

**ELEMENTOS-TRAÇO E QUALIDADE AMBIENTAL EM
AGROECOSSISTEMAS DE PECUÁRIA DE CORTE DA
AMAZÔNIA: UMA ABORDAGEM ATRAVÉS DA
PERSPECTIVA DE SAÚDE ÚNICA**

FERNANDO LUIZ SILVA

Tese apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso como parte das exigências de Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais para obtenção do título de Doutor.

**CÁCERES
MATO GROSSO, BRASIL
2024**

FERNANDO LUIZ SILVA

**ELEMENTOS-TRAÇO E QUALIDADE AMBIENTAL EM
AGROECOSSISTEMAS DE PECUÁRIA DE CORTE DA
AMAZÔNIA: UMA ABORDAGEM ATRAVÉS DA PERSPECTIVA
DE SAÚDE ÚNICA**

Tese apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso como parte das exigências de Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais para obtenção do título de Doutor.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Aparecida Pereira Pierangeli
Coorientador: Prof. Dr. Ernandes Sobreira Oliveria Júnior
Coorientadora: Profa. Dra. Marta López Alonso

**CÁCERES
MATO GROSSO, BRASIL
2024**

Walter Clayton de Oliveira CRB 1/2049

S586e SILVA, Fernando Luiz.
Elementos-Traço e Qualidade Ambiental em
Agroecossistemas de Pecuária de Corte da Amazônia: Uma
Abordagem Através da Perspectiva de Saúde Única / Fernando
Luiz Silva – Cáceres, 2024.
148 f.; 30 cm.

Trabalho de Conclusão de Curso (Tese/Doutorado) – Curso
de Pós-graduação Stricto Sensu (Doutorado) Ciências Ambientais,
Faculdade de Ciências Agrárias e Biológicas, Câmpus de Cáceres,
Universidade do Estado de Mato Grosso, 2024.

Orientador: Maria Aparecida Pereira Pierangeli

Coorientador: Ernandes Sobreira Oliveira Junior

1. Boas Práticas Agropecuárias. 2. Conama 420/2009. 3.
Micronutrientes. 4. Segurança Alimentar. 5. Solo. I. Fernando Luiz
Silva. II. Elementos-Traço e Qualidade Ambiental em
Agroecossistemas de Pecuária de Corte da Amazônia: Uma
Abordagem Através da Perspectiva de Saúde Única: .

CDU 631

FERNANDO LUIZ SILVA

**ELEMENTOS-TRAÇO E QUALIDADE AMBIENTAL EM
AGROECOSSISTEMAS DE PECUÁRIA DE CORTE DA
AMAZÔNIA: UMA ABORDAGEM ATRAVÉS DA PERSPECTIVA
DE SAÚDE ÚNICA**

Esta Tese foi julgada e aprovada como parte dos requisitos para a obtenção do título de doutor em Ciências Ambientais.

Cáceres- MT, 22 de março de 2024.

Banca examinadora

Documento assinado digitalmente
 **MARIA APARECIDA PEREIRA PIERANGELI**
Data: 15/04/2024 11:48:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Maria Aparecida Pereira Pierangeli
Universidade do Estado de Mato Grosso
Orientadora

Dr. Joanis Tilemahos Zervoudakis
Universidade Federal de Mato
Grosso

Dr. Luiz Roberto G. Guilherme
Universidade Federal de Lavras

Dr. Juliano Bogoni
Universidade do Estado de Mato
Grosso

Dra. Carla Galbiati
Universidade do Estado de Mato
Grosso

**CÁCERES
MATO GROSSO, BRASIL
2024**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família:

Minha esposa Rayana e
nossos filhos Beatriz e Elias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar aos meus pais, Anilton e Maria Abadia, que mesmo com poucos recursos me ensinaram a importância dos estudos e proporcionaram boas condições para me dedicar a esse propósito.

A todos os meus professores, desde os primeiros anos escolares, pois contribuíram muito com o que aprendi e com quem sou. Especialmente a professora Vilma, que conduzia sozinha uma classe com quatro turmas da primeira a quarta série do ensino fundamental, em uma escola construída literalmente de palha, na zona rural, e além de tudo, ainda preparava a merenda escolar. Aos professores da escola Cirila Francisca da Silva, também localizada na zona rural, onde estudei até concluir o Ensino Médio.

Agradeço a Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), pelo fato de existir e por ter uma contribuição muito grande na minha formação através da graduação, mestrado e agora o doutorado.

Ao Instituto Federal de Mato Grosso, no qual me dedico como profissional e proporcionou oportunidade para me dedicar ao doutorado como parte do programa de incentivo à qualificação.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos para realização de doutorado sanduíche no exterior.

A Universidade de Santiago de Compostela (USC), na Espanha, por ter me recebido como pesquisador visitante e ter contribuído diretamente com este trabalho proporcionando condições para realização de diversas análises químicas. Além disso, pela oportunidade que tive, decorrente dessa colaboração, em conhecer um pouco melhor da história, cultura e o povo acolhedor da Galícia, principalmente de Lugo, e que agora disfruto de incríveis recordações.

À professora Dra. Marta López Alonso, catedrática da USC, coorientadora nesse trabalho, pela sua contribuição acadêmica e científica, além da contribuição pela sua experiência profissional e de vida, a quem dedico grande respeito e admiração.

Ao professor Dr. Ernandes Sobreira Oliveira Júnior, professor da UNEMAT, que também foi coorientador nesse trabalho, por sua experiência acadêmica e por me incentivar durante momentos críticos relacionados ao desenvolvimento dessa pesquisa.

À professora Dra. Maria Aparecida Pereira Pierangeli, minha orientadora nessa Tese, por ter contribuído amplamente nessa jornada, pelo suporte, experiência e exemplo de dedicação e comprometimento. Além disso, pela contribuição desde a graduação, moldando meu caminho e abrindo portas para muita aprendizagem.

À tantos amigos que fiz durante toda essa jornada. São muitas as contribuições de cada um pelas oportunidades que tive. O incentivo das pessoas próximas definitivamente tem contribuição inestimável e sou muito grato a todos.

Acima de tudo agradeço à Deus, pois creio que afinal é Ele quem me sustenta, me guarda e protege, que proporcionou todos os meios, pessoas condições para que pudesse chegar até aqui.

Meu profundo agradecimento.

BIOGRAFIA

Nasci em Pontes e Lacerda – MT, interior do Brasil, ano 1989. Desde criança vivi no ambiente rural, onde também estudei até os 17 anos, quando ingressei na faculdade no curso de bacharelado em zootecnia pela Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). Apesar do desejo de estudar música em uma grande cidade, me interessei bastante pela oportunidade que tive, sobretudo porque me sobressaia nos temas de ciências exatas. Além disso, obtive uma bolsa de iniciação científica durante a graduação, a qual foi um ótimo estímulo aos estudos. Ao concluir a graduação desejava ingressar no mercado de trabalho, contudo também obtive uma ótima oportunidade na pós-graduação com uma bolsa de estudos para realizar o mestrado em ciências ambientais, pela UNEMAT, na qual ingressei em 2012.

Durante o mestrado me casei, e assim, minha esposa que se chama Rayana, passou a compor esta biografia. A partir de 2014, fui professor interino da UNEMAT na faculdade em que me formei, e isso também contribui com minha formação. Posteriormente, em 2016 obtive um cargo efetivo como zootecnista no Instituto Federal de Mato Grosso (IFMT). Em 2017 a família cresceu com nascimento da Beatriz e em 2023 pelo nascimento do Elias.

Em 2020 ingressei no Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais (PPGCA/UNEMAT), após ter convicção de que seria o melhor programa para desenvolver meu projeto de tese de doutorado, haja vista que também considerava programas *stricto sensu* em ciência animal. Feliz com a decisão, também obtive possibilidade de realizar uma estadia de investigação na faculdade de veterinária da Universidade de Santiago de Compostela na Espanha, através da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que tem me permitido importante colaboração para desenvolvimento da presente tese e da minha formação em geral. Assim, uma única palavra poderia resumir muito bem esta minha trajetória: OPORTUNIDADES. E com sentimento de gratidão espero honrar tantas oportunidades que tive até aqui.

Fernando Luiz Silva

“O temor do Senhor é o princípio do saber...”

(Provérbios 1:7; 9:10)

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS	1
LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE ABREVIACÕES.....	8
LISTA DE SIMBOLOS E UNIDADES DE MEDIDA	9
RESUMO GERAL	10
ABSTRACT	11
INTRODUÇÃO GERAL	12
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16

ARTIGO 1.

ELEMENTOS TRAÇO EM BOVINOS DE CORTE: UMA REVISÃO DA ABORDAGEM CIENTÍFICA SOB A PERSPECTIVA DE SAÚDE ÚNICA.....	20
1. INTRODUÇÃO	21
2. MATERIALS E MÉTODOS.....	24
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
3.1 Visão geral dos artigos por anos e países.....	26
3.2 Análise de rede de coautoria.....	28
3.3 Elementos-traço, tecidos bovinos e técnicas analíticas identificadas.....	30
3.4 Escopo dos artigos em relação à abordagem de Saúde Única.....	35
3.5 Lacunas e oportunidades	37
4. CONCLUSÕES	39
5. REFERENCES.....	40
ARQUIVO SUPLEMENTAR (ARTIGO 1)	47

ARTIGO 2.

AVALIAÇÃO DOS TEORES BACKGROUND DE ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS DE MATO GROSSO (BRASIL) PARA SEGURANÇA AMBIENTAL E ALIMENTAR.....	48
1. INTRODUÇÃO	49
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	50
2.1 Características naturais do território de Mato Grosso	50
2.2 Pesquisa de literatura.....	51
2.3 Novos sítios de amostragem	52
2.4 Análises químicas	52
2.5 Análises estatísticas.....	53
3. RESULTADOS	53
4. DISCUSSÃO	57
4.1 Resultados descritivos e geoespaciais.....	57

4.2 Valores de referência de qualidade (VRQs)	62
5. CONCLUSÕES	64
6. REFERÊNCIAS	65
ARQUIVOS SUPLEMENTARES (ARTIGO 2)	69
REFERÊNCIAS SUPLEMENTARES (ARTIGO 2)	75

ARTIGO 3.

FERTILIDADE E ESTOQUE DE CARBONO EM AMBIENTES DE PASTAGENS E FLORESTAS NO SUL DA AMAZÔNIA.....

1. INTRODUÇÃO	78
2. MATERIAL E MÉTODOS	78
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	82
4. CONCLUSÕES	90
5. LITERATURA CITADA	91

ARTIGO 4.

MICRONUTRIENTES E ELEMENTOS TÓXICOS EM AGROECOSSISTEMAS DE BOVINOS DE CORTE E PRODUTOS CÁRNEOS NO SUL DA AMAZÔNIA

.....	94
1. INTRODUÇÃO	95
2. MATERIAL E MÉTODOS	97
2.1 Área do estudo e descrições gerais	97
2.2 Procedimento amostral para coleta dos materiais para análise	99
2.3 Análises químicas	100
2.4 Análises estatísticas	101
3. RESULTADOS	104
3.1 Elementos-traço no solo, gramínea e suplemento alimentar.....	104
3.2 Estimativa da ingestão de elementos-traço pelos rebanhos	107
3.3 Elementos-traço no plasma sanguíneo bovino e em produtos cárneos ...	109
3.4 Estimativa da ingestão de elementos para humanos via consumo de produtos cárneos	110
4. DISCUSSÃO	113
5. CONCLUSÃO.....	117
6. REFERÊNCIAS.....	118
ARQUIVOS SUPLEMENTARES (ARTIGO 4).....	125

CONSIDERAÇÕES FINAIS	135
----------------------------	-----

ANEXOS	138
--------------	-----

Registro fotográfico:	138
-----------------------------	-----

Apresentações em eventos científicos:	138
---	-----

LISTA DE TABELAS

TABELAS ARTIGO 2

Tabela 1. Resultados descritivos de elementos-traço em solos de áreas preservadas de Mato Grosso, Brasil e alguns níveis de referência para comparação..... 54

Tabela 2. Nível de significância do fator ambiental para cada elemento-traço analisado nos solos de áreas preservados de Mato Grosso, Brasil..... 55

Tabela Suplementar S1. Descrição das características relacionadas à província geológica do Estado de Mato Grosso, Brasil (IBGE, 2023).. 70

Table Suplementar S2. Descrição de características relacionadas à geomorfologia do Estado de Mato Grosso, Brasil (IBGE, 2023)..... 71

Tabela Suplementar S3. Descrição de características relacionadas à litologia do Estado de Mato Grosso, Brasil (IBGE, 2023). 71

Tabela Suplementar S4. Descrição das características relacionadas à pedologia do Estado de Mato Grosso, Brasil (IBGE, 2023)..... 72

Tabela Suplementar S5. Descrição das características relacionadas aos biomas do Estado de Mato Grosso, Brasil (IBGE, 2023). 73

Tabela Suplementar S6. Fontes de literatura com sítios geoespaciais incluídos neste estudo. 74

Tabela Suplementar S7. Controle de qualidade de análises químicas..... 74

Tabela Suplementar S8. Número de sítios incluídos neste estudo a partir da literatura e dos novos sítios amostrados para propor uma aproximação de VRQs para solos de Mato Grosso..... 75

TABELA ARTIGO 3

Tabela 1. Informações gerais sobre as fazendas incluídas neste estudo..... 80

TABELAS ARTIGO 4

Tabela 1. Controle de qualidade para a análise de elementos-traço em solo, gramínea, suplemento alimentar e produtos cárneos. 102

Tabela 2. Controle de qualidade para análise de elementos-traço no plasma sanguíneo. 102

Tabela Suplementar S1. Informações gerais sobre as fazendas e os rebanhos de fêmeas Nelore deste estudo. 125

Tabela Suplementar S2. Descrição das quantidades indicadas de consumo de cada suplemento alimentar e quantidade calculada de consumo de gramínea por unidade animal de 450 kg (UA) por dia¹. 125

Tabela Suplementar S3. Valores dietéticos de referência para algumas categorias humanas, ajustados para 30 dias. 126

Tabela Suplementar S4. Estimativa bovina de ingestão de Fe, Mn, Zn e Cu na matéria seca (MS), considerando o consumo combinado de suplemento alimentar e gramínea de fazendas localizadas na região Sul da Amazônia. 127

Tabela Suplementar S5. Estimativa bovina de ingestão de Se, Co, Mo, Cr e Ni na matéria seca (MS), considerando o consumo combinado de suplemento alimentar e gramínea de fazendas localizadas na região Sul da Amazônia. 128

Tabela Suplementar S6. Estimativa bovina de ingestão de Pb, As, Cd e Hg na matéria seca (MS), considerando o consumo combinado de suplemento alimentar e gramínea de fazendas localizadas na região Sul da Amazônia. 129

Tabela Suplementar S7. Estatísticas descritivas de micronutrientes e elementos tóxicos no músculo de bovinos obtidos em mercados localizados na região sul da Amazônia. 130

Tabela Suplementar S8. Estatísticas descritivas de micronutrientes e elementos tóxicos no rim de bovinos obtidos em mercados localizados na região sul da Amazônia. 131

Tabela Suplementar S9. Estatísticas descritivas de micronutrientes e elementos tóxicos no fígado de bovinos obtidos em mercados localizados na região sul da Amazônia. 132

LISTA DE FIGURAS

FIGURAS ARTIGO 1

Figura 1. Número de artigos sobre elementos-traço na produção de bovinos de corte publicados no período 2000–2022: (A) gráfico de barras e linha de tendência, com intervalo de confiança (área sombreada) para artigos publicados por ano, entre 2000 e 2022; os dados referentes a 2022 foram obtidos até 1º de julho de 2022 e ajustados para o período de 12 meses multiplicando por 2; (B) mapa mostrando o número de artigos publicados em diferentes países..... 27

Figura 2. Redes de coautoria ativas no período 2000–2022 em pesquisas sobre elementos-traço na produção de bovinos de corte. Os nós representam a relevância dos autores; as linhas representam a coautoria entre autores e as cores representam as principais redes identificadas..... 28

Figura 3. Número de artigos publicados no período 2000–2022 sobre elementos-traço na produção de bovinos de corte: (A) elementos-traço mais estudados; (B) elementos-traço menos estudados; Outros elementos: Ar, Au, Be, Bi, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, In, Ir, Lu, Nd, Pr, Pt, Sm, Te, Ti, Th, Tm, Yb; (C) tecidos bovinos analisados; (D) principais técnicas analíticas utilizadas. 31

Figura 4. Número de artigos publicados no período 2000-2022 sobre elementos-traço na produção de gado de corte classificados por escopo de pesquisa dentro da abordagem de Saúde Única: (A) interface do número de artigos categorizados por aspectos de pesquisa e escopo de pesquisa; (B) número de artigos categorizados por principais periódicos e por escopo de pesquisa..... 36

FIGURAS ARTIGO 2

Figure 1. A) Mapa de localização do Estado de Mato Grosso; B) Províncias geológicas; C) Geomorfologia; D) Litologia; E) Principais classes pedológicas de Mato Grosso; F) Biomas e sítios de amostragens. Bases de dados do IBGE (2023). 51

Figura 2. Teste post-hoc para províncias geológicas de solos de Mato Grosso, Brasil. Comparações pareadas pelo teste de Dunn e ajuste de p pelo método de Holm ($p < 0,05$). Possíveis *outliers* e valores inferiores ao limite de detecção (LD) foram removidos para esta análise estatística. A largura da caixa varia em relação à proporção do número de amostras (n). 56

Figura 3. Teste post-hoc para geomorfologia de solos de Mato Grosso, Brasil. Comparações pareadas pelo teste de Dunn e ajuste de p pelo método de Holm ($p < 0,05$). Possíveis *outliers* e valores inferiores ao limite de detecção (LD) foram removidos para esta análise estatística. A largura da caixa varia em relação à proporção do número de amostras (n). 57

Figura 4. Teste post-hoc para litologia de solos de Mato Grosso, Brasil. Comparações pareadas pelo teste de Dunn e ajuste de p pelo método de Holm ($p < 0,05$). Possíveis *outliers* e valores inferiores ao limite de detecção (DL) foram removidos para esta análise estatística. A largura da caixa varia em relação à proporção do número de amostras (n). 58

Figura 5. Teste post-hoc para pedologia de solos de Mato Grosso, Brasil. Comparações pareadas pelo teste de Dunn e ajuste de p pelo método de Holm ($p < 0,05$). Possíveis *outliers* e valores inferiores ao limite de detecção (LD) foram removidos para esta análise estatística. A largura da caixa varia em relação à proporção do número de amostras (n). 59

Figure 6. Teste post-hoc para biomas de solos de Mato Grosso, Brasil. Comparações pareadas pelo teste de Dunn e ajuste de p pelo método de Holm ($p < 0,05$). Possíveis *outliers* e valores inferiores ao limite de detecção (DL) foram removidos para esta análise estatística. A largura da caixa varia em relação à proporção do número de amostras (n). 60

Figura Suplementar S1. Mapa dos sítios de amostragem de acordo com os percentis 75 e 90 de cada elemento. Os sítios de amostragem incluem dados inferiores ao limite de detecção (LD) e possíveis *outliers*. 69

Figura Suplementar S2. Correlações de postos de Spearman para elementos-traço em solos de Mato Grosso. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Possíveis *outliers* e teores inferiores ao LD foram removidos para esta análise estatística (Tabela Suplementar S8). ^a Matéria orgânica do solo (MO); ^b Argila + Silte. 70

FIGURAS ARTIGO 3

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo e locais de amostragem (A). Fotografias dos ambientes estudados: Pastagem e mata adjacente (B); pastagem extensiva típica da Amazônia (C); Degradação de pastagens por falhas de cobertura do solo (D); e Degradação de pastagens por ervas daninhas (E). 79

Figura 2. Matriz de correlação de Pearson entre variáveis químicas e físicas do solo. EB: somade bases trocáveis; MO: matéria orgânica do solo; CTC: capacidade de troca de cátions.	82
Figura 3. Atributos químicos e físicos de solos de ambientes pastagens e floresta.	84
Figure 4. Interpretação da fertilidade do solo das pastagens em cada propriedade (I-VIII).	86
Figura 5. Estoques de carbono orgânico do solo (CO) nos ambientes de floresta e pastagem (camada 0 a 0,20 m). Média e erro padrão do estoque de CO em cada fazenda estudada (I-VIII) e ambientes (A), boxplot com média dos dados do estoque de CO e significância estatística pelo teste t de Student para ambientes estudados (B), estoque de CO na pastagem em relação ao respectivo ambiente de floresta adjacente (C), e análise de correlação de Pearson para estoque de CO com matéria orgânica (MO), argila, areia e densidade aparente (Ds) nos ambientes floresta e pastagem (D).	87
Figura 6. Regressão linear da capacidade de troca catiônica (CTC) (A) e estoque de carbono orgânico do solo (CO) (B) em resposta à matéria orgânica (MO) nos ambientes de floresta e pastagem no Sul da Amazônia.	89

FIGURAS ARTIGO 4

Figura 1. Localização da área do estudo e das fazendas. As feições geográficas das áreas de pastagem foram obtidas no MapBiomas (2023).	98
Figura 2. Estatísticas descritivas dos teores pseudototais de elementos-traço no solo de pastagens das fazendas I-VIII, localizadas na região sul da Amazônia.	105
Figura 3. Estatísticas descritivas de elementos-traço na gramínea (na matéria seca) de pastagens das fazendas I-VIII, localizadas na região Sul da Amazônia. Não há exigência estabelecida de Mo, Ni e Cr para bovinos. Chumbo, As, Cd e Hg são elementos tóxicos.	106
Figura 4. Estatísticas descritivas de elementos-traço no suplemento alimentar bovino (na matéria seca) oferecido a rebanhos bovinos criados em fazendas localizadas na região Sul da Amazônia. n = número de amostras obtidas de cada suplemento alimentar.	107

Figura 5. Estimativa do consumo de elementos-traço por bovinos a pasto através do consumo combinado de gramínea e suplemento alimentar na região sul da Amazônia. Esta estimativa considera uma faixa entre os teores mínimo e máximo de cada elemento na gramínea, como segue em mg/kg MS: Fe 43,07-349,83; Zn 11,43-27,99; Cu 2,77-7,57; e em µg/kg MS: Se 0,79-145,94; e Co 4.19-29.51. A estimativa de ingestão para todos os elementos e combinações de gramínea e suplemento alimentar podem ser vistas nas Tabelas Suplementares S4, S5 e S6..... 108

Figura 6. Estatísticas descritivas de elementos-traço no plasma sanguíneo dos rebanhos I a IV, VIa e VIb de fazendas localizadas na região Sul da Amazônia. Os elementos Ni, Cr, Pb, As, Cd e Hg não tiveram faixas de referência determinadas por Herdt e Hoff (2011). . 109

Figura 7. Estatísticas descritivas de elementos-traço no músculo, rim e fígado (peso úmido) obtidos em mercados localizados na região sul da Amazônia. As tabelas com os percentis mínimo, 10, 25, 50, 75, 90 e máximo podem ser visualizadas nas Tabelas Suplementares S7, S8 e S9. 110

Figura 8. Estimativa da ingestão mensal relativa (RMI) em relação aos de referência ajustados para 30 dias (DRI_{30d}) para categorias humanas pelo consumo de músculo, rim e fígado de bovinos obtidos em mercados localizados na região Sul da Amazônia. As seguintes idades e pesos corporais foram assumidos para categorias humanas: crianças, 6 anos, 20 kg; meninas, 16 anos, 53 kg; meninos, 16 anos, 58 kg; mulheres, 30 anos, 65 kg; e homens, 30 anos, 80 kg. O conteúdo dos elementos nos alimentos foi a faixa entre o percentil 10 e 90 dos resultados descritivos de músculo, rim e fígado de bovinos (Tabelas suplementares S7, S8 e S9)..... 111

Figura 9. Estimativa da ingestão relativa mensal (RMI) em relação aos níveis superiores toleráveis ajustados para 30 dias (UL_{30d}) para categorias humanas pelo consumo de músculo, rim e fígado de bovinos obtidos em mercados localizados na região Sul da Amazônia. As seguintes idades e pesos corporais foram assumidos para categorias humanas: crianças, 6 anos, 20 kg; meninas, 16 anos, 53 kg; meninos, 16 anos, 58 kg; mulheres, 30 anos, 65 kg; e homens, 30 anos, 80 kg. O conteúdo dos elementos nos alimentos foi a faixa entre o percentil 10 e 90 dos resultados descritivos de músculo, rim e fígado de bovinos (Tabelas Suplementares S7, S8 e S9). 112

Figura Suplementar S1. Estatísticas descritivas dos elementos disponíveis (extraídos com solução Mehlich-1) no solo das pastagens das fazendas I-VIII, localizadas na região Sul da Amazônia. Interpretação da fertilidade do solo por Ribeiro et al. (1999)..... 133

Figura Suplementar S2. Matriz de correlações de Pearson entre elementos-traço do solo e a gramínea de pastagens localizadas na região sul da Amazônia. 133

Figura Suplementar S3. Regressão entre Hg no solo e gramínea (A), e Se no solo e gramínea (B), provenientes de pastagens das fazendas I-VIII, localizadas na região Sul da Amazônia. ***: significativo para $p \leq 0,001$ pelo teste F. 134

LISTA DE ABREVIATÖES

AAS	Espectrometria de absorção atômica
BDiA	Banco de dados de informações ambientais
CO	Carbono orgânico do solo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTC	Capacidade de troca de cátions
DMA	Analisador direto de mercúrio
DPR	Desvio padrão relativo
Ds	Densidade aparente do solo
EFSA	European Food Safety Authority
F-AAS	Espectrometria de absorção atômica com chama
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura)
GF-AAS	Espectrometria de absorção atômica com forno de grafite
H + AI	Acidez potencial
HG-AAS	Espectrometria de absorção atômica com gerador de hidretos
ICP-MS	Espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente
ICP-OES	Espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente
IOM	Institute of Medicine (Instituto de Medicina)
LD	Limite de detecção
m	Percentual de saturação por alumínio
MO	Matéria orgânica do solo
MS	Matéria seca
NRC	National Research Council (Concelho Nacional de Pesquisa)
RDI_{30d}	Referência diária de ingestão ajustada para 30 dias
RMI	Ingestão relativa mensal
SB	Soma de bases trocáveis
UA	Unidade animal de 450 kg
UL_{30d}	Nível superior tolerável ajustado para 30 dias
V	Percentual de saturação por bases
VI	Valor de investigação
VP	Valor de prevenção
VRQ	Valor de referência de qualidade
WHO	World Health Organization (Organização Mundial da Saúde)

LISTA DE SIMBOLOS E UNIDADES DE MEDIDA

μ/L	Micrograma por litro
$\mu g/kg$	Micrograma por quilograma
μm	Micrômetro
cm	Centímetro
$cmol_c dm^{-3}$	Centimol carga por decímetro cúbico
$g cm^{-3}$	Grama por centímetro cúbico
$g dm^{-3}$	Grama por decímetro cúbico
$g kg^{-1}$ ou g/kg	Grama por quilograma
g	Grama
ha	Hectare
kg	Quilograma
km^2	Quilômetro quadrado
m	Metro
$Mg ha^{-1}$	Megagrama por hectare
$mg kg^{-1}$ ou mg/kg	Miligramma por quilograma
$Mg m^{-3}$	Megagrama por metro cúbico
mg	Miligramma
mL	Mililitro
mm	Milímetro
$mol L^{-1}$	Mol por litro
nm	Nanômetro
Pg	Petagrama

RESUMO GERAL

Sistemas de criação de bovinos à pasto contribuem para a produção de alimentos, para a economia, sendo também relevante sob aspectos socioculturais e ecológicos. Todavia, podem causar muitos impactos ambientais gerando preocupações globais relacionadas à sua sustentabilidade. A pecuária na Amazônia brasileira ocupa milhões de hectares predominantemente degradadas. Isso exige muito esforços para que modelos de produção mais sustentáveis sejam atingidos. Diante de muitas questões ambientais, sociais e econômicas complexas relacionadas à pecuária na Amazônia, este estudo adota a abordagem de “Saúde Única” para investigar a transferência de micronutrientes e elementos tóxicos entre o ambiente, bovinos e produtos cárneos. O objetivo geral é contribuir para o desenvolvimento de estratégias no âmbito da “Saúde Única”, a fim de favorecer a preservação ambiental, sustentabilidade dos sistemas de produção animal e a segurança alimentar. Assim, esta tese foi organizada em quatro artigos. O primeiro artigo é uma revisão de literatura no qual foi analisado o avanço científico decorrente das pesquisas que investigaram elementos-traço em bovinos de corte, buscando entender como essas pesquisas interagem com os temas relacionados à saúde humana e ambiental. O segundo artigo estabelece os teores background de elementos-traço no solo buscando contribuir para o estabelecimento de valores de referência de qualidade desses elementos para solos de Mato Grosso, além de abordar a relação desses elementos no solo com a segurança ambiental e alimentar. O terceiro artigo avalia e compara a fertilidade do solo e o estoque de carbono de áreas de pastagens e floresta nativa no sul da Amazônia e discute estratégias para a sustentabilidade dessas pastagens. O quarto artigo investiga os teores de micronutrientes e elementos tóxicos em sistemas de produção de bovinos à pasto e sua possível transferência para os animais e produtos cárneos. Nesse contexto são discutidos aspectos para melhorar a gestão dos elementos-traço na Amazônia, a fim de garantir a proteção ambiental, o bem-estar animal e a saúde humana.

Palavras-chave: boas práticas agropecuárias, CONAMA 420/2009, metal pesado, micronutrientes, segurança alimentar, solo

ABSTRACT

Pasture cattle farming systems contribute to food production, the economy, and are also relevant from sociocultural and ecological aspects. However, they can cause many environmental impacts, generating global concerns related to their sustainability. Livestock farming in the Brazilian Amazon occupies millions of predominantly degraded hectares. This requires a lot of effort so that more sustainable production models are achieved. Faced with many complex environmental, social and economic issues related to livestock farming in the Amazon, this study adopts the “One Health” approach to investigate the transfer of micronutrients and toxic elements between the environment, cattle and meat products. The general objective is to contribute to the development of strategies within the scope of “One Health”, in order to favor environmental preservation, sustainability of animal production systems and food security. Thus, this thesis was organized into four articles. The first article is a literature review in which scientific advances resulting from research that investigated trace elements in beef cattle were analyzed, seeking to understand how this research interacts with topics related to human and environmental health. The second article establishes the background levels of trace elements in the soil, seeking to contribute to the establishment of quality reference values for these elements for soils in Mato Grosso, in addition to addressing the relationship of these elements in the soil with environmental and food security. The third article evaluates and compares soil fertility and carbon stock in pasture areas and native forest in the south of the Amazon and discusses strategies for the sustainability of these pastures. The fourth article investigates the levels of micronutrients and toxic elements in pasture-fed cattle production systems and their possible transfer to animals and meat products. In this context, aspects to improve the management of trace elements in the Amazon are discussed, in order to guarantee environmental protection, animal welfare and human health.

Key words: good agricultural practices, CONAMA 420/2009, heavy metal, micronutrients, food safety, soil

INTRODUÇÃO GERAL

A pecuária bovina na Amazônia brasileira ocorre tradicionalmente há centenas de anos, mas desde a década de 1970 tem se expandido rapidamente, impulsionando o desmatamento, e ocupando mais de 55 milhões de hectares de pastagens predominantemente degradadas (ARIMA; BARRETO; BRITO, 2005; WALKER et al., 2009; CARVALHO; AGUIAR; AMARAL, 2020; MAPBIOMAS, 2023). Nesse cenário, a pecuária se consolidou na Amazônia brasileira, tornando-se uma das principais atividades econômicas, e com destaque na exportação de carne para muitos países, apesar de ainda apresentar baixos índices de produtividade (SANTOS et al., 2017; BRASIL, 2024). Diante disso, têm havido a necessidade de adoção de práticas de manejo mais eficientes e produtivas, processo este designado frequentemente de “intensificação da pecuária” (ERMGASSEN et al., 2018; VALE et al., 2019).

Atingir um modelo de produção sustentável de bovinos à pasto, muito além da Amazônia, tem sido um debate global, pois perpassa por diversas questões, que incluem a redução na emissão de gases de efeito estufa, uso racional das terras, bem-estar animal, contaminação ambiental e segurança alimentar (BRUGGER; WINDISCH, 2015; ERMGASSEN et al., 2018; TEAGUE; KREUTER, 2020; MCTAVISH et al., 2021; BARBOUR; YOUNG; WILKINSON, 2022). Isso caracteriza o cenário inter, multi e transdisciplinar das questões relacionadas aos desafios à sustentabilidade que envolvem os sistemas de produção animal à pasto, inclusive na Amazônia brasileira.

Assumir uma abordagem holística que considere as diversas inter-relações existentes entre ambiente, animais e as pessoas, é essencial diante de questões complexas que emergem das constantes mudanças oriundas das ações antrópicas. Assim, o conceito de “Saúde Única” (*One Health*) – ambiental, animal e humana – pode favorecer a análise e compreensão, inclusive a inovação ao lidar com os problemas que envolvem a dinâmica dos agroecossistemas da pecuária de corte bovina na Amazônia.

A abordagem de “Saúde Única” objetiva assegurar o bem-estar das pessoas, dos animais e do ambiente através da resolução colaborativa de problemas, integrando esses componentes altamente interconectados e possibilitando a mudança para melhores resultados de saúde pública

(MACKENZIE; JEGGO, 2019). Embora o conceito de “Saúde Única” tenha nascido originalmente de uma perspectiva zoonótica, nos últimos anos o conceito expandiu-se das ciências médicas e veterinárias para incluir uma gama crescente de disciplinas sinérgicas, incluindo segurança alimentar, saúde pública, economia da saúde e saúde animal (XIE et al., 2017). Agora é reconhecido que os fatores ambientais, incluindo contaminantes químicos em animais e produtos de origem animal, resíduos de aditivos e medicamentos veterinários, e produtos fitossanitários, desempenham um papel significativo na saúde vegetal, animal e humana.

Diante disso, adotamos nesse estudo a abordagem de “Saúde Única” para investigar a transferência de elementos-traço – micronutrientes e elementos tóxicos – entre solo, plantas, bovinos e alimentação humana. Os elementos-traço são onipresentes na natureza e ocorrem em concentrações normalmente abaixo de 100 mg kg^{-1} (MCNAUGHT; WILKINSON, 2019). Eles podem ser nutrientes como Cu, Fe e Zn, ou potencialmente tóxicos como Cd, Hg e Pb (HEJNA et al., 2018). Apesar de ocorrerem em baixas concentrações, podem provocar efeitos perigosos quando ocorrem pequenas alterações na sua biodisponibilidade, seja ocorrência de deficiência nutricional ou toxidez (LÓPEZ-ALONSO, 2012).

No contexto da pecuária bovina, com objetivo de assegurar o suprimento suficiente de micronutrientes na alimentação do gado, quantidades muito superiores ao requerimento animal são normalmente fornecidas através de suplementação alimentar (BRUGGER; WINDISCH, 2015; HEJNA et al., 2018; LÓPEZ-ALONSO; MIRANDA, 2020; DUPLESSIS; ROYER, 2023). Isso gera vários problemas, como alta carga de nutrientes excretado no ambiente através de fezes e urina; baixo aproveitamento de recursos naturais e econômicos para preparação dos suplementos alimentares, e; risco de exposição dos bovinos ao consumo de quantidades de elementos-traço superiores aos limites tolerados. A qualidade da suplementação alimentar bovina em relação à presença de elementos tóxicos dentro dos limites permitidos também é uma preocupação relevante, pois, tipicamente, alguns ingredientes utilizados podem conter quantidade excessivas de Pb e Cd (SIGARINI et al., 2017).

As condições ambientais em que os bovinos são criados também são importantes. As concentrações naturais de vários elementos-traço dos solos da Amazônia, por exemplo, são pouco conhecidas, o que pode influenciar na

quantidade de elementos absorvidos pelas plantas e consequentemente no equilíbrio das dietas preparadas para esses bovinos. Além disso, na Amazônia os bovinos estão expostos a risco de contaminação por Hg através de queimadas e de mineração artesanal de ouro, que liberam Hg para atmosfera podendo ser assimilado pelas gramíneas forrageiras (WASSERMAN; HACON; WASSERMAN, 2003; SHAHID et al., 2017) – o principal alimento do gado nos sistemas de criação à pasto. Embora não se tenha relatos no Brasil, a utilização de fertilizantes, inseticidas e herbicidas para manejo de pastagens, também podem expor o ambiente à contaminação por elementos-traço, e, consequentemente, expor o gado à elementos tóxicos (HE; YANG; STOFFELLA, 2005; SINGH et al., 2011; BRUGGER; WINDISCH, 2015).

Assim, o ambiente e a condição em que os bovinos são criados, também refletem na qualidade dos alimentos que chegam ao consumidor. Diversos trabalhos apontam a necessidade da compreensão da dinâmica dos elementos-traço no ambiente e sistemas de produção e sua relação com a qualidade do tecido de bovinos de corte, tendo em vista o cuidado para o consumo humano (RUDY, 2009; ALKMIM FILHO et al., 2014; CANTY et al., 2014; HASHEMI, 2018; PEREIRA et al., 2018). Desse modo, quando os bovinos sofrem carências de certos micronutrientes, ou estão expostos à contaminação, os produtos gerados podem refletir essas características, representado assim um problema para a saúde humana.

Deficiências de micronutrientes na alimentação humana estão relacionadas à inúmeros problemas de saúde, como atraso do desenvolvimento infantil e suscetibilidade à doenças (BERGER et al., 2022). A organização mundial da saúde, destaca que a anemia por deficiência de Fe afeta bilhões de pessoas em todo o mundo, principalmente mulheres grávidas e crianças (WHO, 2008). A deficiência de Zn também é muito comum, atingindo quase 20% da população global (HLPE, 2017). As deficiências globais de micronutrientes são amplas e causam profundos impactos na sociedade, como por exemplo, menor nível de escolaridade, diminuição da capacidade de trabalho, impactos econômicos, além do impacto sobre a saúde humana propriamente dita (BAILEY; WEST JR.; BLACK, 2015).

A disponibilidade e acessibilidade de alimentos diversificados e de qualidade, por sua vez, têm grande importância no combate à desnutrição

(HLPE, 2017; HAN et al., 2022; FAO et al., 2023) e isso reforça a importância da produção de alimentos mais saudáveis, inclusive no que se refere à disponibilidade de micronutrientes e redução da presença de elementos tóxicos.

Diante o exposto, na presente tese são investigados os teores de elementos-traço Fe, Mn, Zn, Cu, Se, Co, Mo, Ni, Cr, As, Pb, Cd e Hg em amostras de solos preservados do Estado de Mato Grosso e em ambientes de pastagem de bovinos de corte criados à pasto no sul da Amazônia, além, de amostras de sangue, músculo, rim e fígado bovinos criados nessa região. O objetivo geral é favorecer o desenvolvimento de estratégias no âmbito da “Saúde Única”, a fim de contribuir para sustentabilidade da pecuária, preservação ambiental, e segurança alimentar. Entre os objetivos específicos se incluem: a) Revisar a literatura global sobre pesquisas que investigaram elementos-traço no contexto da pecuária bovina de corte; b) Propor valores de referência de qualidade de elementos-traço para solos do Estado de Mato Grosso; c) Investigar a condição de fertilidade e estoque de carbono de solos de fazendas que criam bovinos de corte à pasto na região sul da Amazônia; d) Investigar o risco de contaminação ambiental à elementos potencialmente tóxicos que estes bovinos estão expostos; e) Avaliar a adequação da alimentação bovina aos requerimentos e limites de consumo de elementos-traço; f) Avaliar o estado nutricional dos bovinos em pastagem; g) Avaliar a adequação da carne bovina produzida na região sul da Amazônia aos requerimentos e limites recomendados para o consumo humano.

Esta tese está organizada em quatro artigos. O **primeiro artigo**, intitulado “*ELEMENTOS TRAÇO EM BOVINOS DE CORTE: UMA REVISÃO DA ABORDAGEM CIENTÍFICA SOB A PERSPECTIVA DE SAÚDE ÚNICA*” é uma revisão de literatura das últimas duas décadas (2000-2022), no qual foi analisado o avanço científico decorrente das pesquisas envolvendo elementos-traço em bovinos de corte, buscando entender como essas pesquisas interagem com os temas relacionados à saúde humana e ambiental. Este artigo foi publicado em 31 de agosto de 2022 na revista *Animals* (MDPI).

O **segundo artigo**, intitulado “*AVALIAÇÃO DOS TEORES BACKGROUND DE ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS DE MATO GROSSO (BRASIL) PARA SEGURANÇA AMBIENTAL E ALIMENTAR*” contribui diretamente para o estabelecimento de valores de referência de qualidade de

elementos-traço para solos de Mato Grosso, além de abordar a relação desses elementos no solo com a segurança ambiental e alimentar. Também contribui para o entendimento dos ambientes de pastagens investigados na presente Tese, além de proporcionar valores de referência para avaliar o impacto de atividades antrópicas sobre as concentrações de elementos-traço. Este artigo foi submetido em 15 de janeiro de 2024 para a revista *Agrosystems, Geosciences & Environment* (Wiley).

O **terceiro artigo**, intitulado “*FERTILIDADE E ESTOQUE DE CARBONO EM AMBIENTES DE PASTAGENS E FLORESTAS NO SUL DA AMAZÔNIA*” descreve e compara a fertilidade de solos e estoque de carbono de pastagens e floresta nativa de oito fazendas no sul da Amazônia e discute estratégias em direção a sustentabilidade dessas pastagens utilizadas para criação de bovinos de corte. Este artigo foi publicado em 01 de janeiro de 2024 na Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (SciELO).

O **quarto artigo**, intitulado “*MICRONUTRIENTES E ELEMENTOS TÓXICOS EM AGROECOSSISTEMAS DE BOVINOS DE CORTE E PRODUTOS CÁRNEOS NO SUL DA AMAZÔNIA*” investiga a transferência de micronutrientes e elementos tóxicos do ambiente para os bovinos e produtos cárneos. São apresentados valores descritivos que servirão de referência para estudos futuros, além de contribuir para compreender a importância dos sistemas de produção animal à pasto em contexto global. Também são discutidos aspectos para melhorar a gestão dos elementos-traço no contexto da Amazônia, a fim de garantir a proteção ambiental, o bem-estar animal e a saúde humana. Este artigo está preparado para submissão na revista *Animal* (Elsevier).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALKMIM FILHO, J. F. et al. Heavy metals investigation in bovine tissues in Brazil. *Food Science and Technology*, v. 34, n. 1, p. 110–115, 25 mar. 2014. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612014000100016&lng=en&tlng=en.
- ARIMA, E.; BARRETO, P.; BRITO, M. *Pecuária na Amazônia: tendências e implicações para a conservação ambiental*. Belém: Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, 2005.

- BAILEY, R. L.; WEST JR., K. P.; BLACK, R. E. The Epidemiology of Global Micronutrient Deficiencies. *Annals of Nutrition and Metabolism*, v. 66, n. Suppl. 2, p. 22–33, 2015. Disponível em: <<https://karger.com/doi/10.1159/000371618>>.
- BARBOUR, R.; YOUNG, R. H.; WILKINSON, J. M. Production of Meat and Milk from Grass in the United Kingdom. *Agronomy*, v. 12, n. 4, p. 914, 11 abr. 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4395/12/4/914>>.
- BERGER, M. M. et al. ESPEN micronutrient guideline. *Clinical Nutrition*, v. 41, n. 6, p. 1357–1424, jun. 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261561422000668>>.
- BRASIL - MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA COMÉRCIO, E SERVIÇOS. Estatísticas de Comércio Exterior em Dados Abertos. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>>. Acesso em: 26 jan. 2024.
- BRUGGER, D.; WINDISCH, W. M. Environmental responsibilities of livestock feeding using trace mineral supplements. *Animal Nutrition*, v. 1, n. 3, p. 113–118, set. 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405654515300287>>.
- CANTY, M. J. et al. Cadmium and other heavy metal concentrations in bovine kidneys in the Republic of Ireland. *Science of the Total Environment*, v. 485–486, n. 1, p. 223–231, 2014.
- CARVALHO, R.; AGUIAR, A. P. D.; AMARAL, S. Diversity of cattle raising systems and its effects over forest regrowth in a core region of cattle production in the Brazilian Amazon. *Regional Environmental Change*, v. 20, n. 2, p. 44, jun. 2020. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10113-020-01626-5>>.
- DUPLESSIS, M.; ROYER, I. Mini-Review: The importance of an integrated approach to assess trace mineral feeding practices in dairy cows. *Frontiers in Animal Science*, v. 4, 28 mar. 2023. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fanim.2023.1155361/full>>.
- ERMGASSEN, E. et al. Results from On-The-Ground Efforts to Promote Sustainable Cattle Ranching in the Brazilian Amazon. *Sustainability*, v. 10, n. 4, p. 1301, 2018. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2071-1050/10/4/1301>>.
- FAO et al. The State of Food Security and Nutrition in the World 2023. Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum. [s.l.] FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO; 2023.
- HAN, X. et al. Global, regional, and national burdens of common micronutrient deficiencies from 1990 to 2019: A secondary trend analysis based on the Global Burden of Disease 2019 study. *eClinicalMedicine*, v. 44, p. 101299, fev. 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2589537022000293>>.

- HASHEMI, M. Heavy metal concentrations in bovine tissues (muscle, liver and kidney) and their relationship with heavy metal contents in consumed feed. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 154, p. 263–267, jun. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0147651318301490>>.
- HE, Z. L.; YANG, X. E.; STOFFELLA, P. J. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, v. 19, n. 2–3, p. 125–140, 2005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0946672X05000969>>.
- HEJNA, M. et al. Review: Nutritional ecology of heavy metals. *Animal*, v. 12, n. 10, p. 2156–2170, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S175173111700355X>>.
- HLPE - HIGH LEVEL PANEL OF EXPERTS. Nutrition and food systems. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.fao.org/cfs/cfs-hlpe/en>>.
- LÓPEZ-ALONSO, M. Trace Minerals and Livestock: Not Too Much Not Too Little. *ISRN Veterinary Science*, v. 2012, p. 1–18, 2012. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/archive/2012/704825/>>.
- LÓPEZ-ALONSO, M.; MIRANDA, M. Copper Supplementation, A Challenge in Cattle. *Animals*, v. 10, n. 10, p. 1890, 15 out. 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-2615/10/10/1890>>.
- MACKENZIE, J. S.; JEGGO, M. The One Health Approach—Why Is It So Important? *Tropical Medicine and Infectious Disease*, v. 4, n. 2, p. 88, 31 maio 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2414-6366/4/2/88>>.
- MAPBIOMAS. Coleção v.8 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. Disponível em: <<https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>>.
- MCNAUGHT, A. D.; WILKINSON, A. The IUPAC Compendium of Chemical Terminology. Research Triangle Park, NC: International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), 2019. v. 2nd
- MCTAVISH, M. J. et al. Sustainable management of grassland soils. In: *Soils and Landscape Restoration*. [s.l.] Elsevier, 2021. p. 95–124.
- PEREIRA, V. et al. Trace Element Concentrations in Beef Cattle Related to the Breed Aptitude. *Biological Trace Element Research*, v. 186, n. 1, p. 135–142, 24 nov. 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12011-018-1276-3>>.
- RUDY, M. Correlation of lead, cadmium and mercury levels in tissue and liver samples with age in cattle. *Food Additives {&} Contaminants: Part A*, v. 26, n. 6, p. 847–853, jun. 2009.

