHAUCHEYRAS-DURAND, 2006).

Estudos mostraram que a levedura não coloniza permanentemente o rúmen, mas mantém viabilidade suficiente para alterar o ambiente fermentativo (DURAND-CHAUCHEYRAS et al., 2008; ZELEF et al., 1994). Seus mecanismos de ação incluem: (i) remoção de oxigênio residual, criando condições mais favoráveis a bactérias anaeróbias, incluindo *Fibrobacter succinogenes* e *Ruminococcus spp.* (RUSSELL, 1992; KUTASI et al., 2004); (ii) fornecimento de cofatores metabólicos, como vitaminas do complexo B e ácidos orgânicos, que estimulam o crescimento microbiano; e (iii) estímulo a bactérias lactato-utilizadoras, como *Megasphaera elsdenii* e *Selenomonas ruminantium*, fundamentais para prevenir quedas abruptas de pH (CALLAWAY; MARTIN, 1997; WALLACE; NEWBOLD, 1997).

Williams et al. (1991) confirmaram esses efeitos em novilhos suplementados com *S. cerevisiae* em dietas de cevada e feno, relatando maior pH ruminal, redução do pico de L-lactato e aumento da degradação de forragem. De forma semelhante, Zelef

et al. (1994), utilizando o sistema Rusitec (*Rumen Simulation Technique*), verificaram que a suplementação com cultura de *Saccharomyces cerevisiae* aumentou a digestibilidade da hemicelulose e incremento da proteossíntese microbiana em dietas ricas em volumoso. Em contrapartida, quando parte do volumoso foi substituída por serragem de faia tratada, houve redução significativa da digestibilidade da MS, FDN, hemicelulose e celulose, embora a síntese de proteína microbiana tenha se elevado. Esses resultados indicam que a resposta à levedura depende diretamente da qualidade e da composição da dieta. Miller-Webster et al. (2002) acrescentaram que a suplementação aumentou a digestibilidade da MS e PB e elevou o propionato em fermentadores contínuos, resultados reforçados por Pinloche et al. (2013), que relataram maior pH, redução de amônia e lactato e incremento de AGV.

Outro aspecto relevante é a contribuição das leveduras para a eficiência microbiana no rúmen. A síntese de proteína microbiana é dependente da adequada sincronização entre a disponibilidade de energia fermentescível e de compostos nitrogenados (VAN KESSEL; RUSSELL, 1996; DIJKSTRA et al., 1992; RUSSELL, 1998). A regulação do metabolismo do nitrogênio foi demonstrada por Nolan & Leng (1972) e detalhada por Erfle; Sauer; Mahadevan (1977), que evidenciaram a utilização diferenciada do N-NH₃ pelas vias GDH (em alta concentração de amônia, sem gasto de energia) e GS-GOGAT (em baixa concentração de amônia, exigindo ATP). Embora a segunda via seja energeticamente mais custosa, ela garante a continuidade da síntese proteica em ambientes com baixa disponibilidade de N. Em condições tropicais, onde as gramíneas apresentam baixo teor proteico, essa limitação se torna crítica (RUSSELL, 1998). Assim, a suplementação com levedura otimiza ambas as rotas, favorecendo a incorporação de amônia, aumentando a produção de proteína microbiana e promovendo maior degradação da fibra.

Yi et al. (2025) avaliaram a suplementação de diferentes culturas de levedura em bovinos de corte. Quando comparados ao grupo controle (CON), os animais suplementados com leveduras (Diamond e Keliben) derivadas de *Saccharomyces cerevisiae*, apresentaram maior digestibilidade da fibra, com valores médios de FDN de 651 g/kg vs. 704 g/kg e de FDA de 593 g/kg vs. 655 g/kg. O ganho médio diário mostrou tendência de incremento nos grupos suplementados (0,72 vs. 0,82 kg/d). Além disso, a suplementação reduziu a concentração de metano dissolvido (0,26 vs. 0,21 mM) e a abundância de arqueias metanogênicas (*Euryarchaeota*). Também foi observada melhora no status oxidativo, refletida em maiores atividades de GSH-Px

(30,0 vs. 38,0 U/mL), catalase (0,45 vs. 0,68 U/mL) e antioxidante total (T-AOC) (1,18 vs. 1,51 U/mL), acompanhada por menor concentração de MDA (0,47 vs. 0,30 nmol/mL). Paralelamente, houve aumento nas imunoglobulinas séricas IgA (1,62 vs. 2,99 mg/mL), IgG (3,86 vs. 6,02 mg/mL) e IgM (0,98 vs. 1,58 mg/mL), além de maiores concentrações de proteínas complemento C3 (72,0 vs. 83,5 mg/mL) e C4 (10,8 vs. 12,7 mg/mL). Segundo os autores, esses efeitos não se restringem à ação das células viáveis de *S. cerevisiae*, mas também resultam da presença de metabólitos bioativos, como ácidos orgânicos, β -glucanas, mananas, peptídeos, nucleotídeos e vitaminas, que contribuem para os efeitos integrados sobre digestibilidade, metabolismo energético, imunidade e defesa antioxidante.

Em bovinos submetidos a estresse de transporte, Wernicki et al. (2006) observaram aumento expressivo do cortisol (50,2 vs. 153,0 nmol/L no 1º dia) e da peroxidação lipídica – TBARS (0,125 vs. 0,208 μ mol/g no 3º dia) em relação aos valores basais, com retorno aos níveis normais apenas entre os dias 9 e 16 pós-transporte, caracterizando uma “janela crítica” de maior vulnerabilidade fisiológica. Os autores destacaram que a suplementação com levedura “antes e depois” do transporte representa uma estratégia importante: (i) no pré-transporte, prepara a microbiota para lidar com o jejum e a realimentação subsequente; (ii) no pós-transporte, acelera a recuperação da degradação da fibra e sustenta a capacidade antioxidante e imune. De forma complementar, Wernicki et al. (2014), avaliando 60 bezerros Simental transportados por 120 km e adaptados em confinamento, relataram que os animais estressados apresentaram menor consumo alimentar nas primeiras semanas (1,5 vs. 2,9 kg/dia no dia 1; 1,9 vs. 2,9 kg/dia no dia 3; e 3,5 vs. 3,9 kg/dia no dia 14, para transportados e controles, respectivamente), acompanhado por menor ganho de peso médio no final do período (124,7 vs. 127,6 kg no dia 28). O estresse também se refletiu nos biomarcadores sanguíneos, com maior concentração sérica de haptoglobina nos bezerros transportados (33,8 vs. 1,5 mg/mL no dia 3) e elevação da peroxidação lipídica (TBARS) logo no início (3,8 vs. 2,4 μ mol/g de proteína no dia 1). Além disso, observou-se redução da IgM no grupo transportado ao final do experimento (12,9 vs. 14,9 mg/mL no dia 28), sugerindo supressão da imunidade humoral e maior suscetibilidade a doenças respiratórias.

Finck et al. (2014) relataram que bovinos suplementados e desafiados com LPS apresentaram menor pico de cortisol (46,2 vs. 75,1 ng/mL), menor temperatura retal (39,5 vs. 40,1 °C) e maior consumo de MS (7,5 vs. 6,1 kg/d) em comparação ao grupo

controle, indicando melhor adaptação ao estresse inflamatório. De forma complementar, Burdick Sanchez et al. (2020) verificaram que bezerros de corte suplementados com derivados de levedura apresentaram maior disponibilidade de glicose (5,2 vs. 4,6 mmol/L) e redução de citocinas pró-inflamatórias, como TNF- α e IL-6, sugerindo efeito anti-inflamatório e metabólico benéfico. Além disso, Ogunade et al. (2019), utilizando metagenômica de shotgun em bovinos de corte, confirmaram que a suplementação com levedura elevou a abundância de bactérias celulolíticas (*Ruminococcus albus*: 1,36% vs. 0,26%) e lactato-utilizadoras (*Megasphaera elsdenii*: 1,13% vs. 0,29%), além de enriquecer genes ligados à digestão de carboidratos (glicosiltransferases e hidrolases), favorecendo maior degradação da fibra e uso eficiente do lactato.

Uma metanálise conduzida por Nzeyimana et al. (2023), reportou que a maioria dos estudos com levedura viva apresentou efeitos positivos sobre ingestão de matéria seca e desempenho (36% e 52% dos estudos, respectivamente), além de melhorias em fermentação ruminal (52%) e microbiota (40%). Apesar dos benefícios amplamente documentados, alguns estudos relatam resultados divergentes quanto a pH, digestibilidade e desempenho, atribuídos à variabilidade de cepas, doses, viabilidade celular, composição da dieta e estado fisiológico dos animais (XIAO; SMEEKENS; WU, 2016; BAKER et al., 2022). Ainda assim, os efeitos mais consistentes da suplementação concentram-se em: (a) maior estabilidade fermentativa e digestão de fibras; (b) incremento de marcadores antioxidantes e imunidade; (c) melhor adaptação digestiva em situações de desafio, todos pontos críticos para reduzir o impacto do transporte e acelerar a recuperação produtiva (NZEYIMANA et al., 2023; JIANG et al., 2017; BAKER et al., 2022).

Assim, a trajetória que se inicia com as observações de Farley (1958) e Johnson et al. (1956), passa pela consolidação fisiológica proposta por Russell (1992; 1998) e chega às evidências contemporâneas, confirma que as leveduras vivas, especialmente *S. cerevisiae*, representam uma ferramenta estratégica na nutrição de ruminantes. Sua suplementação atua na manutenção do equilíbrio fermentativo, no uso eficiente do nitrogênio e no reforço da resposta antioxidante e imune, aspectos fundamentais para mitigar os efeitos de estressores como o transporte rodoviário e acelerar a recuperação produtiva dos animais.

Tabela 5 – Síntese dos efeitos do transporte, estresse fisiológico, suplementação mineral e uso de leveduras em bovinos (síntese da revisão de literatura)

Tópico	Principais achados	Autores
Transporte rodoviário	Causa perda de peso imediata (shrink), redução do consumo de MS, elevação de cortisol, NEFA e ativação da resposta inflamatória sistêmica. Aumenta a susceptibilidade a doenças respiratórias.	Hutcheson & Cole (1986); Knowles (1999); Marques et al. (2012); Schroeder & Hansen (2015)
Estresse fisiológico	Estimula o eixo HPA, aumenta cortisol, altera metabolismo energético, mobiliza proteínas de fase aguda (haptoglobina, ceruloplasmina) e desencadeia estresse oxidativo, reduzindo atividade de GSH-Px.	Reffett et al. (1988); Reis et al. (2012); Wang et al. (2020)
Microminerais – Selênio	Deficiência prejudica a função imune (neutrófilos menos ativos, menor resposta vacinal). Suplementação orgânica (levedura/SeMet) aumenta GSH-Px, melhora status antioxidante, reduz BRD e aumenta GMD.	Reffett et al. (1988); Rossi et al. (2017); Wang et al. (2020)
Microminerais – Cromo	Atua como cofator do GTF, melhora utilização de glicose e sensibilidade à insulina. Associado à redução de cortisol e maior desempenho em situações de estresse.	Anderson et al. (1978); Moriel (2013); Luseba (2013)
Microminerais – Zn, Cu, Mn, Co	Fontes orgânicas aumentam concentrações hepáticas e reduzem cortisol. Fontes hidroxiladas apresentam menor solubilidade ruminal, evitando antagonismos e mantendo digestão de fibra.	Genther & Hansen (2014); Lippolis et al. (2017)
Leveduras vivas (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)	Estabilizam pH ruminal, estimulam bactérias fibrolíticas, aumentam digestibilidade de FDN. Derivados (β -glucanos, MOS) reduzem cortisol, modulam inflamação e reduzem morbidade pós-transporte.	Finck et al. (2014); Burdick Sanchez et al. (2014); Daniel (2020); Rossi et al. (2017)
Integração (microminerais + leveduras)	Combinação potencializa efeitos: $\uparrow$ consumo e desempenho, $\downarrow$ cortisol e proteínas de fase aguda, $\uparrow$ resposta vacinal e status antioxidante.	Moriel (2013); Rossi et al. (2017); Lippolis et al. (2017)

3. Referências:

ABIEC – Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne. *Beef Report: Perfil da Pecuária no Brasil 2019*. São Paulo: ABIEC, 2019.

ABREU, M. J.; MARQUES, R. S.; CIDRINI, I. A.; BATISTA, L. H.; FERREIRA, I. M.; OLIVEIRA, K. A.; CRUZ, V. A.; LIMEDE, A. C.; SOUSA, L. M.; FRANÇA, M. Q. S.; BISIO, G. H. M.; SIQUEIRA, G. R.; RESENDE, F. D. Long-term impacts of 48-h water and feed deprivation on blood and performance responses of grazing Bos indicus Nellore heifers. **Translational Animal Science**, v. 8, p. txae015, 2024b.

ABREU, U. G. P.; OLIVEIRA, L. O. F.; SILVA, R. R.; CABRAL, L. S.; MENDONÇA, S. S.; MENDES, L. B.; PIRES, A. V.; PEREIRA, E. S. Impact of 48-h water and feed deprivation and hydroxychloride sources of copper and zinc on metabolism and performance of grazing Nellore cattle. **Animals**, v. 14, n. 2, p. 354-366, 2024a.

ABUELO, A.; HERNÁNDEZ, J.; BENEDITO, J. L.; CASTILLO, C. Redox biology in transition periods of dairy cattle: Role in the health of periparturient and neonatal animals. **Antioxidants**, v. 8, n. 1, p. 20, 2019.

AHOLA, J. K.; SHARPE, L. R.; DORTON, K. L.; BURNS, P. D.; STANTON, T. L.; ENGLE, T. E. Effects of lifetime copper, zinc, and manganese supplementation and source on performance, mineral status, immunity, and carcass characteristics of feedlot cattle. **The Professional Animal Scientist**, v. 21, n. 4, p. 305-317, 2005.

AMIN, A. B.; MAO, S. Y. Influence of yeast on rumen fermentation, growth performance and quality of products in ruminants: A review. **Animal nutrition**, v. 7, n. 1, p. 31-41, 2021.

ANDERSON, R. A.; MERTZ, W. Glucose tolerance factor: an essential dietary agent. **Trends in Biochemical Sciences**, v. 2, n. 12, p. 277-279, 1977.

ANDERSON, R. A. Recent advances in the clinical and biochemical manifestation of chromium deficiency in human and animal nutrition. **The Journal of Trace Elements in Experimental Medicine: The Official Publication of the International Society for Trace Element Research in Humans**, v. 11, n. 2-3, p. 241-250, 1998.

ANDERSON, R. A.; BRANTNER, J. H.; POLANSKY, M. M. An improved assay for biologically active chromium. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 26, n. 5, p. 1219-1221, 1978.

ANDERSON, R. A.; BRYDEN, N. A.; POLANSKY, M. M.; REISER, S. Urinary chromium excretion and insulinogenic properties of carbohydrates. **The American journal of clinical nutrition**, v. 51, n. 5, p. 864-868, 1990.

ANDERSON, R. A.; BRYDEN, N. A.; POLANSKY, M. M.; THORP, J. W. Effects of carbohydrate loading and underwater exercise on circulating cortisol, insulin and urinary losses of chromium and zinc. **European journal of applied physiology and occupational physiology**, v. 63, n. 2, p. 146-150, 1991.

ANDERSON, R.A.; POLANSKY, M.M.; BRYDEN, N.A.; BHATHENA, S.J.; CANARY, J.J. Effects of supplemental chromium on patients with symptoms of reactive hypoglycemia. **Metabolism**, v. 36, n. 4, p. 351-355, 1987.

APPLE, J. K.; UNRUH, J. A.; MINTON, J. E.; BARTLETT, J. L. Influence of repeated restraint and isolation stress and electrolyte administration on carcass quality and muscle electrolyte content of sheep. **Meat Science**, v. 35, p. 191-203, 1993.

ARMSTRONG, D. Oxidative stress in applied basic research and clinical practice. 2010.

ARTHINGTON, J. D.; EICHER, S. D.; KUNKLE, W. E.; MARTIN, F. G. Effect of transportation and commingling on the acute-phase protein response, growth, and feed intake of newly weaned beef calves. **Journal of animal science**, v. 81, n. 5, p. 1120-1125, 2003.

ARTHINGTON, J. D.; RANCHES, J. Trace mineral nutrition of grazing beef cattle. **Animals**, v. 11, n. 10, p. 2767, 2021.

ARTHUR, J. R.; MCKENZIE, R. C.; BECKETT, G. J. Selenium in the immune system. **The Journal of nutrition**, v. 133, n. 5, p. 1457S-1459S, 2003.

BABIOR, B. M.; KIPNES, R. S.; CURNUTTE, J. T. Biological defense mechanisms. The production by leukocytes of superoxide, a potential bactericidal agent. **The Journal of clinical investigation**, v. 52, n. 3, p. 741-744, 1973.

BAKER, L. M.; KRAFT, J.; KARNEZOS, T. P.; GREENWOOD, S. L. The effects of dietary yeast and yeast-derived extracts on rumen microbiota and their function. **Animal Feed Science and Technology**, v. 294, p. 115476, 2022.

BARREIROS, A. L. B. S.; DAVID, J. M.; DAVID, J. P. Estresse oxidativo: relação entre geração de espécies reativas e defesa do organismo. **Química Nova**, v. 29, n. 1, p. 113-123, 2006.

BATISTA DE DEUS, J. C.; SILVA, W. P. da; SOARES, G. J. D. Efeito da distância de transporte de bovinos no metabolismo post mortem. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 5, n. 2, p. 152-156, 1999.

BAXTER, J. D.; FORSHAM, P. H. Tissue effects of glucocorticoids. **The American journal of medicine**, v. 53, n. 5, p. 573-589, 1972.

BERNABUCCI, U.; RONCHI, B.; LACETERA, N.; NARDONE, A. Influence of body condition score on relationships between metabolic status and oxidative stress in periparturient dairy cows. **Journal of dairy science**, v. 88, n. 6, p. 2017-2026, 2005.

BISCOLA, PHN; MALAFAIA, G. C. Anuário Cicarne da cadeia produtiva da carne bovina: 2024-2025.

BONAVENTURA, P.; BENEDETTI, G.; ALBARÈDE, F.; MIOSSEC, P. Zinc and its role in immunity and inflammation. **Autoimmunity reviews**, v. 14, n. 4, p. 277-285, 2015.

BOTTJE, W. G. Metabolic efficiency and the oxidative stress paradigm in animal production. **Journal of Animal Science**, v. 97, n. 6, p. 2145–2153, 2019.

BRASIL. **Código de Trânsito Brasileiro (CTB)**. Lei n.º 9.503, de 23 de setembro de 1997. Diário Oficial da União, Brasília, 24 set. 1997.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 791, de 22 de junho de 2020. Consolida normas sobre o transporte de animais vivos e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 23 jun. 2020a.

BRASIL. Lei nº 13.103, de 2 de março de 2015. Dispõe sobre o exercício da profissão de motorista; altera a Consolidação das Leis do Trabalho – CLT, aprovada pelo Decreto-Lei nº 5.452, de 1º de maio de 1943, e as Leis nº 9.503, de 23 de setembro de 1997 – Código de Trânsito Brasileiro, e nº 11.442, de 5 de janeiro de 2007; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 mar. 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal – RIISPOA**. Aprovado pelo Decreto nº 30.691, de 29 de março de 1952, e atualizado até o Decreto nº 3.553, de 4 de agosto de 2000. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 ago. 2000.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 48, de 16 de julho de 2020. Estabelece requisitos para o transporte de animais vivos e procedimentos em Estabelecimentos de Pré-Embarque. **Diário Oficial da União**, Brasília, 17 jul. 2020b.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Manual de boas práticas de bem-estar animal para o transporte de bovinos**. Brasília: MAPA, 2017. 92 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Manual de Boas Práticas de Bem-Estar Animal para o Transporte de Bovinos e Bubalinos**. Brasília: MAPA, 2022. 108 p.

BRASIL; EPL – EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA. **Plano Nacional de Logística 2035**. Brasília: EPL, 2021.

BR-CORTE. Exigências nutricionais de zebuínos puros e cruzados. 2. ed. Viçosa: UFV, 193 p. 2010.

BR-CORTE. Exigências nutricionais de zebuínos puros e cruzados. 3. ed. Viçosa: UFV, 327 p. 2016.

BRENNECKE, K.; ZEFERINO, C. P.; SOARES, V. E.; ORLANDI, C. M. B.; BERTIPAGLIA, L. M. A.; SGAVIOLI, S.; DIAN, P. H. M.; AMÂNCIO, W. D. C. Welfare during pre-slaughter handling and carcass lesions of beef cattle submitted to different loading densities. **Pesquisa Veterinária Brasileira**, v. 40, n. 12, p. 985-991, 2020.

BROADWAY, P. R.; CARROLL, J. A.; BURDICK SANCHEZ, N. C. Live yeast and yeast cell wall supplements enhance immune function and performance in food-

producing livestock: a review. **Microorganisms**, v. 3, n. 3, p. 417-427, 2015.

BUAINAIN, A. M.; ALVES, E.; SILVEIRA, J. M.; NAVARRO, Z. (Orgs.). *O mundo rural no Brasil do século 21: a formação de um novo padrão agrário e agrícola*. **Embrapa: Brasília, Brazil**, 2014.

BUCKHAM SPORER, K. R.; WEBER, P. S. D.; BURTON, J. L.; EARLEY, B.; CROWE, M. A. Transportation of young beef bulls alters circulating physiological parameters that may be effective biomarkers of stress. **Journal of animal science**, v. 86, n. 6, p. 1325-1334, 2008.

BURDICK SANCHEZ, N. C.; BROADWAY, P. R.; CARROLL, J. A. Influence of yeast products on modulating metabolism and immunity in cattle and swine. **Animals**, v. 11, n. 2, p. 371, 2021.

BURDICK SANCHEZ, N. C.; CARROLL, J. A.; BROADWAY, P. R.; EDRINGTON, T. S.; YOON, I.; BELKNAP, C. R. Some aspects of the acute phase immune response to a lipopolysaccharide (LPS) challenge are mitigated by supplementation with a *Saccharomyces cerevisiae* fermentation product in weaned beef calves. **Translational Animal Science**, v. 4, n. 3, p. txaa156, 2020.

BURTON, J. L. Supplemental chromium: its benefits to the bovine immune system. **Animal feed science and technology**, v. 53, n. 2, p. 117-133, 1995.

BURTON, J. L.; MALLARD, B. A.; MOWAT, D. N. Effects of supplemental chromium on immune responses of periparturient and early lactation dairy cows. **Journal of Animal Science**, v. 71, n. 6, p. 1532-1539, 1993.

BURTON, J. L.; NONNECKE, B. J.; ELSASSER, T. H.; MALLARD, B. A.; YANG, W. Z.; MOWAT, D. N. Immunomodulatory activity of blood serum from chromium-supplemented periparturient dairy cows. **Veterinary Immunology and Immunopathology**, v. 49, n. 1-2, p. 29-38, 1995.

CALLAWAY, E. S.; MARTIN, S. A. Effects of a *Saccharomyces cerevisiae* culture on ruminal bacteria that utilize lactate and digest cellulose. **Journal of dairy science**, v. 80, n. 9, p. 2035-2044, 1997.

CARROLL, J. A.; FORSBERG, N. E. Influence of stress and nutrition on cattle immunity. **Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice**, v. 23, n. 1, p. 105-149, 2007.

CARROLL, J. A.; REUTER, R. R.; CHASE JR, C. C.; COLEMAN, S. W.; RILEY, D. G.; SPIERS, D. E.; GALYEAN, M. L. Profile of the bovine acute-phase response following an intravenous bolus-dose lipopolysaccharide challenge. **Innate Immunity**, v. 15, n. 2, p. 81-89, 2009.

CHANG, X.; MOWAT, D. N. Supplemental chromium for stressed and growing feeder calves. **Journal of Animal Science**, v. 70, n. 2, p. 559-565, 1992.

CLEGG, M. S.; HANNA, L. A.; NILES, B. J.; MOMMA, T. Y.; KEEN, C. L. Zinc

deficiency-induced cell death. **IUBMB life**, v. 57, n. 10, p. 661-669, 2005.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Pesquisa CNT de rodovias 2021. Brasília: CNT, 2021.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Pesquisa CNT de rodovias 2023. Brasília: CNT, 2023.

COCKRAM, M. S. Criteria and potential reasons for maximum journey times for farm animals destined for slaughter. **Applied Animal Behaviour Science**, v. 106, n. 4, p. 234-243, 2007.

COLE, N. A.; PHILLIPS, W. A.; HUTCHESON, D. P. The effect of pre-fast diet and transport on nitrogen metabolism of calves. **Journal of Animal Science**, v. 62, n. 6, p. 1719-1731, 1986.

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito. **Resolução nº 925, de 28 de março de 2022.** Dispõe sobre o transporte de cargas vivas e consolida normas referentes ao transporte de bovinos e outros animais em veículos de carga. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2023.

COOKE, R. F. INVITED PAPER: Nutritional and management considerations for beef cattle experiencing stress-induced inflammation. **The Professional Animal Scientist**, v. 33, n. 1, p. 1-11, 2017.

COOKE, R. F.; CAPPELLOZZA, B. I.; GUARNIERI FILHO, T. A.; BOHNERT, D. W. Effects of flunixin meglumine administration on physiological and performance responses of transported feeder cattle. **Journal of Animal Science**, v. 91, n. 11, p. 5500-5506, 2013.

COSTA E SILVA, L. F.; ENGLE, T. E.; VALADARES FILHO, S. C.; ROTTA, P. P.; VALADARES, R. F. D.; SILVA, B. C.; PACHECO, M. V. C. Intake, apparent digestibility, and nutrient requirements for growing Nellore heifers and steers fed two levels of calcium and phosphorus. **Livestock Science**, 181:17–24. 2015b.

COSTA E SILVA, L. F.; VALADARES FILHO, S. C.; ENGLE, T. E.; ROTTA, P. P.; MARCONDES, M. I.; SILVA, F. A. S.; MARTINS, E. C.; TOKUNAGA, A. T. Macromineral and trace element requirements for beef cattle. **PLoS ONE** 10(12): e0144464. 2015a.

COSTA E SILVA, L. F.; VALADARES FILHO, S. C.; ROTTA, P. P.; MARCONDES, M. I.; ZANETTI, D.; GIONBELLI, M. P.; ENGLE, T. E.; PAULINO, M. F. Exigências de minerais para bovinos de corte. **Exigências nutricionais de zebuínos puros e cruzados**, v. 3, p. 221-258, 2016.

COSTA, L. A história dos frigoríficos no Brasil. **Stravaganza**, 17 mar. 2011. Disponível em: <<http://stravaganzastravaganza.blogspot.com.br/2011/03/historia-dos-matadouros-frigorificosno.html>> Acesso em: 16 de agosto, 2025.

DALIA, A. M.; LOH, T. C.; SAZILI, A. Q.; SAMSUDIN, A. A. Influence of bacterial

organic selenium on blood parameters, immune response, selenium retention and intestinal morphology of broiler chickens. **BMC veterinary research**, v. 16, n. 1, p. 365, 2020.

DANIEL, J. B.; KVIDERA, S. K.; MARTÍN-TERESO, J. Total-tract digestibility and milk productivity of dairy cows as affected by trace mineral sources. **Journal of dairy science**, v. 103, n. 10, p. 9081-9089, 2020.

DELGADO, G. C. **Do capital financeiro na agricultura à economia do agronegócio: mudanças cíclicas em meio século [1965-2012]**. Editora da UFRGS, 2012.

DETERS, E. L.; HANSEN, S. L. Invited Review: Linking road transportation with oxidative stress in cattle and other species. **Applied Animal Science**, v. 36, n. 2, p. 183-200, 2020.

DÍAZ-SÁNCHEZ, V.; OLAZÁBAL-FENOCHIO, A.; IBARRA-GUDIÑO, C. Selenio, selenoproteínas y estrés oxidativo en pequeños rumiantes. Revisión. **Abanico agroforestal**, v. 1, 2019.

DIJKSTRA, J.; NEAL, H. D. S. C.; BEEVER, D. E.; FRANCE, J. Simulation of nutrient digestion, absorption and outflow in the rumen: model description. **The Journal of nutrition**, v. 122, n. 11, p. 2239-2256, 1992.

DUFFY, R.; YIN, M.; REDDING, L. E. A review of the impact of dietary zinc on livestock health. **Journal of Trace Elements and Minerals**, v. 5, p. 100085, 2023.

DUNIÈRE, L.; ESPARTEIRO, D.; LEBBAOUI, Y.; RUIZ, P.; BERNARD, M.; THOMAS, A.; CHAUCHEYRAS-DURAND, F. Changes in digestive microbiota, rumen fermentations and oxidative stress around parturition are alleviated by live yeast feed supplementation to gestating ewes. **Journal of Fungi**, v. 7, n. 6, p. 447, 2021.

DURAND-CHAUCHEYRAS, F.; FONTY, G.; BERTIN, G.; THÉVENIOT, M.; GOUET, P. Fate of Levucell® SC I-1077 yeast additive during digestive transit in lambs. **Reproduction Nutrition Development**, v. 38, n. 3, p. 275-280, 1998.

EFSA – European Food Safety Authority. Scientific Opinion concerning the welfare of animals during transport. **EFSA Journal**, v. 20, n. 2, p. 1-188, 2022.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Bem-estar animal no transporte de bovinos de corte. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2012. 56 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Bem-estar animal no transporte de bovinos**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2012. (Comunicado Técnico, 142).

