

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Impactos socioeconômicos do fechamento da lacuna de produtividade
da pecuária a pasto no Brasil**

Marcela Almeida de Araujo

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Economia Aplicada

**Piracicaba
2024**

Marcela Almeida de Araujo
Bacharela em Ciências Econômicas

**Impactos socioeconômicos do fechamento da lacuna de produtividade da pecuária
a pasto no Brasil**

Orientador:

Prof. Dr. **JOAQUIM BENTO DE SOUZA FERREIRA FILHO**

Coorientador:

Dr. **GERALDO BUENO MARTHA JUNIOR**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Economia Aplicada

Piracicaba
2024

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação DIVISÃO
DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Marcela Almeida de Araujo

Impactos socioeconômicos do fechamento da lacuna de produtividade da pecuária a pasto no Brasil / Marcela Almeida de Araujo. - - Piracicaba, 2024.

166 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Análise de Yield Gap 2. Modelagem biofísica 3. Agricultura de baixa emissão de carbono 4. Impactos socioeconômicos e ambientais 5. Equilíbrio geral computável I. Título

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, especialmente, ao meu pai Milton Araújo, a minha irmã Marta Araújo e ao Leandro Almeida pelo apoio incondicional, amor e paciência os quais me dedicaram ao longo desses anos e por terem sempre me motivado nessa caminhada.

Ao meu orientador Joaquim Bento de Souza Ferreira Filho por toda sua paciência, amizade e gentileza em me oferecer aprendizados, oportunidades e parceria na realização desta tese. Da mesma forma, agradeço ao meu coorientador, Geraldo Bueno Martha Junior, especialmente, sobre a metodologia utilizada para mensuração dos *yield gap* da pecuária, bem como as sugestões oferecidas no decorrer do processo.

Aos estimados Valentino Marini Govigli e Marco Setti pela gentil recepção e atenção no *Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari* da *Università di Bologna*. Os meses vivenciados na Itália foram verdadeiramente gratificantes, proporcionando memoráveis aprendizados e experiências.

A equipe do Grupo de Políticas Públicas (GPP-ESALQ), meu querido lar, especialmente, aos meus grandes mestres - Alberto Barretto, Gerd Sparovek, Rodrigo Maule, Sergio Paganini e Simone Ranieri -, e aos queridos amigos e companheiros de carreira - Aduino Rocha, Ana Chamma, Arthur Fendrich, Giovanni Gianetti, José Safanelli, Monique Filassi, Naila Takahashi, Pedro Coutinho e Pietro Gragnolati - pela confiança, apoio e principalmente pela oportunidade de concluir esse doutorado.

Aos grandes amigos e companheiros de vida Aline Esteves, Paulo Tavares, Thaís Baldassini, Verônica Alves, Wanderson Sousa e Zenilda Ledo pelo incentivo, apoio e amizade, os quais no decorrer de toda a caminhada me fortaleceram com boas palavras e adorável parceria.

Ademais a CAPES e ao IABS pelo fomento e suporte durante o período de doutorado.

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE QUADROS.....	15
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	17
Referências.....	21
2. ASPECTOS GERAIS DA PECUÁRIA DE CORTE NO BRASIL E SEU PROCESSO DE INTENSIFICAÇÃO.....	25
2.1 A pecuária no Brasil: relevância econômica e social.....	26
2.2 Externalidades ambientais ligadas à atividade pecuária.....	29
2.2.1 Dinâmica de expansão das áreas de pastagem e seus efeitos.....	29
2.2.2 Emissão de gases de efeito estufa (GEE).....	31
2.3 Intensificação da pecuária de corte no Brasil.....	32
2.3.1 Degradação e recuperação de pastagens e aspectos relevantes para a intensificação da pecuária bovina	34
2.3.2 “Efeito poupa terra” (<i>land-saving effect</i>) versus “efeito rebote” (<i>rebound effect</i>).....	36
2.3.3 Outros trade-offs da intensificação da pecuária	40
Referências.....	41
3. LACUNA DE PRODUTIVIDADE DA PECUÁRIA DE CORTE A PASTO NO BRASIL	49
3.1 Aspectos gerais sobre análise de lacuna de produtividade (Yield Gap) e sua aplicabilidade.....	49
3.1.1 Conceito e aplicação de análise de yield gap na agropecuária	50
3.1.2 Aplicabilidade da análise de yield gap na pecuária a pasto	54
3.1.3 Objetivos.....	59
3.2 Material e Métodos	60
3.2.1 Projeto GYGA – Atlas Global de Yield Gap.....	61
3.2.2 Estimativa da produtividade atingível (Y _w) das áreas de pastagens	63
3.2.3 Estimativa da produtividade real da pecuária a pasto	73
3.2.4 Estimativa da lacuna de produtividade da pecuária	76