- SANTOS, M. A. S. et al. Caracterização do nível tecnológico da pecuária bovina na Amazônia Brasileira. *Rev. Cienc. Agrar.*, v. 60, n. 1, p. 103–111, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4322/rca.60103>>.
- SHAHID, M. et al. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials*, v. 325, p. 36–58, mar. 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389416310937>>.
- SIGARINI, K. dos S. et al. Determination of the Lead, Cadmium, and Chromium Concentration in Mineral Feeds and Supplements for Cattle Produced in the Mato Grosso State, Brazil. *Biological Trace Element Research*, v. 177, n. 1, p. 209–214, 15 maio 2017. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12011-016-0869-y>>.
- SINGH, R. et al. Heavy metals and living systems: An overview. *Indian Journal of Pharmacology*, v. 43, n. 3, p. 246, 2011. Disponível em: <<http://www.ijp-online.com/text.asp?2011/43/3/246/81505>>.
- TEAGUE, R.; KREUTER, U. Managing Grazing to Restore Soil Health, Ecosystem Function, and Ecosystem Services. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 4, 29 set. 2020. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fsufs.2020.534187/full>>.
- VALE, P. et al. The Expansion of Intensive Beef Farming to the Brazilian Amazon. *GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE-HUMAN AND POLICY DIMENSIONS*, v. 57, jul. 2019.
- WALKER, R. et al. The expansion of intensive agriculture and ranching in Brazilian Amazonia. In: KELLER, M. et al. (Ed.). *Amazonia and Global Change*. [s.l.] American Geophysical Union, 2009. p. 61–81.
- WASSERMAN, J. C.; HACON, S.; WASSERMAN, M. A. Biogeochemistry of Mercury in the Amazonian Environment. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, v. 32, n. 5, p. 336–342, ago. 2003. Disponível em: <<http://www.bioone.org/doi/abs/10.1579/0044-7447-32.5.336>>.
- WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. Worldwide prevalence of anaemia 1993–2005: WHO global database on anaemia. Geneva: WHO Press, 2008.
- XIE, T. et al. A system dynamics approach to understanding the One Health concept. *PLOS ONE*, v. 12, n. 9, p. e0184430, 6 set. 2017. Disponível em: <<https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0184430>>.

ELEMENTOS TRAÇO EM BOVINOS DE CORTE: UMA REVISÃO DA ABORDAGEM CIENTÍFICA SOB A PERSPECTIVA DE SAÚDE ÚNICA

[Publicado na revista [ANIMALS](https://doi.org/10.3390/ani12172254) (MDPI), em 31 de agosto de 2022, <https://doi.org/10.3390/ani12172254>]

RESUMO: O objetivo foi investigar o contexto, abordagem os temas de pesquisa presentes nos artigos que analisaram elementos-traço em bovinos de corte para identificar lacunas e perspectivas científicas para o manejo sustentável de elementos-traço na pecuária. Os principais grupos de pesquisa vieram dos Estados Unidos, Espanha, Japão, Brasil, Índia e Eslováquia, que representaram 31% dos artigos produzidos. Apenas 37% dos estudos abordaram aspectos que integravam a saúde animal, ambiental e humana. Os artigos revisados abordaram 56 elementos e 15 tecidos bovinos (principalmente Cu, Zn, Pb, fígado, músculo e rim). As principais lacunas foram (1) falta de investigação nos países em desenvolvimento, (2) necessidade de compreender o impacto das diferentes questões ambientais e a sua relação com as condições em que os animais são criados, e (3) necessidade de compreender o papel dos muitos elementos-traço na nutrição animal e sua relação com a saúde ambiental e humana. Finalmente, destacamos possíveis formas de expandir o conhecimento e fornecer inovações para amplas questões emergentes, principalmente através da expansão de redes de investigação colaborativa. Neste contexto, sugerimos a adoção da abordagem de Saúde Única para planejar futuras investigações sobre elementos-traço na pecuária. Além disso, a abordagem de Saúde Única também deve ser considerada por gestores e políticos para um cuidado ambiental sustentável e segurança alimentar.

Palavras-chave: ambiente; fazenda; segurança alimentar; pecuária; sustentabilidade

1. INTRODUÇÃO

Os elementos-traço ocorrem no ambiente em concentrações normalmente abaixo de 100 mg kg^{-1} [1]. Eles são descritos como “traços” porque não puderam ser quantificados pelos primeiros métodos analíticos disponíveis [2]. Os elementos-traço podem ser elementos nutricionais, como Cu, Fe e Zn, ou elementos potencialmente tóxicos, como Cd, Hg e Pb [3]. Embora ocorram naturalmente em baixas concentrações, os elementos-traço são de grande importância. Por exemplo, a presença de pequenas variações nas concentrações de elementos-traço na alimentação do gado pode causar uma redução substancial no desempenho e na produção ou pode resultar em deficiência ou toxicidade, levando até mesmo à morte dos animais [4].

As concentrações de elementos-traço no ambiente e nos alimentos variam amplamente. Assim, no contexto da mudança ambiental global que está ocorrendo na chamada era do Antropoceno [5] e considerando que as concentrações de elementos-traço são influenciadas por uma série de fatores de origem natural ou antropogênica, como fatores geológicos e edáficos ou emissões agrícolas e industriais [6, 7], existe o risco sempre presente de que as mudanças causem desequilíbrio ecológico nos mais diversos ambientes.

Dentro do setor agrícola, a suplementação mineral na produção animal é de grande importância. É bem sabido que um fornecimento inadequado (geralmente deficiente) de elementos-traço essenciais leva a más condições dos animais, afetando negativamente a imunidade e a reprodução [8]. Historicamente, extensas áreas de deficiência de elementos-traço foram identificadas em todo o mundo, e uma vasta e abrangente quantidade de pesquisas (para a época) foi conduzida há algumas décadas para estabelecer as necessidades de elementos-traço e o papel metabólico dos elementos-traço [2, 9]. Neste contexto, a suplementação com elementos-traço, principalmente como misturas minerais adicionadas à ração animal concentrada, foi rotineiramente estabelecida como “seguro” para o rebanho; isso foi possível porque a maioria dos elementos-traço tem amplas margens de segurança e o custo dos minerais foi compensado pelos benefícios obtidos [4]. Isso levou à liberação de grandes quantidades de elementos-traço no meio ambiente, com diversas consequências negativas hoje bem conhecidas, como efeitos tóxicos

em plantas, microrganismos e animais [10]. Além disso, em menor grau, os animais criados em áreas poluídas (principalmente devido à indústria e à mineração) podem ser expostos a altos níveis de elementos tóxicos e desenvolver sinais de toxicidade aguda ou crônica [11, 12].

A exposição a elementos-traço na pecuária também tem consequências importantes para os seres humanos. É bem sabido que a carne e os produtos cárneos (principalmente miudezas) são alguns dos principais contribuintes de elementos-traço, incluindo elementos tóxicos, e as concentrações desses elementos na carne estão diretamente relacionadas às da alimentação animal [13]. Altos níveis de elementos tóxicos, muitas vezes excedendo os limites regulamentares, são encontrados em produtos cárneos em áreas poluídas [14]. Além disso, a suplementação excessiva de elementos-traço, particularmente de elementos (como Co, I e Se) para os quais não existem mecanismos homeostáticos intestinais de absorção, leva a produtos de origem animal super enriquecidos [4]. Vestígios de elementos tóxicos presentes em suplementos minerais e rações também podem se acumular em animais e aumentar os níveis desses elementos em produtos cárneos [15]. Além disso, pode ocorrer interação com outros elementos e reduzir a absorção de elementos essenciais (por exemplo, Cd-Cu e Cd-Zn) [16].

O triplo desafio da exposição a elementos-traço na pecuária – otimizar a saúde e a produtividade animal, assegurando ao mesmo tempo a sustentabilidade ambiental e a segurança do consumidor/alimentar – leva à necessidade de considerar a exposição a elementos-traço, em particular a suplementação com elementos-traço, numa perspectiva holística, que é hoje em dia referido como Saúde Única. A abordagem de Saúde Única visa garantir o bem-estar das pessoas, dos animais e do ambiente através da resolução colaborativa de problemas, integrando estes componentes altamente interligados e permitindo a mudança no sentido de obter melhores resultados de saúde pública [17]. Embora o conceito Saúde Única tenha nascido originalmente de uma perspectiva zoonótica, nos últimos anos o conceito expandiu-se das ciências médicas e veterinárias para incluir uma gama rapidamente crescente de disciplinas sinérgicas, incluindo segurança alimentar, saúde pública, economia da saúde, saúde dos ecossistemas, ciência sociais e saúde animal [18]. É agora reconhecido que os fatores ambientais, incluindo contaminantes químicos em

animais e produtos de origem animal, resíduos de aditivos e medicamentos veterinários e produtos fitossanitários, desempenham um papel significativo na saúde humana, animal e vegetal. Assim, a necessidade de uma abordagem de Saúde Única na nutrição/produção animal, investigação e política é uma prioridade.

Durante as últimas décadas, muitas pesquisas abordaram elementos-traço em animais de criação. A maior parte desta pesquisa concentrou-se no uso de elementos-traço, mesmo em concentrações acima das necessidades fisiológicas, para melhorar o desempenho animal. No entanto, permanecem muitos desafios na compreensão da dinâmica destes elementos desde o animal/fazenda até o consumidor para proporcionar fazendas lucrativas e sustentáveis e, assim, determinar com precisão os possíveis impactos a curto, médio e longo prazo. Alguns aspectos da produção animal, como raça e estado fisiológico [19, 20], antagonismo entre elementos [21], práticas produtivas adotadas na pecuária [22] e qualidade do ar e ambiente em geral [23, 24, 25], podem ter impactos significativos nas concentrações e acúmulo desses elementos nos tecidos animais. O manejo preciso desses elementos na produção animal não é uma tarefa fácil, principalmente em sistemas extensivos de produção, devido à existência de uma grande variedade de ambientes, diversidade de práticas de manejo, interações complexas entre elementos e processos bioquímicos, e a ocorrência de processos naturais e mudanças antropogênicas no meio ambiente [7, 26, 27].

O objetivo desta revisão foi buscar e resumir globalmente as pesquisas realizadas nas últimas décadas sobre elementos-traço em bovinos de corte e analisar a abordagem dos pesquisadores por meio de informações bibliométricas (anos, países, autoria e periódicos) e tópicos de pesquisa (elementos-traço, tecidos bovinos, técnicas analíticas e saúde animal, ambiental e humana) apresentados em seus respectivos trabalhos. O gado de corte foi selecionado entre outras espécies pecuárias, pois é possivelmente o tipo de gado que melhor exemplifica a tripla interação animal-ambiente-consumidor e no qual a abordagem de Saúde Única para a exposição a elementos-traço seria, portanto, de maior benefício. Esperamos que este artigo identifique as principais lacunas e perspectivas para o avanço do conhecimento sobre elementos-traço na produção de gado de corte. Isto facilitaria futuras colaborações e permitiria o uso

responsável de elementos-traço na pecuária, protegendo ao mesmo tempo os animais, os consumidores e o meio ambiente.

2. MATERIALS E MÉTODOS

Realizamos uma busca nas bases científicas Scopus, Web of Science e PubMed. Para recuperar os artigos que analisaram elementos-traço em tecidos de bovinos de corte, foram criadas *strings* de busca avançada usando cinco conjuntos de palavras-chave em inglês, que apareceram em títulos e resumos de artigos publicados entre 2000 e 2022. O intervalo de busca a partir de 2000 foi definido para cobrir a iniciativa da Cúpula do Milênio das Nações Unidas realizada naquele ano em que foram criados os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio e que em 2015 culminou na proposta dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável [28]. Para preparar as *strings* de busca, inicialmente foram identificados 15 artigos sentinela por meio de buscas simples em bases de dados científicas utilizando termos como “trace elements” AND “beef cattle” e observando a relevância e o escopo dos artigos recuperados de acordo com o escopo de interesse (elementos-traço em tecidos de bovinos de corte nos últimos 22 anos). Os artigos sentinela foram utilizados como intermediários de seleção apenas para elaboração e verificação das *strings* de busca. Portanto, ao aplicar a *string* de busca em bases de dados científicas, artigos sentinela deverão aparecer nos resultados; caso contrário, era uma indicação de que a *string* deveria ser melhorada. Nesse contexto, os artigos sentinela funcionaram como controle para garantir a qualidade do mecanismo de busca nas bases de dados científicas. Palavras-chave de busca foram identificadas por meio da análise dos títulos e resumos dos artigos sentinela, e então foram criadas *strings* de busca com o objetivo de recuperar todos os artigos diretamente relacionados aos artigos sentinela e reduzir o número de resultados fora do escopo desta pesquisa. Os detalhes da busca realizada, incluindo os artigos sentinela, podem ser vistos no Arquivo Suplementar S1.

Foram obtidos 3.399 artigos na etapa de identificação, sendo excluídos 1.507 artigos duplicados. Na etapa seguinte, foram examinados os títulos, resumos e artigos completos (quando necessário), levando à retirada de 1.542

artigos considerados fora do escopo desta pesquisa e, finalmente, restando um total de 350 artigos.

Na etapa de exame dos artigos foram excluídos trabalhos sobre os seguintes temas: (1) pesquisas com bovinocultura leiteira; (2) pesquisas com bezerros jovens em lactação; (3) pesquisas com ênfase em aspectos reprodutivos; (4) pesquisas nas quais os elementos-traço foram determinados apenas indiretamente; e (5) pesquisas com ênfase em doenças resultantes de deficiência ou toxicidade secundária por elementos-traço. Foram estabelecidas exceções às exclusões para os critérios 1, 2 e 4, quando as condições ambientais foram consideradas preponderantes, por exemplo, casos clínicos que investigam intoxicação por elementos-traço resultante de contaminação ambiental.

Os artigos aceitos foram submetidos a uma fase de extração para obtenção de informações gerais como ano de publicação, país onde a pesquisa foi realizada, autores e suas afiliações e periódico de publicação. Além disso, também foram obtidas informações específicas sobre os elementos-traço e tecidos bovinos analisados, técnicas analíticas e escopo da pesquisa com a abordagem de Saúde Única. Alguns artigos que não puderam ser acessados na íntegra foram analisados em relação às informações disponíveis nas bases de dados, dentre os quais 15 artigos não estavam disponíveis em formato digital e outros 8 artigos necessitavam de pagamento de assinatura.

Dentro da abordagem de Saúde Única, os artigos foram classificados em saúde animal, saúde ambiental e saúde humana, de acordo com os aspectos abordados em cada um. A princípio, aceitamos todos os artigos desta análise na área de saúde animal tendo em vista os pré-requisitos de busca e seleção, que identificaram artigos que analisavam elementos-traço em tecidos bovinos. Embora alguns artigos não abordassem diretamente a saúde animal, sentimos que todos forneceram informações úteis sobre este tópico. Dentro do tema saúde animal, destacamos os aspectos relacionados ao manejo animal, classificados por categoria animal (idade, sexo e raça) e alimentação animal (ração, forragem e suplementação mineral). A saúde ambiental foi identificada como tema em artigos que investigaram aspectos naturais (por exemplo, solo, água, clima e localização) e antropogênicos (por exemplo, agricultura, mineração e indústria) que podem alterar o estado nutricional dos animais. Por fim, o tema saúde

humana foi identificado em artigos que avaliaram elementos-traço como nutrientes ou contaminantes na dieta humana.

Para prosseguir com a análise da rede de coautorias, primeiro foi verificada a grafia correta dos nomes dos autores e alterada quando necessário. Foi então gerado um mapa de rede utilizando o software VOSviewer, versão 1.6.16, que permite a geração de mapas de rede combinando informações de coautorias para traçar a representação gráfica, em que os nós representam a relevância dos autores e os links representam os artigos publicados em coautoria.

Gráficos de barras, mapas de localização e gráficos setoriais foram gerados utilizando os pacotes *ggplot2*, *hmap* e *moonBook* no software R, versão 4.0.4. Para avaliar se o número de publicações tende a aumentar ao longo dos anos, realizamos uma regressão linear utilizando a função *geom_smooth*, método *lm* do pacote *ggplot2*. Além disso, utilizou-se o software Inkscape, versão 1.0.1, para ajustes gráficos e produção de gráficos booleanos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Visão geral dos artigos por anos e países

A busca pela literatura sobre elementos-traço na produção de bovinos de corte no período estudado (2000-2022) identificou 350 artigos que analisaram elementos-traço em tecido bovino. Apesar de ser um importante tema de investigação, o número de publicações por ano foi bastante variável (9 a 26 artigos por ano; média de 15,4 artigos por ano), com uma tendência moderada de aumento anual no número de artigos publicados sobre este tema (Figura 1 A), embora a diferença não tenha sido estatisticamente significativa. Esta tendência ascendente revela que o assunto tem recebido atenção crescente da comunidade científica no período considerado. Torna-se, portanto, ainda mais importante identificar os principais avanços alcançados e as principais lacunas de conhecimento, para que as ações futuras sejam direcionadas de forma estratégica e eficiente, proporcionando oportunidades para gerar resultados mais precisos e especificamente alinhados com as diversas necessidades, seja no âmbito local, regional ou global.

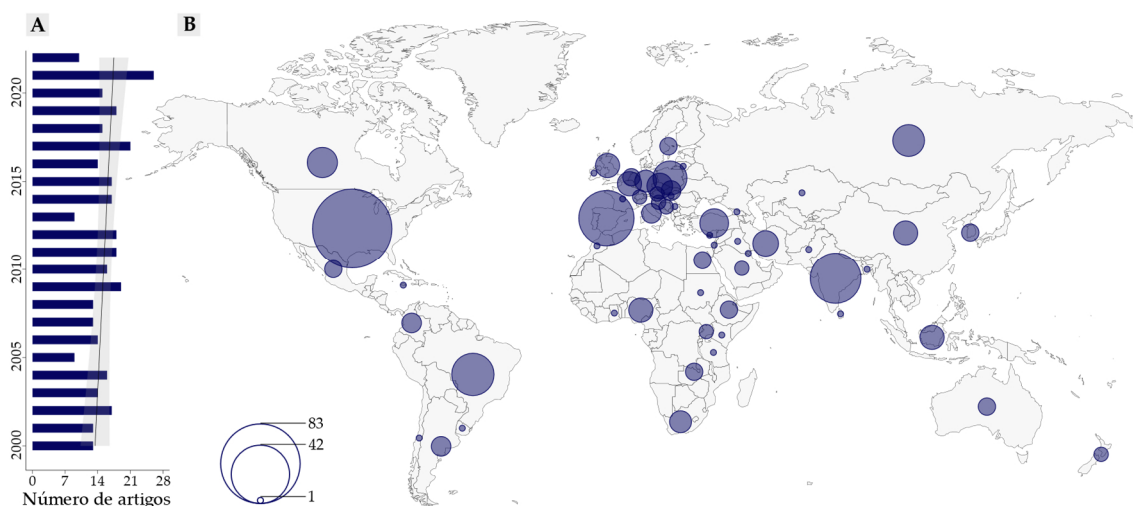


Figura 1. Número de artigos sobre elementos-traço na produção de bovinos de corte publicados no período 2000–2022: (A) gráfico de barras e linha de tendência, com intervalo de confiança (área sombreada) para artigos publicados por ano, entre 2000 e 2022; os dados referentes a 2022 foram obtidos até 1º de julho de 2022 e ajustados para o período de 12 meses multiplicando por 2; (B) mapa mostrando o número de artigos publicados em diferentes países.

As buscas também levaram à recuperação de pesquisas realizadas em 61 países, abrangendo todos os continentes, como pode ser observado no mapa da Figura 1B. Essa ampla distribuição demonstra que o tema da pesquisa é de interesse global. Os países onde foi realizado o maior número de estudos são também aqueles onde a pecuária é de grande importância [29, 30], ou seja, EUA (83 artigos), Espanha (38 artigos), Índia (32 artigos) e Brasil (21 artigos). No entanto, a investigação concentrou-se nos países europeus e nos EUA, indicando elevados níveis de viés regional.

O gado de corte é criado em muitas partes do mundo, fornecendo uma importante fonte de nutrientes na dieta humana [31], participando significativamente da economia de muitos países [32] e representando uma importante expressão da diversidade sociocultural humana [33]. Por outro lado, pesquisas que investigam elementos-traço em tecidos animais geralmente dependem da disponibilidade de pesquisadores, de infraestrutura analítica e de incentivos à pesquisa, entre outros aspectos. Coerente com esta perspectiva, a maior parte das pesquisas realizadas neste período foi realizada em países europeus e nos EUA, que são desenvolvidos econômica e cientificamente, o que pode favorecer boas condições para a realização de pesquisas sobre este tema.

3.2 Análise de rede de coautoria

Através da análise da rede de coautoria foi possível identificar seis principais redes de coautoria em pesquisa e os principais autores de cada rede (Figura 2). Nesta análise, os nós representam os autores e as linhas representam a coautoria da publicação. As redes de coautoria são importantes para o desenvolvimento científico, nas quais os cientistas são incentivados a colaborar para avançar no conhecimento, superar a crescente especialização dentro da ciência e compartilhar infraestrutura, além de combinar diferentes tipos de conhecimentos e habilidades para resolver problemas complexos, proporcionando assim uma oportunidade de expandir o escopo da pesquisa e promover a inovação [34]. Os resultados aqui obtidos permitem-nos visualizar as redes com maior impacto na produção de conhecimento científico e como essas colaborações têm sido estabelecidas, a partir das quais se podem tirar conclusões sobre os avanços científicos alcançados e as potenciais perspectivas.

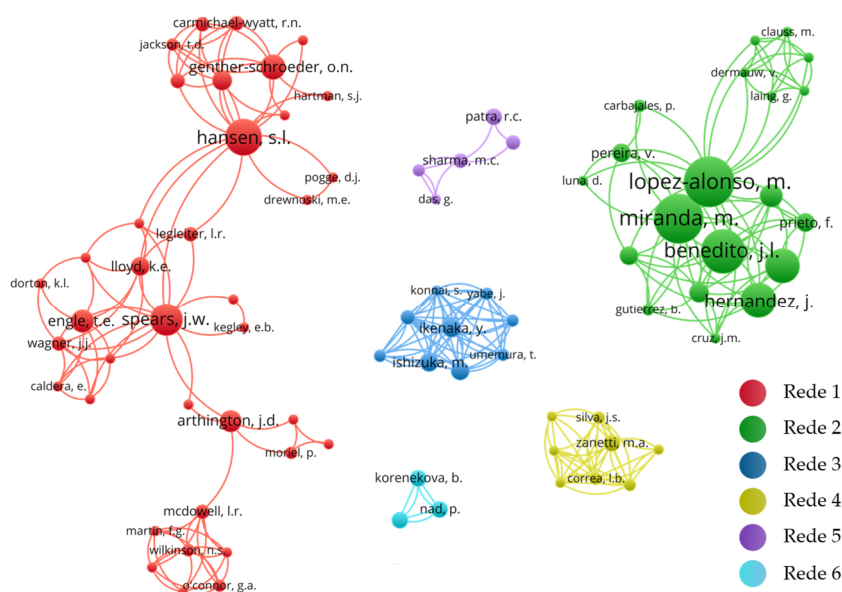


Figura 2. Redes de coautoria ativas no período 2000–2022 em pesquisas sobre elementos-traço na produção de bovinos de corte. Os nós representam a relevância dos autores; as linhas representam a coautoria entre autores e as cores representam as principais redes identificadas.

Ao todo, foram identificados 1.186 autores. Porém, considerando o aspecto visual do gráfico (Figura 2), são mostrados apenas autores com mais de uma publicação e apenas redes que incluem autores com mais de quatro

publicações. A Rede 1 com 49 artigos é composta principalmente por pesquisadores dos EUA, especialmente Jerry W. Spears, Stephanie L. Hansen e Terry E. Engle, afiliados respectivamente à Universidade do Estado da Carolina do Norte, Universidade do Estado do Iowa e Universidade do Estado do Colorado. Este grupo constitui a maior rede de colaboração, com o maior número de investigadores envolvidos. Na sequência, destaca-se a Rede 2, com 36 artigos, representada principalmente por pesquisadoras da Espanha, filiados à Universidade de Santiago de Compostela, especialmente Marta López-Alonso e Marta Miranda. Este grupo inclui os autores com maior número de publicações dentro deste tema de pesquisa. Quatro outras redes proeminentes são representadas por grupos de pesquisa do Japão – Universidade de Hokkaido (Rede 3 - 7 artigos), Brasil – Universidade de São Paulo (Rede 4 - 5 artigos), Índia – Universidade de Agricultura e Tecnologia de Odisha e Instituto Indiano de Pesquisa Veterinária (Rede 5 - 8 artigos) e Eslováquia – Medicina Universitária Veterinária em Kosice (Rede 6 - 5 artigos).

Entre as redes identificadas, a distinção é feita principalmente por aspectos regionais, ou seja, pelos países onde as redes foram estabelecidas. Isso decorre dos aspectos regionais comuns aos autores, que podem ser favorecidos pela proximidade geográfica, idioma e problemas de pesquisa regionais de interesses relacionados. Além disso, as redes também se distinguiram pelas abordagens metodológicas utilizadas e pelo alcance geral da pesquisa. A Rede 1 é caracterizada por pesquisas relacionadas à saúde animal, abordando aspectos de manejo, principalmente nutrição e desempenho animal, e as publicações aparecem principalmente em periódicos voltados para Ciência Animal. Os principais temas de investigação desta rede incluem a alimentação animal e o monitoramento de elementos-traço essenciais, particularmente Cu e Zn, para avaliar o desempenho animal. Por outro lado, temas relacionados a aspectos ambientais e estudos de elementos potencialmente tóxicos, como Pb e Cd, não apareceram nesta rede.

Os demais grupos identificados (Redes 2 a 6) caracterizam-se por pesquisas de abrangência mais ampla e interdisciplinar. Nessas redes, os autores abordaram questões ambientais, humanas e animais dentro dos temas de pesquisa, como por exemplo, diferenças na localização das áreas de criação de animais em relação à proximidade de atividades industriais ou de mineração,

avaliação do risco de contaminação de carne e intoxicação animal estudos de caso além de práticas adotadas em sistemas de produção animal, como alimentação ou desempenho animal. Essas redes estudam uma maior variedade de elementos-traço, e elementos potencialmente tóxicos são frequentemente incluídos.

Além disso, também em relação à análise da rede de coautorias (Figura 2), observamos que os grupos de pesquisa identificados (Redes 1 a 6) incluíam apenas 17% de todos os autores e 31% de todos os artigos. Por outro lado, as demais redes incluíram 83% dos autores e 69% dos artigos. Isso revela que a maioria dos autores envolvidos e das publicações sobre esse tema correspondiam a grupos de pesquisa emergentes. Portanto, é possível que a ampliação das colaborações entre pesquisadores fortaleça grupos emergentes e favoreça a inovação em grupos consolidados.

3.3 Elementos-traço, tecidos bovinos e técnicas analíticas identificadas

No total, 56 elementos-traço foram estudados nos artigos revisados, embora apenas 13 desses elementos tenham sido estudados em mais de 32 artigos (Figura 3 A). Dentre os elementos mais estudados, destacam-se o Cu e o Zn, pois a análise desses elementos foi relatada em 194 e 164 artigos, respectivamente. O terceiro elemento mais estudado foi o Pb, considerado em 117 artigos. Os outros elementos que receberam grande interesse na pesquisa foram Fe, Se, Cd, Mn, As, Co, Mo, Ni, Cr e Hg.

Os elementos Cu, Zn, Fe, Se, Mn, Mo, Co, Ni e Cr são considerados essenciais para ruminantes e, portanto, necessários para diversas funções bioquímicas e fisiológicas dos animais. Esses elementos geralmente precisam ser adicionados à ração animal para suprir as necessidades nutricionais [35, 36]. Avanços recentes na nutrição de ruminantes levaram ao estabelecimento de requerimentos de Cr e Ni. O Cr é considerado essencial porque aumenta a sensibilidade à insulina, e o Ni é essencial para bactérias que exercem efeito no ecossistema microbiano ruminal, aumentando a atividade da enzima urease, favorecendo assim o desempenho animal; no entanto, há alguma controvérsia sobre o quão essenciais esses elementos são realmente para os ruminantes [37]. Em relação ao Mo, as necessidades dietéticas do gado não estão bem

definidas porque em condições práticas de alimentação não foram observadas deficiências [36].

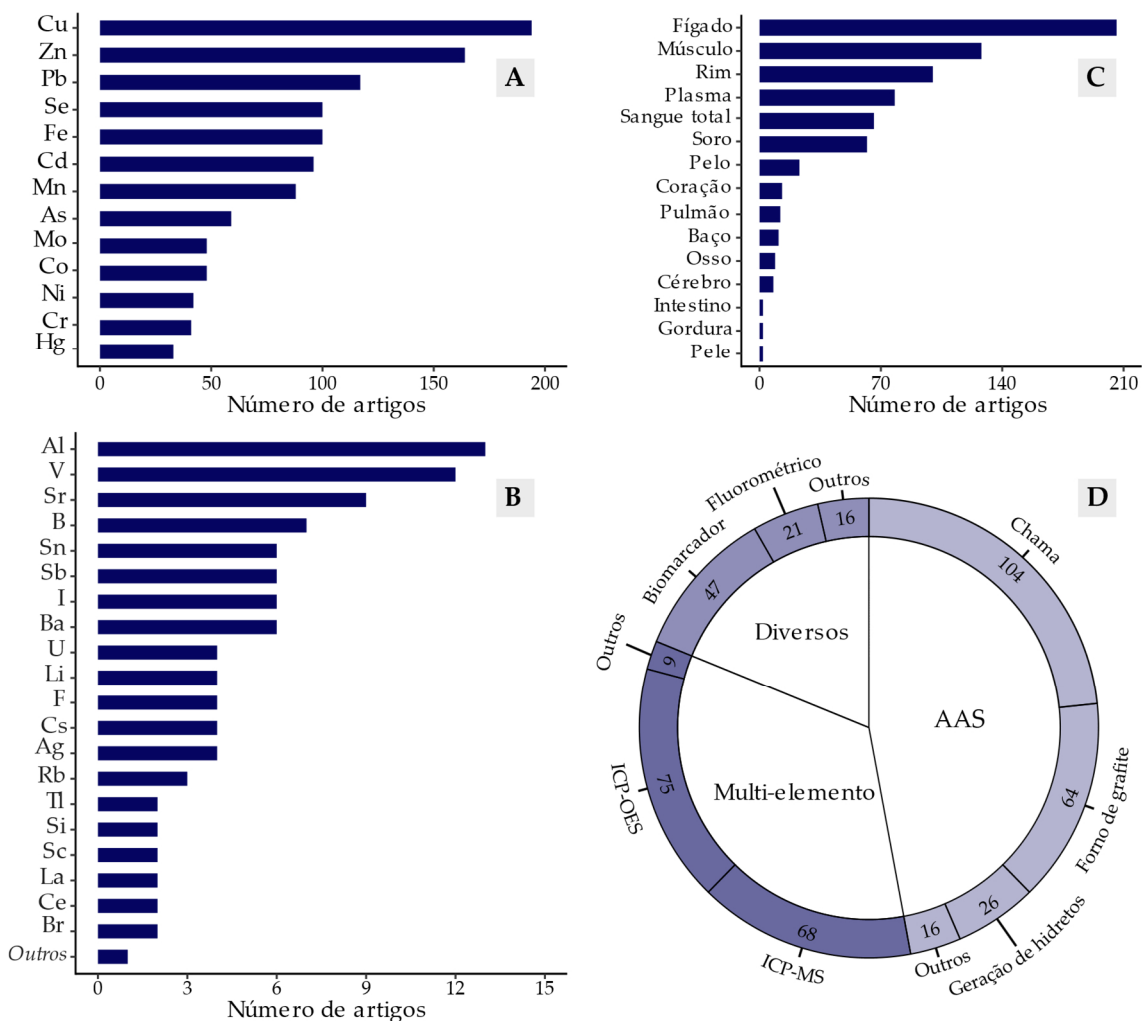


Figura 3. Número de artigos publicados no período 2000–2022 sobre elementos-traço na produção de bovinos de corte: (A) elementos-traço mais estudados; (B) elementos-traço menos estudados; Outros elementos: Ar, Au, Be, Bi, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, In, Ir, Lu, Nd, Pr, Pt, Sm, Te, Ti, Th, Tm, Yb; (C) tecidos bovinos analisados; (D) principais técnicas analíticas utilizadas.

O grande número de estudos que investigam Cu e Zn em tecido bovino, como mostrado na Figura 3A, é explicado pela biodisponibilidade geralmente baixa desses elementos na nutrição de ruminantes [38], e as deficiências são comuns em todo o mundo [39]. Especial atenção tem sido dada ao Cu, que tem sido particularmente desafiador na produção bovina. Existe um equilíbrio delicado entre deficiência e toxicidade de Cu, e ocorrem interações antagônicas com vários outros elementos, como Mo, S e Fe, resultando em numerosos casos

de envenenamento por Cu, especialmente em sistemas de produção intensivos [40].

Os elementos Pb, Cd, As e Hg não possuem funções biológicas estabelecidas e são considerados contaminantes indesejáveis e potencialmente tóxicos da alimentação animal [3], além de constituírem perigo à saúde pública, devido ao alto grau de toxicidade, mesmo em condições de níveis muito baixos de exposição [41]. Estes elementos têm sido geralmente estudados em relação aos níveis máximos toleráveis, ou níveis de segurança, para que não prejudiquem a saúde animal ou humana [42], principalmente devido ao potencial de bioacumulação ao longo da cadeia alimentar [43]. Níveis excessivos desses elementos no gado são geralmente derivados de emissões antrópicas e contaminação de alimentos [44]. No entanto, como ocorre com o As na Índia, as concentrações excessivas também podem ser de origem natural, mas serem potencializadas por ações antrópicas [45].

Entre os elementos-traço menos estudados (Figura 3B), 20 elementos foram incluídos entre 2 e 13 artigos, enquanto 23 elementos (outros) foram incluídos cada um em apenas 1 artigo. Em geral, destes elementos (Figura 3B), apenas I é considerado essencial para ruminantes. Boro, Li, Rb, Si e V apresentam benefícios ocasionais, e Al e F são potencialmente tóxicos [8].

A importância dos elementos-traço é continuamente discutida e revisada, sendo os elementos classificados como tóxicos, benéficos ou essenciais para os organismos vivos, especialmente os humanos [46, 47]. Foi sugerido que alguns elementos como B, Rb, Si, V, F e Sn podem ser exigidos por ruminantes [42]. No entanto, mais informações sobre o uso desses e de outros elementos são necessárias para entender como eles são distribuídos e interagem no organismo em diferentes estágios do desenvolvimento animal [8]. Além disso, é importante determinar a dinâmica desses elementos nos sistemas agrícolas [26] e no meio ambiente em geral, bem como os possíveis impactos dos fluxos nas concentrações dos elementos [7].

A determinação das necessidades nutricionais de elementos-traço também é importante para identificar o estado nutricional e a detecção subclínica de concentrações deficientes ou tóxicas através de análise química de tecido animal [48]. Isso pode facilitar o manejo nos sistemas de produção e prevenir patologias decorrentes do desequilíbrio desses elementos, além de prevenir

concentrações excessivas daqueles elementos que não ocorrem naturalmente nos alimentos consumidos pelas pessoas [4].

Considerando os tecidos bovinos analisados, predominaram fígado, músculo e rim nos estudos revisados (Figura 3 C). O fígado é o principal órgão do metabolismo animal responsável pelo armazenamento da maioria dos elementos-traço e, portanto, é bastante representativo do estado nutricional [49]. Também é fácil de amostrar [50], tornando-o o principal tecido analisado para determinação de elementos-traço em bovinos de corte (207 artigos). O rim, que também é um importante órgão do metabolismo animal, foi analisado em 101 artigos, por vezes apresentando uma tendência distinta de acumular certos elementos, sendo o principal órgão de acumulação de Cd [13] e acumulando níveis mais elevados de outros elementos, como Pb [25] e Se [51].

O músculo foi analisado em 128 artigos e geralmente apresentou níveis mais baixos de elementos-traço do que o fígado ou o rim. Por outro lado, o músculo é o mais consumido pelo ser humano e assume grande importância em relação ao atendimento das necessidades dietéticas de nutrientes essenciais e ao exame do risco de exposição a elementos contaminantes [52], sendo por isso frequentemente avaliado tendo em vista a segurança alimentar humana.

A análise de tecidos sanguíneos e pelos são muito úteis para avaliar o estado nutricional do bovino *in vivo*, e foram muito representativos nos artigos revisados, sendo incluídos em 78 (plasma sanguíneo), 66 (sangue total), 62 (soro sanguíneo) e 23 (cabelo) artigos (Figura 3 C). Em relação à análise sanguínea, não encontramos nenhum estudo relatando diferenças em elementos-traço entre o sangue total e o plasma sanguíneo em bovinos, embora estudos em humanos [53] tenham relatado grandes variações entre essas matrizes de amostras para vários elementos. Em relação ao plasma e soro sanguíneo em bovinos, Luna et al. [54] demonstraram que essas matrizes são igualmente adequadas para a determinação de vários elementos, exceto Cu e Se, que ocorreram em concentrações mais baixas no soro do que no plasma. Esses autores também sugeriram que mais pesquisas sobre Se fossem realizadas, pois já se sabe que parte do Cu em amostras de sangue de ruminantes é sequestrada durante a coagulação.

A análise do pelo bovino foi proposta por Combs [55] como um método potencial para verificar o estado mineral do gado, quando combinado com outros

indicadores para aumentar a precisão da avaliação, como fatores não dietéticos, como sexo, idade, cor do pelo, genética, local de coleta e contaminação da amostra. Dentre os diferentes tipos de amostragem não invasiva, o uso do pelo deve ser aprimorado para produzir resultados mais precisos. Identificamos alguns avanços, como um método recomendado de preparação de amostra para a análise química do pelo, através do uso combinado de etanol e ultrassom [56], e um local recomendado para amostragem de pelo, na cernelha [57]. Outros estudos mostraram correlações entre alguns elementos do sangue e do pelo [58] além de confirmar diferenças em relação à raça [59] e idade do animal [60].

Outros tecidos bovinos foram estudados principalmente para avaliar o atendimento das necessidades dietéticas e para identificar padrões de acumulação de metais devido à raça, alimentação e condições ambientais. Esses dados são escassos e, portanto, podem ocorrer discrepâncias, conforme verificado por Berata et al. [61], que observaram maior acúmulo de Pb nos pulmões do que no fígado em vacas expostas ao Pb, demonstrando a necessidade de realizar mais estudos e assim melhorar a compreensão dos aspectos ambientais ou de manejo associados ao metabolismo animal envolvendo diferentes elementos.

Em termos de técnicas analíticas para determinação de elementos-traço em tecido bovino, foram identificadas 30 técnicas diferentes. As principais técnicas utilizadas foram espectrometria de absorção atômica com chama (F-AAS) ou espectrometria de absorção atômica com forno de grafite (GF-AAS) e técnicas multi-elementares como espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) e espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) (Figura 3D). Além das técnicas já citadas, destacamos também aquelas geralmente utilizadas para determinação de elementos específicos, como a espectrometria de absorção atômica com geração de hidreto (HG-AAS) para determinação de As e Se, o método fluorométrico para determinação de Se e biomarcadores como ceruloplasmina e glutathiona peroxidase (GSH-Px) usada para determinação indireta de Cu e Se, respectivamente.

As técnicas de espectrometria de absorção atômica (AAS) são tradicionalmente utilizadas. No entanto, para análise de matrizes complexas que requerem análise de múltiplos elementos, técnicas multi-elementares como ICP

são mais adequadas, especialmente porque permitiram a análise de uma ampla gama de elementos, incluindo elementos ultra-traço na ordem de partes por trilhão, além de não exigir longas etapas de pré-tratamento da amostra, o que é uma das principais desvantagens da AAS [62].

O ICP-OES fornece um meio excelente e altamente sensível de determinação de elementos-traço e pode detectar muitos elementos simultaneamente. No entanto, o limite de detecção é semelhante ao do F-AAS. Por outro lado, o ICP-MS fornece as melhores características de toda espectrometria atômica em termos de sensibilidade, limites de detecção, taxa de transferência e medição multi-elementar, embora seja muito caro, apesar de ter sido desenvolvido ao longo de vários anos [63, 64].

Outras técnicas multi-elementares de grande potencial para análise de elementos-traço em tecidos bovinos são técnicas que empregam raios-X ou ativação de nêutrons. No presente estudo de revisão, identificamos apenas quatro artigos em que foram utilizadas a análise de ativação de nêutrons e dois artigos que utilizaram raios-X, indicando que essas técnicas ainda podem ser consideradas incipientes para este tipo de estudo. Observamos também que 40 dos elementos-traço identificados nesta pesquisa foram analisados exclusivamente por técnicas multi-elementares (principalmente ICP-MS), o que levou a melhorias na compreensão da dinâmica de uma ampla gama de elementos-traço e ultratraços no contexto da produção de gado de corte.

3.4 Escopo dos artigos em relação à abordagem de Saúde Única

A identificação de estudos usando a abordagem de Saúde Única seguiu três etapas. Primeiramente, admitimos 350 artigos nesta revisão dentro da interface de saúde animal, considerando que a saúde animal foi apoiada nas etapas de busca, identificação e seleção de artigos. A seguir, identificamos 201 artigos na área de saúde ambiental. Por fim, identificamos 164 artigos que abordavam questões relacionadas à saúde humana. As múltiplas questões envolvidas nesta pesquisa indicaram a complexidade dos desafios envolvidos na saúde animal, na conservação do meio ambiente e na produção segura de alimentos, que ultrapassam os limites da pecuária e se estabelecem em larga escala. Tais questões interagem frequentemente entre si e, portanto, podem ser elucidadas através da abordagem de Saúde Única (Figura 4 A).

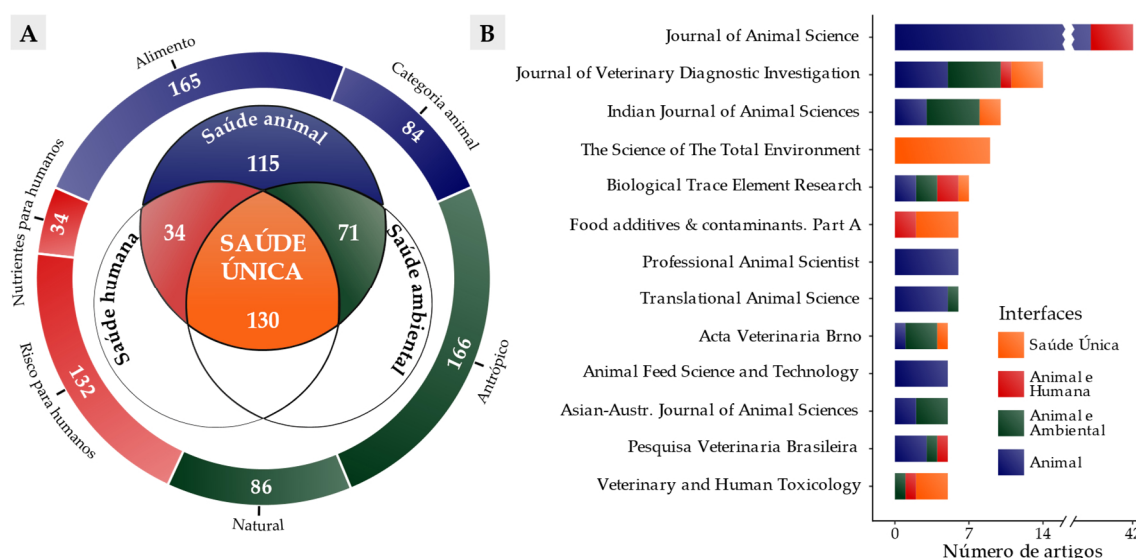


Figura 4. Número de artigos publicados no período 2000-2022 sobre elementos-traço na produção de gado de corte classificados por escopo de pesquisa dentro da abordagem de Saúde Única: (A) interface do número de artigos categorizados por aspectos de pesquisa e escopo de pesquisa; (B) número de artigos categorizados por principais periódicos e por escopo de pesquisa.

As interações entre os temas de pesquisa ocorreram em 34 artigos na interface saúde animal-humana, 71 artigos na interface saúde animal-ambiente e 130 artigos na interface de Saúde Única (saúde animal-humano-ambiente). Isto demonstra quão intimamente a abordagem investigativa dos elementos-traço permeia os aspectos naturais, a atividade humana, a alimentação animal, a nutrição humana e as diferenças entre os animais de diferentes maneiras.

Observamos também que apenas 7% dos estudos realizados nos EUA foram categorizados como relativos à interface de Saúde Única (6 de 83 artigos), enquanto 78% abordaram exclusivamente a interface de saúde animal (65 de 83 artigos). Em comparação, 46% das pesquisas realizadas em outros países (124 de 267 artigos) envolveram a interface de Saúde Única. Isso sugere que há uma distinção entre os principais objetivos da pesquisa que podem estar relacionados à abordagem interdisciplinar. Nesse caso, nos EUA predominaram pesquisas voltadas à saúde animal, avaliando desempenho e produtividade, enquanto poucos estudos integravam saúde ambiental e humana.

Os artigos analisados foram oriundos de 157 periódicos e abrangem amplo escopo científico, com destaque para periódicos das áreas de ciência animal e veterinária (Figura 4B). Também encontramos predominância de publicações sobre saúde animal entre alguns periódicos da área de Ciência

Animal, como o Journal of Animal Science, o Professional Animal Scientist e o Animal Feed Science and Technology. Por outro lado, a abordagem de Saúde Única predominou entre revistas interdisciplinares como The Science of The Total Environment e Food Additives & Contaminants—Part A. Isso indica que os principais periódicos em que esses estudos são publicados também expressam as diferenças entre as abordagens de pesquisa adotadas.

Embora o conceito de Saúde Única tenha permeado pouco mais de um terço dos artigos analisados (37%), destacamos seu potencial para ser incorporado em futuras pesquisas sobre elementos-traço na pecuária de corte e na produção animal em geral, favorecendo assim novas abordagens para questões emergentes no cenário global. Exemplos de questões relacionadas ao monitoramento de elementos-traço que poderiam ser aprimoradas por esta abordagem incluem a identificação de locais de risco de exposição, diagnóstico de riscos à saúde, apoio à conformidade regulatória e identificação de práticas agrícolas mais seguras e eficazes, entre muitos outros [65]. Levando-se em consideração os estudos aqui revisados e para melhor elucidar nosso argumento, sugerimos ampliar os fatores investigados (solo, alimentação, fisiologia animal, atividades antropogênicas próximas) e o número de elementos-traço incluídos em cada busca (elementos essenciais e tóxicos). Neste contexto, recomendamos a leitura de “A framework for One Health research” [66], que oferece orientação aos investigadores relativamente à concepção prática e implementação da investigação dentro da perspectiva de Saúde Única. Além disso, também recomendamos alguns artigos nos quais os elementos-traço são considerados na interface animal-ambiente-saúde humana: [12, 13 ,25] (outros no Arquivo Suplementar S2).