ERDOĞAN, S.; KARADAŞ, F.; YILMAZ, A.; KARACA, S. The effect of organic selenium in feeding of ewes in late pregnancy on selenium transfer to progeny. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 46, n. 02, p. 147-155, 2017.

ERFLE, J. D.; SAUER, F. D.; MAHADEVAN, S. Effect of ammonia concentration on activity of enzymes of ammonia assimilation and on synthesis of amino acids by mixed rumen bacteria in continuous culture. **Journal of Dairy Science**, v. 60, n. 7, p. 1064-1072, 1977.

FALCÃO, V. A. A importância do transporte ferroviário de carga para a economia brasileira e suas reais perspectivas de crescimento. **Engenharia Civil – UM**, n. 45, p. 51–63, 2013.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. *FAOSTAT Statistical Database*. Rome: FAO, 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat>. Acesso em: 28 ago. 2025.

FARLEY, J. O. The isolation and identification of yeasts contaminating cattle tongue epithelial cultures of the virus of foot-and-mouth disease. **Transactions of the British Mycological Society**, v. 41, n. 3, p. 320-324, 1958.

FILIPPO, P. A. D.; DUARTE, B. R.; ALBERNAZ, A. P.; FONSECA, L. A. D.; VIANA, I. S.; QUIRINO, C. R. Efeitos da privação alimentar de 48 horas na resposta de fase aguda em cavalos. **Ciência Animal Brasileira**, v. 23, p. e-72445E, 2022.

FINCK, D. N.; RIBEIRO, F. R. B.; BURDICK, N. C.; PARR, S. L.; CARROLL, J. A.; YOUNG, T. R.; BERNHARD, B. C.; CORLEY, J. R.; ESTEFAN, A. G.; RATHMANN, R. J.; JOHNSON, B. J. Yeast supplementation alters the performance and health status of receiving cattle. **The Professional Animal Scientist**, v. 30, n. 3, p. 333-341, 2014.

FISHER, A. D.; NIEMEYER, D. O.; LEA, J. M.; LEE, C.; PAULL, D. R.; REED, M. T.; FERGUSON, D. M. The effects of 12, 30, or 48 hours of road transport on the physiological and behavioral responses of sheep. **Journal of Animal Science**, v. 88, n. 6, p. 2144–2152, 2010.

FONTY, G.; CHAUCHEYRAS-DURAND, F. Effects and modes of action of live yeasts in the rumen. **Biologia**, v. 61, n. 6, p. 741-750, 2006.

GALLO, C. Transport and pre-slaughter operations, with special reference to cattle. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, supl. especial, p. 77-82, 2008.

GARCIA JÚNIOR, A. R. O Sul: caminho do roçado: estratégias de reprodução camponesa e transformação social. **São Paulo, Marco Zero e Brasília, UnB/CNPq. Sociedade E Estado**, 5(01), 140–142, 1989.

GARCIA, A. C. F. Z. **Utilização da suplementação de zinco orgânico e vitamina E na contagem de células somáticas do leite bovino**. 2007. 80 f. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

GARDINER, M. R. Selenium in animal nutrition. **Outlook on Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 19-28, 1969.

GENTHER, O. N.; HANSEN, S. L. A multielement trace mineral injection improves liver

copper and selenium concentrations and manganese superoxide dismutase activity in beef steers. **Journal of animal science**, v. 92, n. 2, p. 695-704, 2014.

GENTHER, O. N.; HANSEN, S. L. The effect of trace mineral source and concentration on ruminal digestion and mineral solubility. **Journal of Dairy Science**, v. 98, n. 1, p. 566-573, 2015.

GENTHER-SCHROEDER, O. N.; HANSEN, S. L. Effect of a multielement trace mineral injection before transit stress on inflammatory response, growth performance, and carcass characteristics of beef steers. **Journal of Animal Science**, v. 93, n. 4, p. 1767-1779, 2015.

GIERUS, M. Fontes orgânicas e inorgânicas de selênio na nutrição de vacas leiteiras: digestão, absorção, metabolismo e exigências. **Ciência Rural**, v. 37, p. 1212-1220, 2007.

GOFF, J. P. Invited review: Mineral absorption mechanisms, mineral interactions that affect acid–base and antioxidant status, and diet considerations to improve mineral status. **Journal of dairy science**, v. 101, n. 4, p. 2763-2813, 2018.

GRANDIN, T.; GALLO, C. **Cattle transport**. In: GRANDIN, T. (Ed.). *Livestock handling and transport*. 3. ed. Cambridge: CABI, 2007. p. 134-154.

GREGORY, N. G. Preslaughter handling, stunning and slaughter. **Meat science**, v. 36, n. 1-2, p. 45-56, 1994.

GRIFFIN, G. K.; NEWTON, G.; TARRIO, M. L.; BU, D. X.; MAGANTO-GARCIA, E., AZCUTIA, V.; LICHTMAN, A. H. IL-17 and TNF- α sustain neutrophil recruitment during inflammation through synergistic effects on endothelial activation. **The Journal of Immunology**, v. 188, n. 12, p. 6287-6299, 2012.

HIMMS-HAGEN, J. Sympathetic regulation of metabolism. *Pharmacol. Rev.* 19:367–461, 1967.

HOGAN, J. S.; WEISS, W. P.; SMITH, K. L. Role of vitamin E and selenium in host defense against mastitis. **Journal of Dairy Science**, v. 76, n. 9, p. 2795-2803, 1993.

HUTCHESON, D. P.; COLE, N. A. Management of transit-stress syndrome in cattle: Nutritional and environmental effects. **Journal of Animal Science**, v. 62, n. 2, p. 555-560, 1986.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Agropecuário 1980*. Rio de Janeiro: IBGE, 1980.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Agropecuário 1985*. Rio de Janeiro: IBGE, 1985.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Agropecuário 1995–1996*. Rio de Janeiro: IBGE, 1996.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Agropecuário 2006*. Rio de Janeiro: IBGE, 2006.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Agropecuário 2017: resultados definitivos*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa Pecuária Municipal – PPM*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. **Censo Agropecuário 2017**: tabela 6910: número de estabelecimentos agropecuários com bovinos, efetivos e venda, por tipologia, condição do produtor em relação às terras, grupos de cabeças de bovinos e grupos de atividade econômica. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6910>. Acesso em: 28 de agosto de 2025.

JIANG, Y.; OGUNADE, I. M.; QI, S.; HACKMANN, T. J.; STAPLES, C. R.; ADESOGAN, A. T. Effects of the dose and viability of *Saccharomyces cerevisiae*. 1. Diversity of ruminal microbes as analyzed by Illumina MiSeq sequencing and quantitative PCR. **Journal of Dairy Science**, v. 100, n. 1, p. 325-342, 2017.

JOHNSON, R. R.; BENTLEY, O. G.; HIBBS, J. W.; CONRAD, H. R. Ruminant Nutrition, In Vivo and in Vitro Nutritional Requirements of Rumen Microorganisms. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 4, n. 7, p. 627-631, 1956.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian cerrado. **Conservation biology**, v. 19, n. 3, p. 707-713, 2005.

KNOWLES, G.; WARRISS, P. D.; BROWN, S. N.; EDWARDS, J. E. Effects on cattle of transportation by road for up to 31 hours. **Veterinary Record**, v. 145, n. 20, p. 575-582, 1999.

KUTASI, J.; JURKOVICH, V.; BRYDL, E.; KONYVES, L.; TIRIÁN, A. E.; BATA, Á. Influence of different *Saccharomyces cerevisiae* strains on the oxygen concentration in the rumen fluid. **Journal of Animal and Feed Sciences**, v. 13, p. 131-134, 2004.

LI, Z.; TANG, J.; LI, J.; LING, D.; HE, X.; TANG, Y.; YI, P.; YANG, Y.; KOO, H. E.; LIU, Y. Organic selenium supplementation increases serum selenium levels in healthy Xinjiang brown cattle fed selenised yeast. **J. Anim. Feed. Sci.**, v. 10, 2023.

LIPPOLIS, K. D.; COOKE, R. F.; SILVA, L. G. T.; SCHUBACH, K. M.; BRANDAO, A. P.; MARQUES, R. S.; LARSON, C. K.; RUSSELL, J. R.; ARISPE, A.; DELCURTO, T.; BOHNERT, D. W. Effects of organic complexed or inorganic Co, Cu, Mn and Zn supplementation during a 45-day preconditioning period on productive and health responses of feeder cattle. **animal**, v. 11, n. 11, p. 1949-1956, 2017.

LUCCI, C. S.; MOXON, A.; ZANETTI, M. A.; NETO, R. F.; MARCOMINI, D. G. Selênio em bovinos leiteiros do estado de São Paulo. II Níveis de Selênio nas forragens e concentrados. **Revista da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo**, v. 21, n. 1, p. 71-76, 1984.

LUSEBA, D. Effects of sodium selenite and chromium sulphate as metabolic modifiers on stress alleviation, performance and liver mineral contents of feedlot Bonsmara cross steers. **African Journal of Agricultural Research**, v. 8, n. 47, p. 6012-6020, 2013.

MALCOLM-CALLIS, K. J.; DUFF, G. C.; GUNTER, S. A.; KEGLEY, E. B.; VERMEIRE, D. A. Effects of supplemental zinc concentration and source on performance, carcass characteristics, and serum values in finishing beef steers. **Journal of Animal Science**, v. 78, n. 11, p. 2801-2808, 2000.

MAMIGONIAN, A. Notas sobre os frigoríficos do Brasil central pecuário. **Boletim Paulista de Geografia**, v. 51, p. 7-14, 1976.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Manual de boas práticas de bem-estar animal para o transporte de bovinos. Brasília: MAPA, 2017. 92 p.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. *Projeções do Agronegócio: Brasil 2019/20 a 2029/30*. Brasília: MAPA, 2020.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. *Projeções do Agronegócio: Brasil 2023/24 a 2033/34*. Brasília: MAPA, 2024.

MARET, W. Zinc biochemistry: from a single zinc enzyme to a key element of life. **Advances in nutrition**, v. 4, n. 1, p. 82-91, 2013.

MARQUES, R. S.; BOHNERT, D. W.; SOUSA, O. A.; BRANDÃO, A. P.; SCHUMACHER, T. F.; SCHUBACH, K. M.; COOKE, R. F. Impact of 24-h feed, water, or feed and water deprivation on feed intake, metabolic, and inflammatory responses in beef heifers. **Journal of Animal Science**, v. 97, n. 1, p. 398-406, 2019.

MARQUES, R. S.; COOKE, R. F.; FRANCISCO, C. L.; BOHNERT, D. W. Effects of twenty-four hour transport or twenty-four hour feed and water deprivation on physiologic and performance responses of feeder cattle. **Journal of Animal Science**, v. 90, n. 13, p. 5040-5046, 2012.

MARREIRO, D. D. N.; CRUZ, K. J. C.; MORAIS, J. B. S.; BESERRA, J. B.; SEVERO, J. S.; OLIVEIRA, A. R. S. Zinc and oxidative stress: current mechanisms. **Antioxidants**, v. 6, n. 2, p. 24, 2017.

MCCORD, J. M.; FRIDOVICH, I. The biology and pathology of oxygen radicals. **Annals of Internal Medicine**, v. 89, n. 1, p. 122-127, 1978.

MEISKE, J. C.; SALSBURY, R. L.; HOEFER, J. A.; LUECKE, R. W. The effect of starvation and subsequent refeeding on some activities of rumen microorganisms in vitro. **Journal of Animal Science**, v. 17, n. 3, p. 774-781, 1958.

MERTZ, W. Chromium occurrence and function in biological systems. **Physiological reviews**, v. 49, n. 2, p. 163-239, 1969.

MERTZ, W. Chromium: history and nutritional importance. **Biological Trace Element**

Research, v. 32, n. 1, p. 3-8, 1992.

MILLER, W. J. Zinc nutrition of cattle: a review. **Journal of Dairy Science**, v. 53, n. 8, p. 1123-1135, 1970.

MILLER-WEBSTER, T.; HOOVER, W. H.; HOLT, M.; NOCEK, J. E. Influence of yeast culture on ruminal microbial metabolism in continuous culture. **Journal of Dairy Science**, v. 85, n. 8, p. 2009-2014, 2002.

MOONSIE-SHAGEER, S.; MOWAT, D. N. Effect of level of supplemental chromium on performance, serum constituents, and immune status of stressed feeder calves. **Journal of Animal Science**, v. 71, n. 1, p. 232-238, 1993.

MORAES, S. D. S.; TOKARNIA, C. H.; DÖBEREINER, J. Microelement deficiencies and imbalances in cattle and sheep in some regions of Brazil. **Pesquisa Veterinária Brasileira**, v. 19, p. 19-33, 1999.

MORIEL, P.; ARTHINGTON, J. D. Effects of trace mineral-fortified, limit-fed preweaning supplements on performance of pre-and postweaned beef calves. **Journal of Animal Science**, v. 91, n. 3, p. 1371-1380, 2013.

MORRIS, B. W.; MACNEIL, S.; STANLEY, K.; GRAY, T. A.; FRASER, R. The inter-relationship between insulin and chromium in hyperinsulinaemic euglycaemic clamps in healthy volunteers. **Journal of endocrinology**, v. 139, n. 2, p. 339-345, 1993.

MUEGGE, C. R.; BRENNAN, K. M.; SCHOONMAKER, J. P. Supplementation of organic and inorganic selenium to late gestation and early lactation beef cows effect on cow and preweaning calf performance. **Journal of animal science**, v. 94, n. 8, p. 3399-3408, 2016.

MURPHY, M. P. How mitochondria produce reactive oxygen species. **Biochemical journal**, v. 417, n. 1, p. 1-13, 2009.

NAUSEEF, W. M. Assembly of the phagocyte NADPH oxidase. **Histochemistry and Cell Biology**, 122(4), 277–291, 2004.

NOGUEIRA, B. C. F.; CAMPOS, A. K.; ALVES, R. S.; FARIA, R. D. C. V.; SARANDY, M. M.; SILVA, F. F.; GONÇALVES, R. V. Oxidative and local histopathological response on skin wound of horses due to *Amblyomma sculptum* tick parasitism. **Research in Veterinary Science**, v. 136, p. 550-560, 2021.

NOLAN, J. V.; LENG, R. A. Dynamic aspects of ammonia and urea metabolism in sheep. **British Journal of Nutrition**, v. 27, n. 1, p. 177-194, 1972.

NRC – National Research Council. *Nutrient Requirements of Beef Cattle*. 7th.ed. Washington, DC: **National Academy Press**, 242p. 2000.

NRC – National Research Council. *Nutrient requirements of dairy cattle*. Washington, DC, USA: **National Academy Press**, 362 p. 2001.

NZEYIMANA, J. B.; FAN, C.; TAN, L.; BUTORE, J.; ZHUO, Z.; CHENG, J. Meta-analysis of the effect of feeding live yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) on feeding behaviour and lactation performance, rumen fermentation, and rumen microbiota in dairy cattle. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, v. 11, n. 4, p. 2023028-2023028, 2023.

OGUNADE, I. M.; LAY, J.; ANDRIES, K.; MCMANUS, C. J.; BEBE, F. Effects of live yeast on differential genetic and functional attributes of rumen microbiota in beef cattle. **Journal of animal science and biotechnology**, v. 10, n. 1, p. 68, 2019.

OIE – World Organisation for Animal Health. Terrestrial Animal Health Code: transport of animals by land. Paris: OIE, 2019. Disponível em: <https://www.woah.org>. Acesso em: 8 ago. 2025.

OIE – World Organisation for Animal Health. **Terrestrial Animal Health Code: transport of animals by land**. Paris: OIE, 2019. Disponível em: <https://www.woah.org>. Acesso em: 8 ago. 2025.

OTT, E. A.; SMITH, W. H.; HARRINGTON, R. B.; BEESON, W. M. Zinc toxicity in ruminants. II. Effect of high levels of dietary zinc on gains, feed consumption and feed efficiency of beef cattle. **Journal of animal science**, v. 25, n. 2, p. 419-423, 1966.

PALMA, A. S. V. D.; BARRA, C. N.; HERLING, V. R.; GOMIDE, C. A.; NETTO, A. S. Suplementação com aditivos nutricionais e minerais orgânicos no desempenho de bezerros Nelore recém-desmamados em pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 11, p. 1071-1078, 2015.

PECHOVA, A.; PAVLATA, L. Chromium as an essential nutrient: a review. **Veterinární medicína**, v. 52, n. 1, p. 1-18, 2007.

PÉRA, T.G.; COSTA, E.L.; CAIXETA-FILHO, J.V. Impactos dos reajustes dos preços de óleo diesel na logística do agronegócio brasileiro no período de janeiro/2017 a maio/2018. Série: Logística do Agronegócio – Desafios e Oportunidades, v.2. Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial (ESALQ-LOG). Piracicaba, SP, 2018.

PEREIRA, M. A.; BUNGENSTAB, D. J.; EUCLIDES, V. P. B.; MALAFAIA, G. C.; BISCOLA, P. H. N.; MENEZES, G. R. O.; ABREU, U. G. P.; LAURA, V. A.; NOGUEIRA, E.; MAURO, R. A.; SULVA, M. P.; NICACIO, A. C.; ALMEIDA, R. G.; GOMES, R. C.; SILVA, J. C. B.; SPUZA, V. F. From traditionally extensive to sustainably intensive: a review on the path to a sustainable and inclusive beef farming in Brazil. **Animals**, v. 14, n. 16, p. 2340, 2024.

PETRONI, R.; BÜRGER, K. P.; GONÇALEZ, P. O.; MARQUES, R. G. A.; VIDAL-MARTINS, A. M. C.; AGUILAR, C. E. G. Ocorrência de contusões em carcaças bovinas em frigorífico. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 14, p. 478-484, 2013.

PINLOCHE, E.; MCEWAN, N.; MARDEN, J. P.; BAYOURTHE, C.; AUCLAIR, E.;

NEWBOLD, C. J. The effects of a probiotic yeast on the bacterial diversity and population structure in the rumen of cattle. **PloS one**, v. 8, n. 7, p. e67824, 2013.

POLIZEL NETO, A.; JORGE, A. M.; MOREIRA, P. S. A.; GOMES, H. F. B.; PINHEIRO, R. S. B. Desempenho e qualidade da carne de bovinos Nelore e F1 Brangus× Nelore recebendo suplemento com cromo complexado à molécula orgânica na terminação a pasto. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, p. 737-745, 2009.

RASHNOO, M.; RAHMATI, Z.; AZARFAR, A.; FADAYIFAR, A. The effects of maternal supplementation of selenium and iodine via slow-release blouses in late pregnancy on milk production of goats and performance of their kids. **Italian Journal of Animal Science**, v. 19, n. 1, p. 502-513, 2020.

REFFETT, J. K.; SPEARS, J. W.; BROWN JR, T. T. Effect of dietary selenium on the primary and secondary immune response in calves challenged with infectious bovine rhinotracheitis virus. **The Journal of nutrition**, v. 118, n. 2, p. 229-235, 1988.

RODRIGUES, G. P.; KIEFER, C.; NASCIMENTO, K. M. R. D. S.; CORASSA, A.; GARCIA, E. R. D. M.; MARÇAL, D. A.; ROCHA, G. C. Combined supplementation of chromium-yeast and selenium-yeast on finishing barrows. **Ciência Rural**, v. 50, n. 11, p. e20190406, 2020.

RULE, D. C.; BEITZ, D. C.; BOER, G.; LYLE, R. R.; TRENKLE, A. H.; YOUNG, J. W. Changes in hormone and metabolite concentrations in plasma of steers during a prolonged fast. **Journal of animal science**, v. 61, n. 4, p. 868-875, 1985.

RUSSELL, J. B. Strategies that ruminal bacteria use to handle excess carbohydrate. **Journal of Animal Science**, v. 76, n. 7, p. 1955-1963, 1998.

RUSSELL, J. B.; O'CONNOR, J. D.; FOX, D. G.; VAN SOEST, P. J.; SNIFFEN, C. J. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: I. Ruminal fermentation. **Journal of animal science**, v. 70, n. 11, p. 3551-3561, 1992.

SCHAEFER, A. L.; JONES, S. D. M.; STANLEY, R. W. The use of electrolyte solutions for reducing transport stress. **Journal of animal science**, v. 75, n. 1, p. 258-265, 1997.

SCHIEBER, M.; CHANDEL, N. S. ROS function in redox signaling and oxidative stress. **Current biology**, v. 24, n. 10, p. R453-R462, 2014.

SGOIFO ROSSI, C.; COMPIANI, R.; BALDI, G.; MURARO, M.; MARDEN, J.; ROSSI, R.; PASTORELLI, G.; CORINO, C.; DELL'ORTO, V. Organic selenium supplementation improves growth parameters, immune and antioxidant status of newly received beef cattle. **Journal of Animal and Feed Sciences**, v. 26, n. 2, p. 100-108, 2017.

SHARMAN, G. A. M. Selenium in animal health. **Proceedings of the Nutrition Society**, v. 19, n. 2, p. 169-176, 1960.

SHINI, S.; SULTAN, A.; BRYDEN, W. L. Selenium biochemistry and bioavailability: implications for animal agriculture. **Agriculture**, v. 5, n. 4, p. 1277-1288, 2015.

SHIVELY, J. E. **Selenium and sulfur nutrition of beef cattle**. Iowa State University, 1967.

SHONO, S.; GIN, A.; MINOWA, F.; OKUBO, K.; MOCHIZUKI, M. The oxidative stress markers of horses—the comparison with other animals and the influence of exercise and disease. **Animals**, v. 10, n. 4, p. 617, 2020.

SILVA, J. L.; BERTOLONI, W.; ABREU RIBEIRO, J. S. INDICADORES DE ESTRESSE E QUALIDADE DE CARNE DE BOVINOS TRANSPORTADOS EM DIFERENTES TIPOS DE CAMINHÕES (TRADICIONAL, CARRETA DE UM PISO E CARRETA DE DOIS PISOS) E DIFERENTES DISTÂNCIAS NA REGIÃO DE CUIABÁ/MT/BRASIL. **Archives of Veterinary Science**, v. 21, n. 3, 2016.

SILVA, J. S.; RODRIGUEZ, F. D.; TRETTEL, M.; ABAL, R. T.; LIMA, C. G.; YOSHIKAWA, C. Y. C.; ZANETTI, M. A. Performance, carcass characteristics and meat quality of Nellore cattle supplemented with supranutritional doses of sodium selenite or selenium-enriched yeast. **Animal**, v. 14, n.1, 215–222, 2020.

SILVA, R. A. M. S. **Avaliação da infra-estrutura logística e datação da idade das lesões em carcaça de bovinos abatidos no Pantanal Sul-Mato-Grossense**. 2008. Tese (Doutorado em Medicina Veterinária) — Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Botucatu, 2008. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/a64c54c8-d4d6-43a9-b848-574c530841ab/content>. Acesso em: 4 set. 2025.

SORDILLO, L. M. Selenium-dependent regulation of oxidative stress and immunity in periparturient dairy cattle. **Veterinary medicine international**, v. 2013, n. 1, p. 154045, 2013.

SORDILLO, L. M.; AITKEN, S. L. Impact of oxidative stress on the health and immune function of dairy cattle. **Veterinary immunology and immunopathology**, v. 128, n. 1-3, p. 104-109, 2009.

SORENSEN, M.; SANZ, A.; GOMEZ, J.; PAMPLONA, R.; PORTERO-OTIN, M.; GREDILLA, R.; BARJA, G. Effects of fasting on oxidative stress in rat liver mitochondria. **Free Radical Research**, v. 40, n. 4, p. 339-347, 2006.

SPEARS, J. W. Micronutrients and immune function in cattle. **Proceedings of the nutrition society**, v. 59, n. 4, p. 587-594, 2000.

SPEARS, J. W. Organic trace minerals in ruminant nutrition. **Animal feed science and technology**, v. 58, n. 1-2, p. 151-163, 1996.

STABEL, J. R.; SPEARS, J. W.; BROWN JR, T. T.; BRAKE, J. Selenium effects on glutathione peroxidase and the immune response of stressed calves challenged with *Pasteurella hemolytica*. **Journal of Animal Science**, v. 67, n. 2, p. 557-564, 1989.

SWANSON, J. C.; MORROW-TESCH, J. Cattle transport: historical, research, and future perspectives. **Journal of Animal Science**, v. 79, E-Suppl, p. E102-E109,

2001.

TAPIERO, H.; TEW, K. D. Trace elements in human physiology and pathology: zinc and metallothioneins. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 57, n. 9, p. 399-411, 2003.

TARRANT, P. V.; GRANDIN, T. **Cattle transport**. In: GRANDIN, T. (Ed.). *Livestock handling and transport*. London: CABI, 1993. p. 151-173.

TARRANT, P. V.; KENNY, F. J.; HARRINGTON, D. The effect of stocking density during 4 hour transport to slaughter on behaviour, blood constituents and carcass bruising in Friesian steers. **Meat Science**, v. 24, n. 3, p. 209-222, 1988.

UNDERWOOD, E.J.; SUTTLE, N.F. **The Mineral Nutrition of Livestock**. 3rd ed. CAB International Publishing Co.; pp. 57-80, 1999. <http://dx.doi.org/10.1079/9780851991283.0000>.

UNIÃO EUROPEIA. **Regulamento (CE) nº 1/2005 do Conselho, de 22 de dezembro de 2004**. Relativo à proteção dos animais durante o transporte e operações afins. Jornal Oficial da União Europeia, L 3, 5 jan. 2005.

VAN KESSEL, J. A. S.; RUSSELL, J. B. The effect of pH on ruminal methanogenesis. **FEMS microbiology ecology**, v. 20, n. 4, p. 205-210, 1996.

VELLINI, B. L.; PRADOS, L. F.; MONÇÃO, F. P.; FIREMAN, A. K.; RESENDE, F. D.; SIQUEIRA, G. R. Zinc amino acid complex in association with chromium methionine improves the feed efficiency of finished Nellore cattle in the feedlot. **Animal Feed Science and Technology**, v. 262, p. 114430, 2020.

VILLELA, T. M. A.; TEDESCO, G. M. I. Sistema de transporte rodoviário de cargas: uma proposta para sua estrutura e elementos. **Transportes**, v. 19, n. 2, p. 57-65, 2011.

WALLACE, R. J.; NEWBOLD, C. J. Rumen microbiology, biotechnology and ruminant nutrition. In: HOBSON, P. N.; STEWART, C. S. (Ed.). *The Rumen Microbial Ecosystem*. 2. ed. London: Blackie Academic & Professional, p. 467-491, 1997.

WANG, D.; JIA, D.; HE, R.; LIAN, S.; WANG, J.; WU, R. Association between serum selenium level and subclinical mastitis in dairy cattle. **Biological trace element research**, v. 199, n. 4, p. 1389-1396, 2021.

WARRISS, P. D. The handling of cattle pre-slaughter and its effects on carcass and meat quality. **Applied animal behaviour science**, v. 28, n. 1-2, p. 171-186, 1990.

WEISS, W. P. Selenium sources for dairy cattle. 2005.

WERNER, M.; HEPP, C.; SOTO, C.; GALLARDO, P.; BUSTAMANTE, H.; GALLO, C. Effects of a long distance transport and subsequent recovery in recently weaned crossbred beef calves in Southern Chile. **Livestock Science**, v. 152, n. 1, p. 42-46, 2013.

WERNICKI, A. S. A. S.; URBAN-CHMIEL, R. S. A. S.; KANKOFER, M. S. B. S.; MIKUCKI, P.; PUCHALSKI, A. S. A. S.; TOKARZEWSKI, S. S. A. S. Evaluation of plasma cortisol and TBARS levels in calves after short-term transportation. **Revue de médecine vétérinaire**, v. 157, n. 1, p. 30, 2006.

WERNICKI, A.; URBAN-CHMIEL, R.; PUCHALSKI, A.; DEC, M. Evaluation of the influence of transport and adaptation stress on chosen immune and oxidative parameters and occurrence of respiratory syndrome in feedlot calves. **Journal of Veterinary Research**, v. 58, n. 1, p. 111-116, 2014.

WHITE, B. J.; ANDERSON, D. E.; RITCHIE, H. D.; WARNER, R. M.; GAY, J. M. Associations of beef calf wellness and body weight gain with internal location in a truck during transportation. **Journal of animal science**, v. 87, n. 12, p. 4143-4150, 2009.

WILLIAMS, P. E. V.; TAIT, C. A. G.; INNES, G. M.; NEWBOLD, C. J. Effects of the inclusion of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae* plus growth medium) in the diet of dairy cows on milk yield and forage degradation and fermentation patterns in the rumen of steers. **Journal of animal science**, v. 69, n. 7, p. 3016-3026, 1991.

XIAO, H.; SMEEKENS, J. M.; WU, R. Quantification of tunicamycin-induced protein expression and N-glycosylation changes in yeast. **Analyst**, v. 141, n. 12, p. 3737-3745, 2016.

YARI, M.; NIKKHAH, A.; ALIKHANI, M.; KHORVASH, M.; RAHMANI, H.; GHORBANI, G. R. Physiological calf responses to increased chromium supply in summer. **Journal of Dairy Science**, v. 93, n. 9, p. 4111-4120, 2010.