3.3	Resultados e Discussão.....	76
3.3.1	Simulação da produção de forragem pelo modelo CROPGRO-PFM	76
3.3.2	Produtividade da pecuária a pasto	82
3.3.3	Desempenho animal	82
3.3.4	Taxa de lotação real e atingível	83
3.3.5	Produtividade real e atingível	86
3.3.6	Lacuna de produtividade da pecuária (Yield Gap).....	90
3.4	Considerações Finais	96
	Referências	97
4.	IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS DO FECHAMENTO DA LACUNA DE PRODUTIVIDADE DA PECUÁRIA DE CORTE	103
4.1	Impactos do incremento de produtividade na pecuária	103
4.1.1	Objetivo	106
4.2	Material e Métodos	107
4.2.1	Regiões prioritárias para o fechamento da lacuna de produtividade na pecuária de corte.....	107
4.2.2	Modelagem de equilíbrio geral computável	115
4.2.3	A estratégia de simulação utilizada	121
4.3	Resultados e Discussão.....	127
4.3.1	Impactos socioeconômicos	127
4.3.2	Impactos ambientais	145
4.4	Considerações Finais	154
	Referências	155
	APÊNDICE	159

RESUMO

Impactos socioeconômicos do fechamento da lacuna de produtividade da pecuária a pasto no Brasil

Em uma perspectiva global de crescente demanda por produtos agropecuários, mudanças climáticas e escassez de áreas para expansão de produção, a intensificação pecuária é posta como estratégica frente às políticas públicas brasileiras para alcançar uma agricultura com baixas emissões de GEE. Entre essas políticas está o Plano ABC+, que promove a adoção de sistemas, práticas, produtos e processos de produção sustentáveis, como a recuperação de pastagens degradadas (RPD). A RPD pode gerar efeitos sobre a economia e o uso da terra, além de maior fixação de carbono orgânico no solo (SOC). A identificação de pastos degradados no Brasil, comumente, se baseia em indicadores de produtividade pecuária, sobretudo na baixa taxa de lotação animal. Porém, essa abordagem nem sempre é precisa, uma vez que áreas com baixa capacidade de suporte, devido a limitações do meio físico, não estão necessariamente degradadas. A análise de lacuna de produtividade (diferença entre produtividade potencial/atingível e a produtividade real) utiliza modelos de crescimento de forragem para identificar áreas de pasto com maior ou menor potencial para recuperar, sendo um método alternativo para solucionar essa questão. O objetivo desta tese foi analisar os impactos socioeconômicos e ambientais do fechamento da lacuna de produtividade (*yield gap*) da pecuária bovina de corte no Brasil, entre 2020 e 2030, considerando as condições biofísicas para desenvolvimento das pastagens. Para isso, um modelo detalhado de Equilíbrio Geral Computável (EGC), que representa a economia brasileira (o TERMBR-15), foi utilizado para simular os choques de produtividade e investimento resultantes do fechamento das lacunas de produtividade via prática RPD. Para a análise do *yield gap* da pecuária a pasto, os protocolos do GYGA (*Global Yield Gap Atlas*) foram adaptados, especialmente em relação ao detalhamento espacial. Nesta análise, utilizou-se simulações de longo prazo de produção de forragem (no CROPGRO *Perennial Forage*) juntamente com modelo de taxa de lotação crítica, considerando a sazonalidade na produção de pasto. Além disso, a estimativa de produtividade da carne bovina considerou taxa de lotação e desempenho animal. Os choques de produtividade na pecuária de corte foram simulados em regiões identificadas como prioritárias dentro dos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica, considerando condições biofísicas, econômicas e de infraestrutura necessárias para viabilizar o fechamento das lacunas. A análise de *yield gap* da pecuária sugere que a agenda de intensificação deve ser adaptada às diferentes regiões do Brasil. A média nacional da lacuna de produtividade é de cerca de 48 kg EC ha⁻¹ano⁻¹ e as maiores oportunidades de aumento de produtividade da pecuária estão nos estados de Mato Grosso do Sul, Pará, Mato Grosso, Minas Gerais, São Paulo e Rondônia, que possuem grandes extensões de pastagem com lacunas acima de 75 kg EC ha⁻¹ ano⁻¹. Por outro lado, em torno de 9% da área total de pastagem nos municípios analisados (141,6 Mha) está com lacuna de produtividade negativa, ou seja, ultrapassou os limites biofísicos de produtividade. Já a modelagem econômica revela que a RPD geraria um impacto positivo na economia brasileira, elevando o consumo real das famílias em 0,74% e o Produto Interno Bruto (PIB real) em 0,54%, ambos em relação à linha de base em 2030. Isso mostra que os investimentos para a RPD teriam elevada taxa de retorno social (R\$ 42 bilhões a preços de 2023): para cada real investido, cerca de quatro reais retornariam para a economia em 2030. A RPD beneficiaria todas as classes de famílias, contudo, os ganhos para as mais pobres seriam menores, com relação a salários e oferta de trabalho. Dessa forma, políticas adicionais para combater a desigualdade e melhorar a qualificação dos trabalhadores seriam necessárias. Nacionalmente, a produção pecuária se elevaria com menor uso de área, gerando um efeito-poupa terra de 0,44 Mha em 2030. Nas regiões de fronteira agrícola (Amazonas-Acre-Roraima e Piauí-Bahia) e no Mato Grosso do