3.5 Lacunas e oportunidades

As informações aqui apresentadas referem-se ao número de artigos em relação ao ano de publicação, país onde a pesquisa foi realizada, autores envolvidos, elementos-traço estudados, tecidos bovinos analisados, técnicas analíticas utilizadas e área de pesquisa. Foram comunicadas informações qualitativas e quantitativas, demonstrando assim o progresso científico alcançado nesta área. Contudo, foram identificadas algumas lacunas de conhecimento: (1) falta de investigação nos países em desenvolvimento; (2)

necessidade de respostas a uma ampla variedade de questões relacionadas com o ambiente e as condições sob as quais o gado é criado; e (3) necessidade de abordar as funções e interações de uma ampla gama de elementos-traço no metabolismo animal e sua relação com a saúde ambiental e humana.

Poucas mudanças foram feitas nos requerimentos de minerais para bovinos de corte desde a sexta edição do National Research Council (NRC) em 1984 [35]. Contudo, identificamos um elevado potencial de avanços científicos nesta área do conhecimento com a possível ampliação de informações sobre o manejo de elementos-traço na pecuária, o que pode ser favorecido pela incorporação da abordagem de Saúde Única em pesquisas futuras.

Apesar da maior complexidade da abordagem de Saúde Única, que envolve múltiplas questões, esta abordagem tornou-se amplamente aceita. Pesquisas com abordagens inter, multi ou transdisciplinares têm sido necessárias para proporcionar maior integração entre disciplinas e especialistas, bem como uma interpretação ou aplicação mais ampla dos resultados obtidos [67]. Neste contexto, destaca-se a estratégia *Farm to Fork*, parte integrante do Acordo Ecológico da Comissão Europeia, que enfatiza a necessidade de abordagens integradas para avançar em direção a sistemas alimentares seguros e sustentáveis para melhorar simultaneamente a saúde humana, animal e ambiental [68].

Existem interações complexas que ocorrem no sistema produtivo, que combinam condições ambientais além de dimensões sociais, econômicas e culturais, resultando em características únicas em cada local, que precisam ser reconhecidas no planejamento da pesquisa. Essas interações requerem abordagens específicas para obtenção e interpretação de resultados. Diante disso, deverá haver maior interação e colaboração entre os pesquisadores para desenvolver esse tipo de pesquisa, o que deverá favorecer maior compartilhamento e avanço do conhecimento.

Na abordagem de Saúde Única, o conhecimento das disciplinas básicas é reforçado, pois esta abordagem desempenha um papel fundamental na agregação de disciplinas complementares e diferentes áreas de especialização [66, 67, 68, 69, 70]. A estrutura da nova pesquisa pode, assim, ter um alcance maior e integrar questões mais amplas, sem omitir as características das áreas básicas do conhecimento. Além disso, as colaborações podem ajudar a otimizar

os recursos e infraestruturas de investigação, superar a regionalização e garantir a produção segura de alimentos a longo prazo em todo o mundo.

Avanços no desenvolvimento e aprimoramento de técnicas analíticas para o conhecimento do conteúdo de elementos-traço em tecido bovino têm se mostrado essenciais. No entanto, é também importante considerar o acesso a tecnologias de ponta nos países menos desenvolvidos, especialmente devido aos custos associados, que podem constituir uma barreira importante que limita a investigação nestas regiões. Por exemplo, na África, a colaboração entre centros de investigação nacionais e internacionais proporciona melhores abordagens para promover as tecnologias em Saúde Única em centros de áreas remotas [71].

Relativamente aos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) [28], é fundamental compreender a pecuária numa perspectiva holística, para que seja possível levar a produção animal a contribuir para todos estes objetivos estabelecidos [72]. Portanto, a produção científica na pecuária também deve refletir esta perspectiva em todas as suas áreas do conhecimento. Isto poderia contribuir para modelos de produção eficientes e adaptados a diferentes contextos socioeconômicos e ambientais, suplementos mais equilibrados e eficientes, utilização mais racional dos recursos naturais, menor impacto nas alterações climáticas e produção de alimentos mais saudáveis, por exemplo.

Novas pesquisas deverão observar de forma cada vez mais integrada os aspectos ambientais da pecuária e a qualidade dos alimentos para permitir o avanço em direção à pecuária de precisão e alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Assim, os elementos-traço não podem ser investigados isoladamente dentro de um sistema de produção, sendo necessária a integração de dados que combinem informações de micro e macro sistemas, abrangendo dimensões socioculturais, econômicas e principalmente ambientais.

4. CONCLUSÕES

Esta revisão permitiu resumir as informações obtidas entre 2000 e 2022 sobre elementos-traço na produção de bovinos de corte e identificar os principais avanços e lacunas de conhecimento. Os principais grupos de investigação estão localizados nos EUA e Espanha, embora a maioria das publicações (69%) tenha

sido produzida por grupos de investigação emergentes que investigam este tema. Entre os estudos realizados nos EUA, apenas 7% foram categorizados como abordagem de Saúde Única, enquanto em outros países a proporção correspondente foi de 46%. No geral, apenas 37% dos estudos abordaram aspectos que integravam a saúde animal, ambiental e humana.

Descobrimos que foram estudados 56 elementos-traço e 15 tecidos bovinos; entretanto, os principais alvos da pesquisa foram os elementos Cu, Zn e Pb e os tecidos bovinos fígado, músculo e rim. Notamos também a importância de melhorar as técnicas analíticas para aumentar o número de elementos-traço estudados e melhorar a compreensão sobre estes elementos em diferentes contextos de produção animal.

Por último, destacamos o potencial para alargar a cooperação científica internacional para promover a inclusão dos países em desenvolvimento e uma maior colaboração entre disciplinas de investigação, a fim de produzir avanços mais significativos no conhecimento e respostas mais inovadoras e precisas a questões emergentes em todo o mundo. Neste contexto, sugerimos a adoção da abordagem de Saúde Única no planeamento de novas pesquisas sobre elementos-traço na produção animal.

5. REFERENCES

1. McNaught, A.D.; Wilkinson, A. Trace Element; Nič, M., Jiráť, J., Kořata, B., Jenkins, A., McNaught, A., Eds.; International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC): Research Triangle Park, NC, 2014; Vol. 2nd; ISBN 0-9678550-9-8.
2. Underwood, E.J.; Mertz, W. Introduction. In Trace Elements in Human and Animal Nutrition; Elsevier, 1987; pp. 1–19.
3. Hejna, M.; Gottardo, D.; Baldi, A.; Dell’Orto, V.; Cheli, F.; Zaninelli, M.; Rossi, L. Review: Nutritional Ecology of Heavy Metals. *Animal* 2018, 12, 2156–2170, doi:10.1017/S175173111700355X.
4. López-Alonso, M. Trace Minerals and Livestock: Not Too Much Not Too Little. *ISRN Vet. Sci.* 2012, 2012, 1–18, doi:10.5402/2012/704825.
5. Ellis, E.C. Ecology in an Anthropogenic Biosphere. *Ecol. Monogr.* 2015, 85, 287–331, doi:10.1890/14-2274.1.

6. Kabata-Pendias, A.; Mukherjee, A.B. Trace Elements from Soil to Human; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2007; ISBN 978-3-540-32713-4.
7. Thorne, R.J.; Pacyna, J.M.; Sundseth, K.; Pacyna, E.G. Fluxes of Trace Metals on a Global Scale. In Encyclopedia of the Anthropocene; Elsevier, 2018; pp. 93–102.
8. Suttle, N.F. Mineral Nutrition of Livestock; Suttle, N., Ed.; 4th ed.; CABI: Wallingford, 2010; ISBN 9781845934729.
9. McDowell, L.R. Minerals in Animal and Human Nutrition; Elsevier, 2003; ISBN 9780444513670.
10. López-Alonso, M.; Miranda, M. Implications of Excessive Livestock Mineral Supplementation on Environmental Pollution and Human Health. In Trace Elements: Environmental Sources, Geochemistry and Human Health; Leon, D.A. De, Aragon, P.R., Eds.; NOVA, 2012; pp. 75–91.
11. Jena, C.K.; Gupta, A.R.; Patra, R.C. Osteo-Dental Fluorosis in Cattle Reared in Villages on the Periphery of the Aluminium Smelter in Odisha, India. Fluoride 2016, 49, 503–508.
12. Glawischning, W.; Dengg, H.; Liftinger, G. Case Report: Lead Intoxication of a Calf Due to Environmental Contamination from a Previous Mine. Vet. Med. Austria 2021, 108, 229–236.
13. Hashemi, M. Heavy Metal Concentrations in Bovine Tissues (Muscle, Liver and Kidney) and Their Relationship with Heavy Metal Contents in Consumed Feed. Ecotoxicol. Environ. Saf. 2018, 154, 263–267, doi:10.1016/j.ecoenv.2018.02.058.
14. Orisakwe, O.E.; Oladipo, O.O.; Ajaezi, G.C.; Udowelle, N.A. Horizontal and Vertical Distribution of Heavy Metals in Farm Produce and Livestock around Lead-Contaminated Goldmine in Dareta and Abare, Zamfara State, Northern Nigeria. J. Environ. Public Health 2017, 2017, 1–12, doi:10.1155/2017/3506949.
15. Elliott, S.; Frio, A.; Jarman, T. Heavy Metal Contamination of Animal Feedstuffs – a New Survey. J. Appl. Anim. Nutr. 2017, 5, 5, doi:10.1017/jan.2017.7.
16. Goff, J.P. Invited Review: Mineral Absorption Mechanisms, Mineral Interactions That Affect Acid–Base and Antioxidant Status, and Diet Considerations to Improve Mineral Status. J. Dairy Sci. 2018, 101, 2763–2813, doi:10.3168/jds.2017-13112.
17. Mackenzie, J.S.; Jeggo, M. The One Health Approach—Why Is It So Important? Trop. Med. Infect. Dis. 2019, 4, 88, doi:10.3390/tropicalmed4020088.

18. Xie, T.; Liu, W.; Anderson, B.D.; Liu, X.; Gray, G.C. A System Dynamics Approach to Understanding the One Health Concept. *PLoS One* 2017, 12, e0184430, doi:10.1371/journal.pone.0184430.
19. Aluc, Y.; Ekici, H. Investigation of Heavy Metal Levels in Blood Samples of Three Cattle Breeds in Turkey. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2019, 103, 739–744, doi:10.1007/s00128-019-02712-z.
20. Miranda, M.; Pereira, V.; Carbajales, P.; López-Alonso, M. Importance of Breed Aptitude (Beef or Dairy) in Determining Trace Element Concentrations in Bovine Muscles. *Meat Sci.* 2018, 145, 101–106, doi:10.1016/j.meatsci.2018.06.005.
21. Hartman, S.J.; Genther-Schroeder, O.N.; Hansen, S.L. Comparison of Trace Mineral Repletion Strategies in Feedlot Steers to Overcome Diets Containing High Concentrations of Sulfur and Molybdenum. *J. Anim. Sci.* 2018, 96, 2504–2515, doi:10.1093/jas/sky088.
22. Juszcak–Czasnoję, M.; Tomza–Marciniak, A. Ratio of Selenium Concentrations between Soil, Forage Plants and Blood Serum of Beef Cattle Studied in Organic and Conventional Farms. *Arch. Anim. Nutr.* 2021, 75, 183–194, doi:10.1080/1745039X.2021.1913930.
23. Canty, M.J.; Scanlon, A.; Collins, D.M.; McGrath, G.; Clegg, T.A.; Lane, E.; Sheridan, M.K.; More, S.J. Cadmium and Other Heavy Metal Concentrations in Bovine Kidneys in the Republic of Ireland. *Sci. Total Environ.* 2014, 485–486, 223–231, doi:10.1016/j.scitotenv.2014.03.065.
24. Nawrocka, A.; Durkalec, M.; Szkoda, J.; Filipek, A.; Kmiecik, M.; Żmudzki, J.; Posyniak, A. Total Mercury Levels in the Muscle and Liver of Livestock and Game Animals in Poland, 2009–2018. *Chemosphere* 2020, 258, 127311, doi:10.1016/j.chemosphere.2020.127311.
25. Skalny, A. V; Salnikova, E. V; Burtseva, T.I.; Skalnaya, M.G.; Tinkov, A.A. Zinc, Copper, Cadmium, and Lead Levels in Cattle Tissues in Relation to Different Metal Levels in Ground Water and Soil. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2019, 26, 559–569, doi:10.1007/s11356-018-3654-y.
26. He, Z.L.; Yang, X.E.; Stoffella, P.J. Trace Elements in Agroecosystems and Impacts on the Environment. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 2005, 19, 125–140, doi:10.1016/j.jtemb.2005.02.010.
27. Rai, P.K.; Lee, S.S.; Zhang, M.; Tsang, Y.F.; Kim, K.-H. Heavy Metals in Food Crops: Health Risks, Fate, Mechanisms, and Management. *Environ. Int.* 2019, 125, 365–385, doi:10.1016/j.envint.2019.01.067.
28. UN - United Nations Sustainable Development Goals. Dep. Econ. Soc. Aff. 2022. Available online: <https://sdgs.un.org/goals>.
29. EC - European Commission Meat Production and Foreign Trade. Eurostat 2022. Available online: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data/database>.

30. USDA - United States Department of Agriculture Livestock and Poultry: World Markets and Trade 2022, 19.
31. Saadoun, A.; Cabrera, M.C.; Terevinto, A.; del Puerto, M.; Zaccari, F. Nutritional Value of Bovine Meat Produced on Pasture. In *Encyclopedia of Food Security and Sustainability*; Elsevier, 2019; pp. 189–196.
32. OECD / FAO OECD-FAO Agricultural Outlook 2020. Available online: <https://doi.org/10.1787/agr-data-en>.
33. Bettencourt, E.M.V.; Tilman, M.; Narciso, V.; Carvalho, M.L. da S.; Henriques, P.D. de S. The Livestock Roles in the Wellbeing of Rural Communities of Timor-Leste. *Rev. Econ. e Sociol. Rural* 2015, 53, 63–80, doi:10.1590/1234-56781806-94790053s01005.
34. Fonseca, B. de P.F. e; Sampaio, R.B.; Fonseca, M.V. de A.; Zicker, F. Co-Authorship Network Analysis in Health Research: Method and Potential Use. *Heal. Res. Policy Syst.* 2016, 14, 34, doi:10.1186/s12961-016-0104-5.
35. Arthington, J.D.; Ranches, J. Trace Mineral Nutrition of Grazing Beef Cattle. *Animals* 2021, 11, 2767, doi:10.3390/ani11102767.
36. NRC - National Research Council Nutrient Requirements of Beef Cattle, 8th Revised Edition; National Academies Press: Washington, D.C., 2016; ISBN 978-0-309-31702-3.
37. Spears, J.W. Boron, Chromium, Manganese, and Nickel in Agricultural Animal Production. *Biol. Trace Elem. Res.* 2019, 188, 35–44, doi:10.1007/s12011-018-1529-1.
38. Spears, J.W. Trace Mineral Bioavailability in Ruminants. *J. Nutr.* 2003, 133, 1506S--1509S, doi:10.1093/jn/133.5.1506S.
39. Hill, G.M.; Shannon, M.C. Copper and Zinc Nutritional Issues for Agricultural Animal Production. *Biol. Trace Elem. Res.* 2019, 188, 148–159, doi:10.1007/s12011-018-1578-5.
40. López-Alonso, M.; Miranda, M. Copper Supplementation, A Challenge in Cattle. *Animals* 2020, 10, 1890, doi:10.3390/ani10101890.
41. Tchounwou, P.B.; Yedjou, C.G.; Patlolla, A.K.; Sutton, D.J. Heavy Metal Toxicity and the Environment. *NIH Public Access* 2012, 133–164, doi:10.1007/978-3-7643-8340-4_6.
42. NRC - National Research Council Mineral Tolerance of Animals; National Academies Press: Washington, D.C., 2005; ISBN 978-0-309-09654-6.
43. Engwa, G.A.; Ferdinand, P.U.; Nwalo, F.N.; Unachukwu, M.N. Mechanism and Health Effects of Heavy Metal Toxicity in Humans. In *Poisoning in the Modern World - New Tricks for an Old Dog?*; IntechOpen, 2019.

44. López-Alonso, M. Animal Feed Contamination by Toxic Metals. In *Animal Feed Contamination*; Elsevier, 2012; pp. 183–204.
45. Mandal, T.K.; Dey, R.R.; Datta, B.K.; Patra, P.H.; Sarkar, S.; Chakraborty, A.K.; Bhar, M.K.; Majumdar, D. Effect of Environmental Exposure of Arsenic on Cattle and Poultry in Nadia District, West Bengal, India. *Toxicol. Int.* 2012, 19, 59, doi:10.4103/0971-6580.94511.
46. Mehri, A. Trace Elements in Human Nutrition (II) - An Update. *Int. J. Prev. Med.* 2020, 11.
47. Zoroddu, M.A.; Aaseth, J.; Crisponi, G.; Medici, S.; Peana, M.; Nurchi, V.M. The Essential Metals for Humans: A Brief Overview. *J. Inorg. Biochem.* 2019, 195, 120–129, doi:10.1016/j.jinorgbio.2019.03.013.
48. Mertz, W. Review of the Scientific Basis for Establishing the Essentiality of Trace Elements. *Biol. Trace Elem. Res.* 1998, 66, 185–191, doi:10.1007/BF02783137.
49. Counotte, G.; Holzhauer, M.; Carp-van Dijken, S.; Muskens, J.; Van der Merwe, D. Levels of Trace Elements and Potential Toxic Elements in Bovine Livers: A Trend Analysis from 2007 to 2018. *PLoS One* 2019, 14, e0214584, doi:10.1371/journal.pone.0214584.
50. Luna, D.; Miranda, M.; Pereira, V.; López-Alonso, M. Variation in Trace Element Content between Liver Lobes in Cattle. How Important Is the Sampling Site? *J. Trace Elem. Med. Biol.* 2019, 52, 53–57, doi:10.1016/j.jtemb.2018.11.008.
51. Bilandžić, N.; Sedak, M.; Čalopek, B.; Đokić, M.; Varenina, I.; Solomun Kolanović, B.; Božić Luburić, Đ.; Varga, I.; Roncarati, A. Evaluation of Element Concentrations in Beef and Pork Meat Cuts Available to the Population in the Croatian Capital. *Foods* 2020, 9, 1861, doi:10.3390/foods9121861.
52. Kasozi, K.I.; Hamira, Y.; Zirintunda, G.; Alsharif, K.F.; Altalbawy, F.M.A.; Ekou, J.; Tamale, A.; Matama, K.; Ssempijja, F.; Muyinda, R.; et al. Descriptive Analysis of Heavy Metals Content of Beef From Eastern Uganda and Their Safety for Public Consumption. *Front. Nutr.* 2021, 8, doi:10.3389/fnut.2021.592340.
53. Komarova, T.; McKeating, D.; Perkins, A. V; Tinggi, U. Trace Element Analysis in Whole Blood and Plasma for Reference Levels in a Selected Queensland Population, Australia. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, 2652, doi:10.3390/ijerph18052652.
54. Luna, D.; López-Alonso, M.; Cedeño, Y.; Rigueira, L.; Pereira, V.; Miranda, M. Determination of Essential and Toxic Elements in Cattle Blood: Serum vs Plasma. *Animals* 2019, 9, 465, doi:10.3390/ani9070465.
55. Combs, D.K. Hair Analysis as an Indicator of Mineral Status of Livestock. *J. Anim. Sci.* 1987, 65, 1753–1758, doi:10.2527/jas1987.6561753x.

56. Kovalionok, J.K. Improvement of the Procedure of Cattle Hair Sample Preparation for Chemical Analysis. *Vet. ir Zootech.* 2012, 58, 35–41.
57. Miroshnikov, S.; Kharlamov, A.; Zavyalov, O.; Frolov, A.; Bolodurina, I.; Arapova, O.; Duskaev, G. Method of Sampling Beef Cattle Hair for Assessment of Elemental Profile. *Pakistan J. Nutr.* 2015, 14, 632–636, doi:10.3923/pjn.2015.632.636.
58. Patra, R.C.; Swarup, D.; Sharma, M.C.; Naresh, R. Trace Mineral Profile in Blood and Hair from Cattle Environmentally Exposed to Lead and Cadmium Around Different Industrial Units. *J. Vet. Med. Ser. A* 2006, 53, 511–517, doi:10.1111/j.1439-0442.2006.00868.x.
59. Szigeti, E.; Kátai, J.; Komlósi, I.; Szabó, C. Effect of Breed and Sampling Place on the Mineral Content of Cattle Hair. *Poljop-rivreda* 2015, 21, 59–62, doi:10.18047/poljo.21.1.sup.13.
60. Miroshnikov, S.A.; Zavyalov, O.A.; Frolov, A.N.; Bolodurina, I.P.; Kalashnikov, V. V; Grabeklis, A.R.; Tinkov, A.A.; Skalny, A. V The Reference Intervals of Hair Trace Element Content in Hereford Cows and Heifers (*Bos Taurus*). *Biol. Trace Elem. Res.* 2017, 180, 56–62, doi:10.1007/s12011-017-0991-5.
61. Berata, I.K.; Werdi Susari, N.N.; Kardena, I.M.; Oka Winaya, I.B.; Putra Manuaba, I.B. Comparison of Lead Contamination in Innards and Muscle Tissues of Bali Cattle Reared in Suwung Landfill. *Bali Med. J.* 2017, 6, 147, doi:10.15562/bmj.v6i1.397.
62. Bulska, E.; Ruszczyńska, A. Analytical Techniques for Trace Element Determination. *Phys. Sci. Rev.* 2017, 2, doi:10.1515/psr-2017-8002.
63. Brown, R.J.C.; Milton, M.J.T. Analytical Techniques for Trace Element Analysis: An Overview. *TrAC Trends Anal. Chem.* 2005, 24, 266–274, doi:10.1016/j.trac.2004.11.010.
64. Wilschefski, S.; Baxter, M. Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: Introduction to Analytical Aspects. *Clin. Biochem. Rev.* 2019, 40, 115–133, doi:10.33176/AACB-19-00024.
65. Frazzoli, C.; Bocca, B.; Mantovani, A. The One Health Perspective in Trace Elements Biomonitoring. *J. Toxicol. Environ. Heal. Part B* 2015, 18, 344–370, doi:10.1080/10937404.2015.1085473.
66. Lebov, J.; Grieger, K.; Womack, D.; Zaccaro, D.; Whitehead, N.; Kowalczyk, B.; MacDonald, P.D.M. A Framework for One Health Research. *One Heal.* 2017, 3, 44–50, doi:10.1016/j.onehlt.2017.03.004.
67. Garcia, S.N.; Osburn, B.I.; Jay-Russell, M.T. One Health for Food Safety, Food Security, and Sustainable Food Production. *Front. Sustain. Food Syst.* 2020, 4, doi:10.3389/fsufs.2020.00001.

68. EC - European Comission Farm to Fork Strategy - For a Fair, Healthy and Environmentally-Friendly Food System 2020, 23.
69. Lerner, H.; Berg, C. A Comparison of Three Holistic Approaches to Health: One Health, EcoHealth, and Planetary Health. *Front. Vet. Sci.* 2017, 4, doi:10.3389/fvets.2017.00163.
70. Rüegg, S.R.; Nielsen, L.R.; Buttigieg, S.C.; Santa, M.; Aragrande, M.; Canali, M.; Ehlinger, T.; Chantziaras, I.; Boriani, E.; Radeski, M.; et al. A Systems Approach to Evaluate One Health Initiatives. *Front. Vet. Sci.* 2018, 5, doi:10.3389/fvets.2018.00023.
71. Rweyemamu, M.M.; Mmbuji, P.; Karimuribo, E.; Paweska, J.; Kambarage, D.; Neves, L.; Kayembe, J.-M.; Mweene, A.; Matee, M. The Southern African Centre for Infectious Disease Surveillance: A One Health Consortium. *Emerg. Health Threats J.* 2013, 6, 19958. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
72. FAO—Food and Agriculture Organization of the United Nations. *World Livestock: Transforming the Livestock Sector through the Sustainable Development Goals*; FAO: Rome, Italy, 2019; ISBN 978-92-5-130883-7.

ARQUIVOS SUPLEMENTARES (ARTIGO 1)

Os arquivos suplementares podem ser baixados em: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/ani12172254/s1>, Arquivo Suplementar S1: *Strings* de busca dessa revisão; Arquivo Suplementar S2: Planilha com os artigos incluídos nessa revisão.

AVALIAÇÃO DOS TEORES BACKGROUND DE ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS DE MATO GROSSO (BRASIL) PARA SEGURANÇA AMBIENTAL E ALIMENTAR

[Preparado de acordo com as normas da revista [Agrosystems, Geosciences & Environment](#)] [Submetido em 15 de janeiro de 2024]

RESUMO: O Estado de Mato Grosso, Brasil, apresenta uma grande diversidade de solos e paisagens, e muitas áreas de agricultura e mineração, porém os conteúdos naturais de elementos-traço no solo ainda são pouco conhecidos, o que representa uma grande lacuna para estudos e/ou regulamentos relativos ao solo e à segurança alimentar. Este estudo propõe uma abordagem que contribui para estabelecer valores de referência de qualidade (VRQs) para alguns elementos-traço de solos de Mato Grosso. Primeiramente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os teores de elementos-traço em solos de Mato Grosso, considerando procedimentos recomendados pela normativa CONAMA 420/2009, para formar o banco de dados inicial deste estudo. Em seguida, 83 novas amostras de solo foram coletadas e analisadas quanto aos teores de Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Cr, Ba, Pb, As, Cd e Hg, conforme metodologia USEPA 3051A. Os elementos estudados apresentaram grande variabilidade devido a fatores como geologia, geomorfologia, litologia, pedologia e bioma. Com base nos dados da literatura e nos novos locais estudados, foram propostos VRQs (mg kg^{-1}), como segue: Fe 23,128; Mn 351; Cu 16,50; Zn 29,24; Ni 8,86; Cr 52,73; Ba 84,45; Pb 13,42; As 8,50; Cd 0,50; e Hg 0,14. Os teores de Hg, Cd e As requerem monitoramento cuidadoso, pois alguns ambientes podem apresentar teores naturalmente elevados e pequenas alterações na biodisponibilidade de tais elementos podem representar um risco à saúde ou ao ambiente.

Palavras-chave: biomas, geologia, geoquímica, metais pesados, monitoramento ambiental

1. INTRODUÇÃO

No Antropoceno, em que ocorrem extensas transformações ambientais devido às atividades humanas, o monitoramento ambiental tornou-se essencial para avaliar e mitigar ameaças ambientais, como a poluição do solo e da água (Haines et al., 2018). Algumas ameaças difíceis de identificar, mas não menos importantes, incluem aquelas relacionadas à contaminação ambiental por elementos-traço, por exemplo, Hg, As, Pb e Cd, que possuem grande potencial para causar efeitos tóxicos aos seres vivos (Alloway, 2013; Raffa et al., 2021). Os elementos-traço são onipresentes no meio ambiente e muitos são essenciais na nutrição animal e vegetal, porém podem causar efeitos nocivos quando seu conteúdo excede os limites permitidos (Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007; Mehri, 2020; Chen & Costa, 2021). Assim, verificar o conteúdo destes elementos é um passo fundamental para avaliar a ocorrência ou o nível de impacto das ações humanas (por exemplo, atividades agrícolas e mineiras) em diferentes ambientes.

O solo é um provedor vital de serviços ecossistêmicos e um indicador de qualidade ambiental, pois sua matriz reflete as características do meio ambiente ou a ocorrência de poluição (Kabata-Pendias, 2010; Bünemann et al., 2018). Solos em áreas urbanas, agrícolas ou de mineração podem conter vestígios de metais em níveis muitas vezes superiores aos esperados para solos naturais (Guerra et al., 2023). No entanto, os solos naturais sob condições atípicas de processos pedogenéticos também podem conter níveis de certos elementos-traço acima daqueles considerados seguros para os seres humanos (Kabata-Pendias e Mukherjee, 2007). Nesse contexto, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio de sua normativa 420/2009 (CONAMA, 2009), estabeleceu diretrizes para os solos brasileiros quanto aos valores de referência de qualidade (VRQs) – bem como aqueles chamados “valores de prevenção” (VP) e valores de investigação (VI) – para diversas substâncias inorgânicas de ocorrência natural, incluindo elementos-traço.

Em relação ao Estado de Mato Grosso, surgem questionamentos sobre a necessidade de estabelecimento de diferentes VRQs, visto que o Estado possui grande extensão territorial (903 mil km²) e diversidade de características naturais (geologia, relevo, classes de solos e biomas) (IBGE, 2023). Por

exemplo, os solos de várzea do Vale do Guaporé (Bacia Amazônica), sudoeste do Estado, apresentam baixos teores de diversos elementos (Silva et al., 2017). No entanto, regiões próximas apresentam níveis elevados de Pb, Cd, As e Hg, levantando preocupações principalmente sobre os níveis de As, que podem atingir níveis muito elevados (Pierangeli et al., 2009). Além disso, vários estudos também relataram níveis naturalmente elevados de Hg em solos da região amazônica (Fernandes et al., 2018; Gonçalves et al., 2022; Lima et al., 2022).

Esses dados apoiam a hipótese de que fatores ambientais relacionados à geodiversidade do solo de Mato Grosso determinam diferenças nos teores de elementos-traço. O estudo de Santos & Alleoni (2013) traz uma proposta valiosa de VRQs para os Estados de Mato Grosso e Rondônia, porém, é necessária uma amostragem maior do território mato-grossense para representar as amplas condições naturais existentes. Diante disso, o objetivo deste estudo foi ampliar as informações sobre o conteúdo de elementos-traço dos solos de Mato Grosso, e propor VRQs que possam representar de forma ampla a geodiversidade natural desta região.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Características naturais do território de Mato Grosso

O Estado de Mato Grosso está localizado na região Centro-Oeste do Brasil (Figura 1A) e abrange uma área de 903 mil km². O clima da região inclui uma zona tropical com inverno seco (Aw) no sudeste e monções (Am) no noroeste, segundo a classificação de Köppen, com temperaturas variando de 20 a 35°C e precipitações anuais variando de 1.300 a 3.100 mm (Alvares et al., 2013).

As características gerais relacionadas à geodiversidade de seu solo incluem a geologia dos Éons Fanerozóico e Proterozóico e, em menor extensão, do Arqueano, classificado no primeiro táxon em seis províncias geológicas (Figura 1B), compartimentos de relevo variados (Figura 1C), rochas (Figura 1D), classes de solos (Figura 1E) e biomas (Figura 1F) (IBGE, 2023). Descrições adicionais dessas características são mostradas no material suplementar (Tabelas Suplementares S1 a S5).

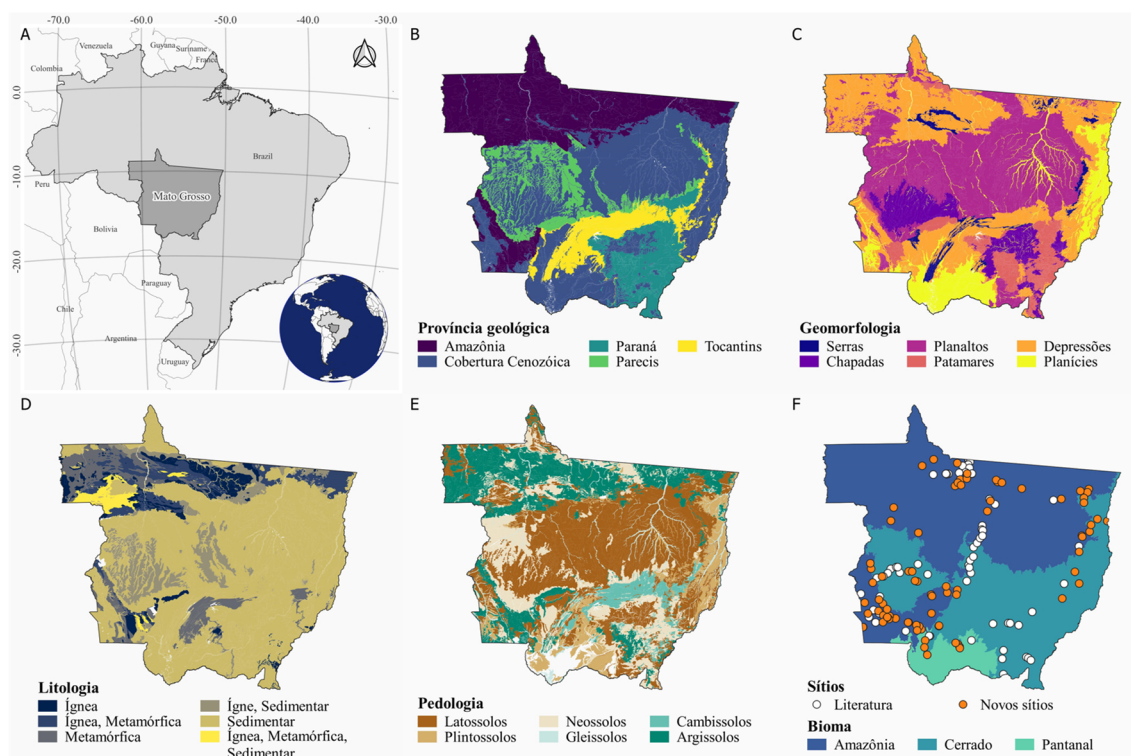


Figure 1. A) Mapa de localização do Estado de Mato Grosso; B) Províncias geológicas; C) Geomorfologia; D) Litologia; E) Principais classes pedológicas de Mato Grosso; F) Biomas e sítios de amostragens. Bases de dados do IBGE (2023).

A pedologia foi caracterizada segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018). Uma equivalência parcial das classes de solos, em comparação com o *Soil Taxonomy* (USDA, 2022) e *World Reference Base for Soil Resources* (FAO, 2015) é mostrada no material suplementar (Tabela Suplementar S4).

2.2 Pesquisa de literatura

Foi realizada uma busca em bases de dados científicas para identificar artigos que avaliassem elementos-traço em solos do Estado de Mato Grosso. Os trabalhos selecionados compreenderam apenas aqueles que analisaram elementos-traço nas camadas superiores do solo (0,0 a 0,2 m) de áreas naturais ou áreas com mínima interferência antrópica, após digestão ácida pela USEPA 3050, 3051, ou métodos equivalentes, conforme normativa CONAMA 420/2009 (CONAMA, 2009). Foram considerados apenas os artigos que reportavam coordenadas geográficas de amostragem de solo. Quando necessário, os autores desses artigos foram solicitados a fornecer informações que faltavam

nos artigos para completar a base de dados, como coordenadas geográficas ou as classes de solos estudadas. Os estudos que formaram esta base de dados da literatura estão listados no material suplementar (Tabela Suplementar S6). Esses dados foram analisados estatisticamente em conjunto com os novos sítios de amostragem investigados no presente estudo.

2.3 Novos sítios de amostragem

Após a busca inicial na literatura científica, novos sítios de amostragem foram selecionados para ampliar as informações sobre elementos-traço do solo em áreas de vegetação preservada, considerando a paisagem e mapas de províncias geológicas (geologia), geomorfologia, litologia, pedologia e biomas, conforme mostrado na Figura 1. Foram considerados apenas locais com vegetação natural ou mínima interferência antrópica, conforme normativa CONAMA 420/2009 (CONAMA, 2009).

Uma amostra composta de aproximadamente 500 g de solo da camada de 0,0-0,2 m foi obtida a partir de 10 subamostras para cada novo sítio de amostragem, de um total de 83 novos sítios de amostragens (Figura 1 F). As amostras foram enviadas ao laboratório para secagem e passadas em peneira de 2 mm. Posteriormente, cada amostra foi macerada em almofariz de ágata até passar por peneira de 150 µm e posteriormente encaminhada para análise química e determinação de elementos-traço.

2.4 Análises químicas

Foram analisados os seguintes elementos: Fe, Mn, Cr, Ba, Zn, Pb, Cu, Ni, As, Cd e Hg. Esses elementos foram extraídos das amostras de solo pelo método USEPA 3051A. Os elementos foram determinados por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), exceto As e Cd que foram analisados por espectrometria de absorção atômica em forno de grafite (GF-AAS); e Hg, por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS). Também foram determinados o teor de matéria orgânica e a textura do solo (Argila + Silte) (Teixeira et al., 2017).

O controle de qualidade durante as análises foi garantido pela inclusão de um material de referência padrão (SRM 2709a) e uma amostra conhecida como padrão interno (Tabela Suplementar S7). O limite de detecção (LD) do

método foi obtido pela seguinte equação: [média da amostra "branco" + (3 × desvio padrão)].

Os conteúdos elementares determinados por estes métodos são considerados pseudototais porque a amostra não se decompõe completamente durante a digestão, ou seja, os elementos da matriz cristalina não são analisados. Embora não forneçam concentrações totais absolutas, esses métodos extraem elementos que provavelmente se tornarão biodisponíveis, mesmo a longo prazo, e, portanto, indicados para avaliação ambiental (Alloway, 2013).

2.5 Análises estatísticas

Dados da literatura e dados dos novos sítios amostrados compuseram o conjunto de dados analisados (Tabela Suplementar S8). A estatística descritiva foi utilizada para identificar possíveis *outliers* (análise de intervalo interquartil) e calcular os percentis 75 e 90. A análise quanto a normalidade da distribuição dos dados foi realizada pelo teste de Shapiro–Wilk. Análises de correlação de Spearman foram realizadas entre elementos, matéria orgânica do solo e Argila+Silte. A análise de variância não paramétrica de Kruskal–Wallis foi usada para fatores ambientais: província geológica, geomorfologia, litologia, pedologia e biomas. A análise post-hoc foi realizada pelo teste de Dunn e o ajuste do valor p, pelo método de Holm. Quando as informações sobre fatores ambientais não estavam disponíveis nos dados de campo, foram utilizadas coordenadas geográficas para relacionar os valores dos elementos com as respectivas feições geoespaciais do Banco de Dados de Informações Ambientais (BDiA) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023).

3. RESULTADOS

Os resultados descritivos e alguns níveis de referência comparativos são apresentados na Tabela 1. Houve uma alta variação para todos os elementos, evidenciada pelo elevado desvio padrão relativo (DPR), de 31% para Hg a 166% e 183% para Ba e Mn, respectivamente. Além disso, os locais de amostragem com níveis dos percentis < LD, < 75, > 75 a 90 e > 90 são mostrados no mapa para cada elemento (Figura Suplementar S1).

Tabela 1. Resultados descritivos de elementos-traço em solos de áreas preservadas de Mato Grosso, Brasil e alguns níveis de referência para comparação.

Elemento mg kg ⁻¹	Este estudo							Níveis de referência	
	n ^a	Min.	Med.	Max.	DPR ^b	75 ^c	90 ^d	VP ^e	Solos globais ^f
Fe ^g	57	0,4	5,5	52,9	112	12,2	23,1	-	1 - 30
Mn	127	1,4	30,2	1,421,8	183	128,9	351,4	-	7 - 9,200
Cr	132	0,3	23,1	133,7	90	39,4	52,7	75	2 - 1,100
Ba	74	1,1	10,6	327,8	166	39,4	84,5	150	85 - 1,500
Zn	150	0,7	6,8	65,1	119	12,4	29,2	300	31 - 75
Pb	150	0,6	7,3	17,0	59	9,9	13,4	72	5 - 90
Cu	127	0,1	3,9	25,4	87	7,4	16,5	60	3 - 140
Ni	120	0,3	2,3	21,3	117	4,3	8,9	30	7 - 50
As	111	0,1	2,5	15,4	95	4,2	8,5	15	< 0,1 - 30
Cd	81	0,01	0,14	1,99	128	0,5	1,27	1,3	0,01 - 0,5
Hg	40	0,04	0,09	0,18	31	0,10	0,14	0,5	0,01 - 1,5

^a n: Número de amostras após remoção de possíveis *outliers* e valores inferiores ao limite de detecção (LD) (Tabela Suplementar S8); ^b DPR: Desvio padrão relativo (%); ^c Percentil 75; ^d Percentil 90; ^e VP: Valor de prevenção (CONAMA, 2009); ^f Solos globais: Intervalo de solos arenosos à solos argilosos (Kabata-Pendias, 2010); ^g Fe em g kg⁻¹.

Os percentis 75 e 90 para todos os elementos ficaram abaixo do valor de prevenção (VP) estabelecido para os solos brasileiros pela normativa CONAMA 420/2009 (CONAMA, 2009), denotando que se trata de áreas não contaminadas, ainda assim o Cd teve um percentil 90 próximo ao VP (Tabela 1). Além disso, foram encontrados teores superiores ao VP para As, Cr e Cd. Apesar disso, todos os elementos estão dentro ou abaixo do intervalo para solos globais, conforme Kabata-Pendias (2010), exceto o Cd, que atingiu teores acima de 0,5 mg kg⁻¹ em 20 locais.

A hipótese de possíveis dependências geoespaciais foi avaliada por meio da análise dos elementos por meio do teste Kruskal-Wallis para fatores ambientais (província geológica, geomorfologia, litologia, pedologia e biomas), cujos resultados são apresentados na Tabela 2. Os fatores ambientais que apresentaram valor de $p < 0,001$ foram: província geológica, para Mn e Zn; geomorfologia, para Mn, Cr, Ba, Zn, As e Cd; litologia, para Mn; pedologia, para Mn e Cr; e bioma, para Mn, As e Cd. No entanto, a análise post-hoc foi realizada para resultados com valor de $p < 0,05$, permitindo um número maior de observações do que um valor de $p < 0,001$.

Em relação à província geológica, os teores de Fe, Mn, Ba, Zn e Cd são mostrados na Figura 2. A Amazônia apresentou os maiores teores de Fe, Mn, Zn e Cd, enquanto o Tocantins apresentou elevados teores de Mn, Ba e Zn.

Alguns grupos geológicos não possuíam dados suficientes para comparações, por exemplo, Paraná para todos os elementos, e Parecis e Tocantins para Fe e Cd.

Tabela 2. Nível de significância do fator ambiental para cada elemento-traço analisado nos solos de áreas preservadas de Mato Grosso, Brasil.

Elemento	Fator ambiental ^a				
	Província geológica ^b	Geomorfologia ^c	Litologia ^d	Pedologia ^e	Bioma ^f
Fe	**	**	0,050	0,156	0,072
Mn	***	***	***	***	***
Cr	0,497	***	*	***	0,111
Ba	**	***	0,072	**	**
Zn	***	***	**	0,075	**
Pb	0,536	0,681	0,193	**	0,555
Cu	0,110	0,050	0,077	*	0,121
Ni	0,129	0,173	0,320	0,059	0,378
As	0,250	***	*	**	***
Cd	*	***	*	*	***
Hg	0,230	0,211	0,868	0,672	0,678

^a Análise estatística através do teste de Kruskal-Wallis. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Possíveis outliers e valores inferiores ao limite de detecção (LD) foram removidos para esta análise estatística (Tabela Suplementar S8). ^b Províncias geológicas (geologia): Amazônia, Cobertura cenozóica, Paraná, Parecis e Tocantins. ^c Geomorfologia: Serras, Chapadas, Planaltos, Patamares, Depressões e Planícies. ^d Litologia: Ígnea, Metamórfica, Sedimentar e diversas. ^e Pedologia: Argissolos, Cambissolos, Gleissolos, Latossolos, Neossolos e Plintossolos. ^f Bioma: Amazônia, Cerrado e Pantanal.

A geomorfologia foi responsável por explicar, com baixos valores de p ($p < 0,001$), os teores da maioria dos elementos dos solos mato-grossenses (Fe, Mn, Cr, Ba, Zn, As e Cd; Tabela 2). Conforme mostrado na Figura 3, Fe, Mn e Zn foram maiores em Patamares e Depressões; Cr nas Chapadas e Planaltos; Ba em Patamares e Planícies; As nas Chapadas e Planaltos; e Cd em Serras, Depressões e Planícies. Entretanto, muitos dados de Cd ficaram abaixo do LD em sítios de todos os grupos geomorfológicos e, portanto, não puderam ser incluídos na análise (Chapadas 15; Depressões 19; Patamares 6; Planaltos 16; Planícies 9; e Serras 7).

A litologia apresentou baixos teores de Mn, Zn e Cd nas rochas sedimentares, e nenhuma diferença ($p < 0,05$) para Cr e As quando comparadas com rochas ígneas e metamórficas (Figura 4). Nestes resultados, diversos grupos de litologia (Figura 1D) não foram mostrados.

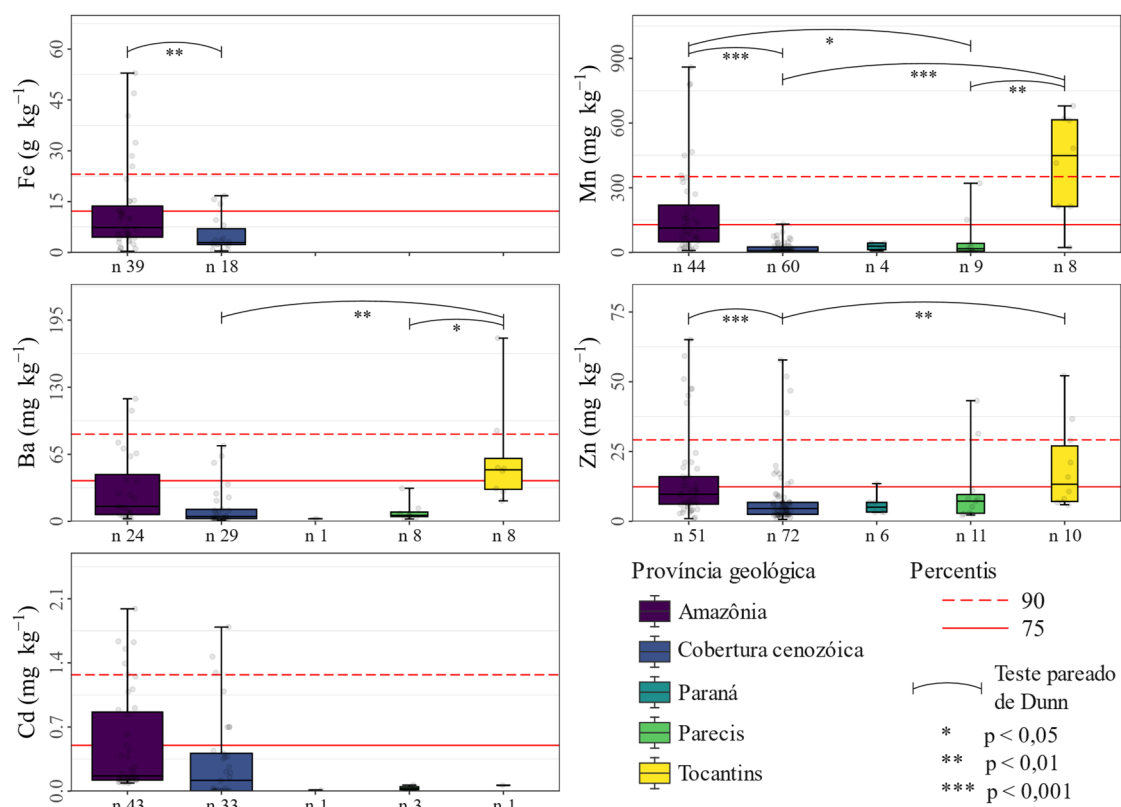


Figura 2. Teste post-hoc para províncias geológicas de solos de Mato Grosso, Brasil. Comparações pareadas pelo teste de Dunn e ajuste de p pelo método de Holm ($p < 0,05$). Possíveis *outliers* e valores inferiores ao limite de detecção (LD) foram removidos para esta análise estatística. A largura da caixa varia em relação à proporção do número de amostras (n).