YI, S.; TIAN, X.; QIN, X.; ZHANG, Y.; GUAN, S.; CHEN, Z.; CAI, D.; WU, D.; WANG, R.; NA, Z.; WANG, M.; ZHANG, X. Effects of Yeast Cultures on Growth Performance, Fiber Digestibility, Ruminal Dissolved Gases, Antioxidant Capacity and Immune Activity of Beef Cattle. **Animals**, v. 15, n. 10, p. 1452, 2025.

ZANETTI, M. A.; SALLES, M. S. V.; BRISOLA, M. L.; CÉSAR, M. C. Desempenho e resposta metabólica de bezerros recebendo dietas suplementadas com cromo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 32, p. 1532-1535, 2003.

ZELEŇÁK, I.; JALČ, D.; KMET, V.; SIROKA, P. Influence of diet and yeast supplement on in vitro ruminal characteristics. **Animal feed science and technology**, v. 49, n. 3-4, p. 211-221, 1994.

ZHANG, Y.; XU, Y.; CHEN, B.; ZHAO, B.; GAO, X. J. Selenium deficiency promotes oxidative stress-induced mastitis via activating the NF- κ B and MAPK pathways in dairy cow. **Biological trace element research**, v. 200, n. 6, p. 2716-2726, 2022.

ZHAO, H.; TANG, X.; WU, M.; LI, Q.; YI, X.; LIU, S.; JIANG, J.; WANG, S.; SUN, X. Transcriptome characterization of short distance transport stress in beef cattle blood. **Frontiers in Genetics**, v. 12, p. 616388, 2021.

CAPÍTULO II: Impacto do transporte rodoviário por 48 horas e da suplementação com minerais orgânicos e levedura viva sobre o metabolismo e o desempenho de bovinos Nelore alimentados com forragem de baixa qualidade durante o período seco

RESUMO GERAL: Dois estudos foram conduzidos para investigar como o transporte rodoviário por 48 horas e duas fontes minerais em suplemento adensado afetam o metabolismo, a fermentação ruminal e o desempenho de bovinos Nelore recriados a pasto. No primeiro experimento, 20 novilhos Nelore, canulados no rúmen (peso corporal médio: 530 ± 30 kg; 30 meses) foram blocados por peso corporal e digestibilidade inicial e distribuídos aleatoriamente em baias individuais, em um arranjo fatorial 2×2 . O primeiro fator foi a condição de transporte: (1) animais não submetidos ao transporte rodoviário (NOTRANS) ou (2) animais submetidos ao transporte rodoviário por 48 horas com privação de água e alimento (CTRANS). O segundo fator foi a fonte mineral do suplemento adensado: (1) INOR – suplemento contendo apenas minerais inorgânicos (macro e microminerais inorgânicos, com selenito de sódio como fonte de Se e sem suplementação de Cr); ou (2) INOR+ORG – suplemento contendo macro e microminerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (cromo levedura, levedura enriquecida com selênio, *Saccharomyces cerevisiae* e proteinato de zinco). O período experimental teve duração de 56 dias, dividido em duas fases: (1) adaptação (d-21 a d-1) e (2) avaliação (d0 a d35). O consumo e a digestibilidade foram avaliados em diferentes períodos de coleta (d3–d5, d11–d13 e d32–d34). O transporte não afetou ($P = 0,790$) o consumo de matéria seca e de nutrientes. Entretanto, houve interação Transporte $\times$ Período para a digestibilidade da matéria seca ($P = 0,012$), matéria orgânica ($P = 0,012$), proteína bruta ($P = 0,005$) e fibra em detergente neutro ($P = 0,003$), além da excreção fecal ($P < 0,001$). Animais transportados (CTRANS) apresentaram maior digestibilidade nos dias 3 a 5, porém a digestibilidade foi reduzida e se igualou aos NOTRANS nos períodos de 11 a 13 e 32 a 34. O consumo de suplemento apresentou interação transporte $\times$ período em INOR+ORG ($P < 0,001$). A excreção fecal apresentou interação transporte $\times$ período ($P = 0,001$), sendo menor nos animais CTRANS nos dias 3 a 5, semelhante entre grupos de 11 a 13 dias e superior em CTRANS ao final do período experimental (32 a 34 dias). O metabolismo do nitrogênio também apresentou interação transporte $\times$ período para a relação PB:MOD ($P = 0,045$), consumo de MOD ($P = 0,046$) e excreção urinária de N ($P = 0,047$). Animais transportados (CTRANS) exibiram menor relação PB:MOD nos dias 3 a 5, acompanhada por maior excreção de N urinário nesse período, enquanto a excreção fecal de N mostrou padrão dinâmico, com queda inicial (3 a 5 dias) aumento posterior (32 a 34). Houve interação transporte $\times$ horário ($P \leq 0,006$) para os parâmetros de fermentação ruminal (AGV totais, proporções individuais, pH e N-NH₃). Em CTRANS, observou-se redução dos AGV totais (79,6 para 48,9 mMol/dL) acompanhada de aumento do pH (6,90 para 7,35). O propionato e o butirato apresentaram queda acentuada, enquanto os ácidos graxos ramificados (isobutirato, isovalerato e valerato) aumentaram durante o transporte. O N-NH₃ foi mais elevado em CTRANS nas primeiras 48 h (10,66 vs. 1,61 mg/dL; $P < 0,001$). No segundo experimento, 80 animais Nelore não castrados (PC $301 \pm 20,4$ kg) foram distribuídos em delineamento de blocos casualizados (arranjo fatorial 2×2), considerando o piquete como unidade experimental, com os mesmos tratamentos aplicados no Experimento 1. Os animais foram mantidos em piquetes de *Urochloa brizantha* cv. Marandu sob lotação contínua por 126 dias (21 dias de período de adaptação, e 105 dias de período de coletas). Os

animais foram bloqueados de acordo com o peso corporal inicial e, dentro de cada bloco, distribuídos aleatoriamente entre os tratamentos. Observou-se interação transporte × dia para proteína total ($P = 0,027$), ureia ($P < 0,01$), albumina ($P = 0,03$) e IGF-1 ($P < 0,01$). Animais CTRANS apresentaram maiores concentrações de proteína total nos dias 2 e 5 (7,19 e 6,92 vs. 6,22 e 6,62 g/dL em NOTRANS; $P < 0,01$) e maior concentração de albumina no dia 2 (3,52 vs. 3,06 g/dL; $P < 0,01$). A ureia sérica foi mais elevada em CTRANS no dia 2 (32,8 vs. 12,0 mg/dL; $P < 0,01$), mas posteriormente não diferiu entre grupos. Além disso, verificou-se interação mineral × dia experimental ($P = 0,02$), com menores concentrações de ureia em INOR+ORG nos primeiros dias pós-transporte (2 e 5), sugerindo efeito benéfico da suplementação sobre o metabolismo nitrogenado, ainda que de forma transitória. O IGF-1 foi reduzido em CTRANS nos dias 2 e 5 (140,8 e 175,8 vs. 256,9 e 244,9 ng/mL em NOTRANS; $P < 0,01$), com recuperação parcial a partir do dia 10. Para o desempenho, foi detectada interação Transporte × Período ($P < 0,001$) para peso corporal e GMD. Animais CTRANS apresentaram perda média após as 48 horas de transporte 47,2 kg (14,8% do PV inicial), seguida de recuperação parcial, mas sem alcançar os NOTRANS até o dia 105. Houve efeito da fonte mineral sobre o GMD geral (0 a 105 dias) ($P = 0,004$), com valores superiores para INOR+ORG em comparação a INOR, independentemente da condição de transporte. O transporte rodoviário de 48 horas impactou a digestibilidade, promoveu instabilidade fermentativa, alterações metabólicas e perda persistente de peso corporal, confirmando seu efeito fisiológico e produtivo de longa duração. A suplementação com minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (INOR+ORG) não evitou as alterações agudas no rúmen e no sangue, mas sustentou maior ganho médio diário em relação à suplementação exclusivamente inorgânica. Além disso, a suplementação com INOR+ORG aumentou o GMD acumulado (0,284 vs. 0,212 kg/dia) e melhorou parâmetros metabólicos, confirmando o benefício previsto para essa estratégia nutricional na atenuação dos efeitos negativos do transporte. Assim, conclui-se que o transporte prolongado gera efeitos persistentes sobre o metabolismo e o desempenho, e que a suplementação INOR+ORG os atenua, mas não os elimina.

Palavras-chave: bovinos de corte; estresse fisiológico; cromo levedura; selênio; proteinato de zinco.

Impact of 48-hour road transport and supplementation with organic minerals and live yeast on the metabolism and performance of Nellore cattle fed low-quality forage during the dry season

GENERAL ABSTRACT: Two studies were carried out to investigate how 48-hour road transport and two mineral sources supplementation impact the metabolism, ruminal fermentation and performance of Nellore cattle raised on pasture. In the first experiment, 20 rumen-cannulated Nellore steers (average body weight: 530 ± 30 kg; 30 months) were blocked by body weight and initial digestibility and randomly assigned to individual pens in a 2×2 factorial arrangement. The first factor was the transport: (1) animals not subjected to road transport (NOTRANS) or (2) animals subjected to 48-h road transport with food and water deprivation (CTRANS). The second factor was the mineral source supplementation: (1) INOR – supplement with inorganic minerals (inorganic macro- and microminerals, with sodium selenite as Se source and without Cr supplementation); or (2) INOR+ORG – supplement with inorganic macro and microminerals added from organic sources (yeast chromium, selenium-enriched yeast, *Saccharomyces cerevisiae* and zinc proteinate). The experimental period lasted 56 days and was divided into two phases: (1) adaptation (d-21 to d-1) and (2) evaluation (d0 to d35). Intake and digestibility were evaluated at different periods (d3–d5, d11–d13 and d32–d34). Transportation did not affect ($P = 0.790$) dry matter and nutrient intake. However, there was a Transportation $\times$ Period interaction for the digestibility of dry matter ($P = 0.012$), organic matter ($P = 0.012$), crude protein ($P = 0.005$) and neutral detergent fiber ($P = 0.003$), in addition to fecal excretion ($P < 0.001$). CTRANS animals showed higher digestibility from day 3 to 5, but the digestibility was reduced and was similar to NOTRANS animals from days 11 to 13 and 32 to 34. Supplement intake showed a transportation $\times$ period interaction for INOR+ORG ($P < 0.001$). Fecal excretion showed transport $\times$ period interaction ($P = 0.001$), being lower for CTRANS animals from day 3 to 5, and similar among treatments from day 11 to 13, and higher for CTRANS at the end of the experimental period (from day 32 to 34). Nitrogen metabolism also showed transport $\times$ period interaction for CP:MOD ratio ($P = 0.045$), MOD intake ($P = 0.046$) and urinary N excretion ($P = 0.047$). CTRANS animals showed a lower CP:MOD ratio from day 3 to 5, accompanied by a higher urinary N excretion during this period, while fecal N excretion showed a dynamic pattern, with an initial decrease (from day 3 to 5) and a subsequent increase (from day 32 to 34). There was a transport $\times$ time interaction ($P \leq 0.006$) for ruminal fermentation parameters (total VFA, individual proportions, pH, and N-NH₃ A reduction in total VFA (79.6 to 48.9 mMol/dL) was observed for CTRANS animals, accompanied by an increase in pH (6.90 to 7.35). Propionate and butyrate showed a sharp decrease, while branched fatty acids (isobutyrate, isovalerate, and valerate) increased during transport. N-NH₃ was higher in CTRANS animals in the first 48 h (10.66 vs. 1.61 mg/dL; $P < 0.001$). In the second experiment, 80 non-castrated Nellore animals (BW 301 ± 20.4 kg) were distributed in a randomized block design (2×2 factorial arrangement), considering the paddock as the experimental unit, with the same treatments applied in Experiment 1. The animals were kept in *Urochloa brizantha* cv. Marandu paddocks under continuous stocking rate for 126 days (21-day adaptation period and 105-day collection period). Within each block, the animals were randomly distributed among treatments. A transport $\times$ day interaction was observed for total protein ($P = 0.027$), urea ($P < 0.01$), albumin ($P = 0.03$), and IGF-1 ($P < 0.01$). CTRANS animals had higher total protein concentrations on days 2 and 5 (7.19 and 6.92 vs. 6.22 and 6.62 g/dL in NOTRANS; $P < 0.01$) and higher albumin concentration on day 2 (3.52 vs. 3.06 g/dL; $P < 0.01$). Serum urea was

higher in CTRANS animals on day 2 (32.8 vs. 12.0 mg/dL; $P < 0.01$) but did not differ among treatments thereafter. Furthermore, a mineral $\times$ experimental day interaction was observed ($P = 0.02$), with lower urea concentrations in INOR+ORG on the first day after transport (2 and 5), suggesting a beneficial effect of supplementation on nitrogen metabolism. IGF-1 was reduced in CTRANS animals on days 2 and 5 (140.8 and 175.8 vs. 256.9 and 244.9 ng/mL in NOTRANS; $P < 0.01$), with partial recovery from day 10. It was observed a Transport $\times$ Period interaction ($P < 0.001$) for body weight (BW) and average daily gain (ADG). CTRANS animals showed an average loss of 47.2 kg (14.8% of initial BW) after 48 hours of transport, followed by partial recovery, but without reaching NOTRANS animals until day 105. There was an effect of the mineral source on the overall ADG (0 to 105 days; $P = 0.004$), with higher values for INOR+ORG compared with INOR, regardless of the transport condition. The 48-hour road transport impacted digestibility, promoted fermentative instability, metabolic alterations, and persistent body weight loss, confirming its long-term physiological and productive effect. Inorganic minerals added to organic sources supplementation (INOR+ORG) did not prevent acute changes in the rumen and blood, but sustained greater ADG compared with exclusively inorganic supplementation (INOR). Furthermore, INOR+ORG supplementation increased accumulated ADG (0.284 vs. 0.212 kg/day) and improved metabolic parameters, confirming the predicted benefit of this nutritional strategy in mitigating the negative effects of transportation. Thus, we conclude that prolonged transportation generates persistent effects on metabolism and performance, and that INOR+ORG supplementation mitigates, but does not eliminate, these effects.

Keywords: beef cattle; physiological stress; chromium yeast; selenium; zinc proteinate.

1. Introdução:

O transporte rodoviário é reconhecido como um dos principais desafios fisiológicos para bovinos de corte, sendo responsável por desencadear alterações metabólicas, fisiológicas e comportamentais que comprometem o bem-estar e o desempenho produtivo. Durante esse processo, os animais são submetidos a múltiplos estressores como: movimentação contínua, vibrações, ruídos, mistura de lotes, variações de temperatura e confinamento em alta densidade, que ativam respostas neuroendócrinas mediadas pelo eixo hipotálamo-hipófise-adrenal. Esse mecanismo resulta em elevação de cortisol e catecolaminas, mobilização de reservas energéticas e intensificação do catabolismo proteico (WARRISS, 1990; TARRANT, 1988), culminando em redução do consumo, perda de peso vivo e queda no desempenho, especialmente em viagens prolongadas (SCHAEFER et al., 1997; MARQUES et al., 2012).

Além das alterações metabólicas imediatas, o transporte desencadeia inflamação sistêmica e distúrbios do metabolismo proteico, como elevação da ureia plasmática e maior degradação muscular (CARROLL et al., 2009; DETERS; HANSEN, 2020). A liberação de enzimas musculares, somada à instabilidade da homeostase ruminal, aumenta a vulnerabilidade dos animais ao estresse oxidativo. O excesso de espécies reativas de oxigênio compromete o equilíbrio redox e a integridade celular, ampliando os danos metabólicos (ARTHUR; MCKENZIE; BECKETT, 2003; LIPPOLIS et al., 2017). Assim, o transporte deve ser compreendido como um evento multifatorial, cujos efeitos se manifestam de forma aguda e podem se prolongar por vários dias.

A restrição hídrica e alimentar, inerente às viagens de longa duração, atua como fator adicional que agrava os efeitos do transporte, resultando em perdas de peso corporal, aumento da ureia plasmática e redução da digestibilidade e da eficiência de utilização dos nutrientes (ZANETTI et al., 2003; YARI et al., 2010). Essas alterações reduzem a retenção de nitrogênio e podem suprimir o eixo GH/IGF-1, comprometendo crescimento, síntese proteica e imunocompetência (CARROLL, 2007; COOKE, 2017; ARTHUR et al., 2003). Estudos clássicos demonstram ainda que até 75% da capacidade fermentativa ruminal pode ser comprometida após 48 horas de jejum, sendo necessária quase uma semana para plena recuperação (HUTCHESON; COLE, 1986), condição associada também a carcaças escuras ("dark cutting") (WARRISS, 1990; TARRANT, 1988).

Nesse contexto, a suplementação com microminerais orgânicos complexados apresenta vantagens fisiológicas pela maior biodisponibilidade e menor antagonismo com outros minerais em comparação às formas inorgânicas (PECHOVÁ; PAVLATA, 2007; SPEARS, 1996; RODRIGUES, 2020). O cromo, em especial, tem se destacado pelo papel como cofator da insulina, potencializando a captação de glicose e aminoácidos, reduzindo o cortisol circulante e favorecendo a resposta imune em situações de estresse (ANDERSON et al., 1978; MOONSIE-SHAGEER; MOWAT, 1993; SPEARS et al. 2025). O selênio, por sua vez, integra a estrutura de selenoproteínas antioxidantes como a glutathione peroxidase e as tioredoxina redutases, essenciais para neutralizar radicais livres e sustentar a função de neutrófilos e linfócitos (ARTHUR; MCKENZIE; BECKETT, 2003;). O zinco, além de seu papel estrutural em enzimas e fatores de transcrição zinc-finger (MARET, 2013; TAPIERO; TEW, 2003), estabiliza membranas e protege contra estresse oxidativo via Cu/Zn-SOD e metalotioneínas (GOFF, 2018; MARREIRO et al., 2017).

A associação desses microminerais a leveduras vivas, como *Saccharomyces cerevisiae*, potencializa efeitos benéficos sobre a fermentação ruminal, contribuindo para a estabilização do pH, maior digestibilidade de fibras e melhor eficiência alimentar em condições de desafio (WILLIAMS et al., 1991; MILLER-WEBSTER et al., 2002; PINLOCHE et al., 2013). Estudos demonstram que culturas de levedura reduzem a produção de metano, aumentam a população de bactérias celulolíticas, melhoram o equilíbrio redox e modulam a resposta inflamatória por meio de componentes como β -glucanos e mananoligossacarídeos (OGUNADE et al., 2019; BURDICK SANCHEZ et al., 2020; YI et al., 2025).

Hipotetizamos que o transporte rodoviário por 48 horas compromete a homeostase fisiológica, o metabolismo ruminal e o desempenho produtivo de bovinos Nelore. No entanto, a suplementação com cromo, selênio e zinco orgânicos associados à levedura viva pode atenuar esses impactos negativos, favorecendo a recuperação pós-transporte e a eficiência produtiva durante o período seco. O objetivo deste estudo foi investigar como o transporte prolongado e a suplementação mineral influenciam a fermentação ruminal, o metabolismo e o desempenho de bovinos Nelore recriados a pasto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os procedimentos de cuidado e manuseio dos animais foram aprovados pela Comissão de Ética no Uso de Animais do Departamento de Descentralização do Desenvolvimento (CEUA DDD, protocolo 008/2025).

2.1. Local

Este estudo foi conduzido na Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA), Pólo Regional da Alta Mogiana, Colina, São Paulo, Brasil (coordenadas geográficas: 20°42'50,0" S 48°32'52,7" W), durante a estação seca de junho a setembro de 2023.

2.2. Tratamentos experimentais

Foram conduzidos dois experimentos complementares com bovinos da raça Nelore, ambos utilizando o mesmo delineamento experimental e os mesmos tratamentos (condição de transporte e fonte mineral), diferindo apenas quanto ao perfil dos animais e ao tipo de avaliação realizada. O Experimento 1 contou com 20 novilhos castrados e canulados no rúmen, enquanto o Experimento 2 envolveu 80 garrotes inteiros, totalizando 100 animais avaliados. Em ambos os estudos, os animais foram distribuídos em blocos casualizados, de acordo com características de peso corporal e desempenho, e alocados nos tratamentos segundo um arranjo fatorial 2×2 , de forma a permitir a avaliação isolada e combinada dos fatores de interesse.

Os tratamentos foram distribuídos para investigar os efeitos da condição de transporte, da fonte mineral do suplemento adensado e suas interações. O primeiro fator foi a condição de transporte: (1) Sem transporte (NOTRANS) – animais não submetidos ao transporte rodoviário; ou (2) Com transporte (CTRANS) – animais submetidos ao transporte rodoviário por 48 horas, com privação de água e alimento durante o percurso. O segundo fator foi a fonte mineral do suplemento adensado: (1) INOR – suplemento contendo apenas minerais inorgânicos (macro e microminerais inorgânicos, com selenito de sódio como fonte de Se e sem suplementação de Cr); ou (2) INOR+ORG – suplemento contendo minerais inorgânicos (macro e microminerais) acrescidos de fontes orgânicas (levedura inativada desidratada, cromo levedura, levedura enriquecida com Se, *Saccharomyces cerevisiae* e proteinato de Zn).

Tabela 1. Composição de ingredientes e química do suplemento adensado

Item	INOR	INOR+ORG
Ingredientes (%)		
Milho moído	35	35
Premix mineral ^{1,2,3}	36	34,65
Sal branco	15	15
Ureia	5.0	5.0
Optigen	9	9
Beef sacc+	0	1,35
Composição química (g/kg MS)		
Matéria Seca	900	892
Proteína Bruta	395,6	395,6
Fibra em detergente neutro	265	253
Matéria mineral	600	543
mg/kg MS ⁴		
Selênio	5	6,82
Cromo	0	13,5

¹Calcário Calcítico, Enxofre Ventilado (Flor de Enxofre), Monóxido de manganês, Sulfato de Cobalto, Iodato de cálcio, Selenito de Sódio, Sulfato de Cobre, óxido de Magnésio, Fosfato Bicálcio, Cloreto de Sódio (sal comum), Sulfato de Zinco, Ureia Pecuária, Ureia Protegida. ²Calcário Calcítico, Enxofre Ventilado (Flor de Enxofre), Monóxido de manganês, Sulfato de Cobalto, Iodato de cálcio, Selenito de Sódio, Sulfato de Cobre, óxido de Magnésio, Fosfato Bicálcio, Cloreto de Sódio (sal comum), Sulfato de Zinco, Levedura inativada desidratada, Proteinado de Zinco, Cromo levedura, *Saccharomyces cerevisiae* (CBS 493 94), Levedura enriquecida com selênio, Ureia Pecuária, Ureia Protegida. ³Cálcio: 98,6 g/kg; fósforo: 40 g/kg; sódio: 57,6 g/kg; magnésio 5 g/kg; enxofre: 15 g/kg; cobalto: 45 mg/kg; Cobre: 0,5 g/kg; Iodo: 25 mg/kg; manganês, 1 g/kg; selênio: 5 mg/kg, zinco: 1,5 g/kg. ⁴Cont: 5,0 mg/kg de Se na forma de Selenito de sódio; BEEF: selenito de sódio contendo 5,0 mg/kg de Se e 1,82 mg/kg de levedura enriquecida de selênio e 13,5 mg/kg de Cr orgânico (cromo levedura), mais levedura desidratada inativada, *Saccharomyces cerevisiae* (CBS 493 94).

2.3 Experimento 1: metabolismo animal

2.3.1. Animais, delineamento experimental, dietas e densidade de transporte

Vinte novilhos Nelore, castrados e canulados no rúmen, com peso corporal médio de $530,7 \pm 94,5$ kg e idade média de 30 meses, foram alojados individualmente em baias equipadas com piso de concreto, cocho de alimentação e bebedouro. Os animais foram blocados por peso corporal e digestibilidade aparente da matéria seca (DigMS = $55,2 \pm 6,5\%$) e distribuídos aleatoriamente entre os tratamentos em arranjo fatorial 2×2 (condição de transporte $\times$ fonte mineral). O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro tratamentos e cinco repetições planejadas. Durante o período experimental, ocorreu a perda de um animal no tratamento CTRANS + INOR, resultando em quatro repetições nesse tratamento e cinco repetições nos demais (n final = 19). Os animais receberam feno de *Urochloa brizantha* cv. Marandu ad libitum, representando a fonte de forragem durante a estação seca, juntamente com um suplemento adensado fornecido na proporção de 0,5 g/kg de peso corporal (Tabela 1).

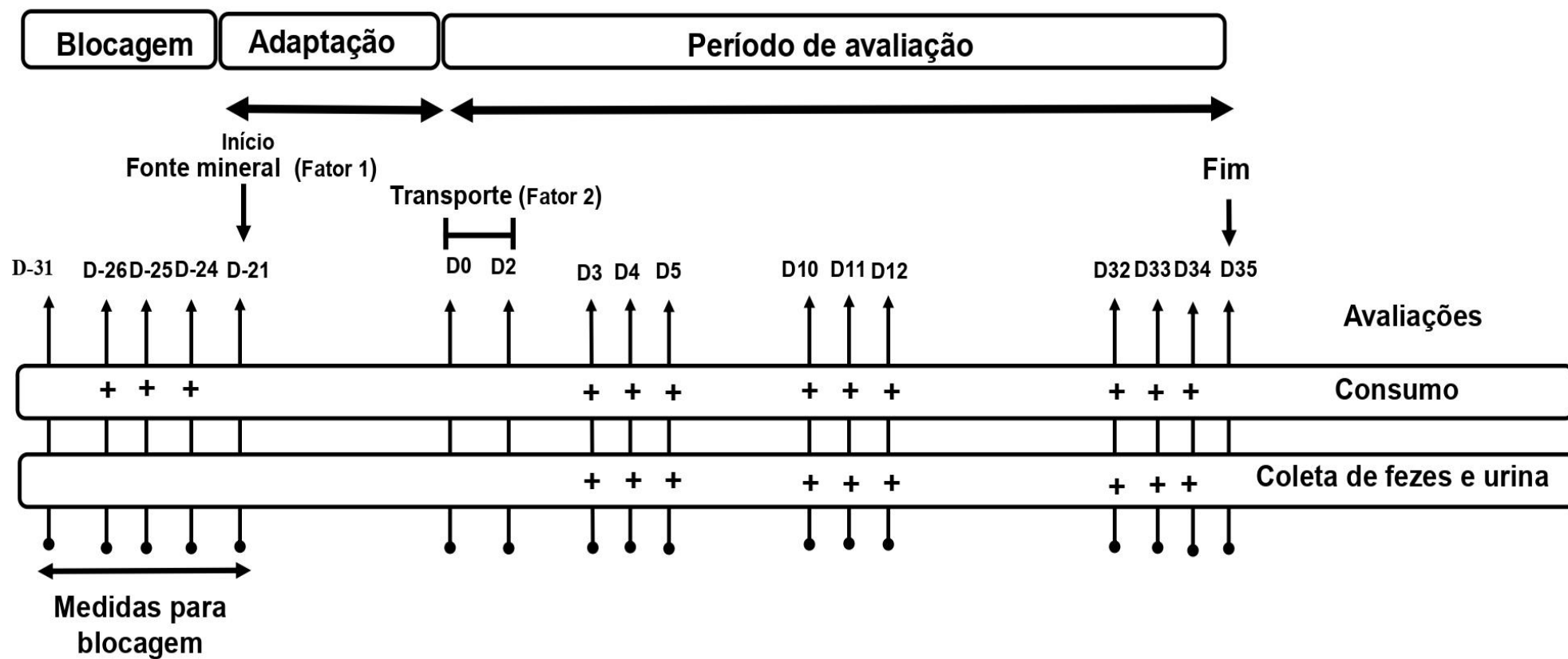
Nos tratamentos em que os animais foram designados ao transporte rodoviário (CTTRANS), o transporte foi realizado em caminhão tipo truck, com piso ripado de madeira, uma divisória interna e com carroceria de dimensões internas de 6,0 m de comprimento, 2,46 m de largura e 1,93 m de altura, totalizando uma área útil de 14,76 m². Assim, foram transportados 10 novilhos, correspondentes aos tratamentos que envolveram a condição de transporte o que resultou em uma densidade de 1,48 m²/animal. De acordo com as recomendações do MAPA (2022), para bovinos com peso aproximado de 530 kg, a densidade mínima estabelecida é de 1,23 m²/animal.

2.3.2. O período experimental e a aplicação dos tratamentos

O período experimental teve duração de 65 dias, dividido em três fases: (1) período inicial de adaptação à forragem (d -31 a d -22), quando os animais foram pesados e receberam exclusivamente feno de *Urochloa brizantha* cv. Marandu, fornecido de forma uniforme a todos os grupos; nesse intervalo, entre os dias -26 e -24, foram realizadas coletas de fezes para determinação da digestibilidade aparente da matéria seca e posterior blocagem dos animais por peso corporal e digestibilidade; (2) período de adaptação aos tratamentos (d -21 a d -1), iniciado com nova pesagem

dos animais e no qual foi implementado apenas o fator fonte mineral por meio do suplemento, mantendo-se o mesmo feno para todos os grupos; e (3) período de avaliação (d 2 a d 35).