Em relação à pedologia, os Latossolos apresentaram menores teores de Mn, Ba e Cd quando comparados aos Argissolos, enquanto o oposto foi encontrado para As e Cr (Figura 5). Os Plintossolos apresentaram baixos teores de Cr e Pb, enquanto os Neossolos apresentaram baixos teores de Cr e As. Havia poucos locais para comparação pareada com Gleissolos ou Cambissolos, então nenhuma diferença foi encontrada.

O bioma Cerrado apresentou baixos teores de Mn, Ba, Zn e Cd, mas o As foi maior no Cerrado em comparação com a Amazônia ou o Pantanal (Figura 6). Muitos locais tinham teores de Cd abaixo do LD, por exemplo, 34 dos 54 sítios no Cerrado (63%), 32 dos 91 sítios na Amazônia (35%) e 6 dos 9 sítios no Pantanal (67%). Comparações entre Amazônia e Pantanal mostraram diferenças ($p < 0,05$) apenas para Ba, que foi maior no bioma Pantanal.

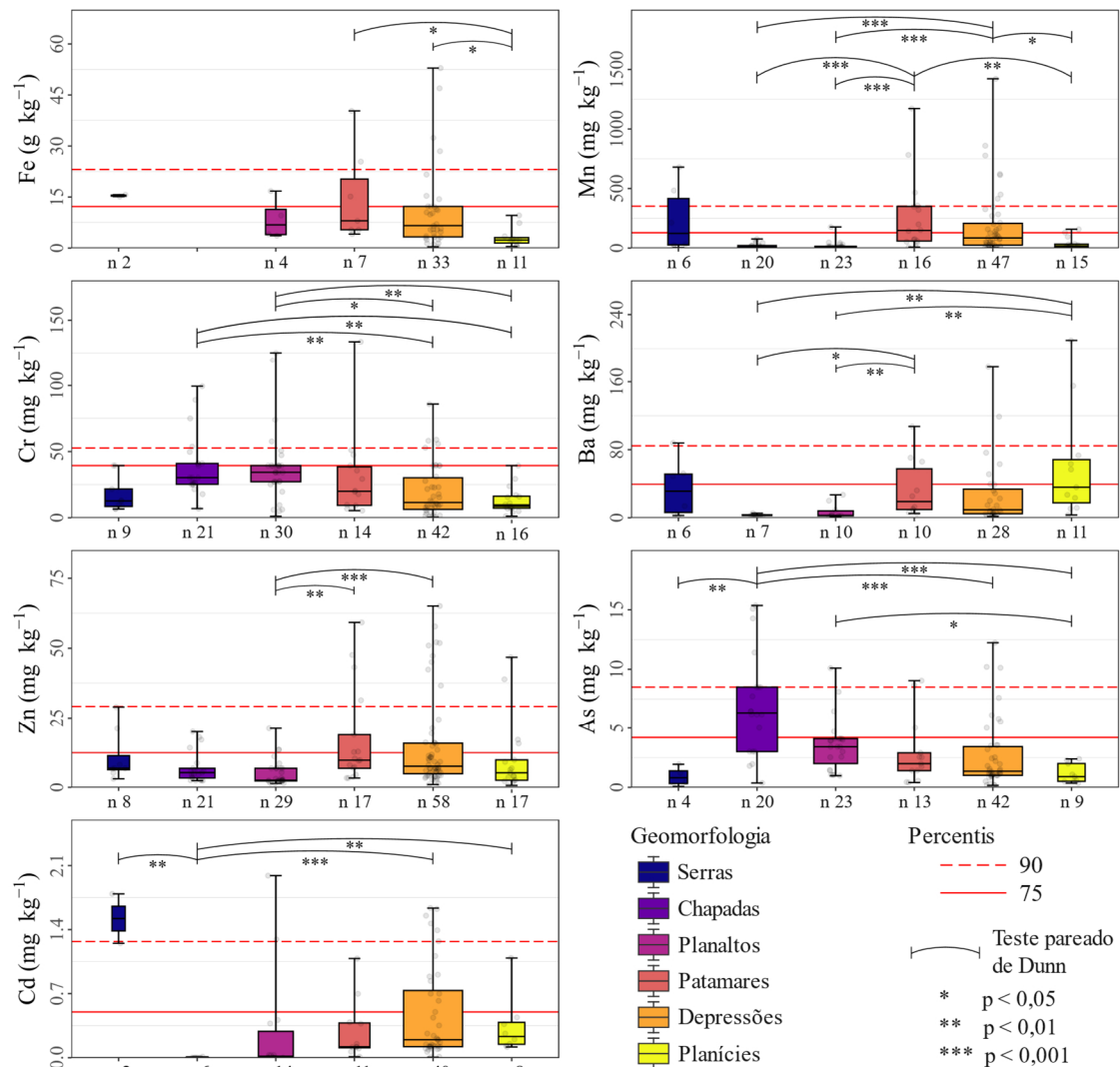


Figura 3. Teste post-hoc para geomorfologia de solos de Mato Grosso, Brasil. Comparações pareadas pelo teste de Dunn e ajuste de p pelo método de Holm ($p < 0,05$). Possíveis *outliers* e valores inferiores ao limite de detecção (LD) foram removidos para esta análise estatística. A largura da caixa varia em relação à proporção do número de amostras (n).

4. DISCUSSÃO

4.1 Resultados descritivos e geoespaciais

A ampla gama de elementos pesquisados neste estudo está relacionada à diversidade do solo mato-grossense, que é proveniente de diferentes rochas e minerais e se desenvolveu sob diferentes relevos e biodiversidade, além do clima quente e úmido do clima tropical. Embora uma ampla gama de elementos-traço ocorra naturalmente nos solos (Kabata-Pendias, 2010), valores extremos geralmente requerem atenção, especialmente para elementos potencialmente

tóxicos, como Hg, Cd, As e Pb, devido à ameaça aos sistemas biológicos, e a possibilidade de chegar à cadeia alimentar humana.

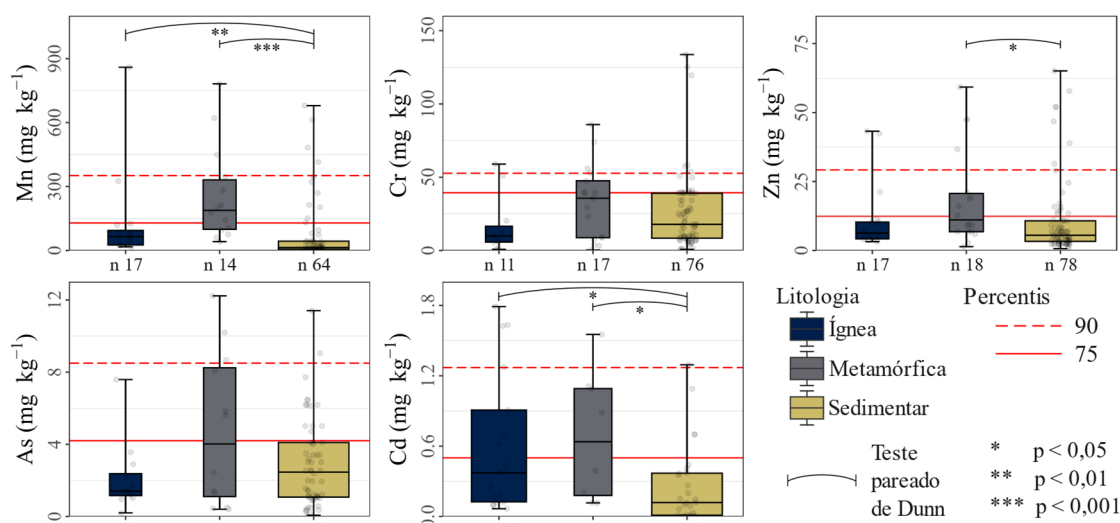


Figura 4. Teste post-hoc para litologia de solos de Mato Grosso, Brasil. Comparações pareadas pelo teste de Dunn e ajuste de p pelo método de Holm ($p < 0,05$). Possíveis *outliers* e valores inferiores ao limite de detecção (DL) foram removidos para esta análise estatística. A largura da caixa varia em relação à proporção do número de amostras (n).

Os principais solos de Mato Grosso, Latossolos (41%) e Argissolos (21%), são muito intemperizados, com baixa capacidade de troca catiônica, pH e teor de matéria orgânica, e predominância de argilominerais do tipo 1:1, como caulinita, além de óxidos de ferro e alumínio (IBGE, 2023; Pereira et al., 2020). Em seguida, destacam-se os Neossolos Quartzarênicos (12%), nos quais a fração areia é dominante (IBGE, 2023). Inicialmente, essas informações indicam a ocorrência de elementos-traço em níveis inferiores aos dos solos de clima temperado, pois há menor retenção de metais (Rieuwerts, 2007). Porém, esta generalização deve ser relativizada, pois assim como existe uma ampla diversidade biológica que ocorre nas regiões tropicais, também existe uma grande diversidade de solos (Davies, 1997; Lima et al., 2020). Portanto, a diversidade de materiais de origem e de processos pedogenéticos pode ser decisiva para a ocorrência de níveis atípicos de qualquer elemento (Alloway, 2013; Kabata-Pendias, 2010).

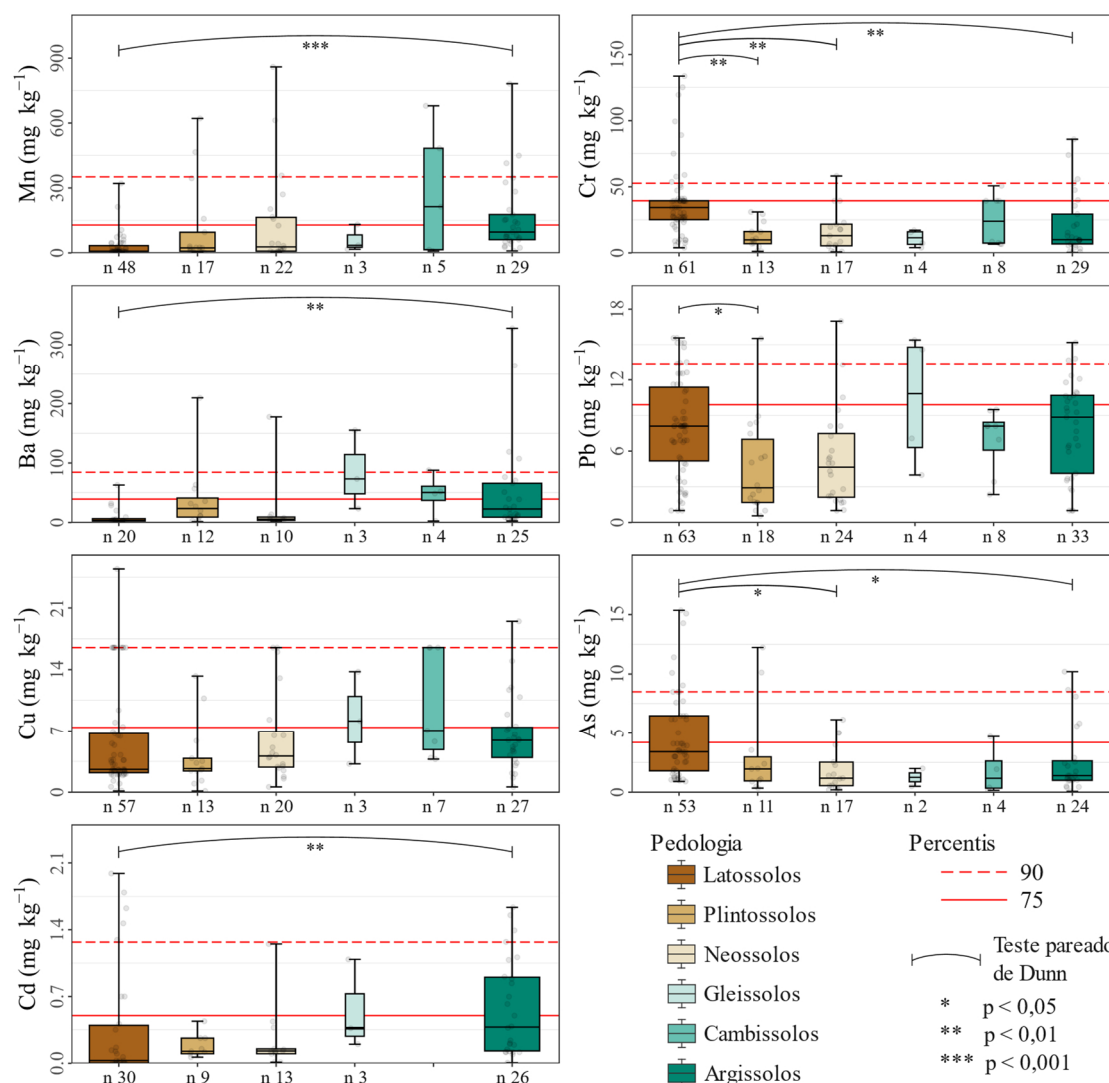


Figura 5. Teste post-hoc para pedologia de solos de Mato Grosso, Brasil. Comparações pareadas pelo teste de Dunn e ajuste de p pelo método de Holm ($p < 0,05$). Possíveis *outliers* e valores inferiores ao limite de detecção (LD) foram removidos para esta análise estatística. A largura da caixa varia em relação à proporção do número de amostras (n).

Comparando os resultados encontrados (Tabela 1) com os VRQs reportados para solos brasileiros (Boechat et al., 2020; Fernandes et al., 2018; Mascarenhas et al., 2022; Suppi et al., 2022), o Cd apresentou teores muito elevados. Geralmente, os percentis 75 ou 90 para Cd são inferiores a 0,5 mg kg⁻¹. No entanto, houve muitas amostras com teores de Cd inferiores ao LD (72 de 153 sítios; Tabela Suplementar S8), indicando que o Cd é naturalmente baixo em muitos locais.

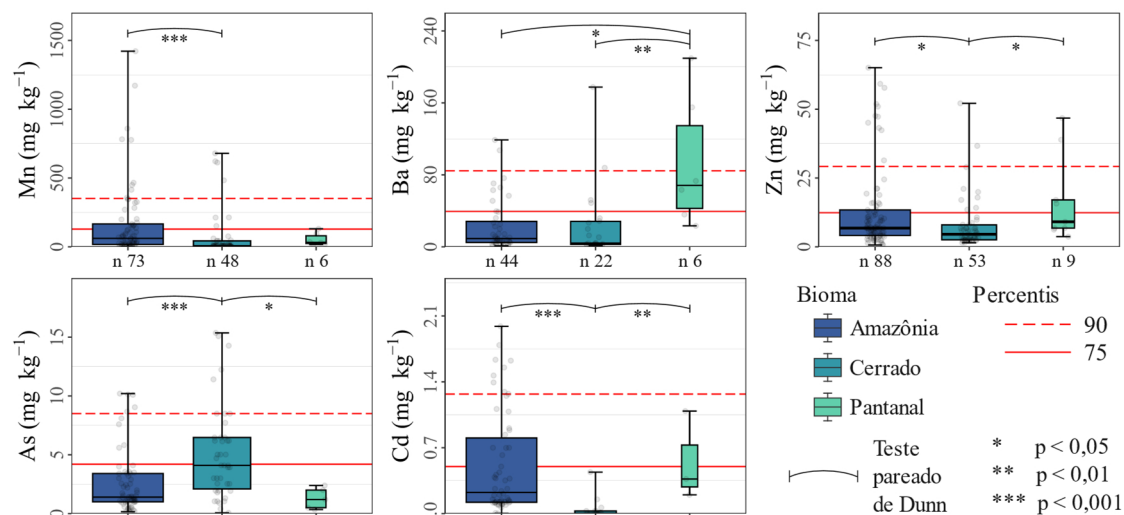


Figure 6. Teste post-hoc para biomas de solos de Mato Grosso, Brasil. Comparações pareadas pelo teste de Dunn e ajuste de p pelo método de Holm ($p < 0,05$). Possíveis *outliers* e valores inferiores ao limite de detecção (DL) foram removidos para esta análise estatística. A largura da caixa varia em relação à proporção do número de amostras (n).

Ao analisar os possíveis fatores ambientais relacionados aos teores de Cd, destacaram-se a geomorfologia e os biomas ($p < 0,001$; Tabela 2). Porém, como existem muitas amostras com teores de Cd inferiores ao LD, uma combinação dos fatores ambientais parece ser mais adequada para explicar a sua ocorrência. Isso dificulta a análise e a compreensão dos padrões de distribuição dos teores de Cd, mas pode favorecer o entendimento correto da dinâmica do Cd nos solos de Mato Grosso. Neste caso, embora de forma menos expressiva, a província geológica, a litologia e a pedologia também explicam os teores deste elemento ($p < 0,05$; Tabela 2). Portanto, altos teores de Cd parecem estar relacionados à geomorfologia de Serras, Depressões e Planícies (Figura 3), e aos Argissolos originários de rochas ígneas ou metamórficas, enquanto baixos teores de Cd estão relacionados ao bioma Cerrado.

Os teores de arsênio foram semelhantes aos dos solos do Estado de Minas Gerais, onde o VRQ (percentil 75) foi de 8 mg kg^{-1} (COPAM, 2011). Os solos de Mato Grosso podem apresentar teores de As muito elevados, chegando a 330 mg kg^{-1} no sudoeste (Pierangeli et al., 2009). A litologia local foi apontada para explicar estes teores elevados, embora houvesse preocupações sobre uma possível contaminação da mineração de ouro devido à mobilização de rochas ricas em As. Entretanto, novas amostragens nessas regiões não apresentaram

teores elevados de As, atingindo no máximo 10,2 mg kg⁻¹. Em geral, As está relacionado à geomorfologia das Chapadas (dentro do bioma Cerrado; Figura 2), ou ao seu entorno, por exemplo, a região sudoeste, próximo à Chapada dos Parecis. Nas demais regiões de Mato Grosso, o As ficou predominantemente abaixo do percentil 75 (4,2 mg kg⁻¹; Tabela 1).

Embora tenha havido alguns sítios com Cr acima do VP (75 mg kg⁻¹), em 7 das 132 amostras (5%), este elemento tem ampla distribuição natural nos solos. Além disso, o percentil 90 foi de 52,7 mg kg⁻¹, semelhante ou inferior aos teores encontrados em diversas regiões do Brasil (Fernandes et al., 2018; Mascarenhas et al., 2022). O Cr merece atenção especial nos Latossolos (Figura 5) com geomorfologia de Chapadas e Planaltos (Figura 3), pois ali foram encontrados os maiores teores. Além disso, essas regiões são amplamente utilizadas para a agricultura.

Os percentis 75 e 90 de Hg também foram elevados (0,10 a 0,14 mg kg⁻¹; Tabela 1). Os maiores teores de Hg foram encontrados em locais do bioma Amazônia, enquanto teores inferiores ao LD predominaram no bioma Cerrado (Figura Suplementar 1). Isto é consistente com a literatura; estudos relataram que os solos do bioma Amazônia podem apresentar altos teores naturais de Hg, chegando a aproximadamente 1 mg kg⁻¹ (Fernandes et al., 2018; Gonçalves et al., 2022). Assim, os teores de Hg relatados neste estudo podem ser considerados adequados para solos do Bioma Amazônia, mas elevados para o Cerrado, onde os teores de Hg são geralmente inferiores a 0,05 mg kg⁻¹ (Carvalho et al., 2019; Lima et al., 2022).

Os demais elementos (Fe, Mn, Cu, Zn, Ba, Pb e Ni) ficaram dentro da faixa típica encontrada para os solos brasileiros (Bocardi et al., 2020; Brito et al., 2020; Fernandes et al., 2018; Mascarenhas et al., 2022), o que também é preocupante, principalmente devido aos baixos teores de alguns micronutrientes em muitos locais, como Zn e Cu, que apresentaram medianas de 6,8 e 3,9 mg kg⁻¹, respectivamente (Denton-Thompson & Sayer, 2022). Os teores de Fe e Mn são tipicamente muito elevados no solo e muitas vezes não são tratados como vestígios em muitos solos brasileiros. Porém, considerando a grande variação encontrada (Tabela 1), podem ocorrer deficiências ou níveis excessivos de Fe e Mn para sistemas de produção (Prado, 2021).

O manganês apresentou valor de p baixo para todos os fatores analisados ($p < 0,001$; Tabela 2); assim, pode ser um bom elemento para distinguir ambientes, pois sua concentração no solo é sensível às condições pedogenéticas do ambiente, material de origem e clima (Kabata-Pendias, 2010). Os maiores teores de Mn em solos de litologia ígnea e metamórfica (Figura 4) contribuíram para explicar os elevados teores de Mn na província geológica Amazônica (Figura 2), bem como na geomorfologia de Patamares e Depressões (Figura 3), Argissolos (Figura 5), e o bioma Amazônia (Figura 6), que apresentam essas rochas-mãe.

Os teores de Mn, Zn e Ba na província geológica do Tocantins (Figura 2) provavelmente estão relacionados à sua litologia metamórfica, que ocorre em algumas partes desta geologia. Porém, foram obtidas poucas amostras nesta região, o que torna essa informação ainda pouco clara. Diante disso, novas investigações são relevantes para melhor compreender seus níveis nesses solos.

Os teores de Ni não apresentaram diferenças para nenhum fator ambiental analisado; assim, seus teores no solo podem ser mais complexos, e lidar com os limites permitidos para este elemento pode exigir uma investigação mais aprofundada. No entanto, o Ni correlacionou-se com Fe (0,54), Mn (0,61), Zn (0,67) e Argila + Silte (0,56) ($p < 0,001$; Figura Suplementar S2) e pode estar relacionado aos óxidos amorfos e argila, ao invés dos fatores ambientais gerais estudados. Isto pode ser explicado pela elevada afinidade do Ni com a fração coloidal, nomeadamente os óxidos de ferro; portanto, os teores de Ni podem ser dependentes do teor e da constituição da argila (Alloway, 2013; Kabata-Pendias, 2010; Sun et al., 2018). No entanto, estabelecer VRQ para Ni no percentil 90 ($8,9 \text{ mg kg}^{-1}$; Tabela 1) parece seguro, presumivelmente não representando qualquer ameaça à biodiversidade e aos sistemas de produção, considerando os níveis comumente relatados na literatura (Bocardi et al., 2020; Fernandes et al., 2018; Mascarenhas et al., 2022).

4.2 Valores de referência de qualidade (VRQs)

O estabelecimento de VRQs conforme normativa CONAMA 420/2009 (CONAMA, 2009) deve atender ao propósito de indicar valores norteadores para prevenção da contaminação do solo para manter sua funcionalidade.

Considerando que o território mato-grossense apresenta uma ampla gama de diferentes elementos no solo relacionados à sua geodiversidade, como mostra o presente estudo, avaliou-se a possibilidade de estabelecer diferentes VRQs para cada ambiente. Neste contexto, Althaus et al. (2018) propuseram dois grupos de VRQs baseados em litologia para o Estado do Rio Grande do Sul, e Boechat et al. (2020) propuseram estabelecer três VRQs para o Estado do Piauí, com base em mesorregiões. Além disso, Suppi et al. (2022) propuseram seis VRQs para o Estado de Santa Catarina, baseados na pedologia. Contudo, foram identificadas algumas limitações para os solos mato-grossenses, que ainda não permitiram a adoção de procedimento semelhante:

(1) Embora vários elementos sejam explicados por mais de um fator ambiental (por exemplo, Mn), cada elemento exigiria múltiplos VRQs. Isso resultaria em inúmeras tabelas de interpretação. Portanto, sua implementação seria difícil.

(2) Uma provável interação entre fatores ambientais parece ser mais adequada para explicar a grande variação de alguns elementos, como o Cd por exemplo (como discutido anteriormente). Mesmo elementos que ocorreram em níveis mais elevados em determinados ambientes, como o Cr nos Latossolos (Figura 5), também ocorreram em níveis próximos ao mínimo, o que reforça a hipótese sugerida de que existe interação entre fatores ambientais. Porém, seriam necessárias mais amostras e informações do ambiente para favorecer uma melhor compreensão destes resultados, e;

(3) Análises estatísticas multivariadas (por exemplo, análise de componentes principais, análise hierárquica de agrupamentos ou krigagem) não foram adequadas para identificar grupos que permitissem a proposição de VRQs com base nos fatores ambientais estudados.

Portanto, sugerimos a adoção do percentil 90 do conjunto de dados dos elementos apresentados na Tabela 1 como VRQs para o Estado de Mato Grosso, pois o percentil 75 é muito restritivo, dada a variabilidade dos elementos analisados. Entretanto, para o Cd, foi sugerido o percentil 75, tendo em vista que, neste caso o percentil 90 é muito elevado. Contudo, o monitoramento ambiental deve ser particularmente cuidadoso em relação a elementos potencialmente tóxicos, como o Cd, em solos de litologia ígnea e metamórfica, e o Hg, em solos do bioma Amazônia. Além disso, alterações na biodisponibilidade desses

elementos, decorrentes de interferências antrópicas, também requerem atenção, pelo risco de atingirem a cadeia alimentar, resultando em ameaça toxicológica.

Além da importância de prevenir a contaminação ambiental, destacamos que informações sobre o conteúdo pseudototal desses elementos também podem contribuir para a identificação de áreas onde há carência de nutrientes essenciais à nutrição das plantas. Portanto, pode favorecer um uso mais eficiente de insumos nutricionais na agricultura e pecuária, permitindo a produção de alimentos mais saudáveis, o que está em linha com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (<https://www.un.org/>) e com o conceito de Saúde Única (<https://www.who.int/>).

Ressalta-se ainda a lacuna no conhecimento gerado sobre alguns elementos-traço pouco investigados no Estado de Mato Grosso como Se e Co e elementos sem informações da literatura científica para esta região como Al, B, Mo, Sb, Ag e V, conforme critérios da normativa CONAMA 420/2009. Nesse sentido, novas pesquisas poderão ser desenvolvidas para ampliar as áreas amostrais no Estado de Mato Grosso, bem como incluir análises de todos os elementos de importância ecológica, seja pelo risco de toxicidade ou pela essencialidade para os sistemas biológicos.

5. CONCLUSÕES

Houve grande heterogeneidade nos teores dos elementos Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Cr, Ba, Pb, As, Cd e Hg dos solos mato-grossenses. Os principais fatores ambientais relacionados a esses resultados foram a geologia para Mn e Zn; geomorfologia para Mn, Cr, Ba, Zn, As e Cd; litologia para Mn; pedologia para Mn e Cr; e bioma para Mn, As, Cd e Hg. Não foi possível identificar a fonte natural de variação do Ni.

Os limites propostos como valores de referência de qualidade para os solos de Mato Grosso, em mg kg⁻¹, são: Fe 23,128; Mn 351; Cu 16,50; Zn 29,24; Ni 8,86; Cr 52,73; Ba 84,45; Pb 13,42; As 8,50; Cd 0,50; e Hg 0,14.

Os teores de Hg, Cd e As requerem monitoramento cuidadoso, pois alguns ambientes podem apresentar níveis naturalmente elevados e pequenas alterações na biodisponibilidade de tais elementos podem representar uma ameaça toxicológica.

6. REFERÊNCIAS

- Alloway, B. J. (Ed.). (2013). Heavy Metals in Soils (Vol. 22). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Althaus, D., Gianello, C., Tedesco, M. J., Silva, K. J. da, Bissani, C. A., & Felisberto, R. (2018). Natural Fertility and Metals Contents in Soils of Rio Grande do Sul (Brazil). *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 42. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160418>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Bocardi, J. M. B., Pletsch, A. L., Melo, V. F., & Quinaia, S. P. (2020). Quality reference values for heavy metals in soils developed from basic rocks under tropical conditions. *Journal of Geochemical Exploration*, 217, 106591. <https://doi.org/10.1016/j.jgexplo.2020.106591>
- Boechat, C. L., Duarte, L. de S. L., de Sena, A. F. S., do Nascimento, C. W. A., da Silva, Y. J. A. B., da Silva, Y. J. A. B., Brito, A. C. C., & Saraiva, P. C. (2020). Background concentrations and quality reference values for potentially toxic elements in soils of Piauí state, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(11), 723. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08656-w>
- Brito, A. C. C., Boechat, C. L., de Sena, A. F. S., de Sousa Luz Duarte, L., do Nascimento, C. W. A., da Silva, Y. J. A. B., da Silva, Y. J. A. B., & Saraiva, P. C. (2020). Assessing the Distribution and Concentration of Heavy Metals in Soils of an Agricultural Frontier in the Brazilian Cerrado. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(8), 388. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04760-2>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Carvalho, G. S., Oliveira, J. R., Curi, N., Schulze, D. G., & Marques, J. J. (2019). Selenium and mercury in Brazilian Cerrado soils and their relationships with physical and chemical soil characteristics. *Chemosphere*, 218, 412–415. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.099>
- Chen, Q. Y., & Costa, M. (2021). Arsenic: A Global Environmental Challenge. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, 61(1), 47–63. <https://doi.org/10.1146/annurev-pharmtox-030220-013418>

- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente – Brasil. (2009). Resolução no 420, de 28 de dezembro de 2009. Diário Oficial Da União. <http://conama.mma.gov.br/>
- COPAM - Conselho Estadual de Política Ambiental do Estado de Minas Gerais – Brasil. (2011). Deliberação Normativa COPAM no 166, de 29 de junho de 2011. <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=18414>
- Davies, B. E. (1997). Deficiencies and toxicities of trace elements and micronutrients in tropical soils: Limitations of knowledge and future research needs. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 16(1), 75–83. <https://doi.org/10.1002/etc.5620160108>
- Denton-Thompson, S. M., & Sayer, E. J. (2022). Micronutrients in Food Production: What Can We Learn from Natural Ecosystems? *Soil Systems*, 6(1), 8. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6010008>
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. www.fao.org/publications
- Fernandes, A. R., Souza, E. S. de, de Souza Braz, A. M., Birani, S. M., & Alleoni, L. R. F. (2018). Quality reference values and background concentrations of potentially toxic elements in soils from the Eastern Amazon, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, 190, 453–463. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.04.012>
- Gonçalves, D. A. M., Pereira, W. V. da S., Johannesson, K. H., Pérez, D. V., Guilherme, L. R. G., & Fernandes, A. R. (2022). Geochemical Background for Potentially Toxic Elements in Forested Soils of the State of Pará, Brazilian Amazon. *Minerals*, 12(6), 674. <https://doi.org/10.3390/min12060674>
- Guerra, M. B. B., Oliveira, C., Carvalho, M. R. de, Silva, A. O., Alvarenga, I. F. S., Barbosa, M. V., Feitosa, M. M., Penido, E. S., Valentim dos Santos, J., Carbone Carneiro, M. A., Bundschuh, J., & Guilherme, L. R. G. (2023). Increased mobilization of geogenic arsenic by anthropogenic activities: the Brazilian experience in mining and agricultural areas. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 100472. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100472>
- Haines, A., Hanson, C., & Ranganathan, J. (2018). Planetary Health Watch: integrated monitoring in the Anthropocene epoch. *The Lancet Planetary Health*, 2(4), e141–e143. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(18\)30047-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30047-0)
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023). BDIA - Banco de informações ambientais. <https://bdiaweb.ibge.gov.br/>
- Kabata-Pendias, A. (2010). Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10158>

- Kabata-Pendias, A., & Mukherjee, A. B. (2007). Trace Elements from Soil to Human. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-32714-1>
- Lima, F. R. D., Pereira, P., Silva Junior, E. C., Vasques, I. C. F., Oliveira, J. R., Windmöller, C. C., Inda, A. V., Weindorf, D. C., Curi, N., Ribeiro, B. T., Guilherme, L. R. G., & Marques, J. J. (2022). Geochemistry signatures of mercury in soils of the Amazon rainforest biome. *Environmental Research*, 215, 114147. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114147>
- Lima, M. W., Hamid, S. S., Souza, E. S., Teixeira, R. A., Palheta, D. da C., Faial, K. do C. F., & Fernandes, A. R. (2020). Geochemical background concentrations of potentially toxic elements in soils of the Carajás Mineral Province, southeast of the Amazonian Craton. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(10), 649. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08611-9>
- Mascarenhas, R. B., Jesus, T. B., Gloaguen, T. V., Costa, O. D. V., & Wyzykowski, J. (2022). Quality reference values for trace metals in Podzols, Ferralsols, and Acrisols of Brazilian Atlantic rainforest. *CATENA*, 210, 105879. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105879>
- Mehri, A. (2020). Trace Elements in Human Nutrition (II) – An Update. *International Journal of Preventive Medicine*, 11(2), 17. https://doi.org/10.4103/ijpvm.IJPVM_48_19
- Pereira, T. T. C., Oliveira, F. S., Freitas, D. F., Damasceno, B. D., & Dias, A. C. (2020). A mineralogia dos solos tropicais: estado da arte e relação com o uso e manejo. *Geonomos*, 28(1), 14. <https://doi.org/https://doi.org/10.18285/geonomos.v28i1.29650>
- Pierangeli, M. A. P., Eguchi, E. S., Ruppim, R. F., Costa, R. B. F., & Vieira, D. F. (2009). Teores de As, Pb, Cd e Hg e fertilidade de solos da região do Vale do Alto Guaporé, sudoeste do estado de Mato Grosso. *Acta Amazonica*, 39(1), 61–69. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000100006>
- Prado, R. de M. (2021). Mineral nutrition of tropical plants. In *Mineral nutrition of tropical plants*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4>
- Raffa, C. M., Chiampo, F., & Shanthakumar, S. (2021). Remediation of Metal/Metalloid-Polluted Soils: A Short Review. *Applied Sciences*, 11(9), 4134. <https://doi.org/10.3390/app11094134>
- Rieuwerts, J. S. (2007). The mobility and bioavailability of trace metals in tropical soils: a review. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 19(2), 75–85. <https://doi.org/10.3184/095422907X211918>
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. Á., Lumberras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araújo-Filho, J. C., Oliveira, J. B., & Cunha, T. J. F. (2018). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (5th ed.). Embrapa. <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>

- Santos, S. N., & Alleoni, L. R. F. (2013). Reference values for heavy metals in soils of the Brazilian agricultural frontier in Southwestern Amazônia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(7), 5737–5748. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2980-7>
- Silva, F. L., Pierangeli, M. A. P., Santos, F. A. S., Serafim, M. E., & Souza, C. A. (2017). Natural backgrounds and reference values of trace-element in earth murundus fields on the Southern Amazon. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, 12(2), 172–178. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i2a5436>
- Sun, W., Zhang, X., Sun, X., Sun, Y., & Cen, Y. (2018). Predicting nickel concentration in soil using reflectance spectroscopy associated with organic matter and clay minerals. *Geoderma*, 327, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.04.019>
- Suppi, I. M., Souza, L. C., Hugen, C., Miquelluti, D. J., & Campos, M. L. (2022). Trace Elements Reference Values for Soils from Santa Catarina, Brazil. *Ensaio e Ciência C Biológicas Agrárias e Da Saúde*, 26(3), 328–337. <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2022v26n3p328-337>
- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (Eds.). (2017). *Manual de Métodos de Análise de Solo* (3rd ed.). Embrapa.
- USDA - United States Department of Agriculture. (2022). *Keys to Soil Taxonomy By Soil Survey Staff* (13th ed.). Natural Resources Conservation Service. <https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/soil-taxonomy>

ARQUIVOS SUPLEMENTARES (ARTIGO 2)

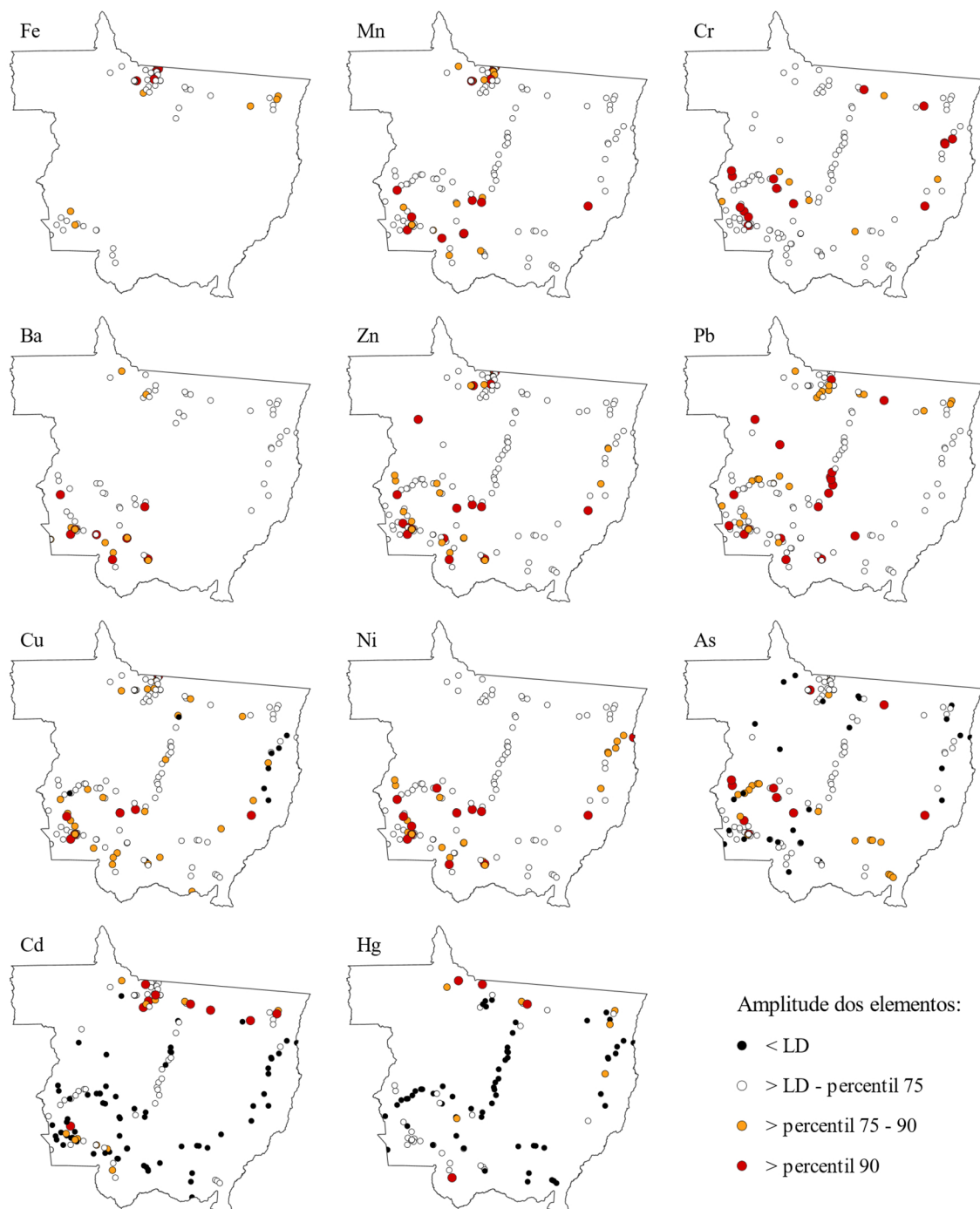


Figura Suplementar S1. Mapa dos sítios de amostragem de acordo com os percentis 75 e 90 de cada elemento. Os sítios de amostragem incluem dados inferiores ao limite de detecção (LD) e possíveis *outliers*.

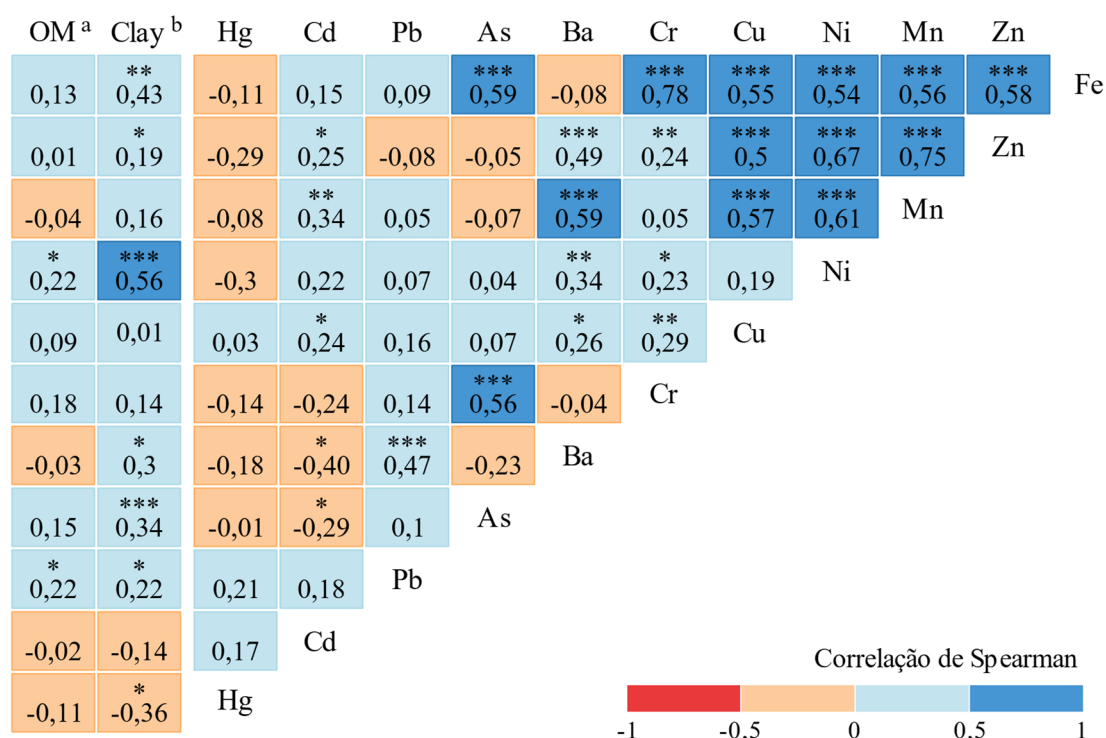


Figura Suplementar S2. Correlações de postos de Spearman para elementos-traço em solos de Mato Grosso. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Possíveis *outliers* e teores inferiores ao LD foram removidos para esta análise estatística (Tabela Suplementar S8). ^a Matéria orgânica do solo (MO); ^b Argila + Silte.

Tabela Suplementar S1. Descrição das características relacionadas à província geológica do Estado de Mato Grosso, Brasil (IBGE, 2023).

PROVÍNCIA GEOLÓGICA	
	Grandes áreas geológicas naturais, apresentando evolução estratigráfica, magmática, tectônica e metamórfica própria e diferente das províncias vizinhas. São definidos cronologicamente pelos últimos eventos de aglutinação ou dispersão de continentes ocorridos em determinada região. Na plataforma sul-americana, o último evento de aglutinação é denominado Ciclo Orogênico Brasileiro, ou simplesmente Orogenias Brasileiras, e o evento de dispersão, Tafrogênese Sul-Atlante. As províncias estruturais são os remanescentes dos paleocontinentes aglutinados, representados pelos crátons e suas coberturas; os orógenos resultantes do fechamento dos oceanos que delimitavam e separavam os continentes; e as bacias sedimentares (geralmente sinéclises) formadas no novo continente (ou supercontinente - dois ou mais continentes unidos).
Amazônia	A Província Geológica da Amazônia consiste em um mosaico de remanescentes de continentes arqueanos ou microcontinentes que se amalgamaram para formar um importante bloco crustal paleoproterozóico (cráton), em torno do qual sucessivas faixas móveis (orógenos de acréscimo) foram agregadas e amalgamadas ao longo do Paleoproterozóico e Mesoproterozóico.
Cobertura cenozóica	Constituídas pelas coberturas pós-Gondwana, ou seja, pelas sequências sedimentares que, no território brasileiro, formam o preenchimento de bacias e depressões continentais desenvolvidas no contexto da Plataforma Sul-Americana durante o Cenozóico (Paleógeno, Neógeno e Quaternário), bem como por os depósitos correlatos dos eventos de nivelamento resultantes das glaciações daquela época, preservados como formações edafoestratigráficas detríticas e/ou lateríticas.
Paraná	O registro sedimento-magmático da Bacia do Paraná é representado por seis supersequências deposicionais: i) Ordoviciano-Siluriano; ii) Devoniano; iii) Carbonífero-Eotriássico; iv) Meso ao Neo-Triássico; v) Jurássico Superior-

	Eocretáceo; e vi) Cretáceo Superior. Do Ordoviciano ao Eotriássico, as supersequências são resultados de ciclos de transgressão e regressão do Oceano Panthalassa que circundou toda a extensão do Megacontinente Gondwana.
Parecis	Esta Província, assim como as demais províncias sedimentares do Gondwana, está subdividida em três domínios: Pimenta Bueno-Casa Branca, seção Paleozóica; Parecis, seção Mesozóica; e Anari-Tapirapuã, magmatismo básico mesozóico. Um evento extensional ocorreu no Paleozóico da Região Amazônica permitindo a deposição de sedimentos na Bacia dos Parecis, do Ordoviciano ao Eopermiano (atual Cisulariano), das Formações Cacoal, Furnas, Ponta Grossa, Pimenta Bueno e Fazenda Casa Branca.
Tocantins	Em termos da evolução tectônica da Plataforma Sul-Americana, a Província Tocantins representa o fechamento, durante o Neoproterozóico, dos oceanos Goianides, Rockelides e Perifranciscanos. É um sistema de orógenos Brasileiros, representado por bacias de margens passivas invertidas e arcos magmáticos intraoceânicos, interligando microcontinentes Arqueano e Riatiano

Tabela Suplementar S2. Descrição de características relacionadas à geomorfologia do Estado de Mato Grosso, Brasil (IBGE, 2023).

GEOMORFOLOGIA	
A geomorfologia consiste no terceiro nível taxonômico de compartimentação do relevo. Eles são definidos como um arranjo de formas altimétricas e fisionomicamente semelhantes em seus diversos tipos de modelagem. A geomorfogênese e a semelhança das formas podem ser explicadas por fatores paleoclimáticos e por condições litológicas e estruturais. Cada unidade geomorfológica apresenta seus processos originais, formações superficiais e tipos de modelagem diferentes das demais. O comportamento da drenagem, seus padrões e anomalias são tomados como referência, pois revelam as relações entre ambientes climáticos atuais ou passados e restrições litológicas ou tectônicas.	
Serras	Topografia de caráter acidentado constituídas por diferentes tipos de rochas, com presença de cristas acentuadas e alongadas e vales estreitos limitados por encostas com declives acentuados.
Chapadas	Feição caracterizada por topos planos ou suavemente ondulados, limitados por escarpas, elaboradas, em geral, em rochas sedimentares. É um subtipo de Planaltos, onde predomina um topo plano, rodeado de escarpas.
Planaltos	Feição plana ou dissecada, de relevo predominantemente homogêneo, de altitudes elevadas, limitada, pelo menos em uma de suas bordas, por superfícies inferiores.
Patamares	Feição plana ou ondulada, constituindo uma etapa de transição entre um Planalto, uma Chapada ou uma Serra, mais elevada, e geralmente uma Depressão ou Planície, em cota inferior.
Depressões	Característica rebaixada em relação aos relevos circundantes mais elevados, elaborada em qualquer tipo de rocha.
Planícies	Topografia plana ou suavemente ondulada, onde os processos de sedimentação superam os de erosão, elaborados em sedimentos aluviais recentes, resultantes de acumulação fluvial, marinha e/ou lacustre, sujeitos a inundações periódicas, e/ou submetidos a trabalhos eólicos.