Entre os dias 0 e 2 foi aplicado o segundo fator experimental, correspondente ao transporte rodoviário. Nesse período, os animais designados ao transporte foram embarcados no dia 0, após contenção em tronco de manejo, permanecendo em jejum de sólidos e líquidos durante todo o percurso, que teve duração contínua de 48 horas, percorrendo vias não pavimentadas, caracterizando uma simulação prática de uma condição real de deslocamento de longa duração. O veículo realizou apenas paradas técnicas para abastecimento, sem desembarque ou fornecimento de água e alimento durante o trajeto, garantindo uniformidade no manejo de todo o lote. Durante o percurso, o veículo realizou paradas técnicas para abastecimento e descanso do motorista (obrigatório por lei: n.º 13.103/2015), sem desembarque dos animais ou fornecimento de água e alimento, assegurando condições homogêneas de manejo para todo o lote. Simultaneamente, os animais dos tratamentos sem transporte permaneceram na área experimental, sem exposição ao estresse de transporte. Após a conclusão do transporte (na manhã do dia 2), todos os animais foram alocados em seus respectivos piquetes, com acesso a água, pasto e suplemento, mantendo-se os tratamentos previamente estabelecidos no dia -21.



OBS: O sinal positivo (+) indica o momento em que determinada avaliação será realizada.

Figura 1: pontos de coleta de fezes e urina durante o período experimental.

2.3.3. Avaliações experimentais

Ingestão e digestibilidade: Dos dias 3 a 5, 10 a 12 e 32 a 34, foram mensurados o consumo de feno e suplemento (oferecido menos sobras) e a produção fecal. Amostras de feno e suplemento (fornecido e sobras) foram coletadas diariamente, homogeneizadas e compostas por animal dentro de cada período experimental, sendo posteriormente analisadas quanto ao teor de matéria seca (MS) e perfil de nutrientes, incluindo matéria mineral (MM), proteína bruta (PB) e fibra em detergente neutro (FDN).

Nos mesmos dias em que o consumo foi mensurado (Figura 1), foi realizada a coleta total de fezes para determinação da digestibilidade aparente dos nutrientes: matéria seca (DMS), matéria orgânica (DMO), proteína bruta (DPB) e fibra em detergente neutro (DFDN). A produção fecal foi coletada individualmente e quantificada em balança eletrônica quatro vezes ao dia (7h00, 15h00, 23h00 e 7h00 do dia seguinte). Uma amostra representativa, correspondente a aproximadamente 10% do peso úmido da produção diária de cada animal, foi retirada, homogeneizada e armazenada a -20 °C no mesmo dia da coleta. Ao final dos três dias de coleta, as amostras foram descongeladas, homogeneizadas, subdivididas em três partes iguais e encaminhadas para secagem em estufa de ventilação forçada a 55 °C por 72 horas, sendo posteriormente moídas em peneira de 1 mm para formação de uma amostra composta por animal e período experimental, utilizada nas análises de nutrientes.

A digestibilidade total dos nutrientes (DTN) foi obtida usando a fórmula descrita por Polizel et al. (2020): $DTN (\%) = ((IMS \times CNMS) - (MSFE \times CNFE) \times 100) / (IMS \times CNMS)$, onde IMS = Ingestão de matéria seca (kg), CNMS = Concentração de nutrientes da IMS (%), MSFE = Matéria seca fecal (kg), CNFE = Concentração de nutriente das fezes (%).

Balanço de nitrogênio

A coleta total de urina foi realizada nos mesmos dias destinados à coleta de fezes, utilizando-se um aparato de colheita individual conectado a um recipiente plástico contendo 500 mL de solução de ácido sulfúrico a 20%. A presença do ácido teve como finalidade acidificar a urina, evitando a volatilização do nitrogênio na forma de amônia e preservando as amostras para posteriores análises laboratoriais,

conforme descrito por Chen e Gomes (1992). O volume urinário diário de cada animal foi quantificado em proveta graduada imediatamente após a coleta, homogeneizado e posteriormente subamostras foram retiradas, acondicionadas em frascos plásticos identificados e armazenadas a -20 °C até a realização das análises laboratoriais de nitrogênio total.

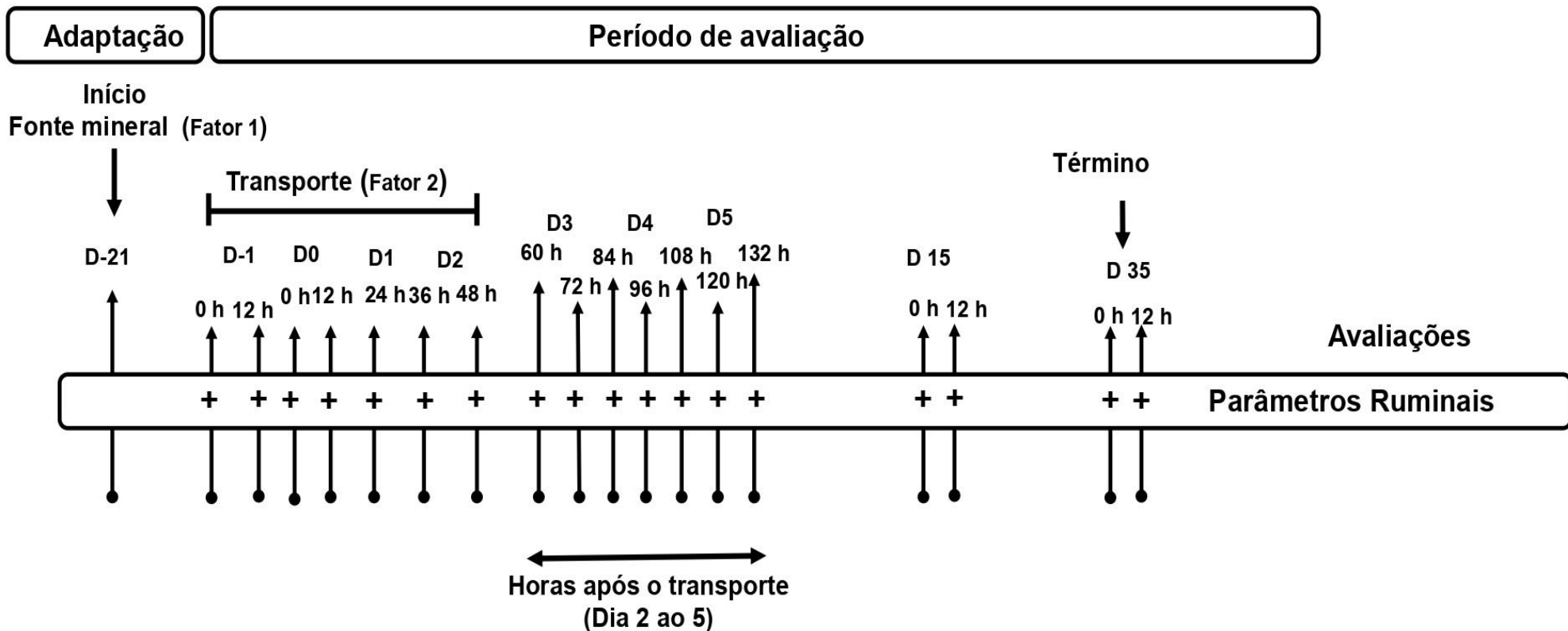
A excreção de nitrogênio urinário (N-urina, g/dia) foi obtida pela multiplicação do volume total de urina pelo teor de nitrogênio determinado na amostra, segundo os procedimentos descritos por Chizzotti et al. (2006), que validaram a coleta total de urina como método-padrão para estimativa da excreção de compostos nitrogenados. O mesmo procedimento foi adotado para estimar a excreção de nitrogênio fecal (N-fezes, g/dia).

O balanço de nitrogênio foi calculado pela diferença entre o nitrogênio ingerido (N-ingestão, g/dia), obtido a partir do consumo de matéria seca e do teor de proteína bruta da dieta, e o nitrogênio excretado (N-excreção, g/dia), determinado pela soma do N excretado nas fezes e na urina. A eficiência de utilização do nitrogênio (EUN, %) foi estimada pela razão entre o nitrogênio retido (N-retido, g/dia) e o nitrogênio ingerido, expressa pela equação:

$$\text{EUN (\%)} = (\text{Nretido} / \text{Ningerido}) \times 100$$

em que $\text{Nretido} = \text{Ningerido} - (\text{Nfezes} + \text{Nurina})$.

Esse procedimento metodológico, amplamente consolidado na literatura, permite estimar com precisão a partição do nitrogênio entre ingestão, excreção e retenção, fornecendo subsídios para avaliar a eficiência do aproveitamento proteico pelos animais experimentais (CHEN e GOMES, 1992; CHIZZOTTI et al., 2006).



OBS: O sinal positivo (+) indica o momento em que determinada avaliação foi realizada.

Figura 2: pontos de coleta de líquido ruminal para aferição dos parâmetros ruminiais durante o período experimental.

Parâmetros ruminais: Nos dias -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 15 e 35 do período experimental (Figura 2) às 0 e 12 horas após alimentação, amostras de líquido ruminal foram coletadas (aproximadamente 150 mL/animal/tempo). As amostras foram filtradas através de 4 camadas de gaze. Após o processo de filtragem, o pH do rúmen (50 mL de fluido ruminal) foi medido em um potenciômetro digital (DM-22, Digimed, São Paulo, Brasil). As amostras para determinação de nitrogênio amoniacal foram preservadas pela adição de 1 mL de ácido sulfúrico a 50 mL de fluido ruminal e armazenadas a 20 °C até a análise pelo método colorimétrico de hipoclorito de fenol (WEATHERBURN, 1962). Outra alíquota de 10 mL foi coletada para análise da proporção molar de ácidos graxos de cadeia curta (AGCCs; acetato, propionato, butirato, valerato, isobutirato e isovalerato) e armazenada a 20 °C até ser determinada por cromatografia gasosa (GCMS QP 2010 plus, Shimadzu, Kyoto, Japão) usando uma coluna capilar (Stabilwax, Restek, Bellefonte, EUA; 60 m, 0,25 mm Ø, 0,25 µm carbowax de ligação cruzada de polietilenoglicol) de acordo com o método descrito por Erwin et al. (1961).

2.4. Experimento 2: Desempenho animal

2.4.1. Área experimental

O experimento foi conduzido em área composta pela forrageira *Urochloa brizantha* cv. Marandu. A área foi dividida em 16 piquetes (1.8 hectares cada). Todos os piquetes possuíam bebedouro redondo tipo australiano e cocho para suplementação (espaçamento de 50 cm linear por animal). O pasto foi vedado no final de abril de 2023 para ser utilizado durante o período experimental (maio a setembro de 2023).

2.4.2. Animais, delineamento experimental, método de pastejo e densidade de transporte

Oitenta bovinos Nelore inteiros (301 kg $\pm$ 20,4 kg; idade= 15 meses) foram atribuídos aos piquetes em delineamento de blocos casualizados em arranjo fatorial (2 x 2), totalizando quatro tratamentos e quatro repetições (piquete com cinco animais). O peso corporal médio (média dos pesos obtidos de pesagens em dois dias consecutivos) foi o fator de blocagem. Foram utilizados quatro piquetes por bloco. Os animais foram manejados em pastejo sob lotação contínua, com taxa de lotação fixa.

Fornecimento e ajuste do suplemento: O suplemento foi fornecido a todos os animais diariamente às 10h00. A quantidade ofertada foi definida de acordo com uma taxa fixa de 0,5 g/kg de peso vivo (PV), equivalente a 0,05% do PV. Para garantir a correção do fornecimento ao longo do tempo, os animais foram pesados ao término do período de adaptação e no início de cada período experimental, e com base nesses valores a quantidade de suplemento destinada a cada animal foi reajustada.

Nos tratamentos em que os animais foram designados ao transporte rodoviário, o transporte foi realizado carreta articulada boiadeira, com carroceria de dimensões internas de 14,88 m de comprimento, 2,46 m de largura e 1,90 m de altura, totalizando uma área útil de 36,60 m². Foram transportados 40 garrotes Nelore, com peso médio de 301 kg, o que resultou em uma densidade de 0,92 m²/animal. De acordo com as recomendações do MAPA (2022), para bovinos dessa categoria (~300 kg), a densidade mínima estabelecida é de 0,86 m²/animal; portanto, neste estudo os animais foram transportados com maior espaço disponível por indivíduo em relação ao mínimo recomendado.

2.4.3. Período experimental e aplicação dos tratamentos

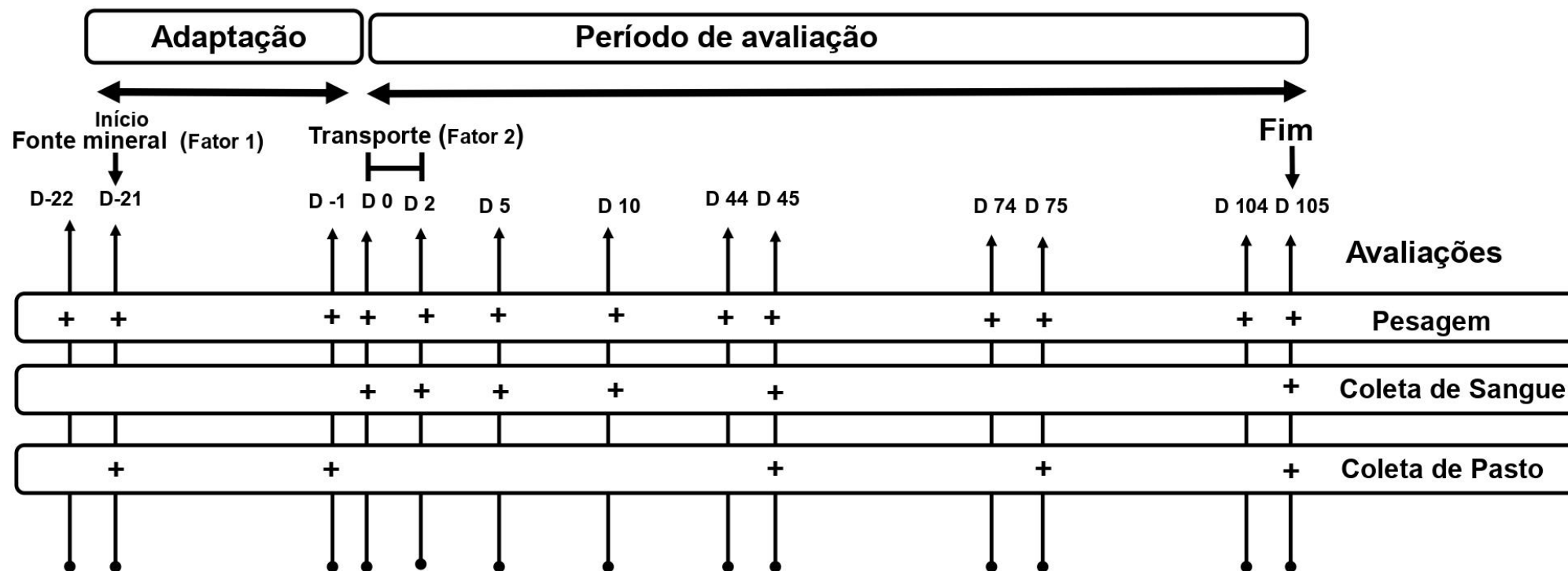
O período experimental teve duração de 126 dias, dividido em fase de adaptação à dieta e à área experimental (d -21 a d -1) e período de avaliação (d 0 a d 105). No d -21, os animais foram pesados, blocados por peso corporal e distribuídos aleatoriamente dentro de cada faixa, sendo então alocados em suas unidades experimentais e iniciados os tratamentos referentes às fontes minerais. No d0 os animais destinados ao transporte foram embarcados, após contenção em tronco de manejo, permanecendo em jejum de sólidos e líquidos durante todo o percurso, que teve duração contínua de 48 horas, percorrendo vias não pavimentadas, caracterizando uma simulação prática de uma condição real de deslocamento de longa duração. O veículo realizou apenas paradas técnicas para abastecimento, sem desembarque ou fornecimento de água e alimento durante o trajeto, garantindo uniformidade no manejo de todo o lote. Durante o percurso, o veículo realizou paradas técnicas para abastecimento e descanso do motorista (obrigatório por lei: n.º 13.103/2015), sem desembarque dos animais ou fornecimento de água e alimento, assegurando condições homogêneas de manejo para todo o lote. Simultaneamente, os animais dos tratamentos sem transporte permaneceram na área experimental, sem

exposição ao estresse de transporte. Após a conclusão do transporte (na manhã do dia 2), todos os animais foram alocados em seus respectivos piquetes, com acesso a água, pasto e suplemento, mantendo-se os tratamentos previamente estabelecidos no dia -21.

2.4.4. Avaliações experimentais

Desempenho animal:

O peso corporal (PC) individual foi registrado em dois dias consecutivos antes do início do experimento, para ser utilizado como critério de blocagem. As pesagens iniciais foram realizadas nos dias -22 e -21, antecedendo o período de adaptação. Ao final da fase de adaptação, imediatamente antes da aplicação do tratamento de transporte rodoviário (dias -1 e 0), novas pesagens foram realizadas. O PC também foi registrado nos dias 2 (imediatamente após o transporte), 5 e 10, para avaliação da recuperação pós-transporte. A perda de peso foi expressa como a variação percentual entre o PC médio registrado nos dias -1 e 0 em relação ao PC registrado no dia 2. Além disso, foram realizadas pesagens em dois dias consecutivos em cada período de experimental (dias 44 e 45, 74 e 75, e 104 e 105), utilizando balança eletrônica. Todas as pesagens foram realizadas sem jejum, às 7 horas da manhã (figura 3). O ganho médio diário (GMD) foi calculado com base nas diferenças de PC obtidas nas seguintes pesagens: dias -22 e -21; -1 e 0; 2; 10; 44 e 45; 74 e 75; e 104 e 105.



OBS: O sinal positivo (+) indica o momento em que determinada avaliação será realizada.

Figura 3: Pontos de coleta do peso corporal, amostras de sangue e pasto.

Amostras de sangue: Foram selecionados dois animais/piquete que apresentavam peso corporal similar a média do piquete. O sangue foi coletado por punção venosa jugular em dois tubos de 10 ml, sem heparina-lítio, sempre antes da suplementação, nos dias 0 (imediatamente antes do transporte), 2 (imediatamente no fim do transporte), 5, 10, 45 e 105 (figura 2). Todas as amostras de sangue foram colocadas imediatamente em caixas contendo gelo, centrifugadas (2500 x g por 30 minutos a 4°C) para coleta do soro, e armazenado em ultrafreezer a – 80 °C no mesmo dia da coleta.

Foram analisadas as concentrações séricas de proteína total, ureia, albumina e IGF-1. As concentrações séricas de ureia, albumina e proteína total foram determinadas utilizando kits bioquímicos comerciais (Bioclin; Quibasa - Química Básica Ltda., Belo Horizonte, MG, Brasil) em analisador bioquímico automático (Cobas Mira Plus; Roche Diagnostic Systems). A concentração sérica de IGF-1 foi analisada conforme protocolo específico para hormônios, utilizando amostras coletadas em tubos contendo anticoagulante.

Massa de forragem: Nos dias -21, 0, 45, 75 e 105, a massa de forragem foi analisada pelo método de dupla amostragem (SOLLENBERGER e CHERNEY, 1995, onde a massa foi associada às leituras de altura do dossel (50 pontos de altura normal e comprimida) pelo uso do prato ascendente (rising plate meter). Em cada piquete foram selecionados três pontos de altura mínima, média e alta (determinados em função de 2 desvios padrões). Uma amostra de forragem de 0,25 m² de cada ponto selecionado foi coletada ao nível do solo e posteriormente uma subamostra foi seca em estufa a 55°C por 72 horas para determinação da matéria seca parcial (MS). Foi realizada uma equação de regressão linear, através dos dados de massa e suas respectivas alturas, onde foi estabelecida uma relação entre a altura do dossel e a massa de forragem, da seguinte forma: $MF \text{ (kg/há)} = a + b \times h \text{ (cm)}$; onde: MF = massa de forragem em kg/ha de matéria seca, h = altura do dossel em cm, a = intercepto da regressão e b = coeficiente angular da regressão.

Composição morfológica do pasto: A avaliação dos componentes morfológicos do dossel forrageiro foi realizada através de amostras colhidas na altura média de cada piquete, conforme descrito acima. As amostras foram separadas manualmente em: folha morta, colmo morto, colmo verde (bainha foliar e colmo) e folha verde. Após separação, os componentes foram pesados e parcialmente secos

em estufa de 55°C por 72 horas para a obtenção da matéria seca e proporção de cada componente no dossel forrageiro.

Determinação do valor nutritivo da forragem e suplementos: O pastejo simulado foi utilizado para representar a fração efetivamente consumida pelos animais. As amostras de forragem foram obtidas pelo método *hand-plucking* descrito por De Vries (1995), no qual o avaliador colhe manualmente partes da planta (folhas, colmos e inflorescências) em proporções semelhantes às observadas no comportamento ingestivo dos bovinos, de modo a reproduzir a dieta selecionada durante o pastejo. As amostras foram parcialmente secas em estufa de circulação de ar a 55 °C por 72 horas e, posteriormente, moídas em peneira de malha de 1 mm. Foram determinados os teores de matéria seca (MS; método 934.01), matéria mineral (MM; método 942.05), e proteína bruta (PB; método 978.04), de acordo com a AOAC (1995). E os teores de fibra em detergente neutro (FDN) foram determinados conforme a metodologia sequencial descrita por Robertson e Van Soest (1981).

Da mesma forma, os suplementos fornecidos aos animais também foram analisados quanto à sua composição bromatológica, utilizando os mesmos procedimentos descritos para a forragem. Como não houve sobras de suplemento durante o experimento, a amostragem foi realizada diretamente nos sacos de armazenamento antes do fornecimento diário, garantindo representatividade do material ofertado em cada período experimental.

Tabela 2: Características quantitativas e qualitativas da *Urochloa brizantha* cv Marandu durante os períodos experimentais

Item	Experimento 1 ¹				Experimento 2 ²		
	d 3–5	d 10–12	d 31–33	d –21- –1	d 0–45	d 46–75	d 76–105
Altura (cm)	-	-	-	44,67	40,89	38,98	36,07
Massa de forragem (kg MS/ha)	-	-	-	13 257	12 399	11 798	10 617
Massa foliar verde (kg MS/ha)	-	-	-	3 228	3 389	1081	792
Massa foliar verde e senescente	-	-	-	8 064	7 932	4 871	2 932
Densidade (kg MS/m ³)	-	-	-	2,87	3,02	3,00	2.60
Oferta de forragem (kg MS/kg PC)	-	-	-	16,1	15,2	13,3	11,4
Oferta de folhas verdes e senescentes (kg MS/kg PC)	-	-	-	3,86	3,64	1,14	0,73
Taxa de lotação (UA/ha)	-	-	-	1.85	1.97	2.09	2,13
Folha verde (g/kg MS)	-	-	-	268,1	229,7	31,5	70,5
Caule verde (g/kg MS)	-	-	-	359,4	344,2	233,3	213,7
Folha senescente (g/kg MS)	-	-	-	185,6	192,1	203,1	205,2
Caule senescente (g/kg MS)	-	-	-	186,7	233,8	531,9	510,5
Características qualitativas (g/kg MS)							
Matéria seca	942	905	960	308,4	317,8	628,3	442,2
Proteína Bruta	69,5	57,6	55,7	84,3	84,5	45,0	63,5
Fibra em detergente neutro	688	692	728	632,7	647,8	730,7	710,2
Matéria mineral	77,9	78,8	76,0	78,4	76,9	68,5	69,4

2.5 Análise estatística

As análises estatísticas foram conduzidas por meio do procedimento MIXED do software SAS (SAS Inst., Inc., Cary, NC, EUA). A normalidade dos resíduos foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, e possíveis outliers foram identificados por inspeção dos resíduos studentizados. A comparação das variáveis entre os tratamentos foi realizada por meio de ANOVA, utilizando delineamento em blocos casualizados com arranjo fatorial 2×2 (Transporte x fonte de mineral), considerando o animal como unidade experimental no experimento 1 e o piquete no experimento 2.

Experimento 1: O modelo estatístico utilizado para os parâmetros ruminais avaliados durante o transporte incluiu os efeitos da fonte de mineral, do transporte, do horário e suas interações. Para as demais variáveis, o modelo considerou os efeitos da fonte de mineral, do transporte, do período e suas interações. O bloco foi tratado como um efeito aleatório.

Os parâmetros ruminais mensurados nos horários 0 e 12 horas após a alimentação, nos dias -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 15 e 35 foram analisados separadamente em cada horário. Todas as variáveis foram analisadas como medidas repetidas no tempo, utilizando o procedimento REPEATED (SAS Institute, Inc., Cary, NC).

Experimento 2: O modelo estatístico para a análise de desempenho e metabólitos sanguíneos incluiu os efeitos da fonte de mineral, do transporte, do dia e suas interações como efeitos fixos. O bloco foi tratado como um efeito aleatório no modelo matemático. As variáveis relacionadas ao desempenho e aos metabólitos sanguíneos foram analisadas como medidas repetidas no tempo, utilizando o procedimento REPEATED do SAS (SAS Institute, Inc., Cary, NC).

As matrizes de covariância foram testadas e selecionadas com base no menor valor do critério de informação bayesiano (BIC – Bayesian Information Criterion). Os resultados foram expressos como médias de mínimos quadrados, e as comparações múltiplas entre tratamentos foram realizadas pelo teste PDIFF. O nível de significância adotado foi de $P \leq 0,05$, sendo consideradas como tendência estatística as probabilidades compreendidas entre $0,05 < P \leq 0,10$.

3. Resultados

3.1. Experimento 1

Consumo, digestibilidade e metabolismo do nitrogênio

Nenhuma interação foi detectada entre transporte e fonte de minerais para o consumo de forragem ($P=0,247$), suplemento ($P=0,568$), matéria seca total ($P=0,251$), consumo de MS em %PV ($P=0,651$), MO, PB e FDN ($P\geq 0,792$). Entretanto houve efeito do período, em que os animais do período 3 (dia 32 a 34) tiveram maior consumo de MS, MO, PB e FDN ($P<0,001$).

O consumo de forragem não apresentou interação transporte $\times$ período ($P=0,957$), nem efeito de transporte ($P=0,915$) ou da fonte mineral ($P=0,631$), com média geral de 6,80 kg/dia. Para INOR+ORG o consumo de suplemento apresentou interação significativa entre transporte e período ($P<0,001$), sem efeito principal de transporte ($P=0,344$) ou da fonte mineral ($P=0,187$), com média de 0,221 kg/dia.

Para o consumo total de matéria seca não foram observadas interações transporte $\times$ período ($P=0,946$), efeito de transporte ($P=0,926$) ou da fonte mineral ($P=0,718$), com média de 7,03 kg/dia. O consumo total de matéria seca em percentual do peso vivo não apresentou interação transporte $\times$ período ($P=0,651$), efeito de transporte ($P=0,989$) ou da fonte mineral ($P=0,889$), com média geral de 1,44%.

O consumo de matéria orgânica, proteína bruta e fibra em detergente neutro não apresentou efeito de transporte ($P\geq 0,790$), da fonte mineral ($P\geq 0,385$) ou de interação transporte $\times$ período ($P\geq 0,792$), com médias de 6,33 kg/dia, 0,546 kg/dia e 4,61 kg/dia, respectivamente. A excreção fecal foi menor nos dias 3 a 5 em CTRANS, e maior nos dias 32 a 34 (figura 4). interação entre transporte e período experimental ($P<0,001$) (Figura 4).

Interação privação $\times$ período foi detectada para digestibilidade dos nutrientes ($P < 0,05$; tabela 3). CTRANS apresentou maior digestibilidade da MS, MO, PB e FDN logo após o período de privação (dias 3 a 5; Figura 3). No entanto, CTRANS reduziu a digestibilidade em períodos mais prolongados, como entre os dias 11 a 13 e 32 a 34. Para essas variáveis, não foram detectados efeitos de transporte ($P\geq 0,423$) ou da fonte mineral ($P\geq 0,207$), nem interações entre transporte e fonte mineral ($P\geq 0,680$) (figura 5).

Tabela 3. Consumo e digestibilidade de novilhos Nelore submetidos (CTTRANS) ou não (NOTTRANS) ao transporte rodoviário por 48 horas e suplementados com suplemento adensado contendo minerais inorgânicos (INOR) ou minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (INOR+ORG).

Item	NOTTRANS		CTTRANS		EPM	Valor de Probabilidade						
	INOR	INOR+ORG	INOR	INOR+ORG		Trans.	Mineral	T × M	Per	Trans×Per	Min×Per	Trans×Min×Per
Consumo, kg/dia												
Forragem	6,64	6,94	6,90	6,75	0,234	0,915	0,631	0,247	<0,001	0,957	0,437	0,720
Suplemento	0,219	0,222	0,221	0,223	0,002	0,344	0,187	0,568	<0,001	<0,001	0,450	0,657
MS Total	6,87	7,18	7,12	6,96	0,200	0,926	0,718	0,251	<0,001	0,946	0,423	0,711
MS Total (%PV)	1,43	1,46	1,47	1,42	0,050	0,989	0,889	0,506	<0,001	0,651	0,311	0,606
Consumo de Nutrientes (kg/dia)												
MO	6,17	6,47	6,40	6,28	0,184	0,910	0,638	0,256	<0,001	0,949	0,418	0,700
PB	0,533	0,564	0,539	0,547	0,018	0,790	0,385	0,542	0,023	0,792	0,205	0,477
FDN	4,48	4,70	4,68	4,57	0,140	0,806	0,702	0,243	<0,001	0,869	0,462	0,735
Excreção Fecal (kg/dia)	3,05	3,04	3,08	2,87	0,139	0,646	0,443	0,515	<0,001	<0,001	0,608	0,184
Digestibilidade Aparente (g/kg)												
MS	558,9	582,6	571,1	588,7	19,3	0,640	0,292	0,886	<0,001	0,012	0,680	0,280
MO	581,5	605,1	592,4	611,4	18,6	0,651	0,262	0,909	<0,001	0,012	0,705	0,269
PB	643,8	642,7	634,2	646,1	14,3	0,833	0,741	0,680	<0,001	0,005	0,157	0,117
FDN	664,6	689,8	680,8	703,1	14,7	0,423	0,207	0,945	<0,001	0,003	0,863	0,323

NOTTRANS: animais mantidos em condições normais de manejo, com acesso contínuo à água e alimento. CTTRANS: animais submetidos a transporte rodoviário por 48 horas, com restrição total de água e alimento durante o período. INOR: suplemento adensado contendo minerais inorgânicos (selenito de sódio como fonte de selênio, sem inclusão de cromo suplementar). INOR+ORG: suplemento contendo minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (levedura inativada desidratada, cromo levedura, levedura enriquecida com Se, *Saccharomyces cerevisiae* e proteinato de Zn). EPM: erro padrão da média; Trans: efeito do Transporte rodoviário; Mineral: efeito a fonte de mineral; T × M: interação entre Transporte Rodoviário e a fonte de mineral; Per: efeito do período experimental; Trans × Per: Interação entre transporte e período experimental; Min × Per: interação entre fonte de mineral e período experimental; Trans × Min × Per: Interação entre transporte rodoviário, fonte de mineral e período experimental.

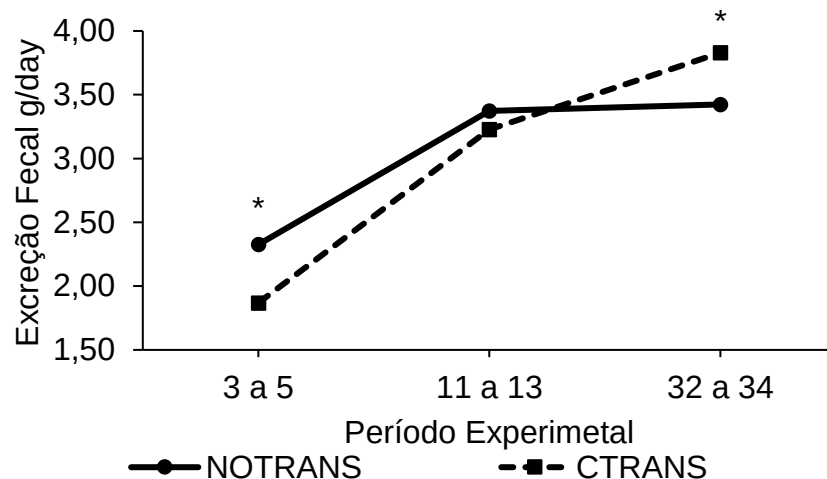


Figura 4: Interação: Transporte × Horas. Excreção fecal de novilhos Nelore submetidos (CTRANS) ou não (NOTRANS) ao transporte rodoviário por 48 horas e suplementados com minerais inorgânicos (INOR) ou suplemento contendo minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (INOR+ORG). * $P \leq 0,05$; ** $0,05 < P \leq 0,10$. NOTRANS: animais não submetidos ao transporte rodoviário; CTRANS: animais submetidos ao transporte rodoviário por 48 horas.

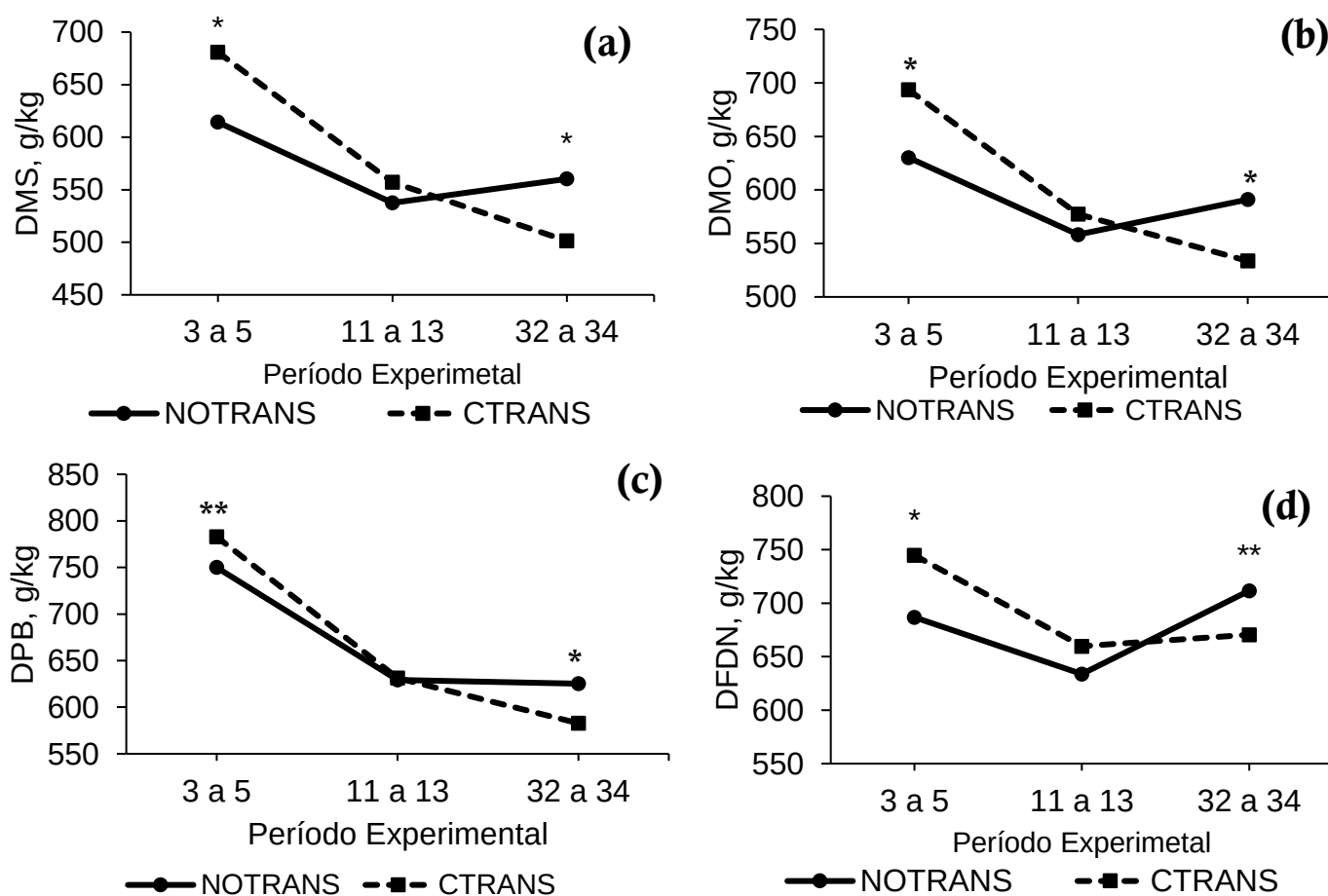


Figura 5: Interações: Transporte × Horas. Digestibilidade da MS (DMS; a), MO (DMO; b), PB (DPB; c) e FDN (DFDN; d) de novilhos Nelore submetidos (CTRANS) ou não (NOTRANS) ao transporte rodoviário por 48 horas e suplementados com minerais inorgânicos (INOR) ou suplemento contendo minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (INOR+ORG). * $P \leq 0,05$; ** $0,05 < P \leq 0,10$. NOTRANS: animais não submetidos ao transporte rodoviário; CTRANS: animais submetidos ao transporte rodoviário por 48 horas.

Foi observada interação entre transporte e período experimental para a relação proteína bruta/matéria orgânica digestível (PB:MOD; $P=0,045$), consumo de matéria orgânica digestível (CMOD; $P=0,046$), excreção urinária de nitrogênio ($P=0,047$) e excreção fecal de nitrogênio ($P=0,001$) (Tabela 4; Figura 6). CTRANS apresentaram menor PB:MOD nos dias 3 a 5 (Figura 6a), enquanto nos períodos de 11 a 13 e 32 a 34 os valores foram semelhantes aos NOTRANS. Para o CMOD (Figura 6b) e a excreção urinária de N (Figura 6c), os maiores valores foram observados em CTRANS nos dias 3 a 5, sem diferenças entre tratamentos nos dias 11 a 13 e 32 a 34. Já a excreção fecal de N (Figura 6d) apresentou padrão inverso, com menores valores em CTRANS nos dias 3 a 5 e aumento progressivo nos períodos seguintes, atingindo maiores valores no intervalo de 32 a 34 dias.

Para o fator transporte, não houve efeito ($P>0,05$) para as variáveis avaliadas ($P > 0,05$). Já a fonte mineral alterou significativamente o metabolismo do nitrogênio, para INOR+ORG que apresentaram maior consumo de N (91,6 vs. 81,8 g/dia; $P=0,005$) e maior excreção urinária de N (31,6 vs. 21,9 g/dia; $P<0,001$) em comparação aos INOR. Para as demais variáveis não foram observadas diferenças entre fontes minerais ($P > 0,05$). O nitrogênio retido ($P=0,012$) e a eficiência de utilização do nitrogênio (EUN; $P=0,002$) foram influenciados apenas pelo período experimental.

Tabela 4. Consumo de matéria orgânica digestível, relação entre proteína bruta e matéria orgânica digestível (PB/MOD) e variáveis do metabolismo do nitrogênio de novilhos Nelore submetidos (CTTRANS) ou não (NOTTRANS) ao transporte rodoviário por 48 horas e suplementados com suplemento adensado contendo minerais inorgânicos (INOR) ou minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (INOR+ORG).

Item	NOTTRANS		CTTRANS		EPM	Valor de Probabilidade						
	INOR	INOR+ORG	INOR	INOR+ORG		Trans.	Mineral	T × M	Per	T×Per	Min×Per	T×M×Per
PB/MOD (g/kg)	154,97	147,39	137,38	148,19	6,143	0,145	0,770	0,114	0,181	0,045	0,748	0,258
CMOD, kg	3,40	3,93	3,83	3,92	0,245	0,333	0,154	0,304	0,04	0,046	0,444	0,368
N Consumido (g/dia)	81,79	91,86	83,66	91,41	4,599	0,792	0,005	0,668	0,009	0,704	0,222	0,581
N Urina (g/dia)	21,85	32,10	26,11	31,01	2,217	0,315	<0,001	0,107	0,286	0,047	0,932	0,768
N Fezes (g/dia)	31,04	31,25	30,29	31,91	2,191	0,977	0,583	0,670	<0,001	0,001	0,557	0,314
N Retido (g/dia)	28,88	28,50	26,51	28,49	2,688	0,662	0,769	0,665	0,012	0,432	0,476	0,390
E.U.N (%)	35,36	31,31	31,66	30,98	2,842	0,453	0,380	0,529	0,002	0,297	0,595	0,378

NOTTRANS: animais mantidos em condições normais de manejo, com acesso contínuo à água e alimento. CTTRANS: animais submetidos a transporte rodoviário por 48 horas, com restrição total de água e alimento durante o período. INOR: suplemento adensado contendo minerais inorgânicos (selenito de sódio como fonte de selênio, sem inclusão de cromo suplementar). INOR+ORG: suplemento contendo minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (levedura inativada desidratada, cromo levedura, levedura enriquecida com Se, *Saccharomyces cerevisiae* e proteinato de Zn). EPM: erro padrão da média; Trans: efeito do Transporte rodoviário; Mineral: efeito a fonte de mineral; T × M: interação entre Transporte Rodoviário e a fonte de mineral; Per: efeito do período experimental; Trans × Per: Interação entre transporte e período experimental; Min × Per: interação entre fonte de mineral e período experimental; Trans × Min × Per: Interação entre transporte rodoviário, fonte de mineral e período experimental.

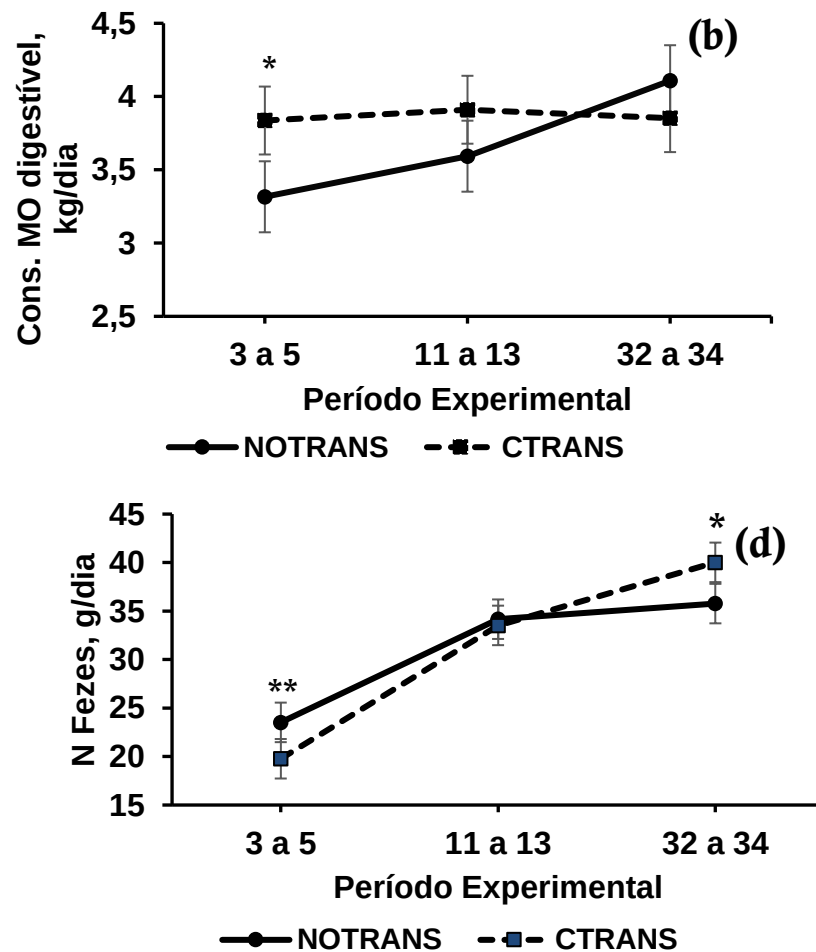
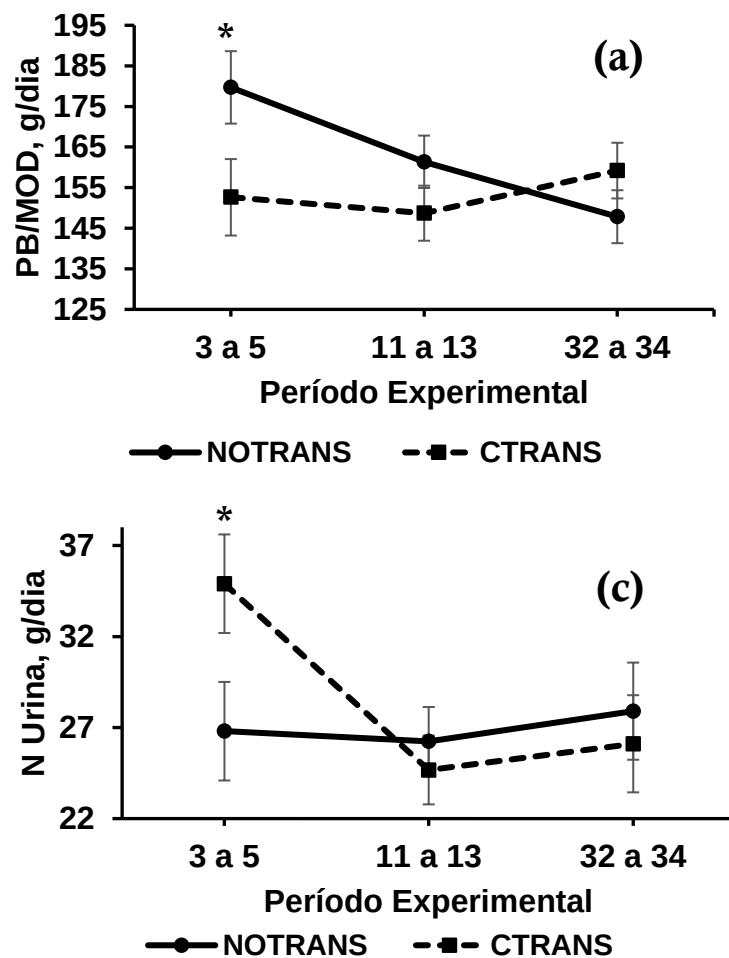


Figura 6: Interações: Transporte × Horas. Relação proteína bruta/matéria orgânica digestível (PB/MOD, a); Consumo de matéria orgânica digestível (CMOD, b); nitrogênio na urina (N urina, c); nitrogênio contido nas fezes (N fezes, d), em novilhos Nelore submetidos (CTRANS) ou não (NOTRANS) ao transporte rodoviário por 48 horas e suplementados com minerais inorgânicos (INOR) ou suplemento contendo minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (INOR+ORG) (levedura inativada desidratada, como levedura, levedura enriquecida com Se, *Saccharomyces cerevisiae* e proteinato de Zn). * $P \leq 0,05$; ** $0,05 < P \leq 0,10$. NOTRANS: animais mantidos em condições normais de manejo, com acesso contínuo à água e alimento. CTRANS: animais submetidos a transporte rodoviário por 48 horas, com restrição total de água e alimento durante o período.

Foi observada interação entre transporte e horário de avaliação ($P < 0,05$) para todos os parâmetros ruminais (tabela 5), exceto para acetato ($P = 0,339$). A concentração de AGV ruminal reduziu de 79,6 para 48,9 mMol/dL durante as 48 horas de transporte em CTRANS, e se manteve estável em NOTRANS ($P < 0,001$; Figura 7a). Para o propionato (Figura 7b), os animais CTRANS apresentaram reduções significativas em relação aos NOTRANS logo nas primeiras 12 h após o início do transporte (14,84 vs. 15,82 mMol/dL; $P = 0,05$) e mantiveram menores valores até as 48 h (12,97 vs. 15,11 mMol/dL; $P = 0,0044$). A partir de 60 h, observou-se elevação das concentrações em CTRANS, que passaram a superar as do grupo NOTRANS, atingindo 19,16 mMol/dL às 72 h (vs. 15,31 mMol/dL; $P = 0,0268$) e 18,31 mMol/dL às 84 h (vs. 15,75 mMol/dL; $P = 0,0171$). As 120 h, verificou-se apenas uma tendência de maiores valores para CTRANS em comparação aos NOTRANS (16,78 vs. 15,29 mMol/dL; $P = 0,0792$).

Para isobutirato, os resultados da interação transporte $\times$ horário ($P < 0,05$; Tabela 5; Figura 7c), demonstraram que CTRANS exibiram valores significativamente maiores nas primeiras horas do transporte, com 1,15 vs. 0,78 mMol/dL às 24 h ($P < 0,001$) e 1,31 vs. 0,75 mMol/dL às 48 h ($P = 0,001$). Entretanto, nos períodos posteriores ocorreu redução para CTRANS, que apresentaram valores inferiores aos NOTRANS às 72 h (0,58 vs. 0,80 mMol/dL; $P < 0,001$) e às 84 h (0,56 vs. 0,64 mMol/dL; $P = 0,0122$). A concentração de butirato exibiram reduções progressivas em CTRANS a partir das 36 h de transporte, com valores de 6,60 vs. 7,93 mMol/dL às 36 h ($P = 0,0015$) até períodos mais tardios, como 120 h (7,19 vs. 7,72 mMol/dL; $P = 0,0059$). As concentrações de isovalerato e valerato foram maiores em CTRANS entre 36 e 48 h, com picos de 1,78 vs. 0,87 mMol/dL às 48 h para o isovalerato, e de 0,93 vs. 0,56 mMol/dL às 36 h para o valerato ($P < 0,001$). Após esse período, os valores tenderam a cair, e aos 72 h ambos apresentaram menores concentrações em CTRANS, como no isovalerato (0,66 vs. 0,89 mMol/dL; $P < 0,001$) e no valerato (0,45 vs. 0,59 mMol/dL; $P = 0,001$).

As concentrações de N-NH₃ foram significativamente mais altas em CTRANS nas primeiras 48 h, com aumentos de 8,64 vs. 1,85 mg/dL às 12 h ($P < 0,001$), 8,59 vs. 2,35 mg/dL às 24 h ($P < 0,001$), 10,66 vs. 1,61 mg/dL às 36 h ($P < 0,001$) e 10,55 vs. 2,16 mg/dL às 48 h ($P < 0,001$) em comparação aos NOTRANS. De forma semelhante, o pH ruminal também se manteve superior em CTRANS nos mesmos intervalos, com valores de 7,18 vs. 6,67 às 36 h e 7,35 vs. 6,94 às 48 h ($P < 0,001$; Figura 9b).

Tabela 5: Parâmetros ruminais de novilhos Nelore submetidos ou não ao transporte rodoviário por 48 horas, suplementados com suplemento adensado contendo minerais inorgânicos (INOR) ou minerais orgânicos associados à levedura viva (INOR+ORG).

Item	NOTRANS		CTRANS		EPM	Valor de Probabilidade						
	INOR	INOR+ORG	INOR	INOR+ORG		Trans	Mineral	T × M	Hr	T × Hr	M × Hr	T × M × Hr
AGV Total, mMol/dL	75,28	76,70	64,00	70,33	2,78	0,027	0,249	0,449	<0,001	0,008	0,610	0,903
Ácidos graxos voláteis, mMol/100mMol												
Acetato	74,06	74,54	74,74	73,91	0,307	0,621	0,177	0,272	<0,001	0,339	0,712	0,192
Propionato	15,46	15,61	15,43	15,81	0,597	0,874	0,642	0,839	<0,001	<0,001	0,095	0,214
Isobutirato	0,72	0,72	0,89	0,87	0,027	0,001	0,162	0,134	<0,001	<0,001	0,918	0,239
Butirato	7,91	7,84	6,82	7,48	0,196	0,001	0,213	0,192	<0,001	<0,001	0,279	0,172
Isovalerato	0,88	0,92	1,16	1,22	0,031	<0,001	0,088	0,214	<0,001	<0,001	0,647	0,174
Valerato	0,67	0,70	0,71	0,78	0,023	0,013	0,772	0,352	<0,001	<0,001	0,473	0,102
N-NH ³	2,16	4,50	4,26	6,09	0,432	<0,001	<0,001	0,624	<0,001	<0,001	0,291	0,220
pH	6,73	6,64	6,82	6,67	0,061	0,352	0,081	0,594	<0,001	0,006	0,169	0,822

NOTRANS: animais mantidos em condições normais de manejo, com acesso contínuo à água e alimento. CTRANS: animais submetidos a transporte rodoviário por 48 horas, com restrição total de água e alimento durante o período. INOR: suplemento adensado contendo minerais inorgânicos (selenito de sódio como fonte de selênio, sem inclusão de cromo suplementar). INOR+ORG: suplemento contendo minerais inorgânicos (macro e microminerais) acrescidos de fontes orgânicas (levedura inativada desidratada, cromo levedura, levedura enriquecida com Se, *Saccharomyces cerevisiae* e proteinato de Zn). EPM: erro padrão da média; Trans: efeito do transporte rodoviário; Mineral: efeito a fonte de mineral; T × M: interação entre transporte e a fonte de mineral; Hr: efeito dos horários de avaliação experimental; T × Per: Interação entre transporte e período experimental; M × Hr: interação entre fonte de mineral e horários de avaliação experimental; T × M × Hr: Interação entre transporte, fonte de mineral e horários de avaliação experimental.

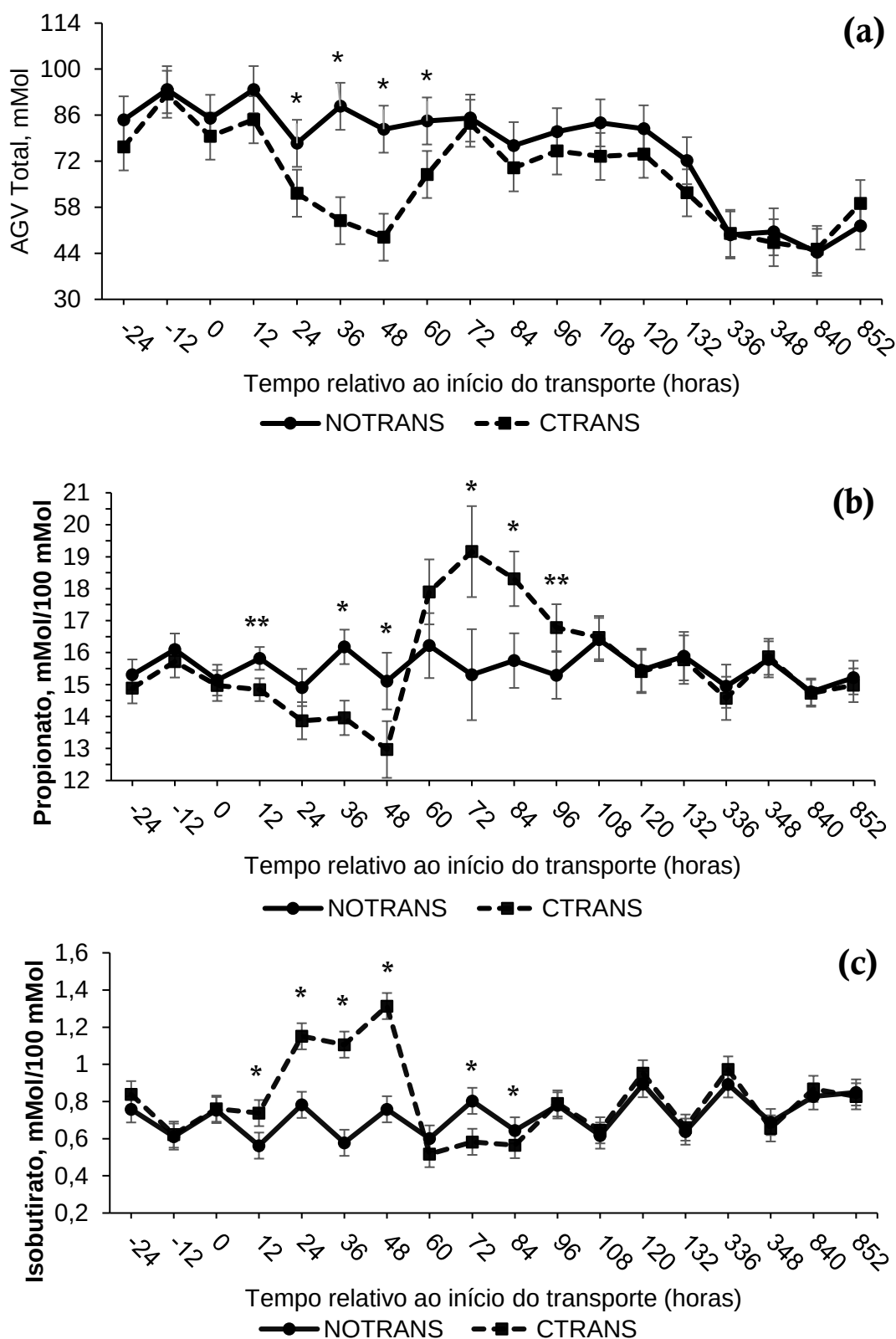


Figura 7: Interações: Transporte × Horas. Concentração sérica AGV (a) Propionato (b) e isobutirato (c) de novilhos Nelore submetidos (CTRANS) ou não (NOTRANS) ao transporte rodoviário por 48 horas e suplementados com minerais inorgânicos (INOR) ou suplemento contendo minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (INOR+ORG). * $P \leq 0,05$; *** $0,05 < P \leq 0,10$. NOTRANS: animais mantidos em condições normais de manejo, com acesso contínuo à água e alimento. CTRANS: animais submetidos a transporte rodoviário por 48 horas, com restrição total de água e alimento durante o período.