Tabela Suplementar S3. Descrição de características relacionadas à litologia do Estado de Mato Grosso, Brasil (IBGE, 2023).

LITOLOGIA
Refere-se à constituição das rochas. A rocha consiste em um agregado natural formado por um ou mais minerais, que constituem parte essencial da litosfera. De acordo com a sua origem, podem ser distinguidos três grandes grupos genéticos de rochas: (1) rochas magmáticas ou ígneas; (2) rochas sedimentares; e (3) rochas metamórficas.

Ígnea	Tipos de rochas que provêm da consolidação do magma e são, portanto, de origem primária. De rochas deste tipo derivam, por diversos processos, rochas sedimentares e metamórficas.
Metamórfica	Tipos de rochas formados quando rochas preexistentes de qualquer tipo genético ou natureza, como resultado de algum processo geológico, são submetidas a condições físicas e químicas diferentes daquelas em que foram formadas e que determinam a instabilidade dos minerais preexistentes, induzindo-os a se adaptarem a essas novas condições. Há uma mudança no arranjo e disposição dos minerais na rocha em geral, mas nem sempre necessariamente acompanhada de uma mudança na composição mineralógica, ou seja, com a formação de novos minerais por recristalização. Transformações metamórficas ocorrem com rochas no estado sólido, mas derretimentos parciais podem ocorrer quando migmatitos são gerados.
Sedimentar	Tipos de rochas formadas a partir de materiais provenientes da destruição erosiva de qualquer tipo de rocha, inclusive as decorrentes de atividade biológica, que são transportadas pela água, pelo gelo ou pelo vento e posteriormente depositadas ou precipitadas em bacias ou áreas de acumulação sedimentar (planícies aluviais, lagos, lagoas, mares, oceanos, entre outros).

Tabela Suplementar S4. Descrição das características relacionadas à pedologia do Estado de Mato Grosso, Brasil (IBGE, 2023).

PEDOLOGIA (Santos et al, 2018)		Equivalência parcial	
O corpo tridimensional que representa o solo é denominado 'pedon'. A face do 'pedon' que vai da superfície até o contato com o material de origem, constituindo a unidade básica de estudo do SiBCS - Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, é o perfil do solo, sendo avaliado em duas dimensões e compondo uma área mínima que permite estudar a variabilidade de atributos, propriedades e características de horizontes ou camadas de solo.		Soil taxonomy (USDA, 2022)	World Reference Base for Soil Resources - WRB (FAO, 2015)
Latossolos	Evolução muito avançada com desempenho significativo do processo de latolização (ferralitização), resultando em intenso intemperismo dos constituintes minerais primários, e ainda dos secundários menos resistentes, e concentração relativa de argilominerais resistentes e/ou óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, com mobilização inexpressiva ou migração de argila, ferrólise, gleização ou plintização.	Oxisols	Ferralsols
Plintossolos	Preponderância e profundidade de manifestação de atributos que evidenciam a formação de plintita, combinada com horizonte diagnóstico plíntico, concrecionário ou litoplíntico.	Plinthic subgroups (some classes of Oxisols, Ultisols, Alfisols, Entisols, Inceptisols)	Plinthosols

Neossolos	Expressão insuficiente dos atributos diagnósticos que caracterizam os diversos processos de formação, pouca diferenciação de horizontes, com individualização do horizonte A seguido de C ou R, e predomínio de características herdadas do material original.	Entisols; (Lithic...Orthents); (Lithic...Psamments); (Quartzipsamments)	Arenosols; Leptosols
Gleissolos	Hidromorfismo, expresso por forte gleização, resultante de processos de intensa redução de compostos de ferro, na presença de matéria orgânica, com ou sem oxidação alternada, por efeito de oscilações do lençol freático, em condições de excesso de umidade permanente ou periódico.	Entisols (Aqu-alf-and-ent-ept-)	Gleysols; some Stagnosols
Cambissolos	Pedogênese pouco avançada, evidenciada pelo desenvolvimento da estrutura do solo, com alteração do material de origem expressa pela quase ausência de estrutura rochosa, ou estratificação sedimentar, maior croma, tonalidades mais avermelhadas ou maior teor de argila que os horizontes subjacentes.	Inceptisols	Cambisols
Argissolos	Evolução avançada com desempenho incompleto do processo de ferralitização, em conexão com parágênese caulínico-oxídica ou virtualmente caulinita ou vermiculita com intercamadas de hidróxi-Al na presença de mobilização de argila da parte mais superficial do solo, com concentração ou acúmulo no horizonte subsuperficial.	Ultisols; some Oxisols (Kandic)	Acrisols; Lixisols; Alisols

Tabela Suplementar S5. Descrição das características relacionadas aos biomas do Estado de Mato Grosso, Brasil (IBGE, 2023).

BIOMA	
Etimologicamente, a palavra bioma deriva do grego ‘bio’ – vida, e ‘ome’ – sufixo que pressupõe generalização (grupo, conjunto, volume, massa); refere-se à “unidade biótica de maior extensão geográfica, compreendendo diversas comunidades em diferentes estágios de evolução, mas nomeadas de acordo com o tipo de vegetação dominante”.	
Amazônia	Os critérios para descrição do Bioma Amazônia foram o clima quente e úmido dominante, o predomínio da fisionomia florestal, a continuidade geográfica, a condição periequatorial e o contexto da Bacia Amazônica, que possui a maior rede hidrográfica do planeta. A vegetação que caracteriza o Bioma Amazônia é a Floresta Ombrófila Densa, geralmente composta por árvores altas, com copa que pode ou não apresentar árvores emergentes. A maioria das plantas de baixo porte, quando ocorrem, são árvores jovens, em crescimento, resultantes de matrizes próximas umas das outras.

Cerrado	O clima dominante no Bioma Cerrado é o tropical quente subúmido, com apenas duas estações, uma estação seca e uma estação chuvosa. A precipitação varia entre 600 e 2.200 milímetros (mm) anualmente e as temperaturas médias anuais variam entre 22°C e 27°C. A cobertura vegetal predominante no Bioma Cerrado é formada por formações Cerrados, ocorrendo também formações florestais. O Cerrado Florestado (Cerradão) tem aspecto florestado e é composto por espécies arbóreas semidecíduas, com copa entre 8 m e 12 m de altura. Caracteriza-se por ser constituída por uma associação de espécies típicas do Cerrado com espécies de outras florestas regionais.
Pantanal	Os limites desse bioma coincidem com os da unidade geomorfológica conhecida como Planície Pantaneira, mais conhecida como Pantanal Mato-Grossense. Esta planície, cujas origens estão relacionadas com movimentos de compensação ocorridos na época do soerguimento da Cordilheira dos Andes, representa a parte mais baixa e plana da bacia hidrográfica e constitui a maior superfície inundável interior do mundo. As cheias que ocorrem anualmente nesta planície atingem grandes proporções, são duradouras e imprimem grandes alterações no ambiente físico, na vida selvagem e na vida cotidiana das populações locais, constituindo o fator determinante para a existência de um macroecossistema classificável como um bioma. As formações Cerrados constituem a fitofisionomia predominante do Bioma Pantanal, que também abriga formações vegetacionais do Cerrado Estepe, além de pequenas áreas de Floresta Estacional Semidecidual e Decídua que se interpenetram e se misturam com a vegetação Cerrado e com comunidades de espécies pioneiras de ampla distribuição.

Tabela Suplementar S6. Fontes de literatura com sítios geoespaciais incluídos neste estudo.

Literatura	Fe	Mn	Cr	Ba	Zn	Pb	Cu	Ni	As	Cd	Co	Se	Hg
Alcântara et al. (2011)	-	-	1	-	-	1	-	1	1	1	-	-	-
Santos e Alleoni (2013)	-	-	14	-	14	14	14	14	-	14	14	-	-
Pierangeli et al (2015)	-	31	31	-	31	31	31	31	31	31	-	31	31
Veiga (2016)	20	20	-	-	20	20	20	-	20	20	-	-	-
Silva et al. (2017)	4	4	4	-	4	4	4	4	4	4	-	4	-
Silva-Júnior et al. (2019)	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
Silva-Júnior et al. (2022)	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1	-
Lima et al. (2022)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Sítios da literatura	24	55	50	1	69	70	69	50	57	70	14	36	32

Tabela Suplementar S7. Controle de qualidade de análises químicas.

Elemento	Material de referência	Certificado/ Médio	Analizado	Recuperação (%)
Pb	NIST 2709a	9,64	9,2	104,7
As	NIST 2709a	7,56	7,8	96,9
Cd	NIST 2709a	0,43	0,4	107,1
Hg	NIST 2709a	0,86	0,9	98,5
Fe	Controle Interno	-	-	-
Mn	Controle Interno	103,72	103,52	99,81
Cr	Controle Interno	518,00	514,95	99,41
Ba	Controle Interno	6,88	7,37	107,24
Zn	Controle Interno	22,76	21,39	93,96
Cu	Controle Interno	31,59	32,27	102,14
Ni	Controle Interno	34,14	35,74	104,68

Tabela Suplementar S8. Número de sítios incluídos neste estudo a partir da literatura e dos novos sítios amostrados para propor uma aproximação de VRQs para solos de Mato Grosso.

Elemento	Número de sítios			< LD	Outliers ^a
	Literatura	Novos sítios	Este estudo		
Fe	24	33	57	-	-
Mn	55	73	128	-	1
Cr	50	83	133	-	1
Ba	1	73	74	-	-
Zn	69	82	151	-	1
Pb	70	83	153	-	3
Cu	69	73	142	9	6
Ni	50	72	122	-	2
As	57	83	140	29	-
Cd	70	83	153	72	-
Hg	32	73	105	65	-
Co	14	-	14	-	-
Se	36	-	36	35	-

^a Possíveis outliers que foram removidos através da análise do intervalo interquartil (mg kg⁻¹): Mn 2.663,7; Cr 278,0; Ba 118,8 e 155,1; Zn 115,5; Pb 22,5 a 31,9; Cu 37,3 a 62,5; Ni 28,9 e 29,7.

REFERÊNCIAS SUPLEMENTARES (ARTIGO 2)

Alcântara, A. J. de O., Pierangeli, M. A. P., Souza, C. A. de, & Souza, J. B. de. (2011). Teores de As, Cd, Pb, Cr e Ni e atributos de fertilidade de Argissolo Amarelo distrófico usado como lixão no município de Cáceres, estado de Mato Grosso. *Revista Brasileira de Geociências*, 41(3), 539–548. <https://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/7849/0>

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. www.fao.org/publications

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023). BDIA - Banco de informações ambientais. <https://bdiaweb.ibge.gov.br/>

Lima, F. R. D., Pereira, P., Silva Junior, E. C., Vasques, I. C. F., Oliveira, J. R., Windmöller, C. C., Inda, A. V., Weindorf, D. C., Curi, N., Ribeiro, B. T., Guilherme, L. R. G., & Marques, J. J. (2022). Geochemistry signatures of mercury in soils of the Amazon rainforest biome. *Environmental Research*, 215, 114147. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114147>

Pierangeli, M. A. P., Guilherme, L. R. G., Carvalho, G. S., Carvalho, C. de A., Silva, C. A., & Pierangeli, L. M. P. (2015). Elementos-traço em áreas de vegetação nativa e agricultura intensiva do estado de Mato Grosso determinados por fluorescência de raios-x por reflexão total. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 39(4), 1048–1057. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140373>

Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. Á., Lumberras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araújo-Filho, J. C., Oliveira, J. B., &

- Cunha, T. J. F. (2018). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (5th ed.). Embrapa. <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>
- Santos, S. N., & Alleoni, L. R. F. (2013). Reference values for heavy metals in soils of the Brazilian agricultural frontier in Southwestern Amazônia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(7), 5737–5748. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2980-7>
- Silva-Júnior, E. C., Martins, G. C., Wadt, L. H. O., Silva, K. E., Lima, R. M. B., Batista, K. D., Guedes, M. C., de Oliveira Junior, R. C., Reis, A. R., Lopes, G., Menezes, M. D., Broadley, M. R., Young, S. D., & Guilherme, L. R. G. (2019). Natural variation of arsenic fractions in soils of the Brazilian Amazon. *Science of The Total Environment*, 687, 1219–1231. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.446>
- Silva-Junior, E. C., Wadt, L. H. de O., Silva, K. E., Lima, R. M. B., Batista, K. D., Guedes, M. C., Oliveira-Junior, R. C., Reis, A. R., Lopes, G., Broadley, M. R., Young, S. D., & Guilherme, L. R. G. (2022). Geochemistry of selenium, barium, and iodine in representative soils of the Brazilian Amazon rainforest. *Science of The Total Environment*, 828, 154426. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154426>
- Silva, F. L., Pierangeli, M. A. P., Santos, F. A. S., Serafim, M. E., & Souza, C. A. (2017). Natural backgrounds and reference values of trace-element in earth murundus fields on the Southern Amazon. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, 12(2), 172–178. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i2a5436>
- USDA - United States Department of Agriculture. (2022). Keys to Soil Taxonomy By Soil Survey Staff (13th ed.). Natural Resources Conservation Service. <https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/soil-taxonomy>
- Veiga, J. B. da. (2016). Fertilidade e elementos-traço em solos sob vegetação primária em Alta Floresta, Mato Grosso. Universidade do Estado de Mato Grosso.

FERTILIDADE E ESTOQUE DE CARBONO EM AMBIENTES DE PASTAGENS E FLORESTAS NO SUL DA AMAZÔNIA

[Publicado na [Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental](https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n1e270888) em 01 janeiro de 2024, <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n1e270888>]

RESUMO: O manejo inadequado de solos de pastagens na Amazônia resulta em predomínio de pastagens degradadas. Considerando as características naturais dessa região pode favorecer estratégias mais adequadas para sua sustentabilidade, o objetivo desse estudo foi avaliar as diferenças de atributos químicos e físicos de solos de pastagens e florestas no sul da Amazônia e identificar os atributos mais sensíveis de sua fertilidade. Além disso, sugerir práticas de manejo mais adequadas para essas pastagens em direção à sustentabilidade. Amostras de solo da camada de 0 a 0,20 m foram analisadas para determinação de pH, bases trocáveis (cálcio, magnésio e potássio), alumínio trocável, acidez potencial, fósforo, carbono orgânico, densidade aparente e textura. Os solos de pastagem tiveram maior pH, cálcio e densidade aparente do que os solos de floresta. No entanto, os solos de pastagem apresentaram menores teores de fósforo e matéria orgânica. Os estoques de carbono orgânico do solo também foram menores nas pastagens, com teores de 0,8 a 12 Mg ha⁻¹ inferiores aos solos da floresta. Os atributos de fertilidade mais sensíveis ao manejo do solo nessas pastagens foram fósforo, pH, carbono orgânico e densidade aparente. A carência de nutrientes e de práticas de conservação do solo e da água têm contribuído para o estado de degradação dessas pastagens. Portanto, o manejo recomendado para essas pastagens deve visar a melhoria da matéria orgânica, redução da compactação, além da reposição e ciclagem de nutrientes.

Palavras-chave: mudanças climáticas; manejo conservacionista; pecuária; degradação do solo; sustentabilidade

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o bioma Amazônia compreende 55 milhões de hectares de pastagens utilizadas para a pecuária, das quais 57% estão moderadas ou severamente degradadas (MapaBiomass, 2022). Atualmente, o desmatamento, as emissões de gases de efeito estufa e a degradação do solo são os principais impactos da produção pecuária na Amazônia. Portanto, a sustentabilidade desta atividade na Amazônia, que continua avançando sobre as florestas nativas, é motivo de grande preocupação (Bueno et al., 2021).

Na Amazônia, houve rápido processo de modificação da paisagem natural, dando lugar às pastagens, seguidas pela agricultura. Esforços para intensificar esses sistemas produtivos têm sido adotados com a justificativa do potencial de produtividade e contribuição para o desenvolvimento sustentável; no entanto, a pecuária ainda predomina com baixos índices de produção (Ermgassen et al., 2018).

A conversão de áreas nativas em pastagens modifica as condições do solo, expondo-os à degradação quando precedida de manejo inadequado, por exemplo, ao aumentar a suscetibilidade à erosão e à perda de matéria orgânica e nutrientes (Bronick e Lal, 2005; Rueda et al., 2020; Silva et al., 2022; Rocha et al. 2023). Como resultado, a produtividade é reduzida e os impactos ambientais são agravados. No entanto, poucos estudos compararam as práticas agrícolas na Amazônia com as condições da vegetação natural (Bueno et al., 2021).

Avaliar os atributos químicos e físicos do solo é importante para identificar o impacto do manejo do solo e permitir um manejo que garanta sua funcionalidade (Cardoso, 2013). Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar as diferenças nos atributos químicos e físicos dos solos de pastagens e florestas no Sul da Amazônia e identificar os atributos mais sensíveis à sua fertilidade. Além disso, sugere práticas de manejo mais adequadas para pastagens sustentáveis.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado em oito fazendas que praticam pecuária extensiva de corte no sul da Amazônia brasileira (Figura 1). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é Am, com temperaturas médias entre

20 e 35 °C e precipitações entre 2.000 e 3.000 mm ano⁻¹. A declividade predominante está entre 5 e 15% e a altitude entre 260 e 375 m. A região do estudo está localizada no arco de desmatamento amazônico e é considerada uma das mais importantes fronteiras agrícolas deste bioma.

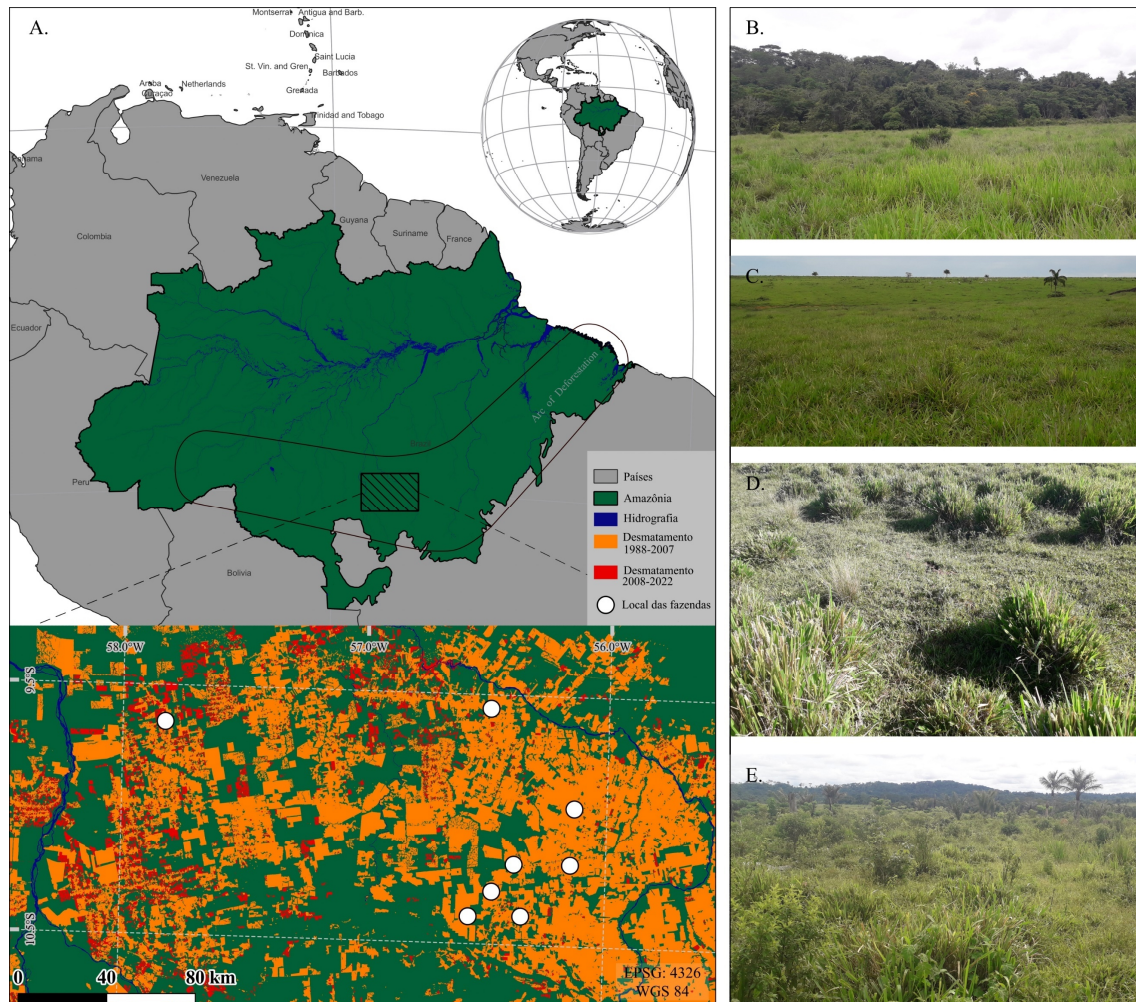


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo e locais de amostragem (A). Fotografias dos ambientes estudados: Pastagem e mata adjacente (B); pastagem extensiva típica da Amazônia (C); Degradação de pastagens por falhas de cobertura do solo (D); e Degradação de pastagens por ervas daninhas (E).

Foram coletadas amostras de solo das pastagens e ambientes florestais adjacentes às pastagens de cada fazenda durante o período chuvoso (2021/2022). Amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0-0,20 m em cada ambiente, em três pontos separados por pelo menos 50 m. Em cada ponto amostral foi obtida uma amostra composta de três amostras individuais, com distância mínima de 10 m entre elas, totalizando 48 amostras (três amostras de

cada ambiente de pastagem e três amostras de cada ambiente de floresta para cada fazenda estudada). Adicionalmente, foi utilizado um questionário semiestruturado para obtenção de informações técnicas, produtivas e históricas do uso do solo (Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil, Comitê de Ética em Pesquisa: 44321521.5.0000.5166). As informações gerais de cada fazenda são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Informações gerais sobre as fazendas incluídas neste estudo.

Fazenda	Categoria tamanho da Fazenda (ha)	Tamanho do pasto (ha)	Classe de solo	Conversão floresta-pastagem	Pastagem atual	Manejo da fertilidade do solo
I	> 1.000	13	Argissolo e Latossolo	1991	<i>Urochloa brizantha</i>	Uso esporádico de calcário e fertilizante mineral.
II	200 a 1.000	11	Argissolo e Latossolo	1995	<i>Panicum maximum</i>	Uso de calcário e fertilizante mineral em 2016.
III	200 a 1.000	8	Argissolo e Latossolo	1994	<i>Panicum maximum</i> ; <i>Urochloa brizantha</i>	Uso de calcário em 2016.
IV	> 1.000	53	Latossolo	1985	<i>Urochloa brizantha</i>	Uso esporádico de calcário e fertilizante mineral.
V	200 a 1.000	6	Argissolo e Latossolo	1999	<i>Urochloa brizantha</i>	Sem correção da fertilidade do solo.
VI	> 1.000	34	Argissolo	2007	<i>Urochloa brizantha</i>	Uso de calcário e mineral fosfatado em 2015.
VII	200 a 1.000	15	Argissolo e Latossolo	1995	<i>Urochloa brizantha</i>	Uso esporádico de calcário.
VIII	> 1.000	20	Argissolo e Latossolo	1984	<i>Panicum maximum</i>	Uso esporádico de calcário e fertilizante mineral.

Foram realizadas as seguintes análises químicas e físicas do solo: o potencial de hidrogênio (pH) na água (1:2,5); o carbono orgânico do solo (CO) determinado por colorimetria após digestão úmida; a matéria orgânica do solo (MO) estimada pela multiplicação do CO por 1,724 (assumindo que a matéria orgânica possui 58% de carbono); o fósforo (P) determinado por colorimetria no comprimento de onda de 660 nm após extração com solução Mehlich-1; o potássio trocável (K^+) determinado por espectrofotometria de chama após extração com solução Mehlich-1; cálcio trocável (Ca^{2+}), magnésio trocável (Mg^{2+}) e alumínio trocável (Al^{3+}) extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e determinados por titulometria; a acidez potencial (H + Al) determinada por titulação após extração

com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ ; a densidade aparente do solo (Ds) determinada pelo método do cilindro volumétrico; e a textura (areia, silte e argila) determinada pelo método do densímetro.

Após a realização das análises química e física do solo, as variáveis do complexo sortivo do solo e estoque de CO foram determinadas por meio das seguintes equações:

$$SB \text{ (cmol}_c \text{ dm}^{-3}) = \sum (\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{K}^{+}) \quad (1)$$

$$CTC \text{ (cmol}_c \text{ dm}^{-3}) = \sum [SB, (\text{H} + \text{Al})] \quad (2)$$

$$m \text{ (\%)} = \text{Al}^{3+} / \sum (\text{SB}, \text{Al}^{3+}) \times 100 \quad (3)$$

$$V \text{ (\%)} = SB / CTC \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Estoque de CO (Mg ha}^{-1}) = (\text{CO} \times \text{Ds} \times \text{E} \times \text{A}) / \text{F} \quad (5)$$

onde:

SB - soma de bases trocáveis;

CTC - capacidade de troca de cátions;

m - percentual de saturação por alumínio;

V - percentual de saturação por bases;

CO - carbono orgânico do solo (g dm⁻³);

Ds - densidade aparente do solo (Mg m⁻³) (para ambientes de pastagem foi utilizada a Ds média do ambiente de floresta adjacente à pastagem);

E - espessura da camada de solo (0,20 m);

A - unidade de área (10.000 m²); e,

F - fator de conversão de kg para Mg (1.000).

Os dados obtidos foram analisados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro–Wilk e, quando necessário, ajustados pelo método de transformação de Box–Cox. Foi construída uma matriz de correlação de Pearson entre as principais variáveis físicas e químicas quantitativas do solo, seguida de análise de regressão linear entre variáveis altamente correlacionadas. O teste t de Student (distribuição paramétrica) ou teste U de Mann–Whitney (distribuição não paramétrica) foi aplicado para comparar os resultados entre pastagens (Fazendas I a VIII) e ambientes florestais (adjacentes a cada pastagem) como

dois grupos naturalmente distintos (pastagem × floresta). O nível de significância foi fixado em 5% ($p \leq 0,05$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise de correlação entre as principais variáveis químicas e físicas do solo são apresentados na Figura 2. Correlações positivas foram observadas entre pH e SB e entre argila, CTC e MO. Embora tenha havido correlação positiva entre o SB e a CTC, elas são colineares, pois a CTC foi derivada da SB (Eq. 2). Além disso, foram observadas correlações negativas entre Al^{3+} com pH e SB, e entre P e argila.

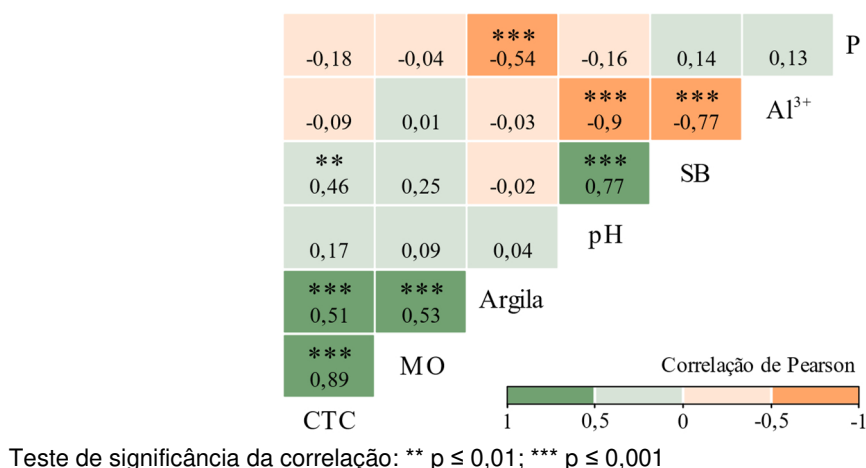


Figura 2. Matriz de correlação de Pearson entre variáveis químicas e físicas do solo. SB: soma de bases trocáveis; MO: matéria orgânica do solo; CTC: capacidade de troca de cátions.

O pH é um dos principais indicadores da fertilidade do solo e é responsável pelas reações de adsorção e dessorção de elementos químicos na solução do solo (Raij, 1983). Condições de baixo pH indicam baixa disponibilidade de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ que compõem a SB, o que explica a correlação positiva entre pH e SB. Isso também explica a correlação negativa entre Al^{3+} com pH e SB, visto que Al^{3+} , que está inversamente relacionado às bases trocáveis, torna-se mais solúvel à medida que o pH do solo é reduzido (Havlin, 2005).

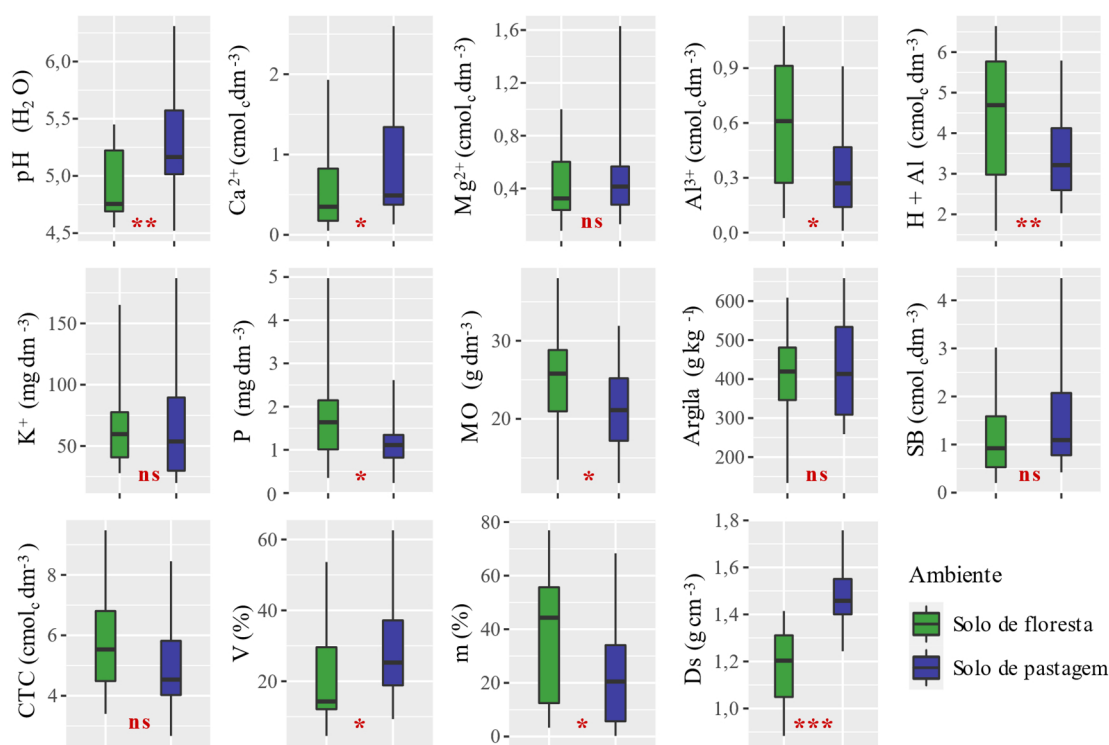
A correlação positiva entre argila, MO e CTC reflete uma dinâmica típica do solo em que argila e MO interagem para formar agregados. Na estrutura

agregada, a argila e a MO estão menos expostos à erosão hídrica (Zhu et al., 2022), e a MO é menos suscetível à rápida mineralização (Liu et al., 2022). Isto é particularmente relevante na Amazônia, onde ocorrem chuvas intensas e altas temperaturas. A CTC é influenciada diretamente pela argila e MO, pois formam cargas elétricas negativas no solo e proporcionam maiores valores de CTC (Umasankareswari et al., 2022). Esta intrincada correlação é de grande importância para a sustentabilidade dos sistemas de produção, pois o manejo inadequado desses solos resulta invariavelmente na sua degradação.

Os resultados de P mostraram comportamento típico de solos tropicais nos quais esse nutriente é complexado com argila, tornando-o menos disponível às plantas em solos argilosos. Em solos argilosos, o P é fortemente adsorvido aos óxidos de Fe e Al (Barbosa et al., 2022), que ocorrem tipicamente nas principais classes de solos do Bioma Amazônia; por exemplo, Argissolos e Latossolos que representam 72% deste território (BDIA, 2022).

Uma comparação das variáveis químicas e físicas do solo entre os ambientes de pastagem e floresta é mostrada na Figura 3. Os solos de pastagem apresentaram maiores pH, Ca^{2+} e V, enquanto os solos de floresta apresentaram maiores acidez potencial, Al^{3+} , m, P e MO. Esses resultados indicam diferenças que podem ser atribuídas ao manejo das pastagens, pois em algumas fazendas foi aplicado calcário ocasionalmente para corrigir a acidez do solo, aumentar as bases trocáveis (Ca^{2+} e Mg^{2+}) e neutralizar o Al^{3+} .

Valores mais baixos de P e MO em solos de pastagem do que em solos florestais indicam perdas desses atributos do solo devido ao manejo adotado. Adicionalmente, por meio de informações obtidas por meio de entrevistas e observações *in loco*, foi possível verificar que não foram adotadas práticas regulares de reposição mineral ou conservação do solo nessas pastagens. Melhorar a produtividade animal em sistemas de pastagem requer o monitoramento dos estoques de nutrientes do solo, dos fluxos e da fertilização para garantir a reposição dos nutrientes extraídos, sem os quais haverá inevitável esgotamento de nutrientes e degradação das pastagens (Rueda et al., 2020). Além disso, a adoção de práticas de proteção e conservação do solo é essencial para a sustentabilidade dos sistemas de produção (Silva et al., 2022).



Nível de significância pelo teste t de Student ou teste U de Mann–Whitney: * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns: não significativo. MO: matéria orgânica; SB: soma de bases trocáveis; CTC: capacidade de troca de cátions; V: percentual de saturação por bases; m: percentual de saturação de alumínio; Ds: densidade aparente do solo.

Figura 3. Atributos químicos e físicos de solos de ambientes pastagens e floresta.

Os solos de pastagem apresentaram maiores valores de Ds que os solos de floresta. Essa diferença também pode ser atribuída ao manejo do sistema de produção, visto que o pisoteio de animais e o tráfego ocasional de máquinas afetam a superfície do solo, causando compactação e reduzindo o espaço físico disponível para ar e água. Para as plantas, existe um limite crítico de densidade do solo, além do qual se torna um impedimento significativo ao crescimento das raízes. Este limite pode ser estimado considerando-se a Ds e o teor de e argila de acordo com a equação proposta por Reichert et al. (2009). Assim, o limite crítico de Ds dos ambientes de pastagem esteve predominantemente acima ou próximo deste limite, que foi estimado entre 1,32 e 1,64 g cm⁻³. Esses resultados indicam a necessidade de práticas que corrijam ou evitem a compactação excessiva desses solos e os mantenham em nível adequado ao crescimento radicular.

Quanto à interpretação das condições naturais de fertilidade destes solos (solos de floresta, Figura 3), com base nas tabelas de interpretação de

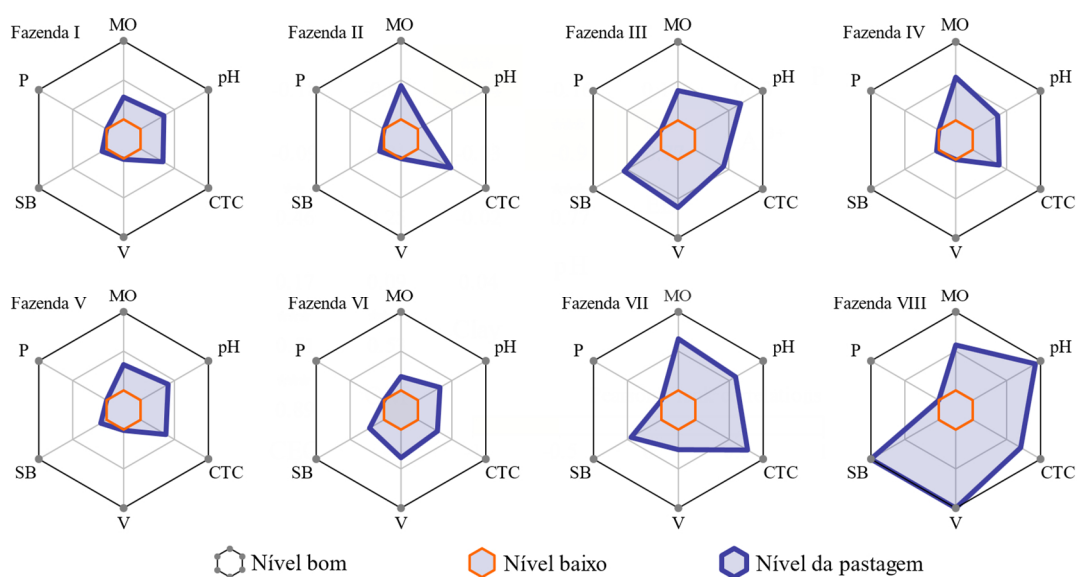
Ribeiro et al. (1999), esses solos apresentavam acidez média e alta, níveis baixos e médios de Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} , médios de K^+ e muito baixos de P. Isto implica que a utilização destes solos para pastagens também requer práticas para corrigir a acidez e a fertilidade dos principais macronutrientes necessários para estabelecer e manter a forragem, além de repor os nutrientes para manter a produção.

A CTC dos solos de floresta foi considerada predominantemente média, com percentis 25 a 75 entre 4,5 e 6,8 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Entretanto, é importante ressaltar a alta correlação desse atributo com a MO (0,89; $p \leq 0,001$; Figura 2), principalmente porque houve redução da MO no ambiente de pastagem, o que contribuiu para reduzir a CTC em aproximadamente 0,7 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para níveis considerados baixos e médios, entre 4,0 e 5,8 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. A CTC é um indicador do potencial do solo para servir ao uso agrícola e normalmente possui valores dependentes da mineralogia do solo e principalmente da MO em solos tropicais (Raij, 1983). Valores baixos de CTC indicam que o solo retém poucas bases trocáveis, aumentando a necessidade de fertilização (Umasankareswari et al., 2022). Assim, destacamos a importância de preservar ou melhorar a MO para permitir condições suficientes para a CTC, favorecendo a fertilidade do solo e minimizando a necessidade de insumos agrícolas.

A mudança no uso da terra afeta a fertilidade do solo; portanto, diferenças naturais ou antropogênicas em cada ambiente podem resultar em respostas diferentes (Silva et al., 2022; Rocha et al., 2023). No entanto, observamos algumas características comuns na interpretação da fertilidade do solo das pastagens em cada fazenda (Figura 4). Essas pastagens apresentavam condições de fertilidade do solo predominantemente abaixo do nível bom, principalmente no que diz respeito ao P, que estava abaixo do nível mínimo em todas as propriedades. Isto realça a necessidade de implementar melhores práticas de gestão da fertilidade do solo, tais como a melhoria da MO e da ciclagem de nutrientes e a reposição regular de nutrientes para o cultivo de pastagens.

Os resultados do estoque CO para os ambientes de pastagem e floresta são mostrados na Figura 5. Apesar da variabilidade entre os locais estudados (Figura 5A), o ambiente de pastagem apresentou os menores estoques de CO ($\bar{x} = 28 \text{ Mg ha}^{-1}$) em comparação ao ambiente florestal ($\bar{x} = 33,7 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Figura

5 B). A magnitude dessa diferença em cada localidade estudada variou de 2,8 a 34,8% ($\bar{x} = 16,3$) de perda de CO do ambiente de pastagem em relação às respectivas localidades do ambiente florestal (Figura 5 C). Isso significa que a conversão de áreas florestais em pastagens representou perdas de CO de aproximadamente 0,8 a 12,4 Mg ha⁻¹ ($\bar{x} = 5,7$), mesmo considerando apenas a camada superficial do solo (0 a 0,20 m).

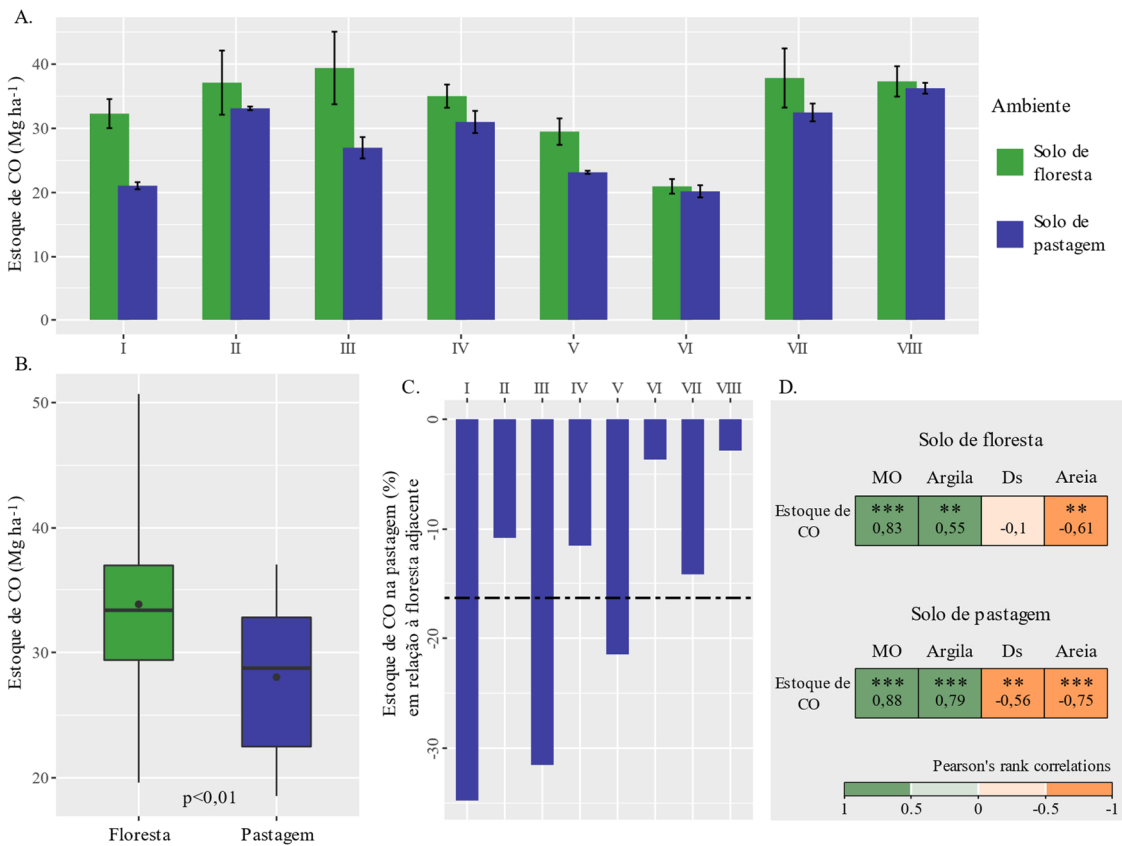


Níveis baixos e bons para pastagens de acordo com Ribeiro et al. (1999): MO (7,0; 40,1 g dm⁻³), pH (4,5; 6,1), CTC (1,6; 6,56 cmol_c dm⁻³), V (20,0; 60,1%), SB (0,6; 3,61 cmol_c dm⁻³) e P (4,0; 12,1 mg dm⁻³). Os valores dos atributos do solo da pastagem foram interpretados a partir da mediana das amostras de cada pastagem. MO: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca de cátions; V: percentual de saturação por bases; SB: soma das bases trocáveis.

Figure 4. Interpretação da fertilidade do solo das pastagens em cada propriedade (I-VIII).

Os resultados da correlação do estoque CO com os atributos físicos do solo sugeriram diferenças entre os ambientes floresta e pastagem (Figura 5 D). Argila e areia apresentaram correlações mais fortes com o estoque de CO em pastagens do que em ambientes de floresta. Estes resultados reforçam a importância de considerar as características naturais destes solos, que podem ser mais frágeis dependendo das condições de manejo a que estão expostos. Por exemplo, solos pouco argilosos (solos arenosos) são mais propensos a sofrer as maiores perdas de carbono do solo devido à ausência de práticas conservacionistas, pois a textura do solo está relacionada à formação de

agregados, o que influencia diretamente na sua capacidade de reter a MO (Zhu et al., 2022).



Teste de significância da correlação: ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$.

Figura 5. Estoques de carbono orgânico do solo (CO) nos ambientes de floresta e pastagem (camada 0 a 0,20 m). Média e erro padrão do estoque de CO em cada fazenda estudada (I-VIII) e ambientes (A), boxplot com média dos dados do estoque de CO e significância estatística pelo teste t de Student para ambientes estudados (B), estoque de CO na pastagem em relação ao respectivo ambiente de floresta adjacente (C), e análise de correlação de Pearson para estoque de CO com matéria orgânica (MO), argila, areia e densidade aparente (Ds) nos ambientes floresta e pastagem (D).

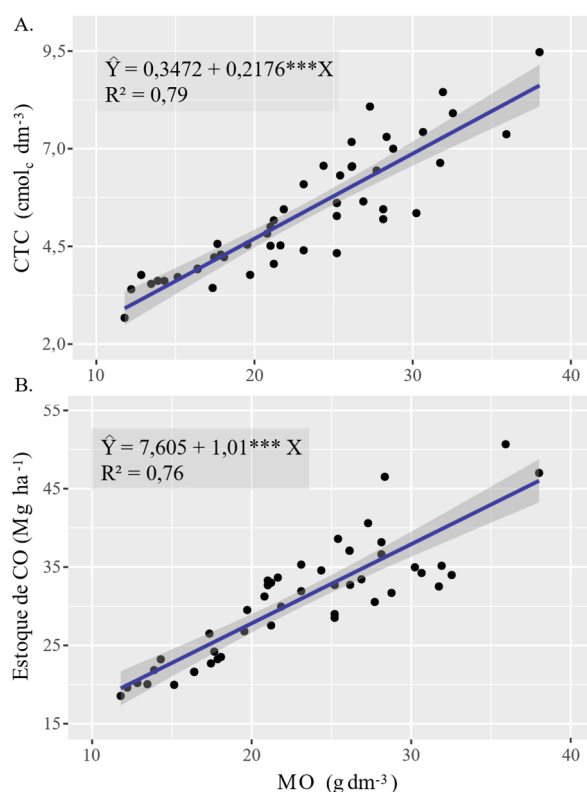
Nas pastagens, a redução do estoque de CO foi correlacionada com o aumento de Ds, o que não ocorreu no ambiente de floresta (Figura 5 D). Essa diferença foi associada ao manejo do solo de pastagem, que está mais exposto a impactos superficiais, conforme discutido em relação ao Ds (Figura 3). Além disso, em solos com maior estoque de CO, maior MO também contribui para a redução do Ds devido à sua menor densidade em relação ao solo e ao seu papel no amortecimento do impacto superficial, o que é particularmente mais relevante em solos manejados. Isso explica as diferentes correlações entre o estoque de

CO e o Ds nos ambientes de pastagem e floresta. Porém, é importante destacar que em solos compactados há menor desenvolvimento radicular, dificuldade no crescimento das plantas e aumento da erosão laminar, entre outros aspectos, contribuindo para a degradação geral da pastagem e aumento das emissões de CO₂ (Bronick e Lal, 2005). Ou seja, a compactação do solo também implica indiretamente na redução do estoque de CO.