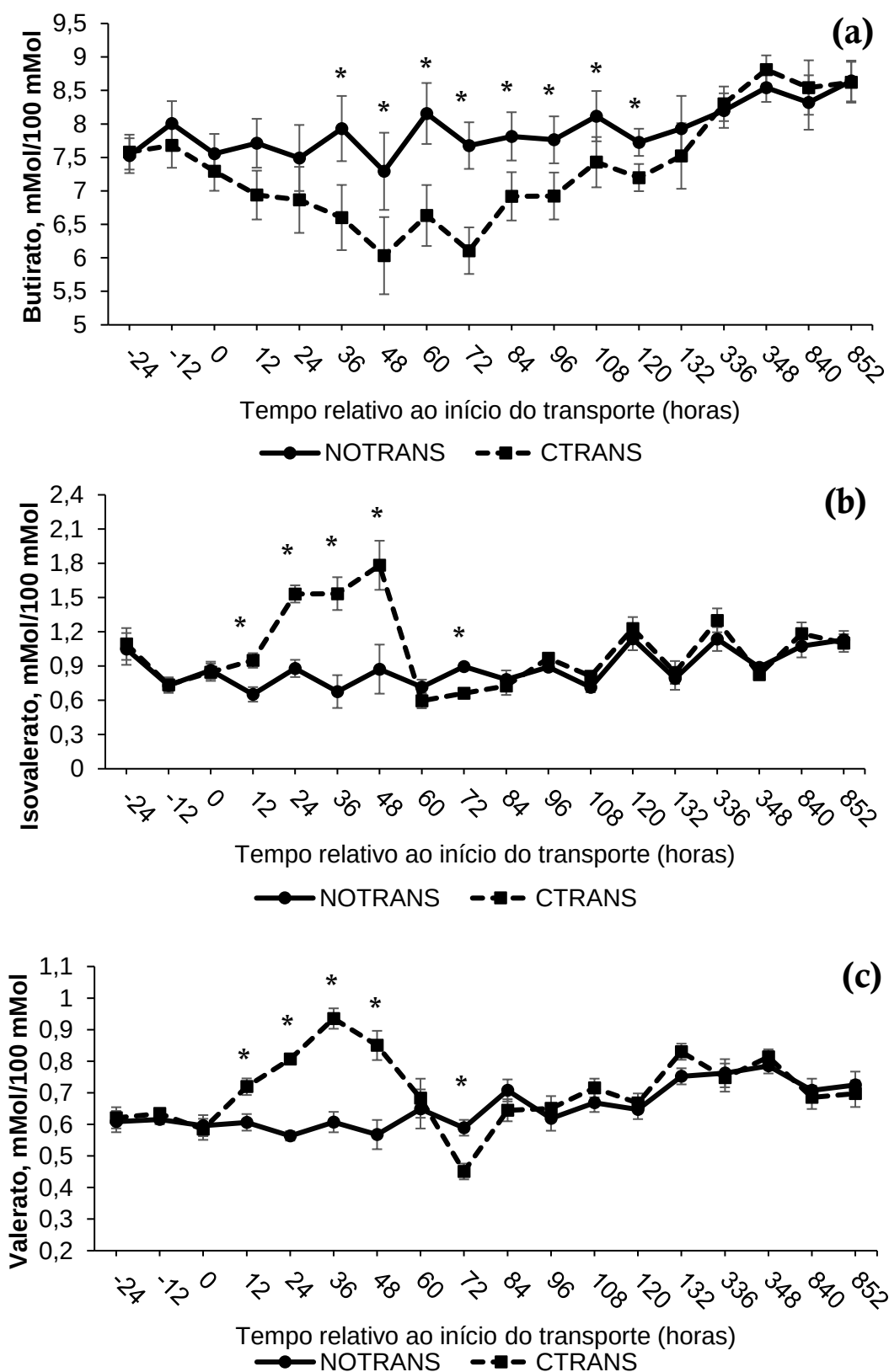


Figura 8: Interações: Transporte × Horas. Concentração sérica de Butirato (a) Isovalerato (b) e Valerato (c) de novilhos Nelore submetidos (CTRANS) ou não (NOTRANS) ao transporte rodoviário por 48 horas e suplementados com minerais inorgânicos (INOR) ou suplemento contendo minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (INOR+ORG). * $P \leq 0,05$; *** $0,05 < P \leq 0,10$. NOTRANS: animais mantidos em condições normais de manejo, com acesso contínuo à água e alimento. CTRANS: animais submetidos a transporte rodoviário por 48 horas, com restrição total de água e alimento durante o período.

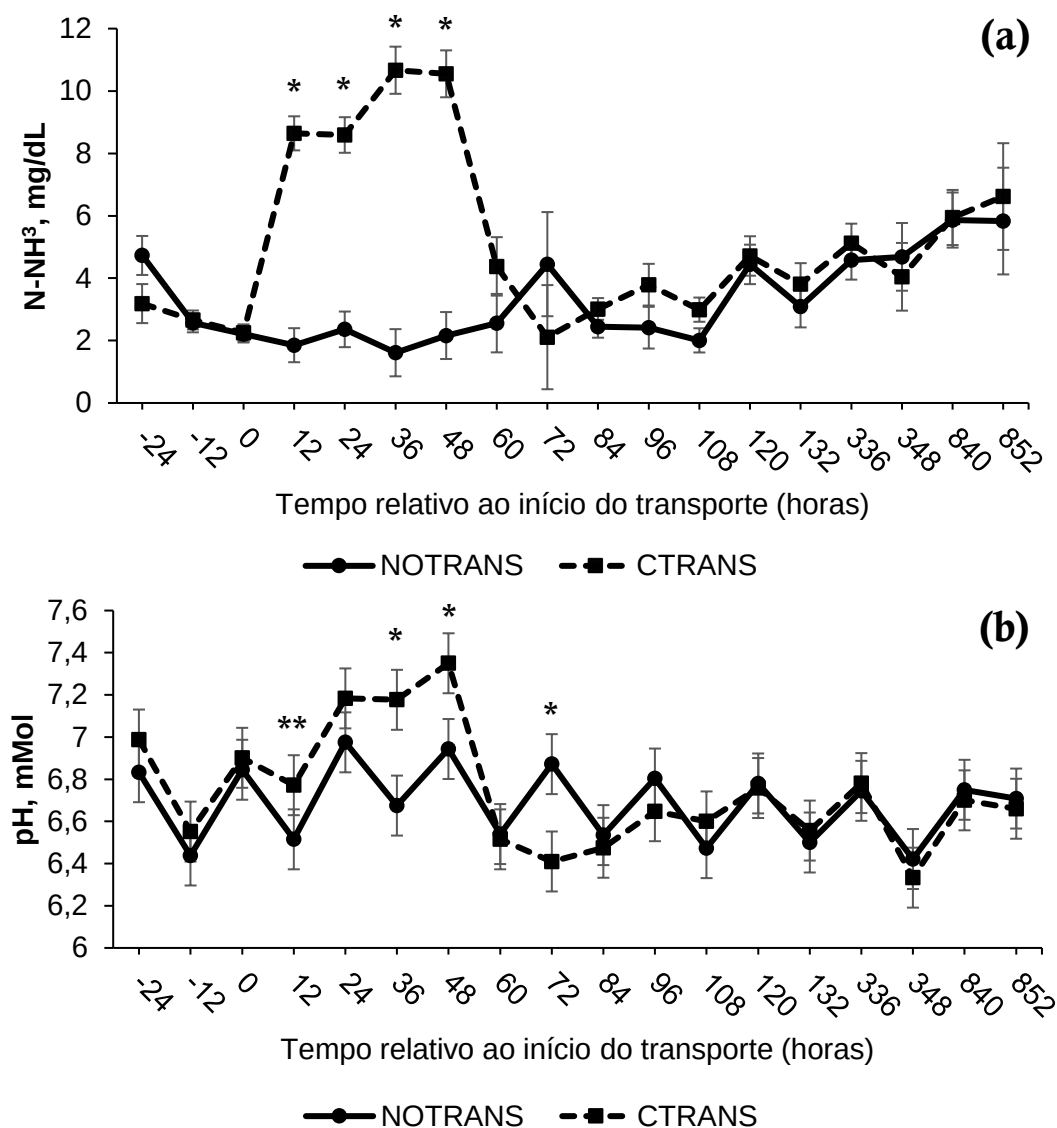


Figura 9: Interações: Transporte × Horas. Concentração sérica de N-NH₃ (a) e pH (b) de novilhos Nelore submetidos (CTRANS) ou não (NOTRANS) ao transporte rodoviário por 48 horas e suplementados com minerais inorgânicos (INOR) ou suplemento contendo minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (INOR+ORG). * $P \leq 0,05$; ** $0,05 < P \leq 0,10$. NOTRANS: animais mantidos em condições normais de manejo, com acesso contínuo à água e alimento. CTRANS: animais submetidos a transporte rodoviário por 48 horas, com restrição total de água e alimento durante o período.

3.2. Experimento 2

Metabólitos sanguíneos

A concentração sérica de proteína total apresentou interação transporte × dia experimental ($P=0,027$; Tabela 6; Figura 10a). Os animais CTRANS exibiram maiores concentrações nos dias 2 (7,19 vs. 6,22 g/dL; $P<0,01$) e 5 (6,85 vs. 6,58 g/dL; $P=0,10$) em comparação aos NOTRANS, enquanto nos demais dias (0, 10, 45 e 105) não foram observadas diferenças significativas ($P>0,22$). Além disso, foi identificado efeito de transporte ($P=0,033$), sem influência da fonte mineral ($P=0,18$) ou da interação transporte × mineral ($P=0,70$).

A concentração sérica de ureia apresentou interação significativa entre transporte × dia ($P<0,01$; Figura 10b) e fonte mineral × dia ($P=0,02$; Figura 11). Os animais CTRANS exibiram concentrações superiores no dia 2 (32,8 vs. 12,0 mg/dL em NOTRANS; $P<0,01$), enquanto nos demais dias não houve diferenças significativas entre tratamentos. Para a fonte mineral, os animais INOR apresentaram maiores concentrações de ureia no dia 2 em comparação ao grupo INOR+ORG (24,5 vs. 20,3 mg/dL; $P=0,02$), com tendência a manter valores mais elevados também nos dias 5 (14,2 vs. 11,0 mg/dL; $P=0,07$) e menores no dia 45 (15,2 vs. 18,7 mg/dL; $P=0,06$). Houve ainda efeito de transporte ($P<0,01$) e do dia experimental ($P<0,01$), sem efeito isolado da fonte mineral ($P=0,23$).

A concentração sérica de albumina apresentou interação transporte × dia ($P=0,03$; Tabela 6; Figura 10c). No dia 2, os animais CTRANS exibiram valores mais elevados (3,52 vs. 3,06 g/dL; $P<0,01$) em comparação aos NOTRANS, enquanto nos demais dias (5, 10, 45 e 105) não foram observadas diferenças significativas ($P>0,26$). Houve ainda efeito do dia ($P=0,04$), mas não foram detectados efeitos de transporte ($P=0,17$), da fonte mineral ($P=0,35$) ou de demais interações ($P\geq 0,62$).

Para o IGF-1, foi identificada interação transporte × dia ($P<0,01$; Tabela 6; Figura 10d). Os animais CTRANS apresentaram redução acentuada no dia 2 (140,8 vs. 256,9 ng/mL; $P<0,01$) e no dia 5 (175,8 vs. 244,9 ng/mL; $P=0,02$) em comparação aos NOTRANS. No dia 10, embora os valores tenham permanecido inferiores em CTRANS (223,4 vs. 243,3 ng/mL), a diferença não foi significativa ($P=0,43$). A partir do dia 45, as concentrações tenderam a se aproximar entre os grupos, com valores semelhantes também no dia 105 (166,5 vs. 164,5 ng/mL; $P=0,88$). Houve ainda efeito do dia ($P<0,01$), sem efeito de transporte ($P=0,12$) ou da fonte mineral ($P=0,50$).

Tabela 6. Metabólitos sanguíneos de garrotes Nelore submetidos (CTTRANS) ou não (NOTTRANS) ao transporte rodoviário por 48 horas e suplementados com suplemento adensado contendo minerais inorgânicos (INOR) ou minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (INOR+ORG).

Item	NOTTRANS		CTTRANS		EPM	Valor de Probabilidade						
	INOR	INOR+ORG	INOR	INOR+ORG		Trans	Mineral	T × M	Dia	T × D	M × D	T × M × D
Proteína total(g/dL)	6,65	6,33	6,77	6,63	0,1197	0,033	0,18	0,70	<0,01	0,02	0,83	0,39
Ureia (mg/dL)	14,2	12,9	17,9	16,4	1,09	<0,01	0,23	0,94	<0,01	<0,01	0,02	0,60
Albumina (g/dL)	3,29	3,23	3,42	3,34	0,1005	0,17	0,35	0,95	0,04	0,03	0,62	0,16
IGF-1 (ng/mL)	220,05	212,73	204,37	192,19	18,19	0,12	0,50	0,97	<0,01	<0,01	0,33	0,61

NOTTRANS: animais mantidos em condições normais de manejo, com acesso contínuo à água e alimento. CTTRANS: animais submetidos a transporte rodoviário por 48 horas, com restrição total de água e alimento durante o período. INOR: suplemento adensado contendo minerais inorgânicos (selenito de sódio como fonte de selênio, sem inclusão de cromo suplementar). INOR+ORG: suplemento contendo minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (levedura inativada desidratada, cromo levedura, levedura enriquecida com Se, *Saccharomyces cerevisiae* e proteinato de Zn). EPM: erro padrão da média; Trans: efeito do transporte rodoviário; Mineral: efeito a fonte de mineral; T × M: interação entre transporte e a fonte de mineral; Dia: efeito do dia de coleta; T × D: Interação entre transporte e dia experimental; M × D: interação entre fonte de mineral dia experimental; T × M × D: Interação entre transporte, fonte de mineral e dia experimental.

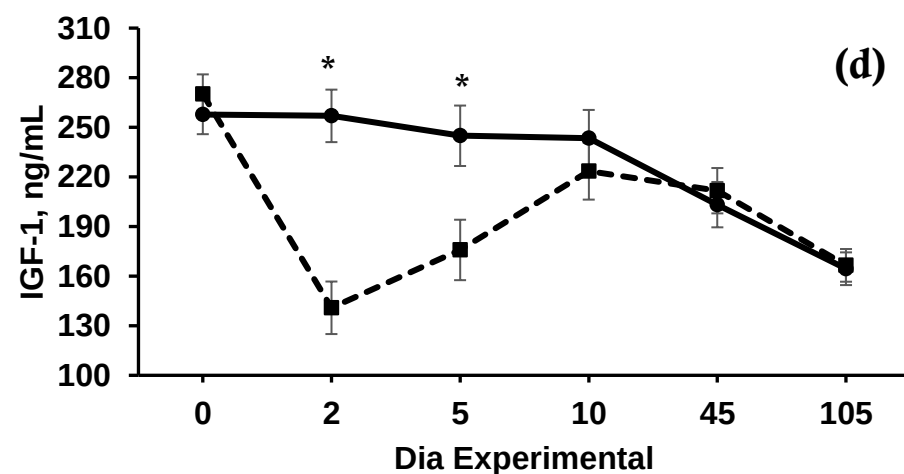
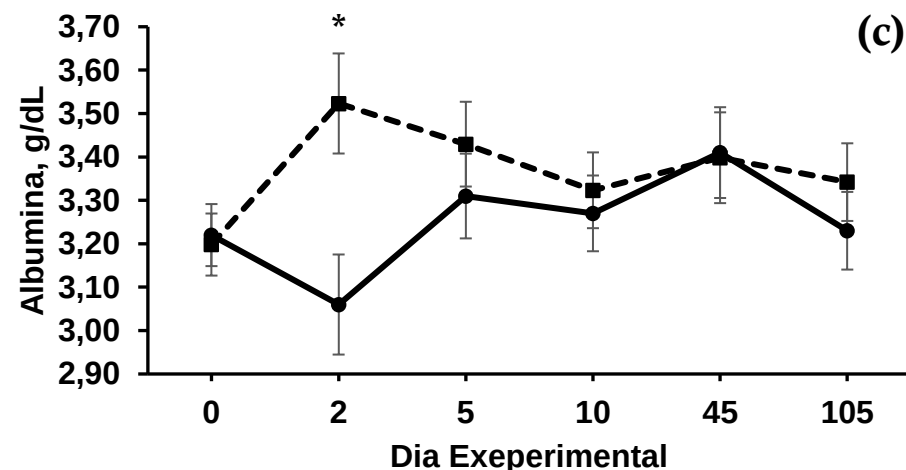
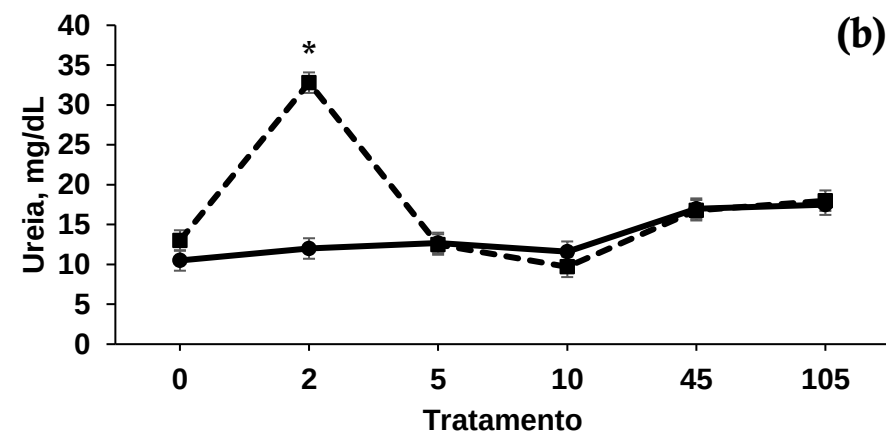
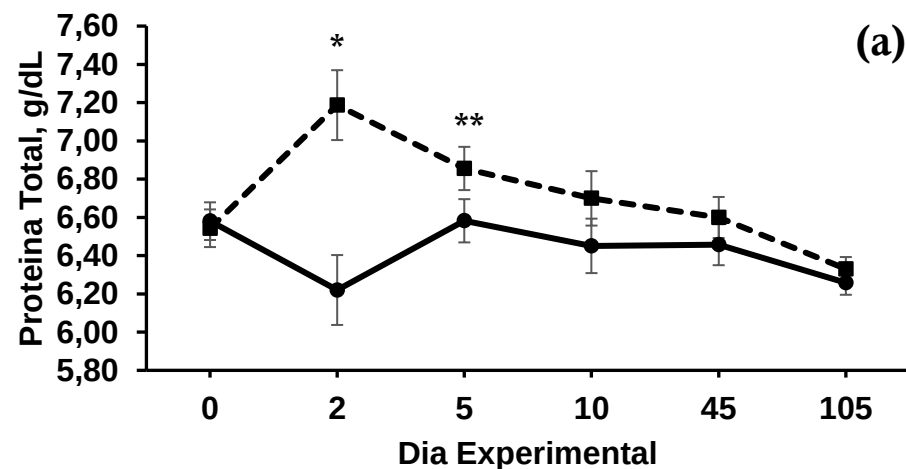


Figura 10: Interações: Transporte × Dia experimental. Concentração sérica de proteína total (a), ureia (b), albumina (c) e IGF-1 (d) de garrotes Nelore submetidos (CTRANS) ou não (NOTRANS) ao transporte rodoviário por 48 horas e suplementados com minerais inorgânicos (INOR) ou suplemento contendo minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (INOR+ORG). * $P \leq 0,05$; ** $0,05 < P \leq 0,10$. NOTRANS: animais mantidos em condições normais de manejo, com acesso contínuo à água e alimento. CTRANS: animais submetidos a transporte rodoviário por 48 horas, com restrição total de água e alimento durante o período.

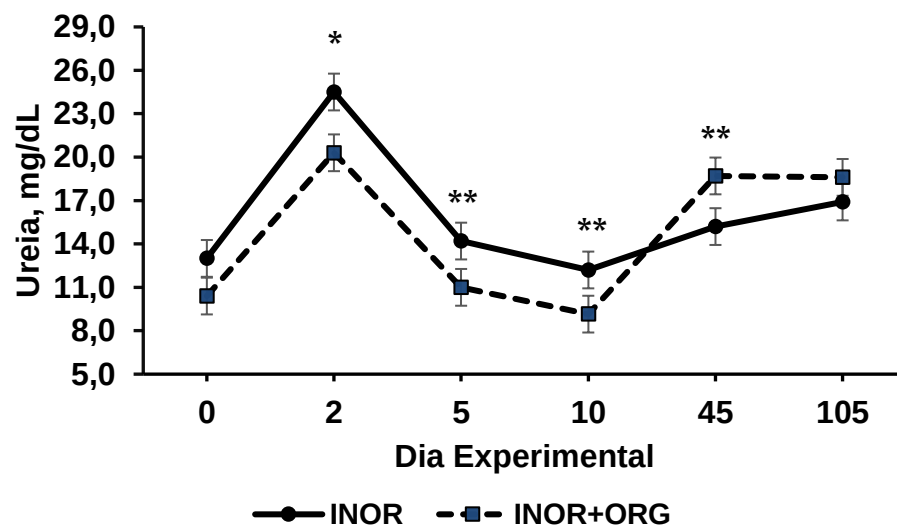


Figura 11: Interação: Mineral × Dia Experimental. Concentração de sérica de ureia de garrotes Nelore submetidos (CTTRANS) ou não (NOTTRANS) ao transporte rodoviário por 48 horas e suplementados com minerais inorgânicos (INOR) ou suplemento contendo minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (INOR+ORG). * $P \leq 0,05$; ** $0,05 < P \leq 0,10$. NOTTRANS: animais mantidos em condições normais de manejo, com acesso contínuo à água e alimento. CTTRANS: animais submetidos a transporte rodoviário por 48 horas, com restrição total de água e alimento durante o período.

Desempenho animal

Foi observada interação entre transporte × período ($P < 0,001$) para o peso corporal, bem como interação mineral × período ($P < 0,001$); a interação tripla mineral × transporte × período não foi significativa ($P = 0,156$) (Tabela 7). Imediatamente após o transporte, os CTRANS apresentaram queda de peso (dia 2: 272,3 kg) em comparação ao próprio peso pré-transporte (dia 0: 319,5 kg), correspondendo a uma perda de 47,2 kg, equivalente a 14,8% do PV inicial. Do dia 2 ao dia 5, os CTRANS recuperaram parte desse peso (303,0 kg), indicando ganho compensatório imediato, embora ainda permanecessem abaixo dos NOTRANS (319,5 kg). Ao longo do período experimental, mesmo com recuperação progressiva (d 45: 335 kg; d 105: 341 kg), os CTRANS não conseguiram igualar o peso dos NOTRANS (d 45: 343 kg; d 105: 348 kg), evidenciando efeito persistente do transporte sobre o peso corporal (Figura 12a).

Para o ganho médio diário (GMD), foram observadas interações significativas entre transporte × período ($P < 0,001$; Figura 12b) e mineral × período ($P < 0,001$; Figura 13). No período pré-transporte (–21 a 0), o CTRANS apresentaram valores semelhantes, com média de 0,898 kg/dia. Entre os dias 2 a 5, imediatamente após a reintrodução de alimento e água, o CTRANS apresentaram um GMD de 10,23 kg/dia, consequência direta do enchimento gastrointestinal e da reidratação após a restrição. Nos dias 5 a 10, ainda se observou diferença significativa, com os CTRANS apresentando GMD superior aos NOTRANS (1,93 vs. 0,35 kg/dia). A partir do dia 10 até o final do experimento (d 45–105), não houve diferença significativa entre os tratamentos ($P > 0,10$), indicando estabilização do peso corporal após a fase inicial de recuperação física.

Foi observada interação significativa entre fonte mineral e período experimental para o ganho médio diário (GMD) nos intervalos de 45 a 75 dias ($P = 0,0105$) e 75 a 105 dias ($P < 0,001$) (Figura 13). No período de 45 a 75 dias, os animais suplementados com INOR apresentaram GMD positivo de 0,083 kg/dia, enquanto aqueles que receberam INOR+ORG apresentaram valor levemente negativo (–0,025 kg/dia). Já entre os dias 75 a 105, verificou-se comportamento inverso, com os animais suplementados com INOR+ORG apresentando GMD de 0,250 kg/dia, superior ao observado no grupo INOR (0,066 kg/dia).

Para o GMD geral, observou-se efeito significativo da fonte mineral ($P = 0,004$) e do transporte ($P < 0,001$), sem interação entre transporte e fonte mineral ($P = 0,537$). Os animais suplementados com INOR+ORG apresentaram GMD médio 33,9% superior em relação ao INOR (0,284 vs. 0,212 kg/dia; Figura 14a). De forma semelhante, os animais não submetidos ao transporte apresentaram GMD 42,4% maior em comparação aos transportados (0,292 vs. 0,205 kg/dia; Figura 14b).

Tabela 7. Ganho médio diário (GMD) de garrotes Nelore submetidos (CTTRANS) ou não (NOTTRANS) ao transporte rodoviário por 48 horas e suplementados com suplemento adensado contendo minerais inorgânicos (INOR) ou minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (INOR+ORG).

Item	NOTTRANS		CTTRANS		EPM	P-valor ^{1,2}		
	INOR	INOR+ORG	INOR	INOR+ORG		M	T	M x T
Peso corporal (kg)								
d -21	301	301	301	301	2,4	0,870	<0.001	0,572
d 0	318	318	322	317				
d 2	316	315	273	272				
d 5	320	319	303	303				
d 10	321	321	312	313				
d 45	341	345	335	336				
d 75	342	346	339	334				
d 105	344	352	340	342				
Ganho médio diário (kg/dia)								
d -21 a 0	0,843	0,798	1,003	0,793	0,03	0,416	<0.001	0,819
d 2 a 5	1,583	1,483	10,13	10,33				
d 5 a 10	0,160	0,540	1,810	2,050				
d 10 a 45	0,548	0,654	0,640	0,659				
d 45 a 75	0,041	0,029	0,126	-0,079				
d 75 a 105	0,087	0,233	0,045	0,267				
GMD geral (d 0 a 105)	0,248	0,335	0,176	0,234	0,02	0,004	<0.001	0,537

NOTTRANS: animais mantidos em condições normais de manejo, com acesso contínuo à água e alimento. CTTRANS: animais submetidos a transporte rodoviário por 48 horas, com restrição total de água e alimento durante o período. INOR: suplemento adensado contendo minerais inorgânicos (selenito de sódio como fonte de selênio, sem inclusão de cromo suplementar). INOR+ORG: suplemento contendo minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (levedura inativada desidratada, cromo levedura, levedura enriquecida com Se, *Saccharomyces cerevisiae* e proteinato de Zn). EPM: erro padrão da média; M: efeito da fonte mineral; T: efeito do transporte; P: efeito do período. ¹Peso corporal: interações T x P ($P < 0,001$) e M x P ($P > 0,1314$); interação M x T x P ($P = 0,156$). ²Ganho médio diário: interações M x P e T x P ($P < 0,001$); interação M x T x P ($P = 0,269$).

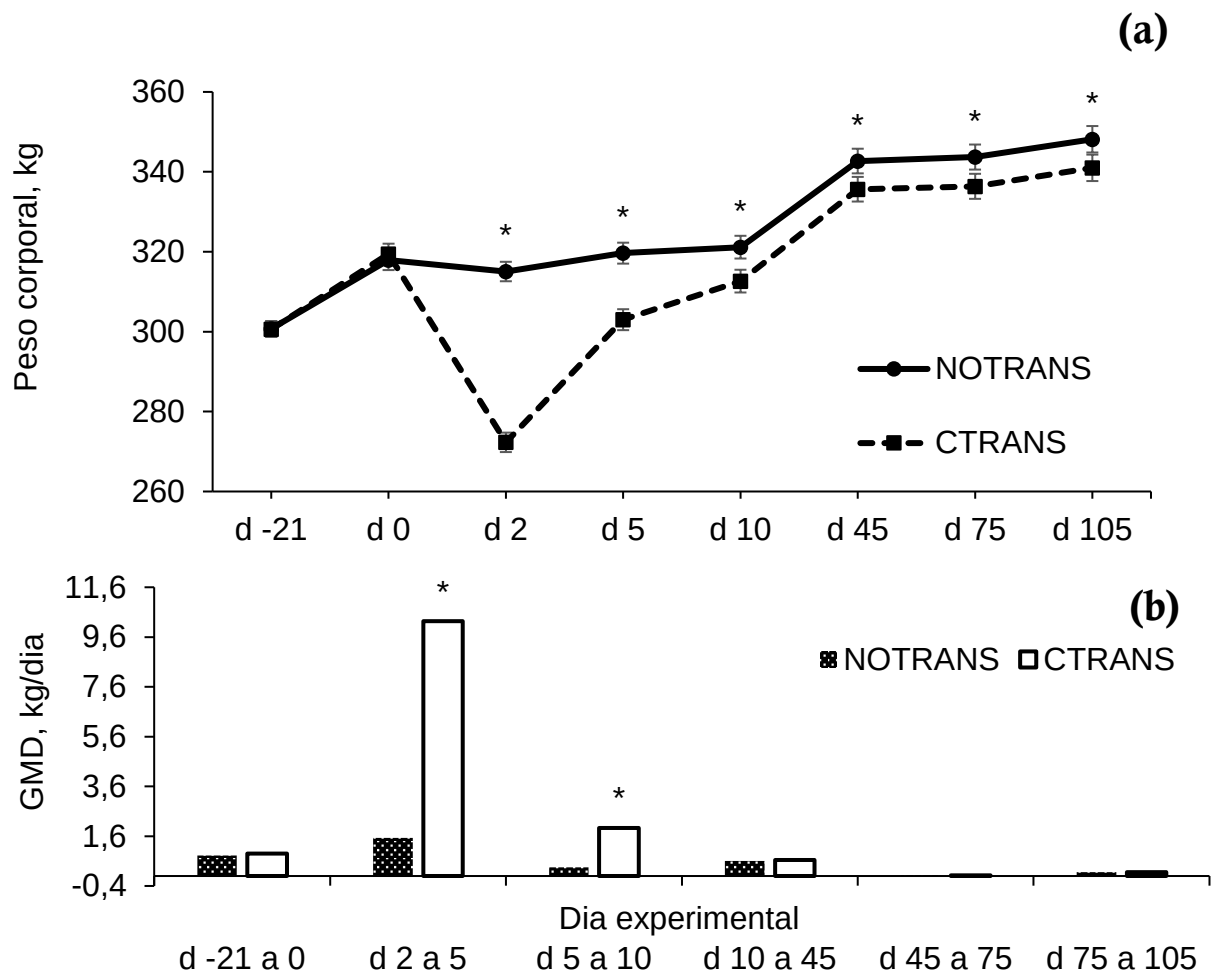


Figura 12: Interações: Transporte × Período. Peso corporal (a) e ganho médio diário (GMD) (b) de garrotes Nelore submetidos (CTRANS) ou não (NOTRANS) ao transporte rodoviário por 48 horas e suplementados com minerais inorgânicos (INOR) ou suplemento contendo minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (INOR+ORG). * $P \leq 0,05$; ** $0,05 < P \leq 0,10$. NOTRANS: animais mantidos em condições normais de manejo, com acesso contínuo à água e alimento. CTRANS: animais submetidos a transporte rodoviário por 48 horas, com restrição total de água e alimento durante o período.