Alcançar um nível de desenvolvimento pecuário sustentável na Amazônia é um grande desafio; no entanto, é necessário procurar soluções para atingir esta meta. Muitos caminhos foram sugeridos para reduzir o desmatamento (Skidmore et al., 2021), reduzir impactos ambientais (Dick et al., 2021), aumentar a produtividade (Ermgassen et al., 2018) e proteger a biodiversidade (Neate-Clegg & Şekercioğlu, 2020). No entanto, ainda não está claro como e quando a pecuária na Amazônia se tornará sustentável (Bueno et al., 2021).

Considerando a multifuncionalidade do solo, que fornece diversos serviços ecossistêmicos essenciais à vida (Adhikari e Hartemink, 2016), garantir a saúde do solo é necessário para a sustentabilidade dos sistemas de produção pecuária. Portanto, o manejo de pastagens na Amazônia é pré-requisito básico para garantir a saúde do solo por meio de práticas produtivas.

Na análise de regressão, encontramos indícios de que um incremento de apenas 5 g dm⁻³ de MO resultaria em melhorias de aproximadamente 1,1 cmol_c dm⁻³ de CTC (Figura 6 A) e 5 Mg ha⁻¹ em estoque de CO na camada superficial do solo (Figura 6B). Isto representaria uma melhoria significativa na fertilidade destes solos, aumentando a sua capacidade de reter e disponibilizar nutrientes, favorecendo a eficiência dos fertilizantes, ou mesmo reduzindo a sua dependência deles. Além disso, considerando 55 milhões de hectares de pastagens na Amazônia (MapaBiomass, 2022), isso representaria o sequestro de um petagrama de CO₂ atmosférico (5×10^{-9} Pg C ha⁻¹ $\times$ 5.5×10^7 ha $\times$ 3.66 CO₂), o que reforça o potencial do solo como sumidouro de carbono para mitigar mudanças climáticas (Lal, 2020). No entanto, a adoção de determinadas práticas agrícolas deve ser cuidadosamente considerada, pois podem eventualmente resultar em efeitos adversos na qualidade do solo, como a contaminação ambiental proveniente da fertilização com resíduos orgânicos (Scheid et al., 2020).



***: significativo ao nível de $p \leq 0.001$ pelo teste F

Figura 6. Regressão linear da capacidade de troca catiônica (CTC) (A) e estoque de carbono orgânico do solo (CO) (B) em resposta à matéria orgânica (MO) nos ambientes de floresta e pastagem no Sul da Amazônia.

Para melhorar a MO e promover a saúde do solo, diversas técnicas de produção já amplamente reconhecidas por conservacionistas e gestores de pastagens ecológicas podem contribuir. Entre estas, algumas opções podem exigir baixo investimento económico, tais como melhorar o controlo do pastoreio, evitar o sobrepastoreio e a lotação excessiva de animais (McTavish et al., 2021), como a técnica *adaptive multipaddock* (Teague & Kreuter, 2020). Entre outras técnicas, estão os sistemas integrados de produção, como a integração lavoura-pecuária-floresta, que têm alcançado resultados promissores apesar de exigirem altos investimentos e tempo de retorno entre 2,5 e 8,5 anos (Ermgassen et al., 2018).

Para superar os constantes desafios relacionados com os custos associados à adoção de melhores práticas agrícolas, a implementação de incentivos através de programas de extensão rural (Rocha-Júnior et al., 2020), pagamentos por serviços ambientais (Biggs et al., 2021) e subsídios de crédito para projetos sustentáveis (Costa-Júnior et al., 2019) são consideradas opções

importantes. Além disso, a avaliação dos serviços ecossistêmicos por meio de indicadores, como MO, Ds e complexo sortivo do solo, pode ser adotada nessas áreas da Amazônia para monitorar mudanças em direção à sustentabilidade. Além disso, estes indicadores são relativamente simples, acessíveis e baratos.

Por fim, é necessário considerar a existência de vários aspectos a serem superados ou compreendidos no contexto das fazendas na Amazônia para a intensificação sustentável da pecuária, como infraestrutura precária, falta de mão de obra qualificada, ambiente regulatório desfavorável e o valor cultural do método tradicional de produção pecuária (Cortner et al., 2019). Isto evidencia a importância de promover o fortalecimento de ações de natureza educativa, de divulgação tecnológica e o desenvolvimento de pesquisas científicas com abordagens multidisciplinares para apoiar todas as dimensões do conceito de sustentabilidade social, econômica e ambiental, e para superar os múltiplos desafios estabelecidos.

4. CONCLUSÕES

Os ambientes de pastagem na Amazônia Meridional apresentam alterações nos atributos químicos e físicos do solo em comparação aos ambientes de floresta. Os atributos mais sensíveis ao manejo do solo foram fósforo, pH, carbono orgânico e densidade do solo.

As condições atuais desses solos indicam que a conversão de floresta em pastagem representa perdas no estoque de carbono orgânico entre 0,8 e 12,4 Mg ha⁻¹ na camada superficial do solo.

A falta de nutrientes e de práticas de conservação do solo e da água têm contribuído para a degradação destas pastagens.

O manejo recomendado para essas pastagens deve ter como objetivo melhorar o teor de matéria orgânica, reduzir a compactação, além de melhorar a reposição e ciclagem de nutrientes.

5. LITERATURA CITADA

- Adhikari, K.; Hartemink, A. E. Linking soils to ecosystem services – A global review. *Geoderma*, v.262, p.101-111, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- Barbosa, J. Z.; Poggere, G.; Mancini, M.; Silva, S. H. G.; Motta, A. C. V.; Marques, J. J. G. S. E M.; Curi, N. National-scale spatial variations of soil phosphorus retention capacity in Brazil. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, v.128, p.1-11, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103271>
- BDIA - Banco de Dados de Informações Ambientais. *Pedologia*. Available on: <<https://bdiaweb.ibge.gov.br/>>. Accessed on: Nov. 2022.
- Biggs, N. B.; Hafner, J.; Mashiri, F. E.; Huntsinger, L.; Lambin, E. F. Payments for ecosystem services within the hybrid governance model: evaluating policy alignment and complementarity on California rangelands. *Ecology and Society*, v.26, p.1-31, 2021. <https://doi.org/10.5751/ES-12254-260119>
- Bronick, C. J.; Lal, R. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, v.124, p.3-22, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Bueno, R. S.; Marchetti, L.; Coccozza, C.; Marchetti, M.; Salbitano, F. Could cattle ranching and soybean cultivation be sustainable? A systematic review and a meta-analysis for the Amazon. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, v.14, p.285-298, 2021. <https://doi.org/10.3832/for3779-014>
- Cardoso, E. J. B. N.; Vasconcellos, R. L. F.; Bini, D.; Miyauchi, M. Y. H.; Santos, C. A.; Alves, P. R. L.; Paula, A. M.; Nakatani, A. S.; Pereira, J. M.; Nogueira, M. A. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? *Scientia Agricola*, v.70, p.274-289, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000400009>
- Cortner, O.; Garrett, R. D.; Valentim, J. F.; Ferreira, J.; Niles, M. T.; Reis, J.; Gil, J. Perceptions of integrated crop-livestock systems for sustainable intensification in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy*, v.82, p.841-853, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.01.006>
- Costa-Júnior, N. B.; Baldissera, T. C.; Pinto, C. E.; Garagorry, F. C.; Moraes, A.; Carvalho, P. C. F. Public policies for low carbon emission agriculture foster beef cattle production in southern Brazil. *Land Use Policy*, v.80, p.269-273, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.10.014>
- Dick, M.; Silva, M. A.; Silva, R. R. F.; Ferreira, O. G. L.; Maia, M. S.; Lima, S. F.; Paiva-Neto, V. B.; Dewes, H. Environmental impacts of Brazilian beef cattle production in the Amazon, Cerrado, Pampa, and Pantanal biomes. *Journal of Cleaner Production*, v.311, p.1-10, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127750>

- Ermgassen, E.; Alcântara, M.; Balmford, A.; Barioni, L.; Beduschi Neto, F.; Bettarello, M.; Brito, G.; Carrero, G.; Florence, E.; Garcia, E.; Gonçalves, E.; Luz, C.; Mallman, G.; Strassburg, B.; Valentim, J.; Latawiec, A. Results from on-the-ground efforts to promote sustainable cattle ranching in the Brazilian Amazon. *Sustainability*, v.10, p.1-26, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10041301>
- Havlin, J. L. Fertility. In: *Encyclopedia of soils in the environment*. Amsterdam: Elsevier, 2005. Ch.2, p.10-19. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00228-9>
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. PRODES desmatamento. Available on: <<http://terrabrasil.dpi.inpe.br/app/map/deforestation?hl=pt-br>>. Accessed on: Dec 2022.
- Lal, R. Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. *Soil Science and Plant Nutrition*, v.66, p.1-9, 2020. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1718548>
- Liu, X.; Li, Q.; Tan, S.; Wu, X.; Song, X.; Gao, H.; Han, Z.; Jia, A.; Liang, G.; Li, S. Evaluation of carbon mineralization and its temperature sensitivity in different soil aggregates and moisture regimes: A 21-year tillage experiment. *Science of the Total Environment*, v.837, p.1-11, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155566>
- MapBiomas. Coleção v.7 da série anual de mapas de uso e cobertura da terra do Brasil. Available on: <<https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>>. Accessed on: Nov 2022.
- McTavish, M. J.; Cray, H. A.; Murphy, S. D.; Bauer, J. T.; Havrilla, C. A.; Oelbermann, M.; Sayer, E. J. Sustainable management of grassland soils. In: Stanturf, J.A.; Callahan, M.A. *Soils and landscape restoration*. Amsterdam: Elsevier, 2021. Ch.4, p.95-124. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813193-0.00004-7>
- Neate-Clegg, M. H. C.; Şekercioğlu, Ç. H. Agricultural land in the Amazon basin supports low bird diversity and is a poor replacement for primary forest. *The Condor*, v.122, p1-11, 2020. <https://doi.org/10.1093/condor/duaa020>
- Raij, B. V. *Avaliação da fertilidade do solo*. 2.ed. Piracicaba: Editora Franciscana (LAFRAME), 1983. 142p.
- Reichert, J. M.; Suzuki, L. E. A. S.; Reinert, D. J.; Horn, R.; Håkansson, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, v.102, p.242–254, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>
- Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Venegas, V. H. A. (eds.). *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5.Aproximação*. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.

- Rocha, F. I.; Jesus, E. C.; Teixeira, W. G.; Lumbreras, J. F.; Clemente, E. P.; Motta, P. E. F.; Borsanelli, A. C.; Dutra, I. S.; Oliveira, A. P. Soil type determines the Magnitude of soil fertility changes by forest-to-pasture conversion in western Amazonia. *Science of the Total Environment*, v.856, p.1-9, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158955>
- Rocha-Júnior, A. B.; Silva, R. O.; Peterle-Neto, W.; Rodrigues, C. T. Efeito da utilização de assistência técnica sobre a renda de produtores familiares do Brasil no ano de 2014. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v.58, p.1-16, 2020. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2020.194371>
- Rueda, B. L.; McRoberts, K. C.; Blake, R. W.; Nicholson, C. F.; Valentim, J. F.; Fernandes, E. C. M. Nutrient status of cattle grazing systems in the western Brazilian Amazon. *Cogent Food & Agriculture*, v.6, p.1-19, 2020. <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1722350>
- Scheid, D. L.; Silva, R. F.; Silva, V. R.; Ros, C. O.; Pinto, M. A. B.; Gabriel, M.; Cherubin, M. R. Changes in soil chemical and physical properties in pasture fertilised with liquid swine manure. *Scientia Agricola*, v.77, p.1-10, 2020. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2019-0017>
- Silva, A. A.; Silva-Júnior, C. A.; Boechat, C. L.; Della-Silva, J. L.; Teodoro, P. E.; Rossi, F. S.; Teodoro, L. P. R.; Pelissari, T. D.; Baio, F. H. R.; Lima, M. Effect of land uses and land cover on soil attributes in the southern Brazilian Amazon. *Environmental Monitoring and Assessment*, v.194, p.1-21, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10342-y>
- Skidmore, M. E.; Moffette, F.; Rausch, L.; Christie, M.; Munger, J.; Gibbs, H. K. Cattle ranchers and deforestation in the Brazilian Amazon: Production, location, and policies. *Global Environmental Change*, v.68, p.1-14, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102280>
- Teague, R.; Kreuter, U. Managing grazing to restore soil health, ecosystem function, and ecosystem services. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v.4, p.1-13, 2020. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.534187>
- Umasankareswari, T.; Dharshana, V.; Saravanadevi, K.; Dorothy, R.; Sasilatha, T.; Nguyen, T. A.; Rajendran, S. Soil moisture nanosensors. In: Denizli, A.; Nguyen, T.A.N.; Rajendran, S.; Yasin, G.; Nadda, A.K. (eds.). *Nanosensors for smart agriculture*. Amsterdam: Elsevier, 2022. Ch.9, p.185-216. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824554-5.00019-7>
- Zhu, X.; Liu, W.; Yuan, X.; Chen, C.; Zhu, K.; Zhang, W.; Yang, B. Aggregate stability and size distribution regulate rainsplash erosion: Evidence from a humid tropical soil under different land-use regimes. *Geoderma*, v.420, p.1-12, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115880>

MICRONUTRIENTES E ELEMENTOS TÓXICOS EM AGROECOSSISTEMAS DE BOVINOS DE CORTE E PRODUTOS CÁRNEOS NO SUL DA AMAZÔNIA

[Artigo preparado de acordo com as normas da Revista [Animal](#) (Elsevier)]

RESUMO: Conhecer o caminho dos nutrientes oriundos da carne bovina desde o campo até a mesa é essencial para promover a saúde do ambiente, dos animais e das pessoas. Animais criados a pasto podem ser bons bioindicadores da qualidade ambiental, refletindo em bem-estar animal e alimentos saudáveis. Os objetivos deste estudo foram: i) investigar a transferência de micronutrientes e elementos tóxicos do ambiente para animais e alimentos; e ii) contribuir para uma melhor compreensão dos sistemas de produção animal baseados em pastagens. Amostras de solo, gramínea, suplementos alimentares, sangue, músculo, rim e fígado bovino foram coletadas e analisadas por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) após digestão ácida para determinação dos elementos Fe, Mn, Zn, Cu, Se, Co, Mo, Ni, Cr, Pb, As, Cd e Hg. Em geral, foram encontrados baixos teores desses elementos nos solos e nas gramíneas. Os suplementos alimentares apresentavam níveis deficientes ou excessivos de vários micronutrientes. Deficiências marginais de Se foram identificadas em alguns rebanhos, exceto na fazenda onde houve teores mais elevados de Se no solo e na gramínea. Os elementos tóxicos (Pb, Cd, As e Hg) não ultrapassaram os limites permitidos para nenhuma amostra analisada. Fígado e rim apresentaram teores de elementos tóxicos semelhantes ou inferiores aos relatados na literatura. Os produtos cárneos foram considerados fontes ricas em micronutrientes para consumo humano, principalmente Zn e Fe. A criação de bovinos nessas pastagens proporcionou baixos níveis de elementos tóxicos e bons níveis de micronutrientes para consumo humano. A suplementação alimentar para animais em sistemas de pastagem pode ser melhorada quando se consideram os níveis de nutrientes no solo e na pastagem, contribuindo para a sustentabilidade da produção animal e nutrição humana.

Palavras-chave: mercúrio, molibdênio, pasto, pecuária, saúde única, selênio

1. INTRODUÇÃO

A produção de alimentos de origem animal enfrenta muitos desafios globais, por exemplo, a redução das alterações climáticas, o uso eficiente da terra e a segurança alimentar. Diante disso, os sistemas de pastoreio animal assumem muitos aspectos relevantes, pois ocupam aproximadamente um terço da superfície terrestre (McTavish et al., 2021; Motta-Delgado et al., 2019). Animais criados em sistemas de pastagem geram proteínas de alto valor biológico, apresentam baixa competição com a alimentação humana e são fonte importante de renda em muitas regiões (Barbour et al., 2022; Doyle et al., 2023; Patel et al., 2017). Sistemas de pastagens também podem ser desenvolvidos em muitas áreas inadequadas para a agricultura ou em sistemas integrados, favorecendo a saúde do solo, o controle de plantas invasoras e o bem-estar animal (Broom, 2021; Durigan et al., 2022; Teague e Kreuter, 2020). No entanto, os sistemas de pastagens também podem causar impactos negativos, por exemplo, aumento do desmatamento, baixas taxas de produtividade e degradação ambiental (McTavish et al., 2021; Motta-Delgado et al., 2019). Portanto, compreender melhor as inter-relações que existem do campo à mesa pode favorecer estratégias para melhorar as condições de criação dos animais, produtividade, qualidade dos alimentos, bem como o desenvolvimento sustentável.

O consumo de carne e miudezas bovinas são fontes importantes de diversos nutrientes para a nutrição humana, como Fe, Zn, Cu e Se (Biel et al., 2019; Lee et al., 2021). Os micronutrientes desempenham papéis essenciais no metabolismo, participando de diversas reações enzimáticas, inclusive atuando no sistema imunológico, combatendo infecções e prevenindo o desenvolvimento de doenças (Zoroddu et al., 2019). A deficiência de Se, por exemplo, tem sido associada a uma série de doenças humanas, incluindo diabetes, problemas cardiovasculares, distúrbios do sistema imunológico e câncer (Roman et al., 2014). Numa outra perspectiva, a contaminação dos alimentos por elementos potencialmente tóxicos tem sido uma preocupação crescente (Thorne et al., 2018). Ao contrário dos micronutrientes, os elementos tóxicos como Pb, Cd, As e Hg não possuem função conhecida no metabolismo e quando ocorrem mesmo em concentrações muito baixas, tornam-se uma ameaça à saúde humana

(Tchounwou et al., 2012). Portanto, a presença de elementos considerados tóxicos deve ser evitada nos alimentos e estratégias de prevenção precisam ser adotadas para garantir a segurança alimentar (Frazzoli et al., 2015).

O monitoramento dos níveis desses elementos (micronutrientes ou elementos tóxicos) também é importante para a nutrição animal, bem como para a avaliação da qualidade ambiental. Um aspecto da nutrição animal que constitui um desafio importante é fazer com que a dieta atenda com precisão às necessidades nutricionais (Pomar e Remus, 2023). As necessidades para bovinos estão bem estabelecidas para a maioria dos micronutrientes (NRC, 2016), no entanto, grandes margens nutricionais são permitidas na pecuária, acima das necessidades para muitos micronutrientes, a fim de garantir o fornecimento do mínimo estabelecido (Hejna et al., 2018). Isto resulta em preocupações sobre o risco de excesso de nutrientes, por exemplo Cu ou Se, que têm limites muito estreitos entre necessidade e toxicidade (Brugger e Windisch, 2015; López-Alonso e Miranda, 2020; Mehdi e Dufrasne, 2016). Além disso, existe o risco sempre presente de resíduos de elementos tóxicos acima do limite permitido nas dietas dos animais (Sigarini et al., 2017), bem como a excreção contínua de micronutrientes ou elementos tóxicos, através de fezes e urina, que representam uma ameaça de contaminação ambiental (Duplessis e Royer, 2023).

Na Amazônia brasileira existem cerca de 55 milhões de hectares de pastagens utilizadas para a pecuária, no entanto, mais da metade estão em condições de degradação moderada ou severa (MapBiomas, 2023). Nesse contexto, considerando que normalmente as pastagens não suprem adequadamente os requerimentos bovinos (Arthington and Ranches, 2021), os problemas de deficiências podem ser agravados. Além disso, nestes ambientes, também ocorre o risco de contaminação por elementos-traço pelo uso de fertilizantes, aplicação de herbicidas ou inseticidas, ou mesmo pela excessiva suplementação mineral do gado (Brugger e Windisch, 2015; Hejna et al., 2018). Os incêndios e a mineração (principalmente a mineração artesanal de ouro) são fatores adicionais que ameaçam a integridade deste ambiente, através da liberação de Hg na atmosfera seguida de assimilação pelas pastagens (Shahid et al., 2017; Wasserman et al., 2003). Essas fontes de contaminação podem

resultar no acúmulo de elementos-traço, eventualmente atingindo níveis tóxicos para microrganismos, plantas, animais e alimentos (Thorne et al., 2018).

Existem poucos estudos que avaliam a transferência de micronutrientes ou elementos tóxicos entre solo, planta e animal no sistema de pastagem. Dada a importância do tema, nesse trabalho são investigados os níveis de Fe, Mn, Cu, Zn, Se, Co, Mo, Ni, Cr, Pb, As, Cd e Hg em amostras de solos, gramíneas, suplementos alimentares para bovinos e sangue de bovinos em pastagens em uma região do sul da Amazônia brasileira. Além disso, nesse estudo também são investigados esses elementos em amostras de músculo, rim e fígado de bovinos obtidas em mercados desta região. Assim, os objetivos da investigação desses elementos foram: a) fornecer informações descritivas sobre o seu conteúdo; b) investigar a transferência solo-planta-animal; c) avaliar a adequação das dietas dos bovinos às exigências e limites de consumo; d) avaliar o estado nutricional desses bovinos a pasto; e) avaliar a adequação de produtos cárneos de bovinos às exigências e limites recomendados para consumo humano, e; f) contribuir para uma melhor compreensão dos sistemas de produção animal baseados em pastagens.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área do estudo e descrições gerais

Esta pesquisa foi realizada em oito fazendas (I-VIII) que praticavam pecuária de corte em pastagens extensivas, localizadas em uma região do sul da Amazônia brasileira (Figura 1), durante o período de outubro de 2021 a março de 2022 (período chuvoso). Esta região está localizada no arco de desmatamento amazônico (Garcia et al., 2019), considerada uma das mais importantes fronteiras agrícolas deste bioma. Dentre essas fazendas, três estavam num raio de cinco km da ocorrência histórica de garimpo artesanal de ouro (Fazendas II, III e V).

Foram realizadas amostragens de solos, gramíneas e suplementos alimentares fornecidos aos rebanhos em todas as fazendas. Além disso, foi aplicado um questionário semiestruturado para obtenção de informações técnicas e produtivas e o histórico de manejo do rebanho de cada fazenda (Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil, Comitê de Ética em Pesquisa:

44321521.5.0000.5166). Informações gerais de cada fazenda e condições de fertilidade de macronutrientes são apresentadas no estudo de Silva et al (2024).

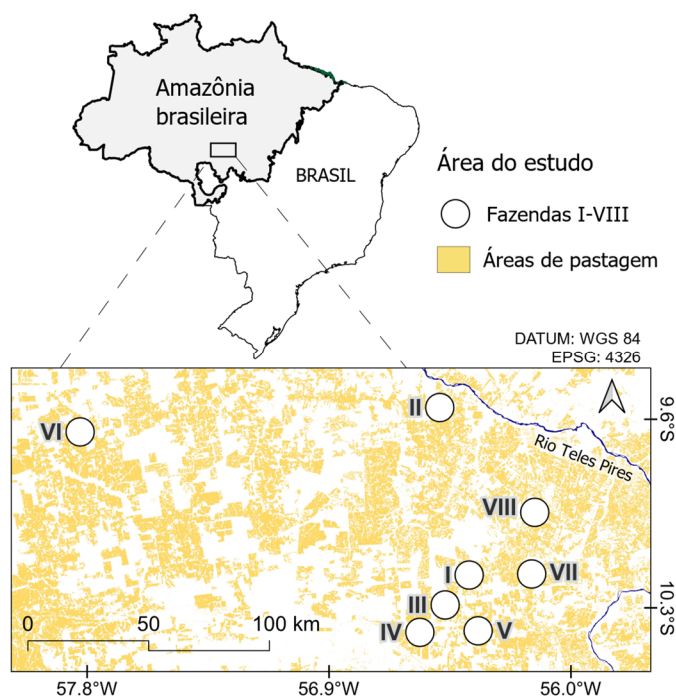


Figura 1. Localização da área do estudo e das fazendas. As feições geográficas das áreas de pastagem foram obtidas no MapBiomas (2023).

Amostras de sangue foram coletadas de rebanhos de fêmeas zebuínas da raça Nelore em fase de crescimento ou terminação para abate, de cinco fazendas (Fazendas I, II, III, IV e VI) (Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil, Comissão de Ética no Uso de Animais: Processo 001/2021). Somente na Fazenda VI foram incluídos dois rebanhos, totalizando amostras de sangue de seis rebanhos. Não foi possível coletar sangue dos rebanhos das fazendas V, VII e VIII, por dificuldades no transporte seguro dos animais até o local de manejo ou pela falta de instalações adequadas para o manejo seguro dos animais. Algumas informações gerais para cada rebanho são apresentadas na Tabela Suplementar S1.

Amostras de produtos cárneos de bovinos (músculo, rim e fígado) foram coletadas em mercados localizados na cidade de Alta Floresta, Estado de Mato Grosso - Brasil, onde está localizado um dos principais polos comerciais de carne bovina da região.

2.2 Procedimento amostral para coleta dos materiais para análise

Foram coletadas amostras de solo das pastagens de cada fazenda. A coleta de solo foi realizada na camada de 0,0-0,2 m em três pontos distantes pelo menos 50 m entre si. Em cada ponto amostral foi obtida uma amostra composta de três amostras individuais, com distância mínima de 10 m entre elas, totalizando 24 amostras. Cada amostra composta por aproximadamente 500 g de solo foi enviada ao laboratório para secagem e obtenção da terra fina seca ao ar, após passagem por peneira de 2 mm. Posteriormente, cada amostra foi macerada até passar por peneira de 150 µm, sendo então armazenada até o momento da análise química.

Foram realizadas amostragens de gramínea em cada pasto no qual os rebanhos estavam pastejando. Três pontos aleatórios na pastagem, medindo área de 0,8 por 0,8 m, foram cortados a uma altura de 5 cm acima do solo. Em laboratório, as folhas da gramínea foram separadas da bainha, secas a 60°C por 72 horas, moídas até a espessura de 1 mm e armazenadas sob vácuo até o momento da análise química.

Amostras de aproximadamente 500 g de suplemento alimentar foram coletadas no armazém de cada fazenda. Foram anotadas as informações dos rótulos e instruções de uso de cada suplemento. No laboratório, as amostras foram secas a 105°C por 72 horas para determinação do teor de umidade e moídas até a espessura de 1 mm. As amostras foram armazenadas em embalagens a vácuo até a realização das análises químicas.

As amostras de suplemento alimentar para bovinos foram classificadas em (a) **silagem de milho** - alimento com mais de 18% de fibra bruta na matéria seca (MS), fornecida em quantidades variáveis para bovinos em pastejo, contém pré-mistura mineral em sua composição; (b) **suplemento proteinado/energético** - alimento com menos de 18% de fibra bruta na MS, consumo de 500 a 2.700 g por unidade animal de 450 kg (UA) por dia, e tipicamente composta por grão de milho moído, farelo de soja e pré-mistura mineral; (c) **bloco mineral** - suplemento fornecido em blocos, consumo entre 100 e 450 g/UA por dia, sendo o melaço de cana um dos seus principais ingredientes; (d) **pó mineral** - consumo de 80 a 135 g/UA por dia, composto principalmente por mistura de rochas moídas e cloreto de sódio (NaCl), e; (e) **pré-mistura mineral** - ingrediente normalmente utilizado na silagem ou em

suplementos proteinados/energéticos, não consumida diretamente pelos animais. Mais informações sobre cada suplemento mineral amostrado podem ser vistas na Tabela Suplementar S2.

Quatro fêmeas da raça Nelore saudáveis de cada rebanho foram escolhidas aleatoriamente para coleta de sangue por venopunção jugular. Amostras de sangue foram coletadas em tubo de 10 mL com heparina sódica, centrifugadas por 20 minutos (10G) e em seguida foram pipetados cerca de 4 mL do plasma sanguíneo. As amostras de plasma sanguíneo foram então armazenadas sob refrigeração (4°C) e enviadas ao laboratório onde foram armazenadas a -20°C. Após a conclusão das amostragens do sangue de todos os rebanhos, as amostras de plasma sanguíneo armazenadas foram descongeladas, transferidas em alíquotas de 0,5 mL para tubos de 2 mL e posteriormente secas por 72 horas a 60°C. Após a secagem, os tubos com as amostras foram armazenados em embalagens a vácuo e conservados sob refrigeração (4°C) até a realização das análises químicas.

Amostras de músculo (*Longissimus dorsi*), rim e fígado de bovinos foram coletadas entre abril e maio de 2022 em oito estabelecimentos comerciais. Semanalmente foram retiradas quatro amostras de músculo, rim e fígado de diferentes mercados, pesando aproximadamente 300 g, até um total de 32 amostras de cada produto cárneo. Imediatamente após a coleta, as amostras foram enviadas ao laboratório, sob refrigeração (4°C). Gordura, tecido conjuntivo e ossos foram removidos, quando presentes. Cerca de 100 g de cada amostra de músculo, rim e fígado foram secas a 105°C para determinação do teor de umidade. Após a secagem, as amostras foram moídas e armazenadas sob vácuo e refrigeração (4°C) até a análise química.

2.3 Análises químicas

Todas as amostras foram analisadas por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) para determinação dos elementos Fe, Zn, Cu, Mn, Se, Co, Mo, Ni, Cr, Cd, Pb, As e Hg. Amostras de solo, gramínea, suplemento mineral e produtos cárneos foram maceradas, secas a 105°C, retiradas cerca de 0,3 g ($\pm 0,003$), adicionados 3 mL de HNO₃ (69%), 1 mL de água ultrapura, e a digestão foi realizada em micro-ondas por uma hora. Em seguida, a solução foi completada até 50 mL com água ultrapura e os elementos

determinados por ICP-MS. Para solos, este método é considerado pseudototal, pois a matriz cristalina não se decompõe completamente durante a digestão. Porém, é amplamente utilizado no contexto de avaliação ambiental, pois indica a quantidade potencialmente disponível do elemento no solo, que poderá se tornar disponível a longo prazo (Alloway, 2013).

Para dissolver as amostras de plasma sanguíneo desidratado, foram adicionados 0,5 mL de água ultrapura (Milli-Q) e 0,5 mL de HNO₃ (69%). Essa solução foi então transferida para tubos de 5 mL, nos quais foram adicionados 0,3 mL de H₂O₂ e submetidos à centrifugação por 5 minutos. Na etapa seguinte, a solução foi mantida em estufa por 12 horas a 60°C para completa dissolução das amostras. Após esse período, o volume foi completado para 4 mL com água ultrapura e os elementos também foram determinados por ICP-MS.

Para o controle analítico de solo, gramínea, suplemento alimentar e produtos cárneos, foram incluídas amostras de referência certificadas em cada lote de análises. Para controle analítico do plasma sanguíneo, foi incluída uma amostra de soro padrão, enriquecida em 5, 10 e 50 µg/L com os elementos-traço de interesse. Brancos analíticos foram incluídos em cada lote e os resultados correspondentes foram utilizados para calcular os limites de detecção (LD), de acordo com a seguinte equação: [média da amostra “branco” + (3 × desvio padrão)]. Os níveis das amostras de referência e as taxas de recuperação dos métodos são mostrados nas Tabelas 1 e 2.

Além disso, todas as amostras, exceto plasma sanguíneo, foram analisadas usando um Analisador Direto de Mercúrio (Milestone DMA-80) para determinar os teores de Hg. Também foram analisados os teores disponíveis de Fe, Mn, Cu e Zn no solo por espectrometria de absorção atômica com chama (F-AAS), após extração com solução de Melich-1 (Teixeira et al., 2017).

2.4 Análises estatísticas

Foram realizadas estatísticas descritivas de elementos-traço (Fe, Mn, Zn, Cu, Se, Co, Mo, Ni, Cr, Cd, Pb, As e Hg) para solo e gramínea (oito fazendas), suplemento alimentar (silagem, proteinado/energético, bloco mineral, pó mineral e pré-mistura mineral), plasma sanguíneo bovino (seis rebanhos) e produtos cárneos bovinos (músculo, rim e fígado). Análises de correlação de

Tabela 1. Controle de qualidade para a análise de elementos-traço em solo, graminea, suplementos minerais e produtos cárneos.

Elemento (mg/kg)	MR Solo ¹			MR Folha de maçã ²			MR Trigo ³			MR Fígado bovino ⁴			MR Músculo de peixe ⁵		
	Cert.	Medido	Rec%	Cert.	Medido	Rec%	Cert.	Medido	Rec%	Cert.	Medido	Rec%	Cert.	Medido	Rec%
Fe	4.280,0	4.315,6	100,8	83,0	67,0	80,7	18,5	12,3	66,3	-	203,7	-	-	11,3	-
Mn	335,0	406,9	121,5	54,0	44,5	82,5	5,4	4,2	78,0	11,1	11,1	100,4	0,4	0,4	111,2
Zn	770,0	742,0	96,4	12,5	10,5	83,9	11,6	9,0	77,7	138,6	154,5	111,5	16,0	20,0	124,7
Cu	78,9	76,7	97,2	5,6	4,6	82,2	2,7	2,4	90,2	277,0	297,9	107,5	1,7	1,9	116,8
Mo	57,8	52,5	90,7	0,1	0,1	86,2	0,5	0,4	86,3	-	3,8	-	-	0,01	-
Co	60,1	59,0	98,2	0,1	0,1	84,4	-	0,0	-	-	0,2	-	-	0,01	-
Se	42,4	33,5	78,9	0,05	0,07	149,2	0,05	0,09	172,9	1,7	1,3	79,4	1,3	1,2	89,8
Ni	143,0	151,1	105,7	0,9	0,7	80,5	-	0,02	-	-	0,01	-	-	0,02	-
Cr	179,0	217,2	121,3	0,3	0,2	78,3	0,01	0,01	128,2	-	0,04	-	-	0,02	-
Pb	145,0	162,6	112,1	0,5	0,4	82,2	-	0,02	-	0,2	0,1	83,2	-	0,004	-
As	123,0	124,7	101,4	0,04	0,07	171,9	0,03	0,02	55,0	0,03	0,03	79,8	12,7	13,4	105,2
Cd	224,0	227,5	101,6	0,01	0,01	102,2	0,02	0,01	77,1	0,5	0,5	89,3	0,01	0,01	73,5
Hg	4,6	4,9	106,3	0,04	0,04	99,8	-	-	-	-	0,004	-	0,6	0,6	97,2

Abreviações: MR = Material de referência; Cert. = Certificado; Rec% = Recuperação percentual. ¹ MR SQC001 Soil. ² MR NIST 1515 Apple leaves. ³ MR GBW10011 Wheat. ⁴ MR 1-185 Bovine liver. ⁵ MR 4-BB422 Fish muscle.

Tabela 2. Controle de qualidade para análise de elementos-traço no plasma sanguíneo.

Elemento (µg/L)	Soro sanguíneo	Nível adicionado (µg/L)			Medido (µg/L)			Recuperação (%)		
		5	10	50	5	10	50	5	10	50
Fe	304,29	309,29	314,29	354,29	317,61	324,97	374,10	103	103	106
Mn	0,46	5,46	10,46	50,46	4,56	10,46	52,43	84	100	104
Zn	153,10	158,10	163,10	203,10	162,10	168,99	217,42	103	104	107
Cu	117,56	122,56	127,56	167,56	123,74	130,61	173,94	101	102	104
Mo	7,38	12,38	17,38	57,38	10,96	15,69	49,81	89	90	87
Co	0,10	5,10	10,10	50,10	3,95	9,32	48,16	77	92	96
Se	13,34	18,34	23,34	63,34	17,63	26,74	64,26	96	115	101
Ni	0,09	5,09	10,09	50,09	4,00	9,52	48,82	79	94	97
Cr	0,25	5,25	10,25	50,25	4,30	9,84	50,77	82	96	101
Pb	0,16	5,16	10,16	50,16	3,72	8,49	41,80	72	84	83
As	1,02	-	-	-	1,06	1,02	1,02	-	-	-
Cd	0,01	5,01	10,01	50,01	3,91	9,31	47,39	78	93	95
Hg	0,48	-	-	-	0,29	0,24	0,17	-	-	-

Pearson foram realizadas para elementos-traço entre solo e gramínea para avaliar possível transferência solo-plantas. A análise de regressão linear foi realizada para elementos com correlação $\geq 0,90$ e valor de $p \leq 0,001$.

O consumo total diário de MS assumido foi de 9,50 kg, considerando o peso vivo animal equivalente a uma Unidade Animal de 450 kg (UA). A quantidade diária assumida de consumo de cada suplemento alimentar foi equivalente à recomendação apresentada no rótulo de cada produto amostrado, calculada sobre a MS (Tabela Suplementar S2). A quantidade diária assumida de gramínea consumida foi a diferença entre o consumo diário total (9,50 kg) e o consumo diário de cada suplemento alimentar.

A ingestão de elementos-traço pelos bovinos foi estimada considerando o consumo combinado de suplemento alimentar e gramínea pela seguinte equação:

$$DI = \frac{(S \times ES) + (G \times EG)}{9,50}$$

Onde: DI é a ingestão diária do elemento por UA, em mg/kg MS; S é o consumo diário do suplemento alimentar por UA, em kg na MS; ES é o teor do elemento no suplemento alimentar, em mg/kg na MS; G é o consumo diário de gramínea por UA, em kg na MS; EG é o teor do elemento na gramínea, em mg/kg na MS; e 9,50 é o consumo diário de alimento por UA, em kg na MS.

A ingestão de elementos-traço provenientes do consumo de músculo, rim e fígado de bovinos foi estimada para diferentes categorias humanas (sexo, idade e peso corporal), sendo: homens, 30 anos, 80 kg; mulheres, 30 anos, 65 kg; meninos, 16 anos, 58 kg; meninas, 16 anos, 53 kg, crianças, 6 anos, 20 kg (CDC, 2022; Fryar et al., 2018; IOM, 2001). Foi assumido um consumo mensal fixo de 1.000 g de músculo, 100 g de rim e 100 g de fígado para todas as categorias (OCDE/FAO, 2023). O conteúdo dos elementos utilizados para cada alimento foi a faixa entre o percentil 10 e 90 dos resultados descritivos de músculo, rim e fígado de bovinos.

A ingestão relativa mensal (RMI) do consumo de músculo, rim e fígado em relação à ingestão diária de referência ajustada para 30 dias (RDI_{30d}) ou nível superior tolerável ajustado para 30 dias (UL_{30d}), foi obtida pela seguinte equação:

$$RMI = \frac{FC \times EF}{IRL} \times 100$$

Onde: RMI é a ingestão relativa mensal em relação ao RDI_{30d} ou UL_{30d}, em percentual (%); FC é a quantidade mensal do produto cárneo consumido, em kg (1,0 para músculo; 0,1 para rim; e 0,1 para fígado); EF é o teor do elemento no produto cárneo, em mg/kg; IRL é o RDI_{30d} ou UL_{30d}, em mg/kg; e 100 é o ajuste para porcentagem.

Os valores dietéticos de referência para ingestão humana foram obtidos da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura/Organização Mundial da Saúde (FAO/WHO), da Autoridade Europeia para a Segurança dos Alimentos (EFSA) e do Instituto de Medicina (IOM). Os valores do RDI_{30d} ou UL_{30d} para as categorias utilizadas neste estudo são mostrados na Tabela Suplementar S3.

3. RESULTADOS

3.1 Elementos-traço no solo, gramínea e suplemento alimentar

Os resultados descritivos dos teores pseudototais de elementos-traço no solo são mostrados na Figura 2. Manganês, Cr, Pb, As, Cd e Hg estavam na faixa típica para solos mundiais, enquanto Fe (Fazendas IV, VII e VIII) foi o único acima dessa faixa. Os teores de Zn estavam predominantemente abaixo de 30 mg/kg, ou seja, teores muito baixos. Cobalto, Mo e Ni variaram entre teores típicos ou muito baixos. O Cu e o Se encontravam-se predominantemente numa faixa muito baixa, apesar de estarem dentro dos níveis típicos dos solos mundiais. Uma grande variação pode ser observada nos teores dos elementos entre as fazendas (Figura 2). Vale ressaltar que foram encontrados teores mais elevados de Se na fazenda II; Mo nas fazendas IV, e, V; e Hg nas fazendas II e VI.

Os teores de Fe, Mn, Zn e Cu disponíveis extraídos pela solução Mehlich-1 tiveram as seguintes médias e desvios padrão, em mg/kg: 81,71±13,57; 21,53±13,11; 0,58±0,21; 0,57±0,36, respectivamente (Figura Suplementar S1). Esses teores, em relação aos teores pseudototais (Figura 2), foram equivalentes a 0,3±0,2% para Fe, 10,8±3,0% para Mn, 3,6±1,3% para Zn e 8,1±5,1% para Cu. Dentre esses elementos, considerando as tabelas de

interpretação da fertilidade do solo de Ribeiro et al. (1999), apenas o Fe apresentou bom nível para pastagens em todas as fazendas (Figuras Suplementar S1; > 31 mg/kg), enquanto Zn e Cu apresentaram níveis deficientes (< 1,6 e 1,3 mg/kg, respectivamente). O Mn apresentou níveis deficientes ou intermediários em três fazendas (Fazenda IV, V e VII; < 9,0 mg/kg).

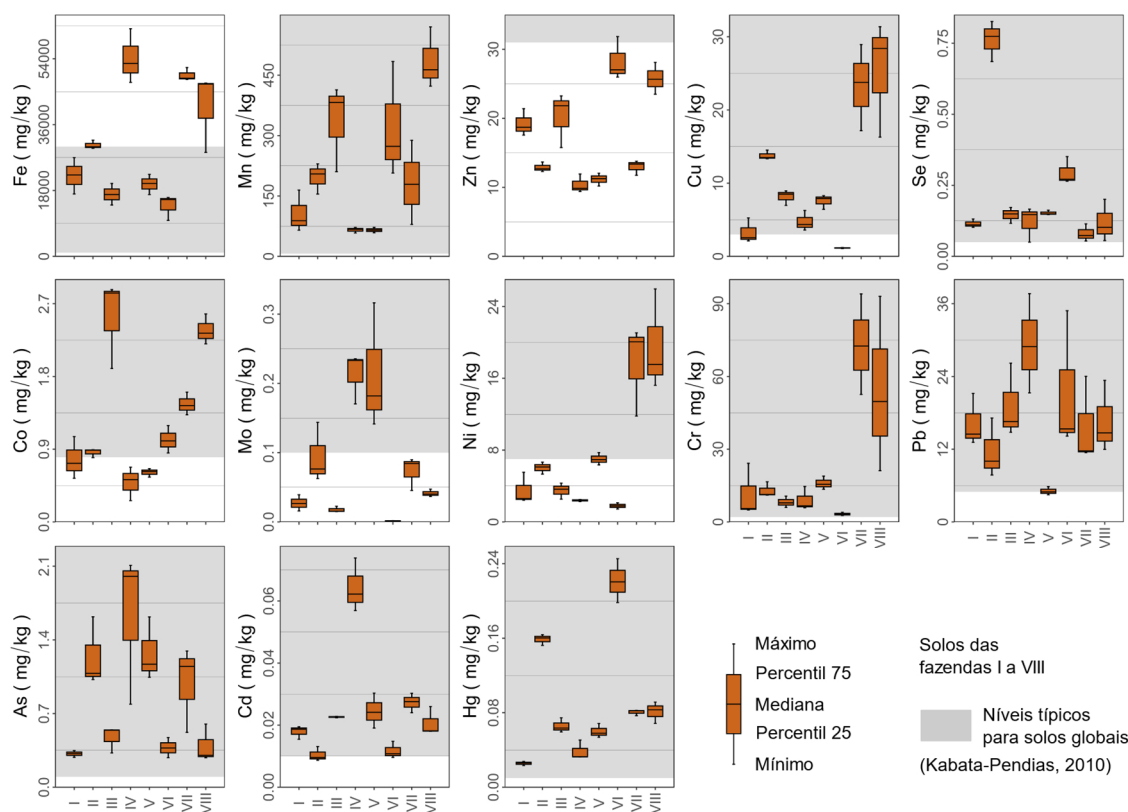


Figura 2. Estatísticas descritivas dos teores pseudototais de elementos-traço no solo de pastagens das fazendas I-VIII, localizadas na região sul da Amazônia.

Os teores de elementos-traço na graminéia são mostrados na Figura 3. Altos teores Mn foram encontrados em todas as pastagens. Os níveis desse elemento estavam acima de 60 mg/kg, ou seja, níveis adequados para atender às necessidades de bovinos de corte (Benedeti et al., 2023; NRC, 2016). Os teores medianos de Fe, Zn, Cu, Se e Co foram predominantemente deficientes conforme os requerimento para zebuínos (Benedeti et al., 2023). Os demais elementos também apresentaram teores muito baixos para graminéas. Molibdênio, Ni e Cr, apesar de serem micronutrientes para bovinos, não possuem níveis de requerimento estabelecidos pelo NRC (2016), pois em condições naturais não são relatados casos de deficiência. Todavia, Benedeti et

al. (2023) tem recomendado o Mo e Cr para zebuínos para suprir manutenção e ganho de peso, os quais, sob esse critério, foram predominantemente deficientes nessas gramíneas. Chumbo, As, Cd e Hg são elementos tóxicos, e nesse caso, estavam abaixo dos respectivos limites tolerados na alimentação de bovinos de corte, de acordo com as recomendações do NRC (2016).