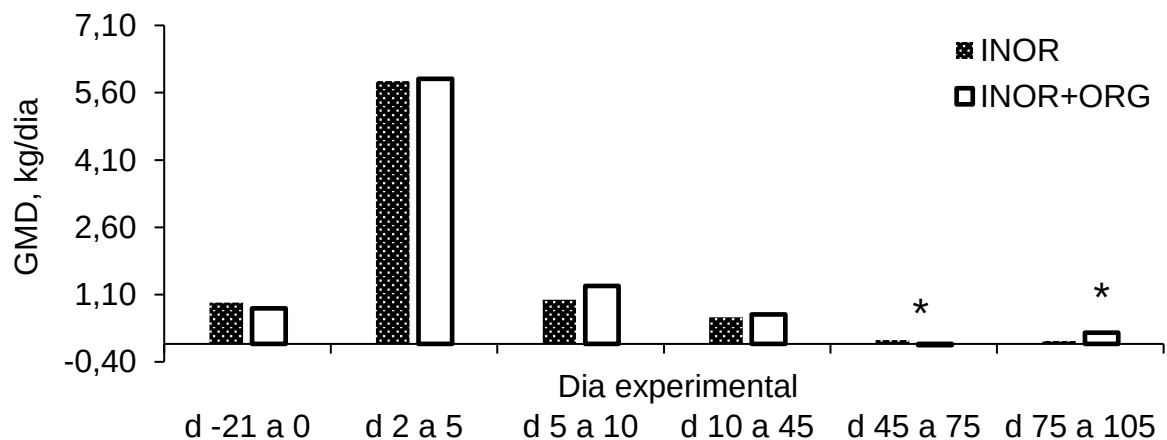


Figura 13: Interações: Mineral × Período. Peso corporal de garrotes Nelore submetidos (CTRANS) ou não (NOTRANS) ao transporte rodoviário por 48 horas e suplementados com minerais inorgânicos (INOR) ou suplemento contendo minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (INOR+ORG). * $P \leq 0,05$; ** $0,05 < P \leq 0,10$.

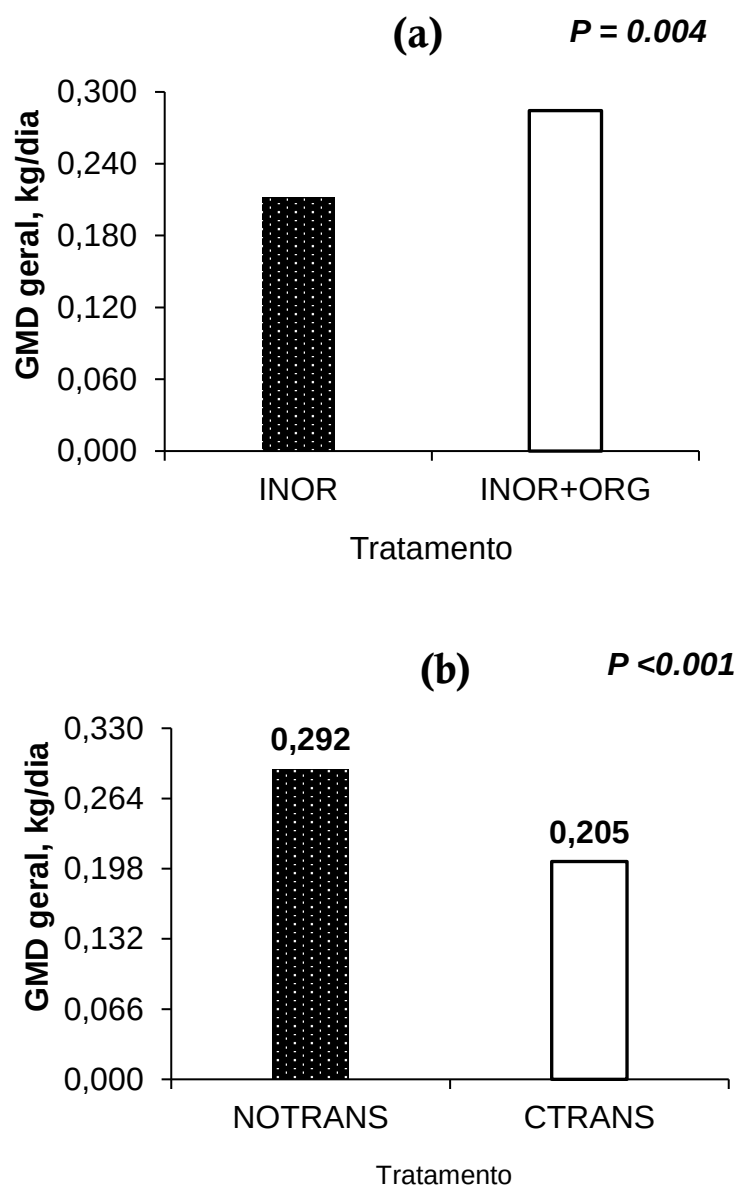


Figura 14: GMD geral. Ganho médio diário (fonte mineral, a); e ganho médio diário (Transporte, b) de garrotes Nelore submetidos (CTRANS) ou não (NOTRANS) ao transporte rodoviário por 48 horas e suplementados com minerais inorgânicos (INOR) ou suplemento contendo minerais inorgânicos acrescidos de fontes orgânicas (INOR+ORG). * $P \leq 0,05$; ** $0,05 < P \leq 0,10$. NOTRANS: animais mantidos em condições normais de manejo, com acesso contínuo à água e alimento. CTRANS: animais submetidos a transporte rodoviário por 48 horas, com restrição total de água e alimento durante o período.

4. Discussão

Procedimentos de manejo adotados na pecuária de corte expõem os animais a eventos estressores, entre os quais se destacam o desmame e o transporte rodoviário (CARROLL; FORSBERG, 2007). Durante o transporte, é comum a ocorrência a restrição de água e alimento (HALEY et al., 2005; MARQUES et al., 2012), condição que pode comprometer a fermentação ruminal (COLE et al., 1986) e alterar a proporção dos ácidos graxos voláteis (AGV). Tais alterações são moduladas pelo tempo de privação, pela composição da dieta e pela quantidade de substrato disponível para a microbiota ruminal (COLE; HUTCHESON, 1985; COLE et al., 1986). Além desses fatores, o transporte agrega outros estressores, como manipulação prévia, mistura de lotes e hierarquias sociais (KNOWLES, 1999), variações de temperatura e ventilação dentro do veículo (SCHWARTZKOPF-GENSWEIN et al., 2016; FISHER, 2010), vibração, ruído e densidade de carga (GREGORY, 1994; WARRISS, 1990). Condições essas, que favorecem perdas de peso vivo por desidratação e mobilização de reservas corporais (SCHAEFER et al., 1997; VILLELA; TEDESCO, 2011), além de induzirem distúrbios fisiológicos e inflamatórios capazes de comprometer o metabolismo energético e proteico (BUCKHAM SPORER et al., 2008; COETZEE et al., 2018; ABREU et al., 2024a). De forma integrada, esses fatores explicam por que a resposta ao transporte não se limita à privação alimentar e hídrica, mas envolve um conjunto de desafios que modulam a fermentação ruminal, a homeostase metabólica e a imunidade dos bovinos (WERNICKI et al., 2014; DETERS; HANSEN, 2020).

Wernicki et al. (2006) demonstraram que bezerros transportados por apenas 2 h apresentaram elevação imediata do cortisol plasmático e aumento dos níveis de TBARS até o 6º dia pós-transporte, indicando indução de estresse oxidativo e distúrbio da homeostase metabólica. Em estudo subsequente, os mesmos autores observaram que bezerros transportados por 120 km e posteriormente adaptados ao confinamento reduziram o consumo de matéria seca e apresentaram queda no ganho de peso durante a primeira semana, associada a aumento de TBARS, elevação de haptoglobina e supressão da imunidade humoral (WERNICKI et al., 2014). Esses resultados reforçam que o transporte promove não apenas alterações ruminais e digestivas, mas também desencadeia respostas endócrinas e inflamatórias que repercutem sobre a fermentação e a absorção de nutrientes.

No presente estudo, a redução da concentração total de AGV e o aumento concomitante do pH ruminal nos primeiros dias após o transporte de 48 h refletem o mesmo padrão descrito por esses autores, evidenciando a sensibilidade da microbiota ruminal ao estresse físico e metabólico. Além disso, a diminuição na proporção de propionato e butirato, acompanhada do aumento de ácidos graxos ramificados, confirma o redirecionamento da fermentação para maior utilização de aminoácidos, padrão clássico já descrito por Allison e Bryant (1963) e também observado por Cole et al. (1986) em animais submetidos a longos períodos de jejum. Dessa forma, embora a magnitude e a duração dos efeitos variem conforme o tempo de transporte e o tipo de dieta, os achados do presente trabalho corroboram a literatura ao indicar que o transporte rodoviário compromete a fermentação ruminal e retarda a recuperação da atividade microbiana.

A redução inicial do consumo de matéria seca e nutrientes nos dias imediatamente após o transporte, seguida de recuperação nos períodos subsequentes, em função da combinação entre esvaziamento gastrointestinal, alterações no comportamento ingestivo e efeitos do estresse fisiológico foi um padrão evidente e já reportado na literatura. Schwartzkopf-Genswein et al. (2016) e Fisher (2010) destacam que a redução no consumo pode persistir por até duas semanas, dependendo da duração do transporte, das condições ambientais, da qualidade do volumoso oferecido e reatividade dos animais. Marques et al. (2018), ao avaliarem novilhas de corte submetidas à privação por 24 horas, observaram queda no consumo de MS de 9,34 para 5,73 kg/dia, com retorno gradual aos níveis basais após cinco dias, além de aumento no cortisol plasmático (de 28 para 43 ng/mL), NEFA (de 0,27 para 0,44 mEq/L) e proteína total (de 6,62 para 6,96 g/dL), indicando ativação do eixo neuroendócrino do estresse. De forma semelhante, Abreu et al. (2024) verificaram redução de 23,3% no consumo de MS (de 7,52 para 5,77 kg/d) nos três primeiros dias após a privação de 48 horas, com aumento transitório da digestibilidade da FDN (de 53,1 para 59,4%) e queda subsequente (para 50,8%), evidenciando instabilidade fermentativa.

O aumento temporário na digestibilidade da MS, MO, PB e FDN nos animais transportados (CTTRANS) pode ser explicado pelo esvaziamento do trato gastrointestinal, resultado combinado da ausência de ingestão durante a restrição hídrica e alimentar e da intensa defecação induzida pelo estresse do transporte (HUTCHESON; COLE, 1985; COLE, 1986). Segundo Phillips et al. (1985, 1991) e

Cole (1986), o transporte, além do jejum e da desidratação, aumenta a secreção de catecolaminas, o que acelera a motilidade gastrointestinal e intensifica a excreção fecal, sobretudo nas primeiras horas da viagem. Esses autores relataram que o transporte promoveu aumento de cerca de 30% da defecação em relação ao jejum isolado, reforçando que o estresse é um fator adicional que potencializa o esvaziamento gastrintestinal. De forma complementar, Hutcheson e Cole (1985) apontaram que o shrink observado em bovinos transportados é composto majoritariamente por perdas de água via fezes e urina, mas também pode incluir perdas reais de tecido corporal. No presente estudo, a elevação transitória da ureia e da proteína total plasmática em CTRANS confirma a ocorrência de proteólise, indicando que parte da perda de peso decorreu de mobilização proteica. Esse processo leva a uma drástica redução do conteúdo ruminal e, conseqüentemente, a uma menor produção fecal nos primeiros dias pós-transporte, o que eleva proporcionalmente a fração digerida e mascara temporariamente a real eficiência do processo fermentativo. Assim, o aumento observado na digestibilidade representa um artefato metodológico do cálculo, baseado em menor excreção fecal, e não um ganho efetivo na utilização dos nutrientes.

Esse padrão foi descrito por Abreu et al. (2024a), que observaram elevação transitória da digestibilidade da MS, MO, FDN e FDA entre os dias 3 e 5 após a privação, seguida por queda acentuada nos dias 11 a 13 e 32 a 34, indicando instabilidade fermentativa e recuperação incompleta da microbiota. Esses resultados reforçam que o desafio imposto pelo transporte compromete não apenas a ingestão, mas também a funcionalidade e a resiliência do ambiente ruminal. De acordo com Galyean et al. (1981), a população microbiana e os parâmetros fermentativos podem ser restabelecidos em até três dias após jejuns de 32 horas; entretanto, em privações mais prolongadas, como as 48 horas do presente estudo, a recuperação torna-se mais lenta e incompleta. Hutcheson e Cole (1986) acrescentam que, mesmo após a reorganização inicial da microbiota, o consumo de matéria seca retorna aos níveis basais apenas cerca de cinco dias após o estressor, indicando que o reequilíbrio entre motilidade, taxa de passagem e fermentação demanda mais tempo que a simples retomada da ingestão. Complementarmente, Durand e Komisarczuk (1988) demonstraram que o esvaziamento ruminal compromete a renovação microbiana e a fermentação da fibra estrutural, reduzindo temporariamente a capacidade funcional do rúmen. Portanto, a elevação inicial da digestibilidade observada logo após a

realimentação deve ser interpretada como uma resposta transitória à disfunção digestiva induzida pelo transporte e pelo jejum, e não como uma melhora efetiva na eficiência de utilização dos nutrientes.

Embora a inclusão de 0,05% do peso vivo tenha sido suficiente para suprir as exigências de macro e microminerais, não foram observadas diferenças entre INOR e INOR+ORG sobre consumo e digestibilidade, indicando que os efeitos da suplementação orgânica com levedura não se manifestaram diretamente nesses parâmetros. Esse resultado sugere que, sob o desafio imposto pelo transporte rodoviário de longa duração, a intensidade do estresse pode atenuar ou retardar a expressão dos benefícios esperados, como maior eficiência no uso do nitrogênio ou modulação da microbiota ruminal, já descritos em situações de menor desafio (MORIEL; ARTHINGTON, 2013). De forma semelhante, Genther e Hansen (2015) não observaram alterações no consumo de matéria seca ou na digestibilidade da FDN em bovinos suplementados com microminerais traço em diferentes formas (sulfato ou hidróxi), reforçando que a maior biodisponibilidade mineral nem sempre se traduz em ganhos digestivos imediatos. Assim, os resultados do presente estudo reforçam que os potenciais efeitos positivos de INOR+ORG não se expressam primariamente sobre o consumo e a digestibilidade, mas podem se manifestar em eixos fisiológicos mais sensíveis ao estresse, como metabolismo energético, estabilidade fermentativa e resposta imune.

As alterações transitórias na relação PB/MOD e nas excreções de nitrogênio urinário e fecal sugerem uma resposta adaptativa ao estresse metabólico induzido pela restrição hídrica e alimentar decorrente do transporte. Tal resposta é compatível com a ativação do eixo hipotálamo-hipófise-adrenal (HPA), que promove aumento nos níveis de cortisol, redirecionando o metabolismo proteico para vias catabólicas, priorizando processos de defesa e manutenção em detrimento da síntese proteica (CARROLL; FORSBERG, 2007; BUCKHAM SPORER et al., 2008; REIS et al., 2012). Como consequência, há intensificação da proteólise, aumento da ureia circulante e redução da eficiência de retenção do nitrogênio, fenômenos bem documentados em bovinos sob estresse (CARROLL; FORSBERG, 2007; DETERS; HANSEN, 2020). Embora a suplementação INOR+ORG não tenha prevenido totalmente tais alterações, observou-se menor concentração de ureia em momentos críticos, sugerindo efeito atenuador relacionado à maior biodisponibilidade mineral e à ação da levedura sobre

a estabilidade ruminal e a eficiência de utilização microbiana do nitrogênio (MORIEL; ARTHINGTON, 2013; AMIN; MAO, 2021).

A interação entre transporte e período evidenciou que os efeitos do CTRANS não se expressaram de forma constante ao longo do tempo, mas sim de maneira dinâmica e transitória. Os animais do CTRANS apresentaram menor relação PB:MOD, principalmente no período (dia 3 a 5) que se deu em 24 a 72 horas após o transporte, possivelmente devido à maior digestibilidade da matéria orgânica nesse momento, o que elevou o consumo de MOD e reduziu proporcionalmente a contribuição da PB. Essa dinâmica é consistente com o restabelecimento da atividade fermentativa ruminal logo após a realimentação, como descrito por Moriel e Arthington (2013) e Buckham Sporer et al. (2008), que observaram recuperação metabólica progressiva após eventos de estresse agudo.

As variações na excreção de nitrogênio urinário e fecal reforçam que os efeitos do transporte não foram estáticos, mas modulados ao longo do tempo. Nos períodos iniciais, a maior excreção observada em animais CTRANS reflete a menor eficiência de incorporação do nitrogênio ingerido, em consonância com a resposta catabólica já descrita em situações de estresse por transporte (CARROLL; FORSBERG, 2007; BUCKHAM SPORER et al., 2008). Com a progressão dos períodos, entretanto, a excreção tendeu à estabilização, indicando recuperação gradual do metabolismo proteico e maior retenção de nitrogênio, resultado consistente com a melhora da eficiência digestiva relatada por Marques et al. (2012) em bovinos reidratados após privação aguda.

Partindo da hipótese estabelecida, a suplementação com minerais orgânicos associados à levedura viva foi considerada uma estratégia potencial para mitigar os efeitos negativos do transporte rodoviário sobre o ambiente ruminal. Entretanto, o estressor imposto pelo transporte de 48 horas, associado ao jejum e à desidratação, comprometeu intensamente a fermentação ruminal, promovendo queda nos AGV totais e aumento concomitante do pH, respostas clássicas à ausência de substrato fermentável e à redução da atividade microbiana (HUTCHESON; COLE, 1986; DURAND; KOMISARCZUK, 1988). De forma concomitante, o N-NH_3 apresentou elevação acentuada, reflexo da proteólise microbiana residual e da maior reciclagem de ureia, caracterizando desequilíbrio entre oferta de energia e proteína degradável no rúmen. Estudos prévios confirmam esse padrão: Abreu et al. (2024a) relataram redução de AGV totais de 68,7 para ~42 mMol após 48 h de privação, acompanhada

de queda em propionato, butirato, e ácidos graxos de cadeia ramificada (isobutirato e isovalerato), enquanto Allison (1969) e Russell (1998) já haviam descrito que a degradação de aminoácidos se intensifica em cenários de limitação energética. O fato de não haver efeito da fonte mineral em nosso estudo sugere que, sob desafio agudo e prolongado, os benefícios esperados de minerais orgânicos e levedura sobre a fermentação e a estabilidade do pH não se expressam de forma consistente, corroborando observações de Moriel e Arthington (2013) e Genther e Hansen (2015), que ressaltam a dependência da intensidade do estresse para a efetividade dos aditivos. Em conjunto, esses achados reforçam que a magnitude e a duração do transporte modulam a resposta microbiana, podendo postergar a recuperação fermentativa mesmo após a retomada da ingestão.

Logo após o término do transporte, observou-se elevação transitória nos níveis de AGV totais, especialmente 12 horas após a realimentação (60 h), sugerindo reativação parcial da fermentação a partir da retomada do consumo de alimento. Esse comportamento indica que a microbiota respondeu rapidamente à oferta de substrato, mas de forma instável, já que nos períodos subsequentes houve novo declínio das concentrações de AGV. Tal padrão evidencia que a recuperação fermentativa não foi sustentada, e que a suplementação com minerais orgânicos associados à levedura viva não foi capaz de evitar as flutuações observadas, em contraste com a hipótese inicial de que essa combinação poderia acelerar a reorganização do ambiente ruminal. A literatura aponta que a normalização dos metabólitos ruminais pode ocorrer em menos de 24 h após o estresse, dependendo do tempo de jejum e da qualidade da realimentação (BUCKHAM SPORER et al., 2008), entretanto, no presente estudo, a instabilidade persistiu além desse período, indicando que a magnitude do desafio imposto pelo transporte de 48 h comprometeu de forma mais duradoura a funcionalidade do rúmen.

A elevação observada em 72 h (24 horas após o transporte) não se manteve nos períodos seguintes. Os níveis de AGV voltaram a cair nos dias subsequentes, sugerindo que, embora a fermentação tenha sido reativada rapidamente, ela ainda não havia atingido estabilidade. Apenas por volta do dia 15 (336 a 348 horas) é que os valores de AGV totais entre os grupos se tornaram similares de forma sustentada, indicando recuperação efetiva do ambiente fermentativo.

Esse comportamento oscilatório reforça que a resposta da microbiota ao estresse por transporte não é imediata nem linear. A fermentação é retomada após a

realimentação, mas flutua até que haja completa reorganização da microbiota e adaptação do ambiente ruminal. Essa resposta fisiológica adaptativa depende de múltiplos fatores, incluindo tipo e quantidade de substrato, tempo de jejum, e estado funcional do rúmen. Tais achados destacam a importância de considerar o tempo necessário de recuperação em avaliações metabólicas após transporte, especialmente porque a concentração ruminal pode levar até 72 horas para retornar aos níveis basais após a interrupção alimentar (DI FILIPPO et al. 2022).

A dinâmica dos ácidos graxos de cadeia curta ao longo do tempo demonstrou que o transporte rodoviário afetou diferentes vias fermentativas microbianas no rúmen de forma específica. O aumento do propionato após o retorno à alimentação (60 e 72 horas) indica fermentação acelerada de carboidratos solúveis, típica de resposta à realimentação pós-jejum. O valerato e os ácidos graxos ramificados (isobutirato e isovalerato) aumentaram durante o transporte, sugerindo maior degradação de aminoácidos pela microbiota remanescente ou por autólise microbiana sob restrição nutricional (ALLISON, 1962; VAN SOEST, 1994; RUSSELL, 1998). Segundo Schwab e Broderick (2017), a reintrodução da dieta após períodos de restrição promoveu uma redução nas concentrações de ácidos graxos de cadeia ramificada no rúmen. Esse efeito está associado à mudança no padrão fermentativo, no qual a utilização de carboidratos solúveis passa a predominar como principal substrato energético, reduzindo a degradação de aminoácidos de cadeia ramificada como fonte fermentável.

O butirato, produto da fermentação de carboidratos ruminais por diferentes grupos microbianos, apresentou níveis reduzidos nos animais CTRANS durante e após o desafio, com recuperação apenas a partir do dia 15. Isso sugere que o transporte comprometeu a atividade de grupos microbianos sensíveis à interrupção alimentar, como as bactérias que degradam fibra. Carroll e Forsberg (2007) relataram que a restrição alimentar pode reduzir significativamente a população de microrganismos ruminais, sendo a recuperação de bactérias fibrolíticas mais lenta do que a de microrganismos que fermentam substratos solúveis. Em nosso estudo, a redução persistente do butirato nos animais CTRANS reforça essa vulnerabilidade, indicando que o transporte comprometeu de maneira prolongada a atividade de bactérias celulolíticas. A ausência de efeito do suplemento com levedura viva e minerais orgânicos contraria a hipótese de que essa associação favoreceria a recuperação das populações fibrolíticas e, conseqüentemente, da digestibilidade da fibra.

O transporte resultou em variações marcantes no pH ruminal, com elevação significativa nos animais CTRANS durante as 36 e 48 horas de viagem, fenômeno compatível com a queda na produção de ácidos graxos voláteis (AGV) decorrente da menor atividade fermentativa. Esse padrão já havia sido descrito por Buckham Sporer et al. (2008), ao relatarem que bovinos transportados apresentaram aumento de pH associado à redução na síntese de AGV durante o estresse. Entretanto, nas primeiras 24 horas após o término do transporte (72 h), ocorreu o efeito oposto, com redução do pH ruminal, indicando retomada parcial da fermentação e maior produção de ácidos orgânicos, sobretudo propionato. Esse comportamento evidencia o caráter dinâmico da recuperação pós-transporte e sugere que a reorganização microbiana ocorre de forma progressiva, porém instável nos primeiros dias. A ausência de efeito modulador dos suplementos reforça que, sob estresse agudo de 48 h, a ação esperada de tamponamento da levedura e dos minerais orgânicos (INOR+ORG) não foi suficiente para estabilizar precocemente o pH, corroborando Moriel e Arthington (2013), que destacam que a magnitude do desafio pode se sobrepor aos benefícios de imunomoduladores.

Quanto ao N-NH_3 , os resultados demonstram o impacto combinado da proteólise microbiana residual e da mobilização endógena de aminoácidos durante a restrição alimentar e hídrica imposta pelo transporte. O aumento expressivo das concentrações, com pico entre 36 e 48 horas, indica que houve degradação proteica acentuada mesmo na ausência de ingestão de substrato. Esse comportamento pode ser explicado pela autólise de microrganismos ruminais e pela intensificação da reciclagem de ureia via saliva e parede ruminal, mecanismos que atuam como fontes alternativas de nitrogênio em períodos de déficit energético (DURAND; KOMISARCZUK, 1988). Assim, o acúmulo de N-NH_3 observado durante o transporte reflete um estado de desequilíbrio fermentativo, no qual a produção de amônia supera a capacidade de incorporação microbiana, reforçando o efeito negativo do estresse prolongado sobre a eficiência de utilização do nitrogênio.

As alterações nos metabólitos sanguíneos observadas após o transporte refletem respostas fisiológicas agudas, particularmente evidentes nos primeiros dias de reidratação e realimentação. A interação entre transporte e dia experimental demonstrou que o impacto do estresse foi mais intenso nos momentos iniciais, diminuindo progressivamente ao longo do tempo.

A elevação da proteína total nos dias 2 e 5 em animais CTRANS sugere ativação rápida de mecanismos adaptativos. Esse aumento pode está associado à síntese de proteínas de fase aguda, estimulada por mediadores inflamatórios liberados logo após o estresse de transporte (LIPPOLIS et al., 2017), caracterizando um ajuste típico da resposta inflamatória sistêmica. Padrão semelhante foi descrito por Cole et al. (1986), que observaram elevação de 7,3 para 7,8 g/dL em bovinos submetidos a 46 horas de jejum e transporte. Além disso, a hemoconcentração induzida pela privação hídrica, reduz o volume plasmático e concentra os solutos circulantes (CARROLL; FORSBERG, 2007). No presente estudo, as concentrações atingiram 7,20 g/dL no dia 2 retornando progressivamente à normalidade nos períodos subsequentes. Esses valores permaneceram dentro da faixa fisiológica para novilhos em crescimento ($\approx$ 6,0–8,0 g/dL) (KANEKO; HARVEY; BRUSS, 2008), reforçando a interpretação de resposta de fase aguda transitória, sem indícios de comprometimento hepático. A ausência de efeito da fonte mineral sugere que a magnitude da resposta inflamatória se sobrepôs a possíveis diferenças entre INOR e INOR+ORG.

A ureia sérica apresentou um aumento expressivo no segundo dia em animais CTRANS (32,87 vs. 12,0 mg/dL em NOTRANS), indicando intensificação do catabolismo proteico e menor eficiência de incorporação do nitrogênio em síntese microbiana, com maior conversão em ureia hepática — condição típica de desequilíbrio entre energia e proteína degradável (DETMANN et al., 2014; SCHWAB; BRODERICK, 2017). Esse pico foi transitório, com retorno aos níveis basais no quinto dia, evidenciando recuperação gradual do metabolismo nitrogenado. Padrão semelhante foi descrito por Abreu et al. (2024b), que relataram valores próximos a 36 mg/dL no segundo dia em bovinos submetidos a privação hídrica e alimentar de 48 h, com normalização até o sexto dia experimental. Além disso, verificou-se interação mineral $\times$ dia experimental ($P = 0,02$): animais suplementados com INOR+ORG apresentaram menores concentrações de ureia nos primeiros dias pós-transporte (21,3 vs. 24,1 mg/dL no dia 2), sugerindo efeito protetor da suplementação sobre a perda nitrogenada, possivelmente por favorecer maior eficiência de utilização do N microbiano (MORIEL; ARTHINGTON, 2013; AMIN; MAO, 2021). Nos dias 5 e 10 manteve-se essa tendência, enquanto no dia 45 o grupo INOR+ORG apresentou tendência a concentrações séricas mais elevadas, possivelmente associadas a maior ingestão e turnover proteico, compatíveis com metabolismo mais ativo, sem necessariamente indicar perda metabólica (SCHWAB; BRODERICK, 2017).