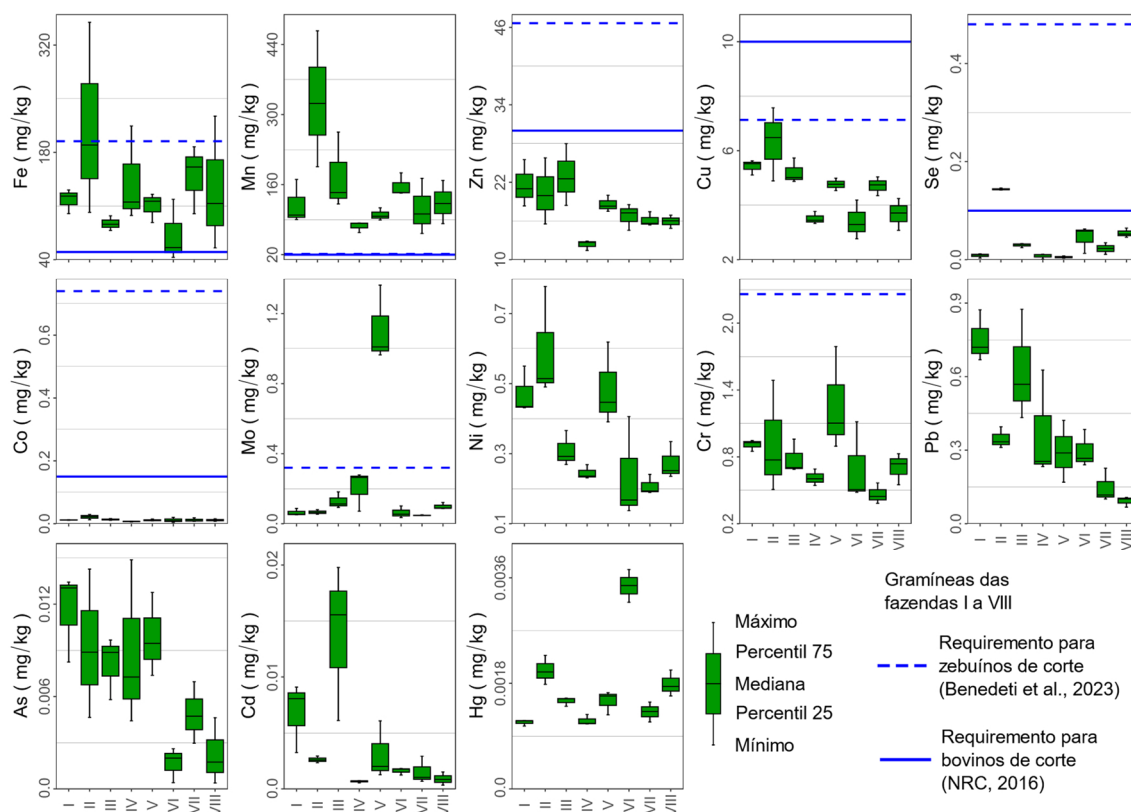


Figura 3. Estatísticas descritivas de elementos-traço na gramínea (na matéria seca) de pastagens das fazendas I-VIII, localizadas na região Sul da Amazônia. Não há exigência estabelecida de Mo, Ni e Cr para bovinos. Chumbo, As, Cd e Hg são elementos tóxicos.

Os maiores teores de Se, Mo e Hg na gramínea ocorreram nas fazendas II, V e VIII, respectivamente. Os teores mais altos desses elementos também foram encontrados no solo dessas fazendas. Porém, houve alta correlação entre solo e gramínea apenas para Se e Hg (correlação de Pearson $\geq 0,9$; $p \leq 0,001$; Figura Suplementar S2). As regressões lineares entre Hg no solo e gramínea e Se no solo e gramínea são mostradas na Figura Suplementar S3. Os coeficientes de determinação foram 0,88 para Hg ($p < 0,001$) e 0,83 para Se ($p < 0,001$).

Os teores de elementos-traço entre as categorias de suplementos alimentares variaram amplamente (Figura 4). Em geral, os teores estiveram na

seguinte ordem: pré-mistura mineral > pó mineral > bloco mineral > proteinado/energético > silagem de milho. Algumas exceções foram altos teores de Fe, Ni, Pb e Cd na maioria das amostras de pó mineral, e altos teores de Cr e As em uma amostra de bloco mineral.

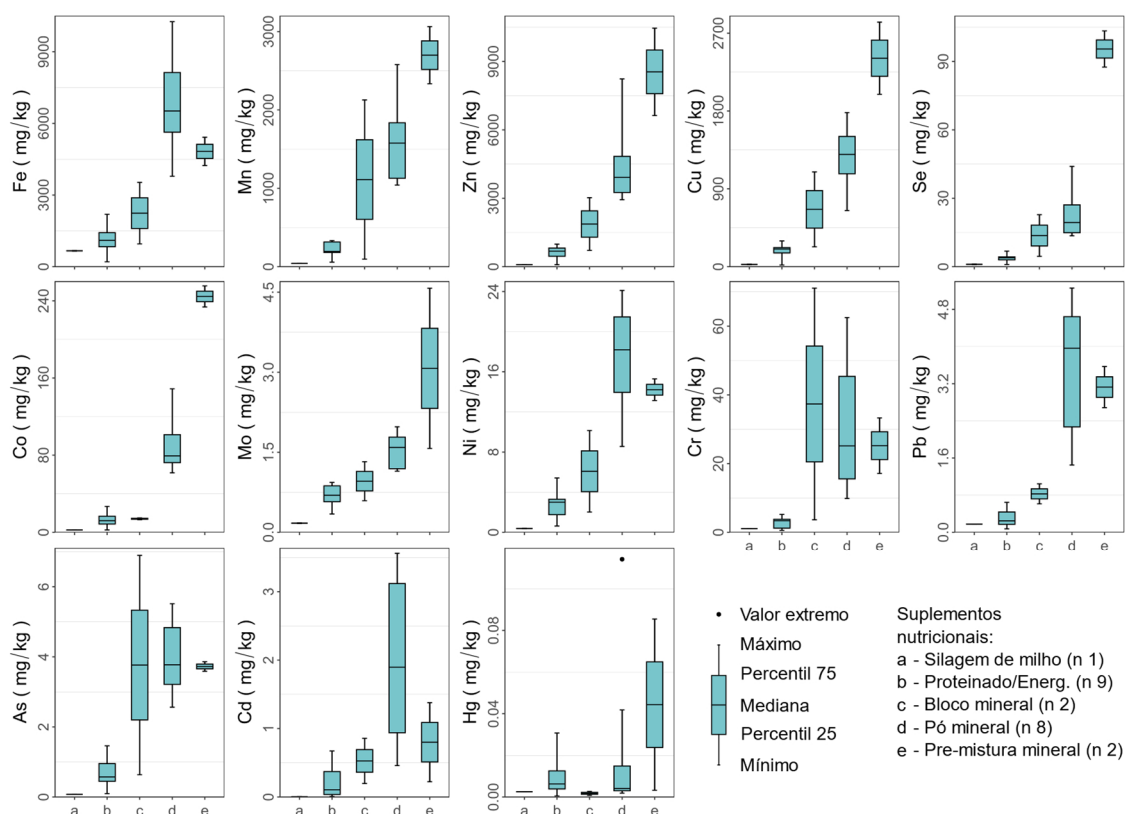


Figura 4. Estatísticas descritivas de elementos-traço no suplemento alimentar bovino (na matéria seca) oferecido a rebanhos bovinos criados em fazendas localizadas na região Sul da Amazônia. n = número de amostras obtidas de cada suplemento alimentar.

3.2 Estimativa da ingestão de elementos-traço pelos rebanhos

O consumo estimado combinado de cada suplemento alimentar e gramínea e a ingestão estimada dos elementos-traço são fornecidos nos materiais suplementares (Tabela Suplementar S4, Tabela Suplementar S5 e Tabela Suplementar S6). Apenas alguns exemplos em que os elementos na dieta ficaram abaixo, marginal ou acima dos requerimentos e limites de ingestão são mostrados na Figura 5. O Fe e o Cu em duas dietas apresentaram estimativas de ingestão acima dos limites tolerados para bovinos; para o Fe, no entanto, isso ocorreu, apenas quando os suplementos foram combinados com gramínea com alto teor deste elemento (Figura 5). Considerando os

requisitos para zebuínos de corte (Benedeti et al., 2023), que são geralmente superiores em relação àqueles do NRC (2016), são mostradas algumas dietas em que Cu, Zn, Se e Co foram deficientes ou marginal deficientes, variando em algumas condições dependendo do teor do elemento na gramínea (Figura 5).

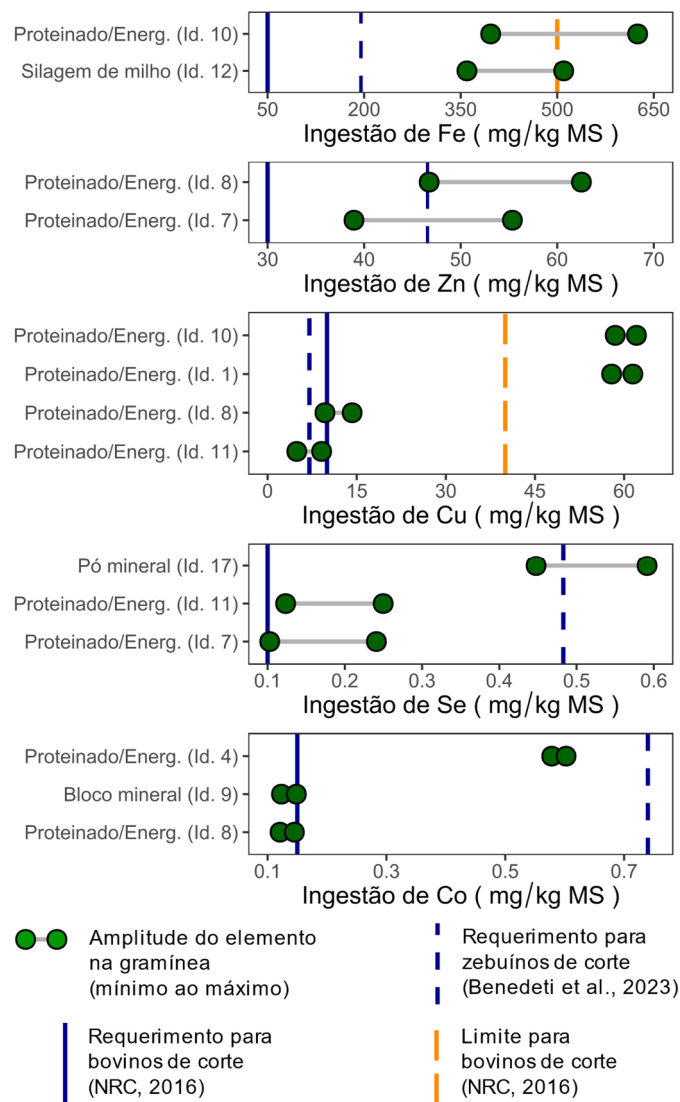


Figura 5. Estimativa do consumo de elementos-traço por bovinos a pasto através do consumo combinado de gramínea e suplemento alimentar na região sul da Amazônia. Esta estimativa considera uma faixa entre os teores mínimo e máximo de cada elemento na gramínea, como segue em mg/kg MS: Fe 43,07-349,83; Zn 11,43-27,99; Cu 2,77-7,57; e em µg/kg MS: Se 0,79-145,94; e Co 4.19-29.51. A estimativa de ingestão para todos os elementos e combinações de gramínea e suplemento alimentar podem ser vistas nas Tabelas Suplementares S4, S5 e S6.

3.3 Elementos-traço no plasma sanguíneo bovino e em produtos cárneos

Os teores dos elementos-traço no plasma sanguíneo são mostrados na Figura 6. Ferro, Mn, Zn, Cu e Co estavam na faixa adequada para bovinos de corte ou ligeiramente superiores. Apenas o rebanho II para Se e IV para Mo ficaram nesta faixa considerada adequada, enquanto os demais rebanhos ficaram abaixo. Esses rebanhos que apresentaram os maiores teores de Se e Mo no plasma sanguíneo coincidem com os maiores teores de Se e Mo no solo e na gramínea. Os demais elementos (Ni, Cr, Pb, As, Cd e Hg) estavam próximos de níveis tipicamente reportados para bovinos de corte saudáveis.

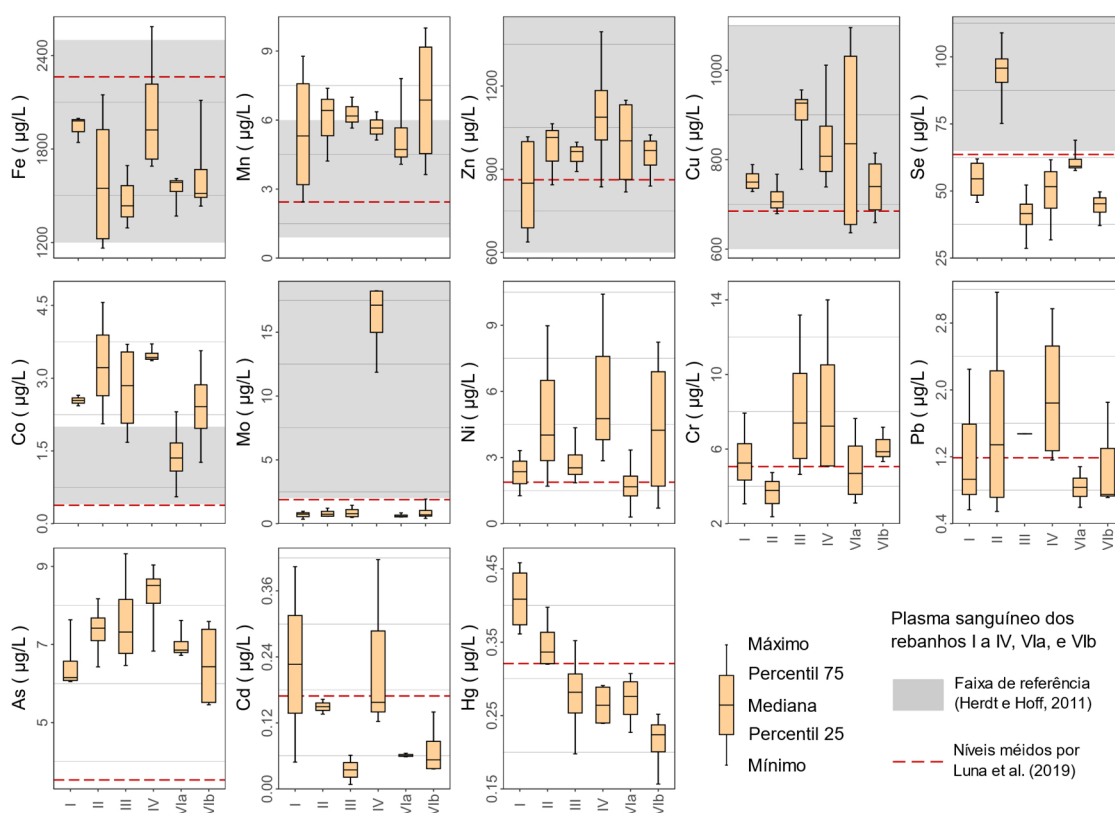


Figura 6. Estatísticas descritivas de elementos-traço no plasma sanguíneo dos rebanhos I a IV, VIa e VIb de fazendas localizadas na região Sul da Amazônia. Os elementos Ni, Cr, Pb, As, Cd e Hg não tiveram faixas de referência determinadas por Herdt e Hoff (2011).

Na Figura 7 são apresentados os teores dos elementos-traço no músculo, rim e fígado de bovinos obtidos em mercados localizados na região sul da Amazônia. O músculo apresentou teores mais baixos em relação ao rim e ao fígado, exceto Zn e Cr, que foram altos, semelhante ao observado no fígado. O rim apresentou os maiores teores de Se, As, Cd e Hg, enquanto o fígado

apresentou os maiores teores de Fe, Mn, Cu, Co, Mo e Ni. Os teores de chumbo foram semelhantes entre fígado e rim, embora maior amplitude tenha ocorrido no fígado. Nenhuma amostra apresentou teores de elementos-traço superiores aos limites permitidos para consumo humano (ANVISA, 2022; EFSA, 2024; FAO/WHO, 2020; FDA, 2024).

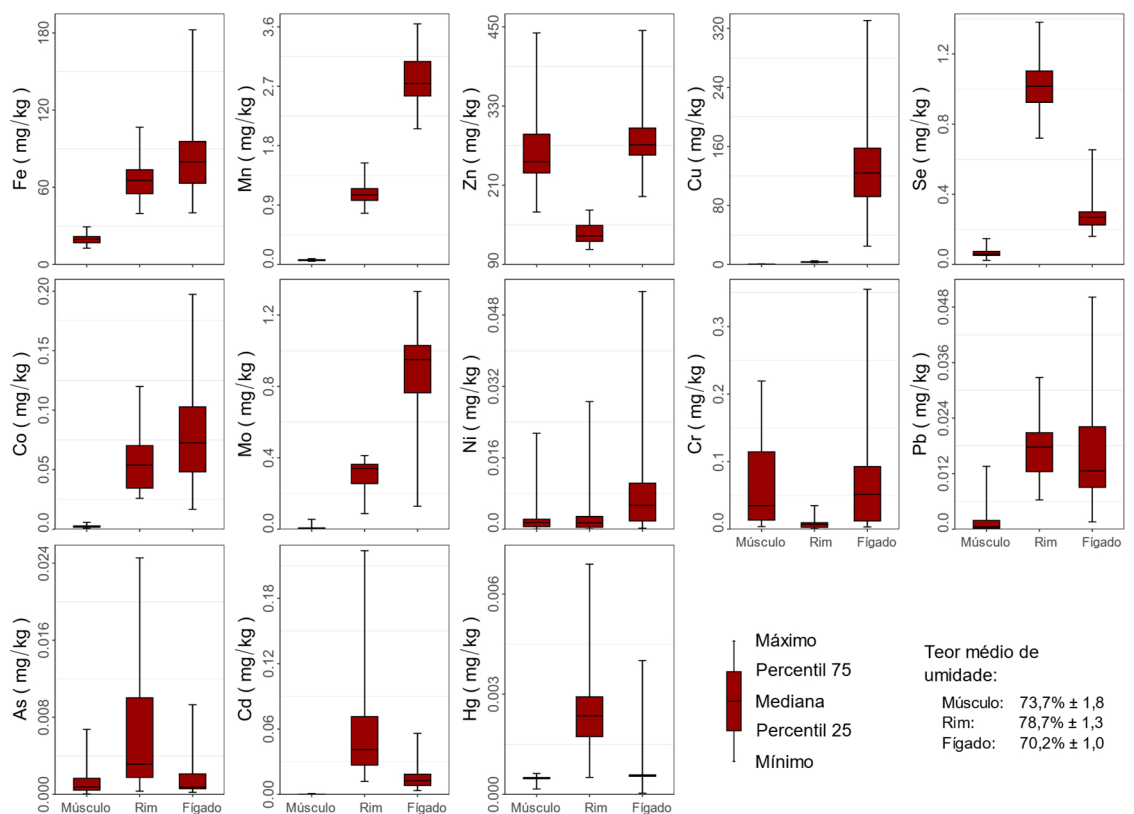


Figura 7. Estatísticas descritivas de elementos-traço no músculo, rim e fígado (peso úmido) obtidos em mercados localizados na região sul da Amazônia. As tabelas com os percentis mínimo, 10, 25, 50, 75, 90 e máximo podem ser visualizadas nas Tabelas Suplementares S7, S8 e S9.

3.4 Estimativa da ingestão de elementos-traço para humanos via consumo de produtos cárneos

Na Figura 8 é apresentada a estimativa da ingestão dos elementos-traço Fe, Mn, Zn, Cu, Se, Mo e Cr (micronutrientes para humanos), através do consumo de músculo, rim e fígado bovinos, considerando algumas categorias humanas, e um período mensal. O consumo de 1.000 g de músculo representou uma contribuição muito elevada em relação à ingestão de Zn, atingindo RMI em relação ao RDI_{30d} acima de 200% para crianças, e acima de 50% para as demais categorias. Além disso, representa também uma importante contribuição em

relação ao consumo de Fe, Se e Cr, especialmente o percentil 90 dos respectivos teores encontrados no músculo. O rim destacou-se pela sua contribuição para os níveis de ingestão de Se e Mo, enquanto o fígado para Cu e Mo, apesar da estimativa assumir um consumo de miudezas de apenas 100 g por mês.

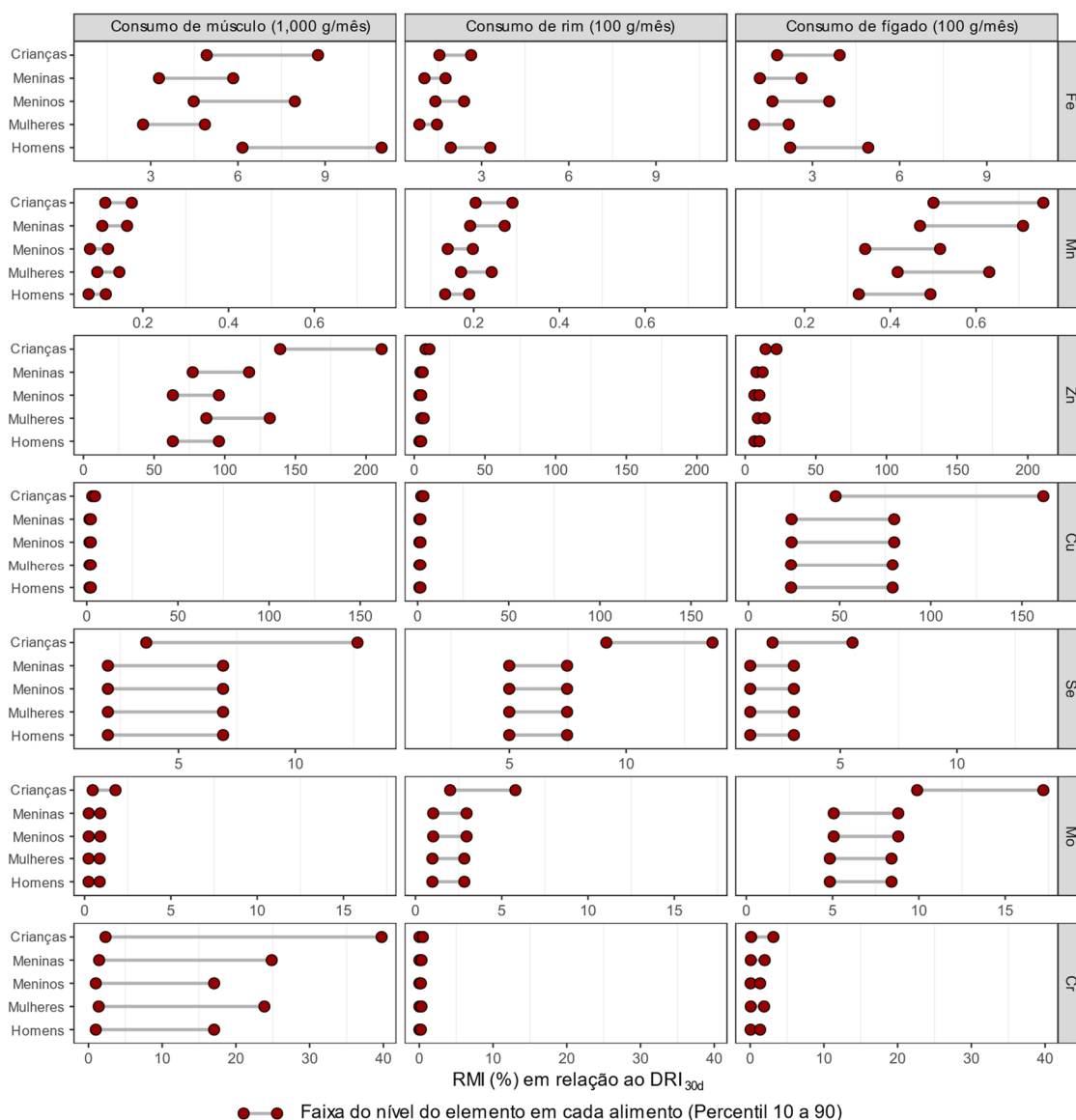


Figura 8. Estimativa da ingestão mensal relativa (RMI) em relação aos de referência ajustados para 30 dias (DRI_{30d}) para categorias humanas pelo consumo de músculo, rim e fígado de bovinos obtidos em mercados localizados na região Sul da Amazônia. As seguintes idades e pesos corporais foram assumidos para categorias humanas: crianças, 6 anos, 20 kg; meninas, 16 anos, 53 kg; meninos, 16 anos, 58 kg; mulheres, 30 anos, 65 kg; e homens, 30 anos, 80 kg. O conteúdo dos elementos nos alimentos foi a faixa entre o percentil 10 e 90 dos resultados descritivos de músculo, rim e fígado de bovinos (Tabelas suplementares S7, S8 e S9).

Os níveis de ingestão em relação ao UL_{30d} foram estimados para Ni, Pb, As, Cd e Hg, e estão apresentados na Figura 9. As estimativas de ingestão de Ni, As e Hg, considerando as quantidades de alimentos consumidos, atingiu o RMI em relação ao UL_{30d} inferior a 0,25% para todas as categorias humanas. Chumbo e Cd tiveram os maiores RMIs em relação ao UL_{30d} para crianças, atingindo cerca de 2% para Pb proveniente do músculo, rim e fígado, e acima de 5% para Cd proveniente do rim.

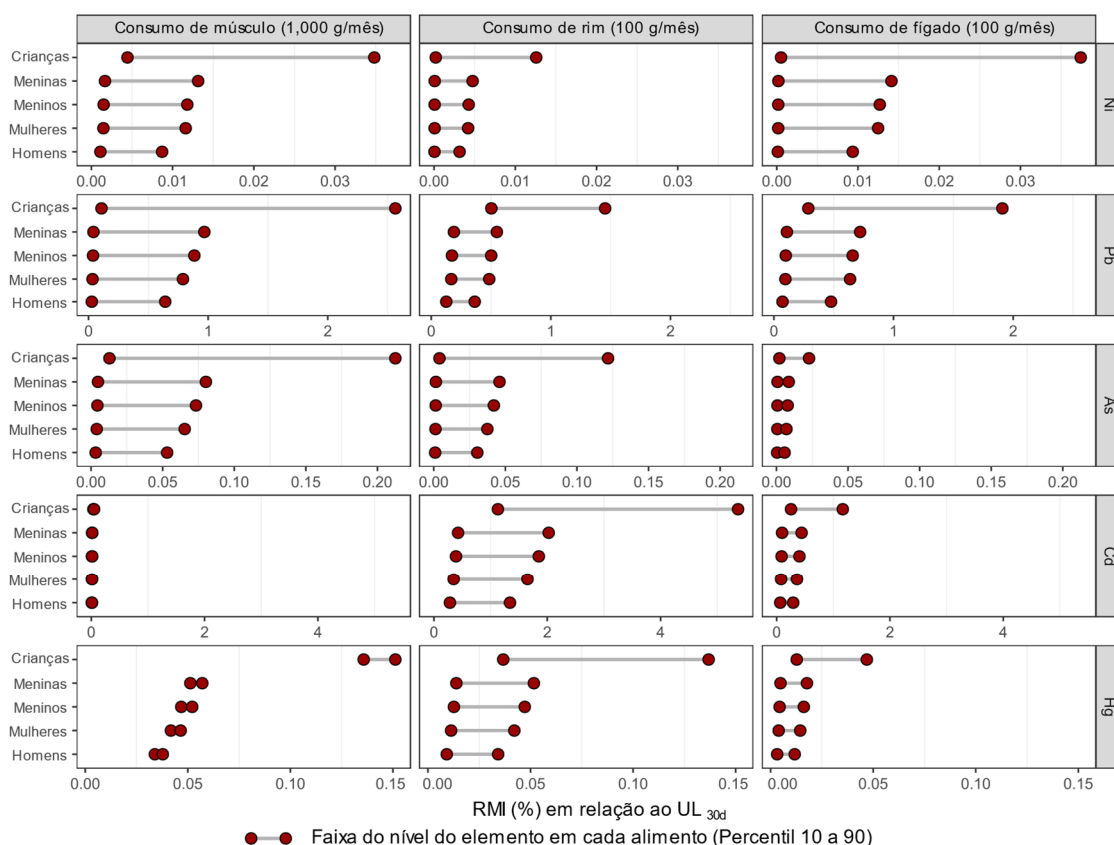


Figura 9. Estimativa da ingestão relativa mensal (RMI) em relação aos níveis superiores toleráveis ajustados para 30 dias (UL_{30d}) para categorias humanas pelo consumo de músculo, rim e fígado de bovinos obtidos em mercados localizados na região Sul da Amazônia. As seguintes idades e pesos corporais foram assumidos para categorias humanas: crianças, 6 anos, 20 kg; meninas, 16 anos, 53 kg; meninos, 16 anos, 58 kg; mulheres, 30 anos, 65 kg; e homens, 30 anos, 80 kg. O conteúdo dos elementos nos alimentos foi a faixa entre o percentil 10 e 90 dos resultados descritivos de músculo, rim e fígado de bovinos (Tabelas Suplementares S7, S8 e S9).

4. DISCUSSÃO

Os teores de micronutrientes ou elementos tóxicos no solo obtidos pela digestão pseudototal fornecem indicações do estado de saúde do solo e são importantes para a avaliação ambiental (Alloway, 2013). Isto significa que níveis muito elevados podem indicar contaminação, enquanto níveis baixos geralmente refletem a pobreza natural na rocha. No presente estudo, os elevados teores de Fe observados no solo estão relacionados à gênese dos Latossolos e Argissolos (Santos et al. 2018) na região tropical e, portanto, não representam contaminação. Baixos teores de diversos micronutrientes, como Zn e Cu, indicam possíveis deficiências desses elementos para o crescimento e estabelecimento de pastagens (Ribeiro et al. 2019). Além disso, o uso contínuo dessas pastagens para pastoreio animal, associado às baixas taxas de reposição de nutrientes, causa exaustão do solo e resulta em baixa produtividade e degradação das pastagens (Silva et al., 2024).

Os solos das fazendas que apresentaram os maiores teores de Se, Mo e Hg provavelmente refletem a variações dos processos pedogenéticos desta região, embora estes teores sejam considerados normais para solos globais. Não foram relatados uso de insumos fertilizantes contendo Se ou Mo em nenhuma fazenda estudada, o que sugere sua ocorrência natural. Os níveis seguros desses elementos para os solos brasileiros são de até 5 mg/kg de Se e 30 mg/kg de Mo (CONAMA, 2009), ou seja, níveis muito superiores aos observados neste estudo. Particular preocupação ocorre em relação aos teores de Hg, devido ao risco de exposição desses agroecossistemas ao Hg proveniente do garimpo artesanal e dos incêndios que ocorrem nesta região (Crespo-Lopez et al., 2021; Michelazzo et al., 2010). Para solos brasileiros, níveis de Hg inferiores a 0,5 mg/kg são considerados seguros (CONAMA, 2009). No entanto, níveis de Hg de até 0,96 mg/kg são relatados para solos não contaminados na Amazônia (Fernandes et al., 2018). Portanto, os teores de Hg nessas fazendas que chegam a 0,24 mg/kg parecem naturais, o que também está em linha com os níveis naturais relatados para vários locais da Amazônia (Lima et al., 2022).

Os teores disponíveis de micronutrientes para as plantas em relação aos teores pseudototais representam geralmente pequenas frações, que variam

dependendo de vários fatores, por exemplo, mineralogia do solo, pH ou matéria orgânica do solo (López-Mateo et al., 2023). Assim, mesmo em solos tropicais com teores de elementos tipicamente elevados – determinados após digestão pseudototal – podem ocorrer teores deficientes para a nutrição das plantas (Prado, 2021). Neste contexto, é importante destacar a necessidade do manejo do solo para fornecer um suprimento adequado de nutrientes para o estabelecimento dessas pastagens, principalmente Zn e Cu, que são tipicamente deficientes nesses solos.

No geral, apesar da predominância de correlações fracas para elementos entre solo e gramínea (Figura Suplementar S2), os teores dos elementos na gramínea foram proporcionais aos do solo. Em resumo, níveis adequados de Mn ou níveis deficientes de Zn, Cu, Se, Co e Mo na gramínea podem ser explicados pelos níveis desses elementos no solo. Diante disso, destaca-se também a importância de considerar o nível do elemento no solo no planejamento da suplementação nutricional do rebanho. Assim, a suplementação excessiva pode ser reduzida onde a pastagem já atende às necessidades do animal, ou a oferta pode ser melhorada onde as deficiências são severas. Uma particularidade foi observada em relação aos teores de Fe, pois apesar desse elemento ocorrer em níveis elevados no solo, também há elevado requerimento para zebuínos, de modo que nessas condições estudadas permanece a necessidade da suplementação do Fe para bovinos em pastagem.

A variedade de suplementos alimentares fornecidos aos bovinos na Amazônia é muito ampla, apesar disso, a amostragem realizada nas fazendas já permite observar alguns aspectos relacionados à suplementação mineral. Em condições em que as pastagens são severamente deficientes em determinados micronutrientes, como Cu e Zn, alguns suplementos não atendem às necessidades do animal, enquanto outros fornecem quantidades muito superiores às necessidades, aproximando-se ou mesmo ultrapassando os limites máximos tolerados pelos animais. Além disso, a variedade de solos e pastagens na Amazônia também é muito maior do que a região amostrada, e isso destaca a necessidade de desenvolver estratégias de nutrição do gado em nível de rebanho. Ou seja, as recomendações genéricas de nutrição animal normalmente assumidas para a região amazônica podem muitas vezes ser inadequadas para condições reais de pastejo.

A avaliação do estado nutricional dos animais através da análise do plasma sanguíneo revelou baixos níveis de Mo e Se em rebanhos que pastejavam onde esses elementos eram pobres no solo e na gramínea. O baixo teor de Mo no plasma sanguíneo não parece ser um problema, pois este elemento não está associado a deficiências em condições práticas (NRC, 2016; Suttle, 2022). Além disso, baixos teores de Mo na dieta podem favorecer a absorção de Cu, que ocorre em níveis extremamente baixos nessas pastagens. No entanto, garantir que a suplementação de Cu não exceda o limite tolerado de 40 mg/kg de MS da dieta é particularmente importante nestas condições, para prevenir o risco de intoxicação por Cu onde o Mo é muito baixo. Por exemplo, a intoxicação por Cu já foi reportada para bovinos Nelore à pasto, levando à morte de vários animais que consumiam altas quantidades de suplementos com níveis de Cu de 50 mg/kg (Martins et al., 2020).

Os baixos teores de Se no plasma sanguíneo de alguns rebanhos indicam que os suplementos alimentares disponíveis não proporcionaram um fornecimento adequado deste elemento na dieta. Isto provavelmente ocorre porque as fontes minerais de Se apresentam baixa biodisponibilidade desse elemento. É bem reconhecido que fontes inorgânicas de Se, como o selenato (SeO_4^{2-}) e o selenito (SeO_3^{2-}), são de baixa biodisponibilidade para bovinos; portanto as fontes orgânicas de Se são mais apropriadas (Khalili et al., 2019; Mehdi e Dufrasne, 2016). Isto é consistente com os resultados deste estudo, uma vez que o rebanho pastejando onde ocorreu o maior teor de Se na gramínea foi o único rebanho com estado adequado de Se. Adicionalmente, também deve ser destacada a importância do solo no fornecimento de nutrientes ao rebanho (Figura Suplementar 3B).

Os teores dos elementos tóxicos Pb, Cd, As e Hg no plasma sanguíneo bovino estavam normais. A alta correlação de Hg entre solo e gramínea (Figura Suplementar 3A) resultou apenas em níveis muito baixos de Hg na gramínea, consequentemente, não afetou os níveis de Hg no sangue. Porém, teores elevados desses elementos no sangue geralmente são observados apenas em casos de intoxicação crônica ou aguda (Tahir e Alkheraije, 2023). Para melhor avaliar o nível de exposição ambiental dos animais a esses elementos, a análise de órgãos acumuladores como o rim e fígado são boas opções. Embora não tenha sido possível obter amostras de fígado e rim dos animais estudados,

assumimos que a amostragem em mercados da região permite considerar suficientemente os riscos de contaminação ambiental a que estes animais estão expostos.

Dados os teores de Pb, As, Cd e Hg no rim ou fígado de bovinos amostrados nos mercados localizados na região sul da Amazônia, observamos que estes foram predominantemente inferiores aos níveis relatados em vários países (Bilandžić et al. , 2010; Counotte et al., 2019; Drapal et al., 2021; Hashemi, 2018; Khalafalla et al., 2011; Miedico et al., 2016; Ogbomida et al., 2018; Skalny et al., 2019), incluindo o Brasil (Alkmim Filho et al., 2014). Isto indica que os bovinos criados nesta região estão expostos a baixos níveis destes elementos tóxicos. Esse resultado decorre da dieta desses bovinos, em que as pastagens são o principal alimento, e apresentam níveis muito baixos desses elementos. Geralmente esses animais são criados a pasto, recebendo baixas quantidades de suplementos alimentares até completar a fase de crescimento e iniciar a fase de acabamento de carcaça, ou seja, por volta dos 24 a 30 meses de idade. Desde então, dietas mais concentradas são fornecidas por um curto período (cerca de três meses), às vezes ainda a pasto, ou em confinamento até atingir o peso de abate.

Em relação aos micronutrientes presentes no músculo, rim e fígado de bovinos, esses alimentos podem ser considerados fontes ricas em diversos elementos para a nutrição humana. O músculo geralmente tem teores mais baixos desses elementos em comparação com as miudezas, no entanto, os teores de Zn e Fe no músculo foram altos. Além disso, os baixos níveis de elementos tóxicos nestes alimentos ajudam a aumentar o seu valor nutricional. Mesmo as miudezas (rim e fígado), que se sabe acumularem elementos tóxicos, não atingiram níveis que representassem uma ameaça significativa à saúde humana.

Pode ser necessária atenção para Pb e Cd no músculo, rim e fígado de bovinos, pois atingiram os níveis mais elevados de RMI em relação ao UL_{30d}. Estes níveis mais elevados provêm provavelmente de animais tardios, embora não tenha sido possível determinar a idade dos animais a partir de amostras obtidas no mercado. Nesta região da Amazônia estima-se que mais de 25% dos animais sejam abatidos com mais de 36 meses de idade (Skidmore et al., 2022). Assim, estratégias que reduzam a idade média de abate dos animais poderiam

reduzir o tempo de exposição à bioacumulação e os teores desses elementos nos alimentos. Garantir o fornecimento de suplementos alimentares com baixos níveis de elementos tóxicos pode ser essencial. Além disso, o monitoramento do solo e das pastagens ajuda a identificar áreas onde podem ocorrer níveis mais elevados desses elementos e, portanto, identificar onde há maior risco de exposição ambiental.

Esses resultados contribuem para a compreensão da importância do uso racional dos solos, das pastagens e da suplementação alimentar em sistemas de produção animal baseados em pastagens. O desenvolvimento de estratégias sustentáveis para sistemas de pastagens, portanto, deve considerar, entre muitos aspectos sociais, econômicos e ambientais, as inter-relações de micronutrientes e elementos tóxicos entre os compartimentos ambiente-animal-humano. Vimos que a variação natural dos micronutrientes no ambiente são decisivas para o equilíbrio das formulações dietéticas para bovinos criados nessas condições. Por fim, destacamos a importância de uma perspectiva holística e integrada dos componentes dos sistemas de produção baseados em pastagens para o fornecimento de alimentos com baixos níveis de elementos tóxicos e bons níveis de micronutrientes, a fim de contribuir para a saúde ambiental, animal e humana.

5. CONCLUSÃO

Os solos das fazendas estudadas apresentavam baixos teores dos micronutrientes Zn, Cu, Se, Co, Mo e Ni, e dos elementos tóxicos Pb, As, Cd e Hg. As pastagens refletiram elementos do solo, com baixos teores de Zn, Cu, Se, Co, Mo, Ni, Pb, As, Cd e Hg.

Os suplementos alimentares estudados apresentaram grande variação de micronutrientes, podendo resultar em dietas com níveis insuficientes ou excessivos para os bovinos. As deficiências ou excessos de micronutrientes nas dietas desses bovinos também podem ser aumentadas pela variação dos níveis de cada elemento nas gramíneas.

Deficiências marginais de Se no plasma sanguíneo bovino foram identificadas na maioria dos rebanhos estudados, exceto onde houve teores mais elevados de Se no solo e na gramínea. Os elementos tóxicos (Pb, As, Cd

e Hg) no plasma sanguíneo estavam dentro da faixa considerada normal para bovinos saudáveis.

A criação de gado nessas pastagens da Amazônia proporcionou baixos níveis de elementos tóxicos e bons níveis de micronutrientes para consumo humano.

A suplementação alimentar para animais em sistemas de pastagem pode ser melhorada quando se consideram os teores de nutrientes no solo e na pastagem.

A avaliação integrada dos componentes do sistema de produção animal à pasto pode favorecer a identificação das estratégias para melhorar a sustentabilidade desse sistema de produção e contribuir desde a qualidade ambiental até a saúde humana.

6. REFERÊNCIAS

- Alexander, J., Benford, D., Cockburn, A., Cravedi, J.-P., Dogliotti, E., Domenico, A. Di, Fernández-Cruz, M.L., Fürst, P., Fink-Gremmels, J., Galli, C.L., Grandjean, P., Gzyl, J., Heinemeyer, G., Johansson, N., Mutti, A., Schlatter, J., Leeuwen, R. van, Peteghem, C. Van, Verger, P., 2011. Statement on tolerable weekly intake for cadmium. EFSA J. 9. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.1975>
- Alkmim Filho, J.F., Germano, A., Dibai, W.L.S., Vargas, E.A., Melo, M.M., 2014. Heavy metals investigation in bovine tissues in Brazil. Food Sci. Technol. 34, 110–115. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612014005000013>
- Alloway, B.J. (Ed.), 2013. Heavy Metals in Soils, Environmental Pollution. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2022. INSTRUÇÃO NORMATIVA - IN No 160, DE 1º DE JULHO DE 2022. Estabelece os limites máximos tolerados (LMT) de contaminantes em alimentos.
- Arthington, J.D., Ranches, J., 2021. Trace Mineral Nutrition of Grazing Beef Cattle. Animals 11, 2767. <https://doi.org/10.3390/ani11102767>
- Barbour, R., Young, R.H., Wilkinson, J.M., 2022. Production of Meat and Milk from Grass in the United Kingdom. Agronomy 12, 914. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040914>
- Benedeti, P.D.B., Silva, F.A. de S., Saraiva, D.T., Lopes, S.A., Silva, L.F.C. e, Zanetti, D., Valadares-Filho, S. de C., 2023. Tabelas de exigências nutricionais de bovinos de corte, in: Exigências Nutricionais de Zebuínos

- Puros e Cruzados - BR-CORTE. Editora Scienza, pp. 431–480. <https://doi.org/10.26626/978-85-8179-192-0.2023.C017.p.431-480>
- Biel, W., Czerniawska-Piątkowska, E., Kowalczyk, A., 2019. Offal Chemical Composition from Veal, Beef, and Lamb Maintained in Organic Production Systems. *Animals* 9, 489. <https://doi.org/10.3390/ani9080489>
- Bilandžić, N., Đokić, M., Sedak, M., 2010. Survey of arsenic, cadmium, copper, mercury and lead in kidney of cattle, horse, sheep and pigs from rural areas in Croatia. *Food Addit. Contam. Part B* 3, 172–177. <https://doi.org/10.1080/19440049.2010.503194>
- Broom, D.M., 2021. A method for assessing sustainability, with beef production as an example. *Biol. Rev.* 96, 1836–1853. <https://doi.org/10.1111/brv.12726>
- Brugger, D., Windisch, W.M., 2015. Environmental responsibilities of livestock feeding using trace mineral supplements. *Anim. Nutr.* 1, 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2015.08.005>
- CDC - Centers for Disease Control and Prevention, 2022. CDC Growth Charts [WWW Document]. National Center for Health Statistics. URL https://www.cdc.gov/growthcharts/cdc_charts.htm (accessed 2.6.24).
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente – Brasil, 2009. Resolução no 420, de 28 de dezembro de 2009 [WWW Document]. Diário Of. da União. URL <http://conama.mma.gov.br/> (accessed 4.1.23).
- Counotte, G., Holzhauer, M., Carp-van Dijken, S., Muskens, J., Van der Merwe, D., 2019. Levels of trace elements and potential toxic elements in bovine livers: A trend analysis from 2007 to 2018. *PLoS One* 14, e0214584. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214584>
- Crespo-Lopez, M.E., Augusto-Oliveira, M., Lopes-Araújo, A., Santos-Sacramento, L., Yuki Takeda, P., Macchi, B. de M., do Nascimento, J.L.M., Maia, C.S.F., Lima, R.R., Arrifano, G.P., 2021. Mercury: What can we learn from the Amazon? *Environ. Int.* 146, 106223. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106223>
- Doyle, P., O’Riordan, E.G., McGee, M., Crosson, P., Kelly, A.K., Moloney, A., 2023. Temperate pasture- or concentrate-beef production systems: steer performance, meat nutritional value, land-use, food–feed competition, economic and environmental sustainability. *J. Agric. Sci.* 54, 1–16. <https://doi.org/10.1017/S0021859623000540>
- Drapal, J., Steinhäuser, L., Stastny, K., Faldyna, M., 2021. Cadmium concentration in cattle tissues in the Czech Republic. *Vet. Med. (Praha)*. 66, 369–375. <https://doi.org/10.17221/218/2020-VETMED>
- Duplessis, M., Royer, I., 2023. Mini-Review: The importance of an integrated approach to assess trace mineral feeding practices in dairy cows. *Front. Anim. Sci.* 4. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1155361>

- Durigan, G., Pilon, N.A.L., Souza, F.M., Melo, A.C.G., Ré, D.S., Souza, S.C.P.M., 2022. Low-intensity cattle grazing is better than cattle exclusion to drive secondary savannas toward the features of native Cerrado vegetation. *Biotropica* 54, 789–800. <https://doi.org/10.1111/btp.13105>
- EFSA - European Food Safety Authority, 2024. Metals as contaminants in food [WWW Document]. URL <https://www.efsa.europa.eu/en/topics/topic/metals-contaminants-food> (accessed 1.30.24).
- FAO/WHO - Food and Agriculture Organization of the United Nation/World Health Organization, 2020. General standard for contaminants and toxins in food and feed - CXS 193-1995. Codex Alimentarius, International Food Standards.
- FAO/WHO - Food and Agriculture Organization of the United Nation/World Health Organization, 2011. Evaluation of certain food additives and contaminants: seventy-third report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, WHO technical report series; 960. World Health Organization.
- FDA - Food and Drug Administration, 2024. Environmental Contaminants in Food [WWW Document]. URL <https://www.fda.gov/food/chemical-contaminants-pesticides/environmental-contaminants-food>
- Fernandes, A.R., Souza, E.S. de, de Souza Braz, A.M., Birani, S.M., Alleoni, L.R.F., 2018. Quality reference values and background concentrations of potentially toxic elements in soils from the Eastern Amazon, Brazil. *J. Geochemical Explor.* 190, 453–463. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.04.012>
- Frazzoli, C., Bocca, B., Mantovani, A., 2015. The One Health Perspective in Trace Elements Biomonitoring. *J. Toxicol. Environ. Heal. Part B* 18, 344–370. <https://doi.org/10.1080/10937404.2015.1085473>
- Fryar, C.D., Kruszon-Moran, D., Gu, Q., Ogden, C.L., 2018. Mean Body Weight, Height, Waist Circumference, and Body Mass Index Among Adults: United States, 1999–2000 Through 2015–2016; no 122. National Health Statistics Reports, Hyattsville, MD.
- Garcia, A.S., Vilela, V.M. de F.N., Rizzo, R., West, P., Gerber, J.S., Engstrom, P.M., R. Ballester, M.V., 2019. Assessing land use/cover dynamics and exploring drivers in the Amazon's arc of deforestation through a hierarchical, multi-scale and multi-temporal classification approach. *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* 15, 100233. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.05.002>
- Hashemi, M., 2018. Heavy metal concentrations in bovine tissues (muscle, liver and kidney) and their relationship with heavy metal contents in consumed feed. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 154, 263–267. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.02.058>

- Hejna, M., Gottardo, D., Baldi, A., Dell'Orto, V., Cheli, F., Zaninelli, M., Rossi, L., 2018. Review: Nutritional ecology of heavy metals. *Animal* 12, 2156–2170. <https://doi.org/10.1017/S175173111700355X>
- Herd, T.H., Hoff, B., 2011. The Use of Blood Analysis to Evaluate Trace Mineral Status in Ruminant Livestock. *Vet. Clin. North Am. Food Anim. Pract.* 27, 255–283. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2011.02.004>
- IOM - Institute of Medicine, 2001. Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc. National Academies Press, Washington, D.C. <https://doi.org/10.17226/10026>
- Kabata-Pendias, A., 2010. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, New York. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- Khalafalla, F.A., Fatma H. Ali, Schwagele, F., Abd-El-Wahab, M.A., 2011. Heavy metal residues in beef carcasses in Beni-Suef abattoir, Egypt. *Vet. Ital.* 47.
- Khalili, M., Chamani, M., Amanlou, H., Nikkhah, A., Sadeghi, A., Dehkordi, F.K., Rafiei, M., Shirani, V., 2019. The effect of feeding inorganic and organic selenium sources on the hematological blood parameters, reproduction and health of dairy cows in the transition period. *Acta Sci. Anim. Sci.* 42, e45371. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v42i1.45371>
- Lee, M.R.F., McAuliffe, G.A., Tweed, J.K.S., Griffith, B.A., Morgan, S.A., Rivero, M.J., Harris, P., Takahashi, T., Cardenas, L., 2021. Nutritional value of suckler beef from temperate pasture systems. *Animal* 15, 100257. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100257>
- Lima, F.R.D., Pereira, P., Silva Junior, E.C., Vasques, I.C.F., Oliveira, J.R., Windmöller, C.C., Inda, A. V., Weindorf, D.C., Curi, N., Ribeiro, B.T., Guilherme, L.R.G., Marques, J.J., 2022. Geochemistry signatures of mercury in soils of the Amazon rainforest biome. *Environ. Res.* 215, 114147. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114147>
- López-Alonso, M., Miranda, M., 2020. Copper Supplementation, A Challenge in Cattle. *Animals* 10, 1890. <https://doi.org/10.3390/ani10101890>
- López-Mateo, C., Marcos-Rodríguez, R., Díaz-Rodríguez, F., Fernandez-Marcos, M.L., 2023. Forms of Toxic and Trace Metals in Grassland Soils of Galicia, Spain. *Spanish J. Soil Sci.* 13. <https://doi.org/10.3389/sjss.2023.11201>
- Luna, D., López-Alonso, M., Cedeño, Y., Rigueira, L., Pereira, V., Miranda, M., 2019. Determination of Essential and Toxic Elements in Cattle Blood: Serum vs Plasma. *Animals* 9, 465. <https://doi.org/10.3390/ani9070465>
- MapBiomass, 2023. Coleção v.8 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil [WWW Document]. URL <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>

- Martins, K.P.F., Padilha, V.H.T., Damasceno, T.K., Souza, M.A., Silva, E.M.S., Ribeiro, M., Pereira, A.H.B., Colodel, E.M., 2020. Chronic copper poisoning in beef cattle in the state of Mato Grosso, Brazil. *Pesqui. Veterinária Bras.* 40, 651–661. <https://doi.org/10.1590/1678-5150-pvb-6526>
- McTavish, M.J., Cray, H.A., Murphy, S.D., Bauer, J.T., Havrilla, C.A., Oelbermann, M., Sayer, E.J., 2021. Sustainable management of grassland soils, in: *Soils and Landscape Restoration*. Elsevier, pp. 95–124. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813193-0.00004-7>
- Mehdi, Y., Dufrasne, I., 2016. Selenium in Cattle: A Review. *Molecules* 21, 545. <https://doi.org/10.3390/molecules21040545>
- Michelazzo, P.A.M., Fostier, A.H., Magarelli, G., Santos, J.C., de Carvalho, J.A., 2010. Mercury emissions from forest burning in southern Amazon. *Geophys. Res. Lett.* 37, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2009GL042220>
- Miedico, O., Iammarino, M., Paglia, G., Tarallo, M., Mangiacotti, M., Chiaravalle, A.E., 2016. Environmental monitoring of the area surrounding oil wells in Val d'Agri (Italy): element accumulation in bovine and ovine organs. *Environ. Monit. Assess.* 188, 338. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5317-0>
- Motta-Delgado, P.A., Ocaña-Martínez, H.E., Rojas-Vargas, E.P., 2019. Indicadores asociados a la sostenibilidad de pasturas: una revisión. *Cienc. y Tecnol. Agropecu.* 20. https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num2_art:1464
- NRC - National Research Council, 2016. *Nutrient Requirements of Beef Cattle*, 8th ed. The National Academies Press, Washington, DC.
- OECD/FAO - Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD)/Food and Agriculture Organization (FAO), 2023. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032*, OECD-FAO Agricultural Outlook. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/08801ab7-en>
- Ogbomida, E.T., Nakayama, S.M.M., Bortey-Sam, N., Oroszlany, B., Tongo, I., Enuneku, A.A., Ozekeke, O., Ainerua, M.O., Fasipe, I.P., Ezemonye, L.I., Mizukawa, H., Ikenaka, Y., Ishizuka, M., 2018. Accumulation patterns and risk assessment of metals and metalloid in muscle and offal of free-range chickens, cattle and goat in Benin City, Nigeria. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 151, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.069>
- Patel, M., Sonesson, U., Hesse, A., 2017. Upgrading plant amino acids through cattle to improve the nutritional value for humans: effects of different production systems. *Animal* 11, 519–528. <https://doi.org/10.1017/S1751731116001610>
- Pomar, C., Remus, A., 2023. Review: Fundamentals, limitations and pitfalls on the development and application of precision nutrition techniques for precision livestock farming. *animal* 100763. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100763>

- Prado, R. de M., 2021. Mineral nutrition of tropical plants, Mineral nutrition of tropical plants. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4>
- Ribeiro, A.C., Guimarães, P.T.G., Venegas, V.H.A., 1999. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em minas gerais - 5a Aproximação. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, Viçosa - MG.
- Roman, M., Jitaru, P., Barbante, C., 2014. Selenium biochemistry and its role for human health. *Metallomics* 6, 25–54. <https://doi.org/10.1039/C3MT00185G>
- Santos, Humberto Gonçalves, Paulo Klinger Tito Jacomine, Lúcia Helena Cunha Anjos, Virlei Álvaro Oliveira, José Francisco Lumbrreras, Maurício Rizzato Coelho, Jaime Antonio Almeida, José Coelho Araújo-Filho, João Bertoldo Oliveira, and Tony Jarbas Ferreira Cunha. 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS. 5th ed. Brasília, DF: Embrapa. <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>.
- Schrenk, D., Bignami, M., Bodin, L., Chipman, J.K., del Mazo, J., Grasl-Kraupp, B., Hogstrand, C., Hoogenboom, L. (Ron), Leblanc, J., Nebbia, C.S., Ntzani, E., Petersen, A., Sand, S., Schwerdtle, T., Vleminckx, C., Wallace, H., Guérin, T., Massanyi, P., Van Loveren, H., Baert, K., Gergelova, P., Nielsen, E., 2020. Update of the risk assessment of nickel in food and drinking water. *EFSA J.* 18. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6268>
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., Niazi, N.K., 2017. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *J. Hazard. Mater.* 325, 36–58. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063>
- Sigarini, K. dos S., de Oliveira, A.P., Martins, D.L., Brasil, A.S., de Oliveira, K.C., Villa, R.D., 2017. Determination of the Lead, Cadmium, and Chromium Concentration in Mineral Feeds and Supplements for Cattle Produced in the Mato Grosso State, Brazil. *Biol. Trace Elem. Res.* 177, 209–214. <https://doi.org/10.1007/s12011-016-0869-y>
- Silva, F.L., Silva, M.H.M., S. Oliveira-Júnior, E., López-Alonso, M., Pierangeli, M.A.P., 2024. Fertility and carbon stock in pasture and forest environments in the Southern Amazon. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 28, 9. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n1e270888>
- Skalny, A. V., Salnikova, E. V., Burtseva, T.I., Skalnaya, M.G., Tinkov, A.A., 2019. Zinc, copper, cadmium, and lead levels in cattle tissues in relation to different metal levels in ground water and soil. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26, 559–569. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3654-y>
- Skidmore, M.E., Sims, K.M., Rausch, L.L., Gibbs, H.K., 2022. Sustainable intensification in the Brazilian cattle industry: the role for reduced slaughter age. *Environ. Res. Lett.* 17, 064026. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6f70>

- Suttle, N., 2022. Mineral Nutrition of Livestock, 5th ed. CAB International, GB. <https://doi.org/10.1079/9781789240924.0000>
- Tahir, I., Alkheraije, K.A., 2023. A review of important heavy metals toxicity with special emphasis on nephrotoxicity and its management in cattle. *Front. Vet. Sci.* 10. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1149720>
- Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, A.K., Sutton, D.J., 2012. Heavy Metal Toxicity and the Environment. pp. 133–164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Teague, R., Kreuter, U., 2020. Managing Grazing to Restore Soil Health, Ecosystem Function, and Ecosystem Services. *Front. Sustain. Food Syst.* 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.534187>
- Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G. (Eds.), 2017. *Manual de Métodos de Análise de Solo*, 3rd ed. Embrapa, Brasília, DF.
- Thorne, R.J., Pacyna, J.M., Sundseth, K., Pacyna, E.G., 2018. Fluxes of Trace Metals on a Global Scale, in: *Encyclopedia of the Anthropocene*. Elsevier, pp. 93–102. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809665-9.09918-3>
- Wasserman, J.C., Hacon, S., Wasserman, M.A., 2003. Biogeochemistry of Mercury in the Amazonian Environment. *AMBIO A J. Hum. Environ.* 32, 336–342. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-32.5.336>
- Zoroddu, M.A., Aaseth, J., Crisponi, G., Medici, S., Peana, M., Nurchi, V.M., 2019. The essential metals for humans: a brief overview. *J. Inorg. Biochem.* 195, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2019.03.013>

ARQUIVOS SUPLEMENTARES (ARTIGO 4)

Tabela Suplementar S1. Informações gerais sobre as fazendas e os rebanhos de fêmeas Nelore deste estudo.

Fazenda/ Rebanho	Classe de solo do pasto ¹	Gramínea da pastagem	Idade dos animais (meses)
I	Argissolo e Latossolo	<i>U. brizantha</i>	42 ± 6
II	Argissolo e Latossolo	<i>U. brizantha</i> e <i>P. maximum</i>	60 ± 12
III	Argissolo e Latossolo	<i>U. brizantha</i> e <i>P. maximum</i>	18 ± 2
IV	Latossolo	<i>U. brizantha</i>	21 ± 3
V	Argissolo e Latossolo	<i>U. brizantha</i>	-
VI-a	Argissolo	<i>U. brizantha</i>	18 ± 1
VI-b	Argissolo	<i>U. brizantha</i>	17 ± 1
VII	Argissolo e Latossolo	<i>U. brizantha</i>	-
VIII	Argissolo e Latossolo	<i>P. maximum</i>	-

¹ Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al. 2018).

Tabela Suplementar S2. Descrição das quantidades indicadas de consumo de cada suplemento alimentar e quantidade calculada de consumo de gramínea por unidade animal de 450 kg (UA) por dia¹.

Suplemento alimentar	Consumo de suplemento	MS	Consumo de Suplemento ²	Consumo de gramínea ³
	(g/UA MN por dia)	(%)	(g/UA MS por dia)	
Proteinado/Energético (Id. 1)	2.700	90,7	2.448,0	7.052,0
Proteinado/Energético (Id. 2)	1.000	92,3	923,3	8.576,7
Bloco mineral (Id. 3)	450	82,2	370,0	9.130,0
Proteinado/Energético (Id. 4)	500	90,3	451,7	9.048,3
Proteinado/Energético (Id. 5)	1.000	91,3	913,3	8.586,7
Proteinado/Energético (Id. 6)	1.000	91,7	916,7	8.583,3
Proteinado/Energético (Id. 7)	500	92,0	460,0	9.040,0
Proteinado/Energético (Id. 8)	500	90,7	453,3	9.046,7
Bloco mineral (Id. 9)	100	86,7	86,7	9.413,3
Proteinado/Energético (Id. 10)	2.700	90,0	2.430,0	7.070,0
Proteinado/Energético (Id. 11)	1.350	91,3	1.233,0	8.267,0
Silagem de milho (Id. 12)	15.000	32,3	4.845,0	4.655,0
Pó mineral (Id. 13)	100	97,2	97,2	9.402,8
Pó mineral (Id. 14)	135	96,2	129,8	9.370,2
Pó mineral (Id. 15)	100	96,5	96,5	9.403,5
Pó mineral (Id. 16)	100	95,8	95,8	9.404,2
Pó mineral (Id. 17)	100	96,5	96,5	9.403,5
Pó mineral (Id. 18)	135	95,3	128,7	9.371,3
Pó mineral (Id. 19)	135	95,5	128,9	9.371,1
Pó mineral (Id. 20)	100	96,0	96,0	9.404,0
Pré-mistura mineral ⁴ (Id. 21)	-	98,4	-	-
Pré-mistura mineral ⁴ (Id. 22)	-	97,6	-	-

Abreviações: MN = matéria natural; MS = matéria seca. ¹ O consumo total diário de MS assumido foi de 11,25 kg, considerando o equivalente a 2,5% de uma UA (450 kg). ² A quantidade diária assumida de consumo de cada suplemento alimentar foi equivalente à recomendação apresentada no rótulo de cada produto amostrado, calculada sobre a MS. ³ A quantidade diária assumida de consumida de gramínea foi a diferença entre o consumo diário total (11,25 kg) e o consumo diário de cada suplemento alimentar. ⁴ A pré-mistura mineral não é consumida diretamente pelo gado.

Tabela Suplementar S3. Valores dietéticos de referência para algumas categorias humanas, ajustados para 30 dias.

Elemento	Referência	Categorias humanas ¹				
		Crianças	Meninas	Meninos	Mulheres	Homens
		RDI _{30d} (mg)				
Fe	IOM (2001)	300,0	450,0	330,0	540,0	240,0
Mn	IOM (2001)	45,0	48,0	66,0	54,0	69,0
Zn	IOM (2001)	150,0	270,0	330,0	240,0	330,0
Cu	IOM (2001)	13,2	26,7	26,7	27,0	27,0
Se	IOM (2001)	0,90	1,65	1,65	1,65	1,65
Co ²	-	-	-	-	-	-
Mo	IOM (2001)	0,66	1,29	1,29	1,35	1,35
Cr	IOM (2001)	0,45	0,72	1,05	0,75	1,05
UL _{30d} (mg)						
Ni ³	Schrenk et al. (2020)	7,80	20,67	23,01	23,40	31,20
Pb ⁴	FAO/WHO (2011)	0,18	0,48	0,52	0,59	0,72
As	FAO/WHO (2020)	1,80	4,77	5,22	5,85	7,20
Cd	Alexander et al. (2009)	0,21	0,57	0,62	0,70	0,86
Hg	FAO/WHO (2020)	0,34	0,91	0,99	1,11	1,37

Abreviações: RDI_{30d} = Referência diária de ingestão, ajustada para 30 dias; UL_{30d} = Nível superior tolerável, ajustado para 30 dias. ¹ As seguintes idades e pesos corporais foram assumidos para categorias humanas: crianças, 6 anos, 20 kg; meninas, 16 anos, 53 kg; meninos, 16 anos, 58 kg; mulheres, 30 anos, 65 kg; e homens, 30 anos, 80 kg. ² Não há referência diária de ingestão para Co. Este elemento é necessário para humanos apenas como vitamina B12; ³ O níquel é necessário como nutriente, porém não há referência diária de ingestão para este elemento. ⁴ Para calcular o UL_{30d} do Pb, o valor foi assumido foi 0,3 µg/kg por peso corporal por dia, considerado um risco insignificante para crianças, de acordo com FAO/WHO (2011).

Tabela Suplementar S4. Estimativa bovina de ingestão de Fe, Mn, Zn e Cu na matéria seca (MS), considerando o consumo combinado de suplemento alimentar e gramínea de fazendas localizadas na região Sul da Amazônia.

Suplemento alimentar	Consumo de suplemento	Consumo de gramínea	Faixas de ingestão ¹ dos elementos							
	kg MS		Fe (mg/kg)		Mn (mg/kg)		Zn (mg/kg)		Cu (mg/kg)	
Proteinado/Energético (Id. 1)	2,448	7,052	106,02	333,74	94,08	394,57	93,48	105,77	57,90	61,47
Proteinado/Energético (Id. 2)	0,923	8,577	120,07	397,03	75,36	440,81	106,44	121,39	22,30	26,64
Bloco mineral (Id. 3)	0,370	9,130	78,57	373,38	63,80	452,83	38,86	54,78	11,60	16,22
Proteinado/Energético (Id. 4)	0,452	9,048	145,31	437,49	74,86	460,41	46,73	62,50	16,79	21,37
Proteinado/Energético (Id. 5)	0,913	8,587	153,09	430,37	69,79	435,67	88,80	103,77	17,79	22,14
Proteinado/Energético (Id. 6)	0,917	8,583	196,70	473,87	74,03	439,76	95,09	110,05	26,88	31,22
Proteinado/Energético (Id. 7)	0,460	9,040	91,79	383,71	71,73	456,93	33,02	48,78	11,09	15,66
Proteinado/Energético (Id. 8)	0,453	9,047	93,67	385,80	74,57	460,05	33,11	48,88	9,65	14,23
Bloco mineral (Id. 9)	0,087	9,413	74,88	378,84	81,35	482,45	38,94	55,35	12,75	17,51
Proteinado/Energético (Id. 10)	2,430	4,655	396,57	624,87	131,74	432,99	182,70	195,03	58,51	62,08
Proteinado/Energético (Id. 11)	1,233	8,267	64,07	331,02	61,87	414,13	21,10	35,51	4,91	9,09
Silagem de milho (Id. 12)	4,845	4,655	359,67	509,98	51,36	249,71	47,96	56,08	14,73	17,08
Pó mineral (Id. 13)	0,097	9,403	121,54	425,17	83,51	484,17	64,87	81,26	16,06	20,82
Pó mineral (Id. 14)	0,130	9,370	113,62	416,19	75,87	475,13	52,94	69,28	11,59	16,33
Pó mineral (Id. 15)	0,097	9,404	101,50	405,15	73,19	473,87	48,22	64,61	13,71	18,47
Pó mineral (Id. 16)	0,096	9,404	115,68	419,36	78,96	479,67	58,79	75,18	15,80	20,56
Pó mineral (Id. 17)	0,097	9,404	101,29	404,95	88,06	488,74	94,97	111,36	20,84	25,60
Pó mineral (Id. 18)	0,129	9,371	181,45	484,06	77,00	476,31	51,06	67,39	17,05	21,79
Pó mineral (Id. 19)	0,129	9,371	169,64	472,24	81,47	480,77	56,37	72,71	22,13	26,87
Pó mineral (Id. 20)	0,096	9,404	80,90	384,57	79,47	480,18	53,80	70,19	20,29	25,05
Requerimento para bovinos de corte (NRC, 2016)			40,0		20,0		30,0		10,0	
Requerimento para zebuínos de corte (Benedeti et al., 2023) ²			194,61		21,43		46,65		7,13	
Máximo tolerável (NRC, 2016)			500,0		1.000,0		500,0		40,0	

¹ Esta estimativa considera uma faixa entre os teores mínimo e máximo de cada elemento na gramínea, em mg/kg MS, como segue: Fe 43,07-349,83; Mn 62,50-467,30; Zn 11,43-27,99; e Cu 2,77-7,57. ² A categoria animal utilizada para obtenção dos requerimentos foram zebuínos de corte macho não castrados em sistema de pastoreio, com 450 kg de peso vivo e ganho de peso médio diário de 0,8 kg.

Tabela Suplementar S5. Estimativa bovina de ingestão de Se, Co, Mo, Cr e Ni na matéria seca (MS), considerando o consumo combinado de suplemento alimentar e gramínea de fazendas localizadas na região Sul da Amazônia.

Suplemento alimentar	Consumo de suplemento	Consumo de gramínea	Faixas de ingestão ¹ dos elementos									
	kg MS		Se (mg/kg)		Co (mg/kg)		Mo (mg/kg)		Cr (mg/kg)		Ni (mg/kg)	
Proteinado/Energético (Id. 1)	2,448	7,052	1,00	1,11	2,21	2,23	0,23	1,21	0,59	1,63	0,37	0,84
Proteinado/Energético (Id. 2)	0,923	8,577	0,67	0,80	2,61	2,64	0,12	1,31	0,69	1,96	0,29	0,87
Bloco mineral (Id. 3)	0,370	9,130	0,18	0,32	0,58	0,61	0,06	1,33	0,51	1,86	0,21	0,83
Proteinado/Energético (Id. 4)	0,452	9,048	0,20	0,34	0,58	0,60	0,07	1,33	0,61	1,95	0,39	1,00
Proteinado/Energético (Id. 5)	0,913	8,587	0,29	0,42	1,17	1,19	0,10	1,30	0,59	1,86	0,41	0,99
Proteinado/Energético (Id. 6)	0,917	8,583	0,41	0,54	1,43	1,45	0,09	1,29	0,71	1,98	0,49	1,06
Proteinado/Energético (Id. 7)	0,460	9,040	0,10	0,24	0,81	0,83	0,05	1,31	0,42	1,76	0,27	0,88
Proteinado/Energético (Id. 8)	0,453	9,047	0,19	0,32	0,12	0,15	0,08	1,34	0,58	1,92	0,27	0,88
Bloco mineral (Id. 9)	0,087	9,413	0,21	0,35	0,12	0,15	0,05	1,36	1,03	2,42	0,23	0,86
Proteinado/Energético (Id. 10)	2,430	4,655	1,30	1,41	4,57	4,59	0,17	1,16	1,15	2,20	0,95	1,42
Proteinado/Energético (Id. 11)	1,233	8,267	0,12	0,25	0,32	0,35	0,15	1,31	0,41	1,63	0,20	0,76
Silagem de milho (Id. 12)	4,845	4,655	0,52	0,59	1,24	1,26	0,10	0,75	0,72	1,41	0,26	0,58
Pó mineral (Id. 13)	0,097	9,403	0,18	0,33	0,99	1,01	0,05	1,36	0,80	2,19	0,38	1,01
Pó mineral (Id. 14)	0,130	9,370	0,19	0,33	1,11	1,14	0,05	1,36	0,60	1,99	0,25	0,88
Pó mineral (Id. 15)	0,097	9,404	0,29	0,43	0,63	0,66	0,05	1,36	0,48	1,87	0,29	0,92
Pó mineral (Id. 16)	0,096	9,404	0,21	0,36	0,79	0,81	0,05	1,37	0,52	1,91	0,35	0,98
Pó mineral (Id. 17)	0,097	9,404	0,45	0,59	1,19	1,21	0,05	1,36	0,64	2,04	0,34	0,97
Pó mineral (Id. 18)	0,129	9,371	0,20	0,35	0,88	0,90	0,06	1,37	1,23	2,61	0,46	1,09
Pó mineral (Id. 19)	0,129	9,371	0,20	0,34	1,02	1,04	0,06	1,37	1,17	2,56	0,36	0,99
Pó mineral (Id. 20)	0,096	9,404	0,27	0,41	1,51	1,53	0,05	1,37	0,63	2,02	0,25	0,89
Requerimento para bovinos de corte (NRC, 2016)			0,1		0,15		-		-		-	
Requerimento para zebuínos de corte (Benedeti et al., 2023) ²			0,48		0,74		0,32		2,26		-	
Máximo tolerável (NRC, 2016)			5,0		25,0		5,0		1.000,0		5,0	

¹ Esta estimativa considera uma faixa entre os teores mínimo e máximo de cada elemento na gramínea, na MS como segue: Se 0,79-145,94 µg/kg; Co 4,19-29,51 µg/kg; Mo 35,31-1.362,71 µg/kg; Cr 0,38-1,79 mg/kg; e Ni 0,14-0,78 µg/kg. ² A categoria animal utilizada para obtenção dos requerimentos foram zebuínos de corte macho não castrados em sistema de pastoreio, com 450 kg de peso vivo e ganho de peso médio diário de 0,8 kg.

Tabela Suplementar S6. Estimativa bovina de ingestão de Pb, As, Cd e Hg na matéria seca (MS), considerando o consumo combinado de suplemento alimentar e gramínea de fazendas localizadas na região Sul da Amazônia.

Suplemento alimentar	Consumo de suplemento	Consumo de gramínea	Faixas de ingestão ¹ dos elementos							
	kg MS		Pb (µg/kg)		As (µg/kg)		Cd (µg/kg)		Hg (µg/kg)	
Proteinado/Energético (Id. 1)	2,448	7,052	79,19	678,24	46,27	51,26	3,55	17,99	8,71	10,69
Proteinado/Energético (Id. 2)	0,923	8,577	97,21	825,78	56,19	62,27	16,31	33,87	1,53	3,94
Bloco mineral (Id. 3)	0,370	9,130	89,00	864,56	25,12	31,59	8,00	26,69	1,06	3,63
Proteinado/Energético (Id. 4)	0,452	9,048	95,26	863,89	69,80	76,21	32,30	50,81	1,32	3,86
Proteinado/Energético (Id. 5)	0,913	8,587	103,32	832,73	66,63	72,71	36,12	53,69	1,02	3,43
Proteinado/Energético (Id. 6)	0,917	8,583	110,78	839,91	92,48	98,56	43,45	61,01	2,45	4,86
Proteinado/Energético (Id. 7)	0,460	9,040	72,77	840,69	22,11	28,52	2,09	20,59	1,12	3,66
Proteinado/Energético (Id. 8)	0,453	9,047	76,33	844,82	25,74	32,14	5,37	23,89	1,21	3,75
Bloco mineral (Id. 9)	0,087	9,413	76,67	876,31	63,32	69,99	8,16	27,42	1,09	3,73
Proteinado/Energético (Id. 10)	2,430	4,655	102,52	703,10	290,66	295,67	10,18	24,65	6,92	8,23
Proteinado/Energético (Id. 11)	1,233	8,267	68,54	770,80	12,81	18,67	1,46	18,38	2,06	4,38
Silagem de milho (Id. 12)	4,845	4,655	123,98	519,41	38,50	41,80	2,84	12,36	1,82	3,13
Pó mineral (Id. 13)	0,097	9,403	91,81	890,56	56,81	63,47	32,19	51,44	1,09	3,73
Pó mineral (Id. 14)	0,130	9,370	91,81	887,78	44,45	51,09	10,63	29,81	1,08	3,71
Pó mineral (Id. 15)	0,097	9,404	114,15	912,95	26,42	33,09	4,99	24,23	2,22	4,86
Pó mineral (Id. 16)	0,096	9,404	108,84	907,70	40,59	47,25	20,50	39,74	1,48	4,12
Pó mineral (Id. 17)	0,097	9,404	105,56	904,36	54,20	60,86	18,56	37,80	1,10	3,74
Pó mineral (Id. 18)	0,129	9,371	138,10	934,17	63,78	70,41	42,70	61,88	1,12	3,75
Pó mineral (Id. 19)	0,129	9,371	130,26	926,30	48,75	55,39	48,65	67,83	1,14	3,77
Pó mineral (Id. 20)	0,096	9,404	81,73	880,57	32,57	39,23	10,44	29,69	1,09	3,73
Requerimento para bovinos de corte (NRC, 2016)			-	-	-	-	-	-	-	-
Requerimento para zebuínos de corte (Benedeti et al., 2023) ²			-	-	-	-	-	-	-	-
Máximo tolerável (NRC, 2016)			30.000,0		50.000,0		500,0		2.000,0	

¹ Esta estimativa considera uma faixa entre os teores mínimo e máximo de cada elemento na gramínea, em µg/kg MS, como segue: Pb 67,77-874,77; As 0,39-14,88; Cd 0,33-19,78; e Hg 1,07-3,74. ² A categoria animal utilizada para obtenção dos requerimentos foram zebuínos de corte macho não castrados em sistema de pastoreio, com 450 kg de peso vivo e ganho de peso médio diário de 0,8 kg.

Tabela Suplementar S7. Estatísticas descritivas de micronutrientes e elementos tóxicos no músculo de bovinos obtidos em mercados localizados na região sul da Amazônia.

Elemento	Unidade	Média	DP	Percentil						
				Mínimo	10	25	50	75	90	Máximo
Fe	mg/kg	19,9416	4,3672	12,6618	14,7759	16,8507	19,4533	21,7123	26,2637	29,2572
Mn		0,0653	0,0105	0,0487	0,0506	0,0581	0,0658	0,0722	0,0784	0,0885
Zn		260,7393	54,9638	169,4757	208,7558	228,5975	245,5108	287,4511	316,4971	440,7871
Cu		0,4834	0,0688	0,3500	0,4001	0,4486	0,4771	0,5014	0,5969	0,6515
Se		0,0664	0,0304	0,0235	0,0326	0,0513	0,0590	0,0745	0,1140	0,1475
Co		0,0023	0,0011	0,0007	0,0010	0,0016	0,0022	0,0028	0,0038	0,0057
Mo		0,0078	0,0100	0,0010	0,0031	0,0035	0,0049	0,0070	0,0118	0,0550
Cr	µg/kg	68,2329	69,6600	3,7802	10,4112	13,4582	34,7333	114,4737	178,9322	219,4583
Ni		2,0403	3,6860	0,0115	0,3466	0,5561	1,4634	2,2281	2,7162	21,4913
Pb		1,6921	2,7319	0,1320	0,1948	0,2032	0,5076	1,8817	4,6168	13,5838
As		1,4928	1,7450	0,0528	0,2313	0,4346	0,7680	1,6685	3,8253	6,7511
Cd		0,1148	0,1334	0,0741	0,0796	0,0805	0,0844	0,0879	0,1058	0,8168
Hg		0,4831	0,0680	0,1609	0,4654	0,4693	0,4887	0,5040	0,5183	0,6263

Abreviação: DP = Desvio padrão

Tabela Suplementar S8. Estatísticas descritivas de micronutrientes e elementos tóxicos no rim de bovinos obtidos em mercados localizados na região sul da Amazônia.

Elemento	Unidade	Média	DP	Percentil						
				Mínimo	10	25	50	75	90	Máximo
Fe	mg/kg	65,3461	14,8677	39,6513	46,4977	55,0025	65,2606	73,6838	79,1960	106,7746
Mn		1,0761	0,1677	0,7766	0,9201	0,9714	1,0535	1,1495	1,3070	1,5383
Zn		137,2765	16,2593	112,7711	119,4794	124,9385	133,2810	149,1110	160,3916	172,4651
Cu		3,3757	0,6678	2,4315	2,6662	2,8966	3,2950	3,6972	4,2019	4,9614
Se		1,0172	0,1617	0,7204	0,8239	0,9244	1,0158	1,1033	1,2330	1,3817
Co		0,0555	0,0209	0,0259	0,0305	0,0345	0,0539	0,0702	0,0762	0,1199
Mo		0,3000	0,0952	0,0869	0,1326	0,2550	0,3397	0,3637	0,3823	0,4124
Cr	µg/kg	8,8098	8,5079	0,6635	1,2144	2,7131	7,0533	9,5975	21,5163	34,7903
Ni		3,5354	5,9216	0,0410	0,1602	0,4356	1,4142	2,8480	9,8080	28,5938
Pb		17,7183	7,0823	6,3192	9,0445	12,4323	17,7537	20,8419	26,1644	32,7770
As		7,0904	8,0021	0,3318	0,7186	1,7599	3,1355	10,0285	21,9116	24,5495
Cd		58,7686	46,6571	12,0101	24,1812	26,8442	41,0676	71,4460	115,0263	223,7759
Hg		2,6038	1,4462	0,5082	1,2579	1,7290	2,3516	2,9203	4,6918	6,8953

Abreviação: DP = Desvio padrão

Tabela Suplementar S9. Estatísticas descritivas de micronutrientes e elementos tóxicos no fígado de bovinos obtidos em mercados localizados na região sul da Amazônia.

Elemento	Unidade	Média	DP	Percentil						
				Mínimo	10	25	50	75	90	Maximum
Fe	mg/kg	84,3674	29,3680	40,1246	53,5715	63,1581	79,7173	95,6644	118,0720	182,4773
Mn		2,7925	0,4135	2,0559	2,2529	2,5529	2,7435	3,0749	3,4067	3,6459
Zn		278,3077	51,6385	192,9775	216,6842	255,6737	271,2259	296,6441	332,6995	444,5566
Cu		132,3123	64,7942	24,8131	63,0866	91,9875	124,0057	157,6703	213,5300	330,7441
Se		0,2987	0,1257	0,1600	0,1890	0,2253	0,2683	0,2999	0,4973	0,6539
Co		0,0787	0,0463	0,0167	0,0283	0,0482	0,0725	0,1028	0,1201	0,1973
Mo		0,8989	0,2536	0,1283	0,6534	0,7641	0,9498	1,0288	1,1360	1,3320
Cr	µg/kg	72,4783	83,5253	3,2755	6,0372	12,1589	51,4683	92,7492	141,6726	355,1919
Ni		9,7693	13,0628	0,2142	0,4125	1,8288	5,3405	10,2982	29,1859	53,2683
Pb		16,7695	11,9718	1,5714	5,1723	9,0215	12,5841	22,1424	34,3754	50,1475
As		1,7098	2,0741	0,2137	0,3720	0,5882	0,7381	2,1250	4,0968	9,3062
Cd		15,2850	12,0105	3,4948	5,4518	8,1052	12,6007	18,4798	25,0039	56,0180
Hg		0,8284	0,9192	0,0368	0,4362	0,5411	0,5599	0,5837	1,6077	4,0082

Abreviação: DP = Desvio padrão

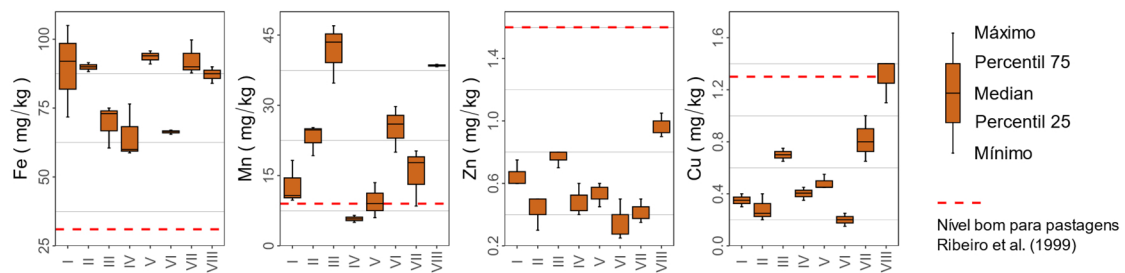


Figura Suplementar S1. Estatísticas descritivas dos elementos disponíveis (extraídos com solução Mehlich-1) no solo das pastagens das fazendas I-VIII, localizadas na região Sul da Amazônia. Interpretação da fertilidade do solo por Ribeiro et al. (1999).

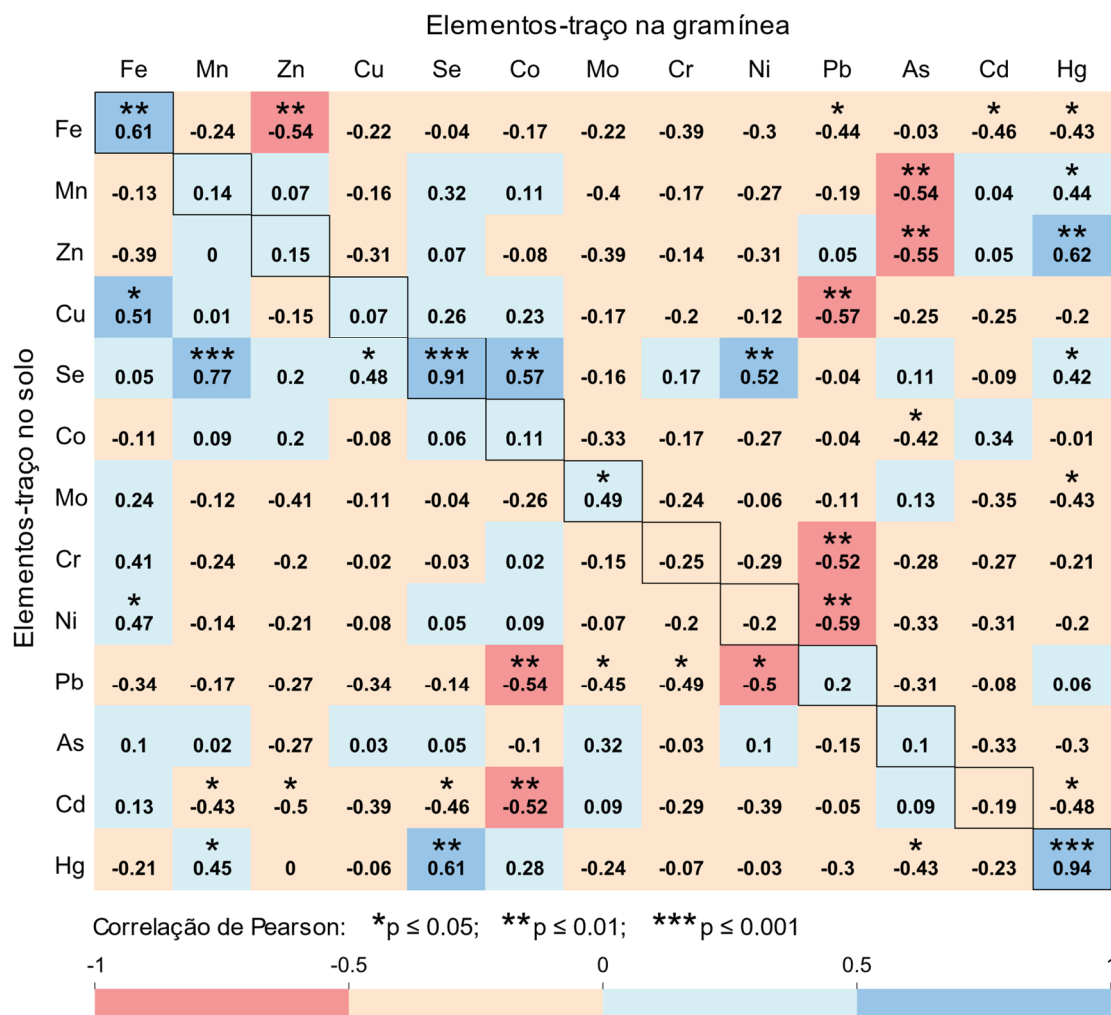


Figura Suplementar S2. Matriz de correlações de Pearson entre elementos-traço do solo e a gramínea de pastagens localizadas na região sul da Amazônia..

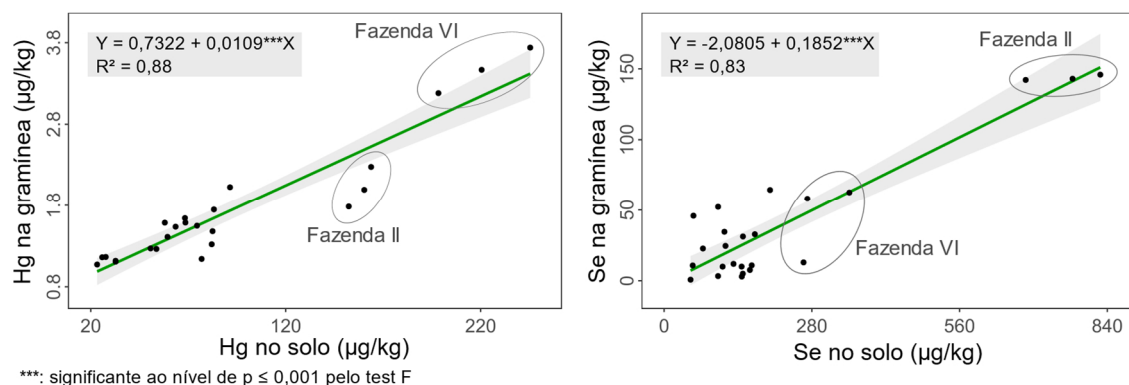


Figura Suplementar S3. Regressão entre Hg no solo e graminha (A), e Se no solo e graminha (B), provenientes de pastagens das fazendas I-VIII, localizadas na região Sul da Amazônia. ***: significativo para $p \leq 0,001$ pelo teste F.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A abordagem de “Saúde Única” contribuiu para considerar vários aspectos relacionados a saúde ambiental, animal e humana nesse estudo. Apesar do estudo ter foco nas concentrações de elementos-traço, é possível perceber como ambiente, animais e pessoas estão fortemente conectados. Nesse contexto, a avaliação de um agroecossistema pode tornar-se mais aprimorada, ainda que mais complexa, quando se consideram suas várias inter-relações ambiente-animal-humano. Além disso, surgem oportunidades de maior integração entre as várias disciplinas da ciência, ao mesmo tempo em que favorece e exige maior colaboração entre pesquisadores e o fortalecimento de redes de pesquisa.

O estudo dos solos preservados do Estado de Mato Grosso permitiu ampliar o reconhecimento acerca da heterogeneidade das concentrações de elementos-traço nesses solos. Essas concentrações variaram amplamente e se correlacionaram com diversos aspectos naturais, como geologia, geomorfologia, litologia, pedologia e biomas. Isso significa, que o impacto e as consequências de atividades antrópicas, como a pecuária, podem ser bastante variáveis em relação às concentrações de vários elementos-traço em cada ambiente. Predominaram baixos teores de vários elementos nos solos de Mato Grosso. No entanto, podem ocorrer locais com concentrações atípicas, o que exige um manejo que considere as particularidades do ambiente. Ainda que, não tenha sido possível desvendar todas as particularidades acerca dos elementos-traço dos solos do Estado de Mato Grosso, aqui foram lançadas algumas luzes sobre a importância desse monitoramento ambiental para contribuir com seu uso sustentável.

Ao se estudar a fertilidade e o estoque de carbono do solo de áreas de pastagens no Sul da Amazônia comparando-as com solos de áreas nativas adjacentes à essas pastagens foi possível identificar muitos aspectos importantes para melhorar o manejo dessas pastagens. Isto é, as pastagens das fazendas estudadas exigem adoção de muitas práticas de manejo que permitam melhorar a disponibilidade de nutrientes, a conservação do solo e da matéria orgânica, com potencial, inclusive, para sequestro de CO₂. Embora a literatura seja vasta sobre as possibilidades e alternativas de manejo de pastagens para

favorecer seu uso sustentável, continua sendo um grande desafio modificar o paradigma que mantém milhões de hectares de pastagens predominantemente degradadas na Amazônia.

Em relação à transferência de elementos-traço entre solo-planta-animal, verificamos que, em geral, as pastagens refletiram as concentrações dos elementos do solo, apesar de haver correlações muito variáveis. As pastagens, por sua vez, sendo o principal alimento dos bovinos, também são muito relevantes para a disponibilidade de micronutrientes para a nutrição animal. Ou seja, é indispensável que o planejamento da suplementação alimentar considere as características locais de solo e gramínea para garantir a oferta adequada de micronutrientes, evitando assim carências ou excessos de micronutrientes para os bovinos.

Músculo, rim e fígado bovinos foram considerados ótimas fontes de micronutrientes para alimentação humana, particularmente Zn e Fe. Além disso, houve baixos teores de elementos-tóxicos (Pb, As, Cd e Hg). Todavia, no contexto da pecuária, é importante o desenvolvimento de ações para reduzir os níveis de Pb e Cd no músculo e miúdos, a fim de garantir a oferta de alimentos mais saudáveis. Estratégias que envolvam a redução da idade de abate dos bovinos e a utilização de suplementos alimentares com menores concentrações desses resíduos (Pb e Cd), são exemplos que podem contribuir. Contudo, novas investigações no âmbito da “Saúde Única”, também poderão ajudar a identificar mais aspectos relevantes que possibilitem melhorar a gestão dos elementos-traço desde a fazenda até o consumidor.

A gestão adequada desses elementos no contexto da pecuária à pasto da Amazônia é complexa. Todavia, há possibilidade de se desenvolverem várias ações, seja no âmbito do setor privado ou do setor público. Por exemplo, na fazenda podem ser adotadas técnicas que melhorem a ciclagem dos nutrientes, a qualidade da pastagem, evitando-se o uso de insumos agrícolas de baixa qualidade ou inadequados para a condição local. A indústria também pode ser favorecida pela possibilidade de redução de custos ou aperfeiçoamento/ inovação de seus produtos. No âmbito público, é possível melhorar diversos aspectos, como conscientização da importância desses elementos para a saúde humana, o aperfeiçoamento de políticas públicas que

favoreçam meios de produção mais sustentáveis, ou mesmo, melhorar o apoio à pesquisa científica.

Não foi possível identificar claramente o possível impacto de ações antrópicas externas à pecuária sobre as concentrações de elementos-traço na região ou nas amostras estudadas, como por exemplo, os impactos decorrentes de desmatamento ou mineração artesanal de ouro. No entanto, os resultados obtidos proporcionam informações importantes que vão contribuir para que estes e outros temas sejam claramente elucidados através de pesquisa futuras.

O contexto em que se encontram os desafios à sustentabilidade enfrentados nas pastagens da Amazônia se relaciona com muitos desafios da produção animal à pasto em todo o mundo. Além disso, envolve muitas questões de natureza social, econômica e ambiental que exigem engajamento de diferentes especialidades nesses temas. Por fim, destaca-se que uma abordagem inter, multi ou transdisciplinar, como a “Saúde Única” pode ser essencial para enfrentar os complexos desafios estabelecidos.

ANEXOS

Registro fotográfico:

1. Expedições de amostragens de solos em Mato Grosso:
<https://drive.google.com/drive/folders/11tzR9aR0AVzvrYw0PKSscx4ra7Q36iJf?usp=sharing>
2. Amostragens nas fazendas e atividades de laboratório:
<https://drive.google.com/drive/folders/1I8YDqZqpLFboaC6S8x7oAlt7F0GNDc34?usp=sharing>
3. Doutorando Sanduíche no Exterior:
<https://drive.google.com/drive/folders/1NFXbMx0D5a5YU0xshthywoJjHZmpwfu?usp=sharing>

Apresentações em eventos científicos:

1. ELEMENTOS-TRAÇO NA PECUÁRIA: A PESQUISA CIENTÍFICA ATRAVÉS DA PERSPECTIVA “ONE HEALTH”. I SEMANA ACADÊMICA DA PESQUISA E INOVAÇÃO DA UNEMAT. 2021.
2. FERTILIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE PASTAGEM E FLORESTA NATIVA NO SUL DA AMAZÔNIA. JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO DO INSTITUTO FEDERAL DE MATO GROSSO, CAMPUS ALTA FLORESTA – 2022.
3. ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS DE PASTAGENS NA AMAZÔNIA MERIDIONAL. III SEMANA ACADÊMICA DA PESQUISA E INOVAÇÃO DA UNEMAT. 2023.
4. MERCURIO EN VACUNO DE CARNE EN PASTOREO EN EL SUR DE LA AMAZONÍA. XXV CONGRESO INTERNACIONAL ANEMBE DE MEDICINA BOVINA. 2023.
5. TEORES BACKGROUND PARA ELEMENTOS-TRAÇO, FERRO E MANGANES EM SOLOS DE MATO GROSSO. CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. 2023.