A albumina, classificada como proteína negativa de fase aguda, constitui um marcador indireto da resposta inflamatória e do estado hidroeletrólítico, uma vez que sua síntese hepática é inibida por citocinas pró-inflamatórias (IL-1, IL-6, TNF- α) durante a resposta de fase aguda (CECILIANI et al., 2012). Em condições típicas de inflamação sistêmica, a concentração sérica tende a diminuir, refletindo o redirecionamento metabólico para a produção de proteínas de defesa, além de alterações de redistribuição de fluidos. Entretanto, no presente estudo foi observado aumento transitório da albumina no segundo dia pós-transporte (3,20 para 3,59 g/dL em CTRANS), padrão que sugere efeito de hemoconcentração decorrente da restrição hídrica prolongada, mais do que uma alteração na taxa de síntese hepática. Esse comportamento é coerente com a elevação simultânea da proteína total e da ureia no mesmo período, reforçando a hipótese de concentração plasmática de solutos pela redução do volume circulante. Resultados semelhantes foram relatados por Abreu et al. (2024b), que verificaram incremento da albumina de 2,93 para 3,16 g/dL em novilhas Nelore submetidas a 48 h de privação de água e alimento, seguido de queda gradual nos dias posteriores à reidratação. Assim, tanto no presente estudo quanto em trabalhos prévios, a elevação da albumina deve ser interpretada como consequência aguda do estresse hídrico e da desidratação associada ao transporte, sem evidências de comprometimento hepático ou de estímulo da síntese proteica.

O IGF-1 foi o metabólito que mais claramente refletiu os efeitos persistentes do transporte sobre o metabolismo anabólico dos novilhos. Houve redução acentuada nas concentrações séricas nos dias 2 e 5 em animais CTRANS (273 para 143,7 ng/mL no dia 2), caracterizando supressão do eixo somatotrófico, mecanismo típico de situações de jejum, desidratação e inflamação sistêmica (ARTHINGTON et al., 2014; COOKE, 2017). A queda indica estado catabólico de baixa prioridade anabólica, condicionado pela baixa ingestão e pela ativação do eixo HPA (CARROLL; FORSBERG, 2007; MORIEL; ARTHINGTON, 2013). A ausência de diferenças consistentes entre INOR e INOR+ORG sugere que a intensidade do estressor sobrepôs potenciais benefícios metabólicos da suplementação. A recuperação parcial das concentrações séricas de IGF-1 a partir do dia 10 indica reorganização lenta do metabolismo endócrino-nutricional.

De forma integrada, os perfis de proteína total, ureia, albumina e IGF-1 evidenciam uma perturbação aguda, porém transitória, compatível com a resposta fisiológica ao transporte, mantendo-se majoritariamente dentro de faixas fisiológicas para a

categoria animal. Ainda que tenha havido indícios pontuais de modulação do metabolismo do nitrogênio em INOR+ORG (como menor ureia no dia 2), os efeitos não foram sustentados, reforçando que a magnitude do estressor foi determinante para a limitação dos potenciais benefícios da suplementação.

O transporte rodoviário resultou em uma perda média de 14,70% do peso corporal entre os animais transportados (INOR: 15,22% do PC; INOR+ORG: 14,19% do PC). Esses valores superam os 6,8% reportados por Phillips et al. (1991) e situam-se na faixa superior das perdas descritas por Beenken; Deters; Hansen (2021) e Abreu et al. (2024a), que relataram variações entre 5,9% e 14,5% após privações de até 48 horas. A magnitude observada pode ser atribuída à combinação entre desidratação, esvaziamento do trato gastrointestinal e mobilização de reservas corporais, como indicado por Carroll e Forsberg (2007) e Marques et al. (2012). O aumento transitório da ureia e da proteína total após o transporte reforça essa interpretação, sugerindo ativação de processos catabólicos e uso de proteína muscular como fonte energética. Esse quadro catabólico imediato é compatível com a ativação do eixo HPA e com o redirecionamento do metabolismo para manutenção e defesa (BUCKHAM SPORER et al., 2008; REIS et al., 2012), o que pode ter limitado a eficiência anabólica e contribuído para o desempenho inferior dos animais nos primeiros dias pós transporte.

A recuperação do peso corporal ocorreu de forma gradual, mas mesmo ao final do período experimental (105º dia) os animais CTRANS não atingiram os valores de NOTRANS, com diferenças significativas persistindo ao longo de todo o acompanhamento (dias 5, 10, 45, 75 e 105). Essa resposta evidencia que o transporte rodoviário de longa duração promove efeitos metabólicos persistentes, não revertidos pela simples retomada do consumo, em consonância com os relatos de Carroll e Forsberg (2007) e Moriel e Arthington (2013). A ausência de equalização até o final do experimento sugere que a mobilização inicial de reservas corporais não foi plenamente compensada, resultando em impacto produtivo de longa duração.

A recuperação de peso foi incompleta ao longo do período experimental. Os animais CTRANS permaneceram consistentemente mais leves que os NOTRANS até o dia 105, evidenciando que a perda inicial não foi revertida. Esse padrão difere de Abreu et al. (2024a), que observaram recuperação total do peso em 5 dias em condições controladas, e contrasta principalmente com Marques et al. (2012), nos quais 24 h de transporte ou de privação reduziram o ganho médio diário e a eficiência alimentar nos primeiros dias de confinamento, mas não alteraram o consumo de

matéria seca nem o peso corporal final após 28 dias. Em conjunto, os dados sugerem que a maior duração do desafio (48 h) e o horizonte de avaliação ampliado (105 dias) no presente estudo resultaram em efeito persistente sobre o peso corporal.

Os animais CTRANS permaneceram consistentemente mais leves que os NOTRANS até o dia 105, confirmando que a perda inicial não foi revertida. Esse padrão contrasta com Abreu et al. (2024a), que observaram recuperação completa em até cinco dias em condições controladas de privação, e difere também de Marques et al. (2012), em que 24 h de transporte ou de privação reduziram o GMD e a eficiência alimentar apenas nos primeiros dias de confinamento, sem impacto sobre o peso corporal final após 28 dias. Dessa forma, os achados do presente estudo indicam que a maior duração do estressor (48 h), associada ao horizonte de avaliação ampliado (105 dias), resultou em déficit persistente de peso corporal, evidenciando que os efeitos do transporte prolongado são mais severos e de longa duração do que os descritos em desafios mais curtos.

Observou-se GMD elevado entre os dias 2 e 5 nos animais transportados (10,33 kg/dia), reflexo do retorno imediato da ingestão e da reidratação após o transporte de 48 h. Esse pico não refletiu crescimento tecidual efetivo, mas sim repleção fisiológica decorrente da recomposição do conteúdo ruminal e do volume plasmático, como já descrito por Werner et al. (2012) e Goetz et al. (2021). Entre os dias 5 e 10, o GMD dos CTRANS permaneceu superior ao dos NOTRANS, porém em menor intensidade, reforçando o caráter transitório da resposta. Nos períodos subsequentes (45 a 105 dias), os valores de GMD foram semelhantes entre grupos, sem evidência de ganho compensatório suficiente para reverter o déficit acumulado de peso corporal.

A ausência de compensação completa é compatível com limitação anabólica pós-estresse, atribuída à supressão do eixo somatotrófico. Arthington et al. (2014) demonstraram que o transporte rodoviário reduz de forma persistente as concentrações de IGF-1, comprometendo o crescimento muscular e a deposição proteica. De forma complementar, Cooke (2017) descreve que a ativação do eixo HPA e a resposta inflamatória aumentam a demanda de nutrientes e energia para manutenção e síntese de proteínas de fase aguda, reduzindo GMD e eficiência alimentar no período inicial de adaptação após o transporte. Esses mecanismos explicam por que os ganhos iniciais de curto prazo, observados logo após a realimentação, não se traduziram em equalização do peso até o dia 105.

A resposta em desempenho de bovinos à suplementação com minerais orgânicos associados à levedura é variável na literatura. Sgoifo Rossi et al. (2017) relataram maior GMD em animais suplementados com minerais orgânicos em comparação aos inorgânicos (0,91 vs. 0,80 kg/dia), enquanto Moriel e Arthington (2013) observaram efeito positivo da associação de minerais orgânicos com levedura viva sobre o ganho de peso de bezerros em adaptação ao confinamento. Em contraste, outros estudos não identificaram diferenças significativas entre fontes orgânicas e inorgânicas, sugerindo que os efeitos podem depender da intensidade do estressor e do contexto nutricional (e.g., MARQUES et al., 2012; GENTHER; HANSEN, 2014). Nossa hipótese era de que a suplementação com INOR+ORG sustentaria melhor o desempenho pós-transporte. De fato, foi constatado maior GMD médio nos animais INOR+ORG, tanto em NOTRANS (0,335 vs. 0,248 kg/dia) quanto em CTRANS (0,234 vs. 0,176 kg/dia). Entretanto, esse incremento não foi suficiente para eliminar o déficit acumulado de peso entre CTRANS e NOTRANS até o dia 105, confirmando que a suplementação atenua, mas não neutraliza, os impactos do transporte rodoviário de longa duração.

5. Conclusão:

O transporte rodoviário de 48 horas imposto nesse estudo foi capaz de impactar parâmetros de digestibilidade de nutrientes, promover instabilidade fermentativa a curto e longo prazo, alterações metabólicas e perda persistente de peso corporal, confirmando seu impacto fisiológico e produtivo de longa duração. A suplementação com minerais inorgânicos acrescido de fontes orgânicas (INOR+ORG), por sua vez, não foi capaz de evitar as alterações agudas do ambiente ruminal e dos parâmetros sanguíneos, mas sustentou maior ganho médio diário em comparação à suplementação exclusivamente inorgânica. Assim, conclui-se que o transporte prolongado gera efeitos persistentes sobre o metabolismo e o desempenho, e que a suplementação INOR+ORG os atenua, mas não os elimina.

6. Referências:

ABREU, M. J.; MARQUES, R. S.; CIDRINI, I. A.; BATISTA, L. H.; FERREIRA, I. M.; OLIVEIRA, K. A.; CRUZ, V. A.; LIMEDE, A. C.; SOUSA, L. M.; FRANÇA, M. Q. S.; BISIO, G. H. M.; SIQUEIRA, G. R.; RESENDE, F. D. Long-term impacts of 48-h water and feed deprivation on blood and performance responses of grazing Bos indicus Nellore heifers. **Translational Animal Science**, v. 8, p. txae015, 2024b.

ABREU, U. G. P.; OLIVEIRA, L. O. F.; SILVA, R. R.; CABRAL, L. S.; MENDONÇA, S. S.; MENDES, L. B.; PIRES, A. V.; PEREIRA, E. S. Impact of 48-h water and feed deprivation and hydroxychloride sources of copper and zinc on metabolism and performance of grazing Nellore cattle. **Animals**, v. 14, n. 2, p. 354-366, 2024a.

ALLISON, M. J.; M. P. Bryant. Biosynthesis of branched-chain amino acids from branched-chain fatty acids by ruminal bacteria. **Arch. Biochem. Biophys.** 101:269, 1963.

ALLISON, M.J.; BRYANT, M.P.; KATZ, I.; KEENEY, M. Metabolic function of branched-chain volatile fatty acids, growth factors for ruminococci II: biosynthesis of higher branched-chain fatty acids and aldehydes. **Journal of bacteriology**, v. 83, n. 5, p. 1084-1093, 1962.

AMIN, A. B.; MAO, S. Y. Influence of yeast on rumen fermentation, growth performance and quality of products in ruminants: A review. **Animal nutrition**, v. 7, n. 1, p. 31-41, 2021.

ANDERSON, R. A.; BRANTNER, J. H.; POLANSKY, M. M. An improved assay for biologically active chromium. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 26, n. 5, p. 1219-1221, 1978.

AOAC. Official Methods of Analysis. 16th ed. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists, 1995.

ARTHINGTON, J. D.; MORIEL, P.; MARTINS, P. G. M. A.; LAMB, G. C.; HAVENGA, L. J. Effects of trace mineral injections on measures of performance and trace mineral status of pre-and postweaned beef calves. **Journal of Animal Science**, v. 92, n. 6, p. 2630-2640, 2014.

ARTHUR, J. R.; MCKENZIE, R. C.; BECKETT, G. J. Selenium in the immune system. **The Journal of nutrition**, v. 133, n. 5, p. 1457S-1459S, 2003.

BEENKEN, A. M.; DETERS, E. L.; HANSEN, S. L. The effect of injectable vitamin C and road transit duration on inflammation, muscle fatigue, and performance in pre-conditioned beef steer calves. **Journal of Animal Science**, v. 99, n. 12, p. skab312, 2021.

BUCKHAM SPORER, K. R.; WEBER, P. S. D.; BURTON, J. L.; EARLEY, B.; CROWE, M. A. Transportation of young beef bulls alters circulating physiological parameters that may be effective biomarkers of stress. **Journal of animal science**, v. 86, n. 6, p. 1325-1334, 2008.

BURDICK SANCHEZ, N. C.; CARROLL, J. A.; BROADWAY, P. R.; EDRINGTON, T. S.; YOON, I.; BELKNAP, C. R. Some aspects of the acute phase immune response to a lipopolysaccharide (LPS) challenge are mitigated by supplementation with a *Saccharomyces cerevisiae* fermentation product in weaned beef calves. **Translational Animal Science**, v. 4, n. 3, p. txaa156, 2020.

CARROLL, J. A.; FORSBERG, N. E. Influence of stress and nutrition on cattle immunity. **Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice**, v. 23, n. 1, p. 105-149, 2007.

CARROLL, J. A.; REUTER, R. R.; CHASE JR, C. C.; COLEMAN, S. W., RILEY, D. G.; SPIERS, D. E.; GALYEAN, M. L. Profile of the bovine acute-phase response following an intravenous bolus-dose lipopolysaccharide challenge. **Innate Immunity**, v. 15, n. 2, p. 81-89, 2009.

CECILIANI, F.; CERON, J. J.; ECKERSALL, P. D.; SAUERWEIN, H. Acute phase proteins in ruminants. **Journal of Proteomics**, v. 75, n. 14, p. 4207–4231, 2012.

CHEN, X. B.; GOMES, M. J. Estimation of microbial protein supply to sheep and cattle based on urinary excretion of purine derivatives – An overview of the technical details. **Aberdeen: Rowett Research Institute**, 21 p, 1992.

CHIZZOTTI, M. L.; VALADARES FILHO, S. C.; VALADARES, R. F. D.; CHIZZOTTI, F. H. M.; CAMPOS, J. M. S. Intake, digestibility and ruminal kinetics of neutral detergent fiber in cattle fed low-quality tropical forage and supplemented with nitrogenous compounds. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, n. 4, p. 1584–1592, 2006.

COLE, N. A.; HUTCHESON, D. P. Influence of prefast feed intake on recovery from feed and water deprivation by beef steers. **Journal of Animal Science**, v. 60, n. 3, p. 772-780, 1985.

COLE, N. A.; PHILLIPS, W. A.; HUTCHESON, D. P. The effect of pre-fast diet and transport on nitrogen metabolism of calves. **Journal of Animal Science**, v. 62, n. 6, p. 1719-1731, 1986.

COOKE, R. F. INVITED PAPER: Nutritional and management considerations for beef cattle experiencing stress-induced inflammation. **The Professional Animal Scientist**, v. 33, n. 1, p. 1-11, 2017.

DE VRIES, M. F. W. Estimating forage intake and quality in grazing cattle: a reconsideration of the hand-plucking method. **Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives**, v. 48, n. 4, p. 370-375, 1995.

DETERS, E. L.; HANSEN, S. L. Invited Review: Linking road transportation with oxidative stress in cattle and other species. **Applied Animal Science**, v. 36, n. 2, p. 183-200, 2020.

- DETMANN, E.; PAULINO, M.F.; VALADARES FILHO, S.C.; BATISTA, E.D.; RUFINO L.M.A. Aspectos nutricionais aplicados a bovinos em pastejo nos trópicos. **Anais do Simpósio de Produção de Gado de Corte. DZO-UFV, Viçosa, MG, Brasil**, p. 239-267, 2014.
- DETMANN, E.; SOUZA, M. A.; VALADARES FILHO, S. C.; QUEIROZ, A. C.; BERCHIELLI, T. T.; SALIBA, E. O. S.; CABRAL, L. S.; PINA, D. S.; LADEIRA, M. M.; AZEVEDO, J. A. G. **Métodos para análise de alimentos - INCT - Ciência Animal** Visconde do Rio Branco: Suprema, 214 p., 2012.
- DETMANN, E.; VALADARES FILHO, S. C.; PAULINO, M. F.; HUHTANEN, P. Nutritional aspects applied to grazing cattle in the tropics: a review based on Brazilian results. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 4, p. 2829-2854, 2014.
- DI FILIPPO, P. A.; DUARTE, B. R.; ALBERNAZ, A. P.; FONSECA, L. A.; VIANA, I. S.; QUIRINO, C. R. Efeitos da privação alimentar de 48 horas na resposta de fase aguda em cavalos. **Ciência Animal Brasileira**, v. 23, p. e-72445P, 2022.
- DURAND, M.; KOMISARCZUK, S. Influence of major minerals on rumen microbiota. **The Journal of nutrition**, v. 118, n. 2, p. 249-260, 1988.
- ERWIN, E. S.; MARCO, G. J.; EMERY, E. M. Volatile fatty acid analyses of blood and rumen fluid by gas chromatography. **Journal of Dairy Science**, v. 44, n. 9, p. 1768-1771, 1961.
- FISHER, A. D.; NIEMEYER, D. O.; LEA, J. M.; LEE, C.; PAULL, D. R.; REED, M. T.; FERGUSON, D. M. The effects of 12, 30, or 48 hours of road transport on the physiological and behavioral responses of sheep. **Journal of Animal Science**, v. 88, n. 6, p. 2144–2152, 2010.
- GALYEAN, M. L.; LEE, R. W.; HUBBERT, M. E. Influence of fasting and transit on ruminal and blood metabolites in beef steers. **Journal of Animal Science**, v. 53, n. 1, p. 7-18, 1981.
- GENTHER, O. N.; HANSEN, S. L. Effect of trace mineral source on performance, lipid metabolism, and stress response in beef steers. **Journal of Animal Science**, v. 93, n. 10, p. 5202–5213, 2015.
- GOETZ, H. M.; KOPPER, J. J.; VAZQUEZ, A. N.; HOLLAND, B. P.; LARSON, R. L.; AMES, T. R.; COETZEE, J. F. Characterizing the literature surrounding transportation of young dairy calves: A scoping review. **Journal of Dairy Science**, v. 105, p. 1555–1572, 2022.
- GOFF, J. P. Invited review: Mineral absorption mechanisms, mineral interactions that affect acid–base and antioxidant status, and diet considerations to improve mineral status. **Journal of dairy science**, v. 101, n. 4, p. 2763-2813, 2018.
- GREGORY, N. G. Preslaughter handling, stunning and slaughter. **Meat science**, v. 36, n. 1-2, p. 45-56, 1994.

HALEY, D. B.; BAILEY, D. W.; STOOKEY, J. M. The effects of weaning beef calves in two stages on their behavior and growth rate. **Journal of animal science**, v. 83, n. 9, p. 2205-2214, 2005.

HUTCHESON, D. P.; COLE, N. A. Management of transit-stress syndrome in cattle: Nutritional and environmental effects. **Journal of Animal Science**, v. 62, n. 2, p. 555-560, 1986.

KANEKO, J. J.; HARVEY, J. W.; BRUSS, M. L. **Clinical Biochemistry of Domestic Animals**. 6. ed. San Diego: Academic Press, 2008.

KNOWLES, G.; WARRISS, P. D.; BROWN, S. N.; EDWARDS, J. E. Effects on cattle of transportation by road for up to 31 hours. **Veterinary Record**, v. 145, n. 20, p. 575-582, 1999.

LIPPOLIS, K. D.; COOKE, R. F.; SILVA, L. G. T.; SCHUBACH, K. M.; BRANDAO, A. P.; MARQUES, R. S.; LARSON, C. K.; RUSSELL, J. R.; ARISPE, A.; DELCURTO, T.; BOHNERT, D. W. Effects of organic complexed or inorganic Co, Cu, Mn and Zn supplementation during a 45-day preconditioning period on productive and health responses of feeder cattle. **animal**, v. 11, n. 11, p. 1949-1956, 2017.

LUSEBA, D. **Effect of selenium and chromium on stress level, growth performance selected carcass characteristics and mineral status of feedlot cattle**. 2005. 214f. These (Doctor of Philosophy in Veterinary Science) - Faculty of Veterinar Science, University of Pretoria, Pretoria, 2005.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Instrução normativa nº 113, de 16 de dezembro de 2020. Estabelece práticas para o transporte de bovinos. Brasília, 2022.

MARET, W. Zinc biochemistry: from a single zinc enzyme to a key element of life. **Advances in nutrition**, v. 4, n. 1, p. 82-91, 2013.

MARQUES, R. S.; BOHNERT, D. W.; SOUSA, O. A.; BRANDÃO, A. P.; SCHUMACHER, T. F.; SCHUBACH, K. M.; COOKE, R. F. Impact of 24-h feed, water, or feed and water deprivation on feed intake, metabolic, and inflammatory responses in beef heifers. **Journal of Animal Science**, v. 97, n. 1, p. 398-406, 2019.

MARQUES, R. S.; COOKE, R. F.; FRANCISCO, C. L.; BOHNERT, D. W. Effects of twenty-four hour transport or twenty-four hour feed and water deprivation on physiologic and performance responses of feeder cattle. **Journal of Animal Science**, v. 90, n. 13, p. 5040-5046, 2012.

MARREIRO, D. D. N.; CRUZ, K. J. C.; MORAIS, J. B. S.; BESERRA, J. B.; SEVERO, J. S.; OLIVEIRA, A. R. S. Zinc and oxidative stress: current mechanisms. **Antioxidants**, v. 6, n. 2, p. 24, 2017.

MILLER-WEBSTER, T.; HOOVER, W. H.; HOLT, M.; NOCEK, J. E. Influence of yeast culture on ruminal microbial metabolism in continuous culture. **Journal of Dairy Science**, v. 85, n. 8, p. 2009-2014, 2002.

MOONSIE-SHAGEER, S.; MOWAT, D. N. Effect of level of supplemental chromium on performance, serum constituents, and immune status of stressed feeder calves. **Journal of Animal Science**, v. 71, n. 1, p. 232-238, 1993.

MORIEL, P.; ARTHINGTON, J. D. Effects of trace mineral-fortified, limit-fed preweaning supplements on performance of pre-and postweaned beef calves. **Journal of Animal Science**, v. 91, n. 3, p. 1371-1380, 2013.

OGUNADE, I. M.; LAY, J.; ANDRIES, K.; MCMANUS, C. J.; BEBE, F. Effects of live yeast on differential genetic and functional attributes of rumen microbiota in beef cattle. **Journal of animal science and biotechnology**, v. 10, n. 1, p. 68, 2019.

PECHOVA, A.; PAVLATA, L. Chromium as an essential nutrient: a review. **Veterinární medicína**, v. 52, n. 1, p. 1-18, 2007.

PHILLIPS, W. A.; COLE, N. A.; HUTCHESON, D. P. Effect of fasting and transit on performance and carcass composition of beef steers. **Journal of Animal Science**, v. 69, p. 234–241, 1991.

PINLOCHE, E.; MCEWAN, N.; MARDEN, J. P.; BAYOURTHE, C.; AUCLAIR, E.; NEWBOLD, C. J. The effects of a probiotic yeast on the bacterial diversity and population structure in the rumen of cattle. **PloS one**, v. 8, n. 7, p. e67824, 2013.

REIS, M. M.; GALVÃO, K. N.; OLIVEIRA, C. M. F.; LIMA, F. S. Acute phase response and performance of beef cattle after road transport. **Arquivos Brasileiros de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 64, n. 2, p. 369–376, 2012.

ROBERTSON, J. B.; VAN SOEST, P. J. The detergent system of analysis and its application to human foods. In: JAMES, W. P. T.; THEANDER, O. (Eds.). **The Analysis of Dietary Fiber in Food**. New York: Marcel Dekker, p. 123–158, 1981.

RODRIGUES, G. P.; KIEFER, C.; NASCIMENTO, K. M. R. D. S.; CORASSA, A.; GARCIA, E. R. D. M.; MARÇAL, D. A.; ROCHA, G. C. Combined supplementation of chromium-yeast and selenium-yeast on finishing barrows. **Ciência Rural**, v. 50, n. 11, p. e20190406, 2020.

RUSSELL, J. B. Strategies that ruminal bacteria use to handle excess carbohydrate. **Journal of Animal Science**, v. 76, n. 7, p. 1955-1963, 1998.

SCHAEFER, A. L.; JONES, S. D. M.; STANLEY, R. W. The use of electrolyte solutions for reducing transport stress. **Journal of animal science**, v. 75, n. 1, p. 258-265, 1997.

SCHWAB, C. G.; BRODERICK, G. A. A 100-Year Review: Protein and amino acid nutrition in dairy cows. **Journal of dairy science**, v. 100, n. 12, p. 10094-10112, 2017.

SCHWARTZKOPF-GENSWEIN, K. S.; FAUCITANO, L.; DADGAR, S.; SHAND, P. J.; GONZÁLEZ, L. A.; CROWE, T. G. TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE BOVINOS NA AMÉRICA DO NORTE E SEUS IMPACTOS SOBRE O BEM-ESTAR ANIMAL E A

QUALIDADE DAS CARCAÇAS E DA CARNE. **COMO VALOR AGREGADO NAS CADEIAS PRODUTIVAS DE CARNES**, cap. 9, p. 81. 2016.

SPEARS, J. W. History of chromium in animal nutrition in the United States. **Applied Animal Science**, v. 41, n. 2, p. 65-75, 2025.

SPEARS, J. W. Organic trace minerals in ruminant nutrition. **Animal feed science and technology**, v. 58, n. 1-2, p. 151-163, 1996.

TAPIERO, H.; TEW, K. D. Trace elements in human physiology and pathology: zinc and metallothioneins. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 57, n. 9, p. 399-411, 2003.

TARRANT, P. V.; KENNY, F. J.; HARRINGTON, D. The effect of stocking density during 4 hour transport to slaughter on behaviour, blood constituents and carcass bruising in Friesian steers. **Meat Science**, v. 24, n. 3, p. 209-222, 1988.

VAN ENGEN, N. K.; COETZEE, J. F. Effects of transportation on cattle health and production: a review. **Animal health research reviews**, v. 19, n. 2, p. 142-154, 2018.

VAN SOEST, P. J. **Nutritional Ecology of the Ruminant**. 2nd ed. Ithaca: Cornell University Press, 1994.

VILLELA, T. M. A.; TEDESCO, G. M. I. Sistema de transporte rodoviário de cargas: uma proposta para sua estrutura e elementos. **Transportes**, v. 19, n. 2, p. 57-65, 2011.

WARRISS, P. D. The handling of cattle pre-slaughter and its effects on carcass and meat quality. **Applied animal behaviour science**, v. 28, n. 1-2, p. 171-186, 1990.

WEATHERBURN, M.W. Phenol-hypochlorite reaction for determination of ammonia. **Analytical chemistry**, v. 39, n. 8, p. 971-974, 1967.

WERNER, J. C.; BRUCKMAIER, R. M.; DANIEL, J. A.; MEYER, H. H. D.; KASKE, M. Effects of 63 hours of road transport on the physiological and metabolic status of calves with special emphasis on hydration status and electrolytes. **Journal of Animal Science**, v. 90, n. 10, p. 3630–3637, 2012.

WERNICKI, A. S. A. S.; URBAN-CHMIEL, R. S. A. S.; KANKOFER, M. S. B. S.; MIKUCKI, P.; PUCHALSKI, A. S. A. S.; TOKARZEWSKI, S. S. A. S. Evaluation of plasma cortisol and TBARS levels in calves after short-term transportation. **Revue de médecine vétérinaire**, v. 157, n. 1, p. 30, 2006.

WERNICKI, A.; URBAN-CHMIEL, R.; PUCHALSKI, A.; DEC, M. Evaluation of the influence of transport and adaptation stress on chosen immune and oxidative parameters and occurrence of respiratory syndrome in feedlot calves. **Journal of Veterinary Research**, v. 58, n. 1, p. 111-116, 2014.

WILLIAMS, P. E. V.; TAIT, C. A. G.; INNES, G. M.; NEWBOLD, C. J. Effects of the inclusion of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae* plus growth medium) in the diet

of dairy cows on milk yield and forage degradation and fermentation patterns in the rumen of steers. **Journal of animal science**, v. 69, n. 7, p. 3016-3026, 1991.

YARI, M.; NIKKHAH, A.; ALIKHANI, M.; KHORVASH, M.; RAHMANI, H.; GHORBANI, G. R. Physiological calf responses to increased chromium supply in summer. **Journal of Dairy Science**, v. 93, n. 9, p. 4111-4120, 2010.

YI, S.; TIAN, X.; QIN, X.; ZHANG, Y.; GUAN, S.; CHEN, Z.; CAI, D.; WU, D.; WANG, R.; NA, Z.; WANG, M.; ZHANG, X. Effects of Yeast Cultures on Growth Performance, Fiber Digestibility, Ruminal Dissolved Gases, Antioxidant Capacity and Immune Activity of Beef Cattle. **Animals**, v. 15, n. 10, p. 1452, 2025.

ZANETTI, M. A.; SALLES, M. S. V.; BRISOLA, M. L.; CÉSAR, M. C. Desempenho e resposta metabólica de bezerros recebendo dietas suplementadas com cromo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 32, p. 1532-1535, 2003.