Sul, contudo, haveria efeito rebote, com aumento do desmatamento. Ao considerar o potencial de fixação de SOC pela RPD, haveria uma redução tanto das emissões totais de GEE, quanto da intensidade de emissões (isto é, por unidade de produto) na pecuária em 2030, mitigando parte das emissões originadas da atividade.

Palavras-chave: Agricultura de baixa emissão de carbono, Análise de Yield Gap, Modelagem biofísica, Equilíbrio geral computável, Impactos socioeconômicos e ambientais

ABSTRACT

Socioeconomic impacts of closing yield gap in pasture-based livestock system in Brazil

In a global perspective of increasing demand for agricultural products, climate change, and limited available land for agricultural expansion, livestock intensification is considered as a strategic approach for Brazilian public policies to achieve low greenhouse gas emissions in agriculture. One of these policies is the ABC+ Plan which promotes the adoption of sustainable systems, practices, products, and production processes, such as the recovery of degraded pastures (RDP). RDP can have effects on the economy land use, and increased soil organic carbon (SOC) sequestration. The identification of degraded pastures in Brazil commonly relies on indicators of livestock productivity, especially in the low animal stocking rate. However, this approach may not always be accurate, as areas with low carrying capacity due to physical limitations are not necessarily degraded. The yield gap analysis (difference between potential/achievable and actual productivity) uses forage growth models to identify pasture areas with higher or lower potential for recovery, providing an alternative method to address this issue. The aim of this thesis was to analyze the socioeconomic and environmental impacts of closing the yield gap in Brazilian beef cattle farming between 2020 and 2030, taking into account the biophysical conditions for pasture development. For this purpose, a detailed Computable General Equilibrium (CGE) model representing the Brazilian economy (TERMBR-15) was used to simulate productivity and investment shocks resulting from closing yield gaps through RDP practices. For the analysis of pasture yield gaps, the Global Yield Gap Atlas (GYGA) protocols were adapted, especially regarding spatial detailing. In this analysis, long-term simulations of forage production (using CROPGRO Perennial Forage) were combined with a critical stocking rate model, considering seasonality in pasture production. Additionally, the estimation of beef productivity considered stocking rate and animal performance. Productivity shocks in beef cattle farming were simulated in regions identified as priorities within the Amazon, Cerrado, and Atlantic Forest biomes, considering biophysical, economic, and infrastructure conditions necessary to enable gap closure. The livestock yield gap analysis suggests that the intensification agenda should be adapted to different regions of Brazil. Currently, the national average yield gap is approximately 48 kg EC ha⁻¹ year⁻¹, and the greatest opportunities for increasing livestock productivity are in the states of Mato Grosso do Sul, Pará, Mato Grosso, Minas Gerais, São Paulo, and Rondônia, which have large pasture areas with gaps above 75 kg EC ha⁻¹ year⁻¹. On the other hand, around 9% of total pasture area in the analyzed municipalities (141.6 Mha) has a negative yield gap, exceeding the biophysical productivity limits. The economic modeling indicates that RDP would generate a positive impact on the Brazilian economy, increasing real household consumption by 0.74% and real Gross Domestic Product (GDP) by 0.54%, both compared to the baseline in 2030. This shows that investments in RDP would have a high social return rate (R\$ 42 billion at 2023 prices): for every real invested, about four reais would return to the economy in 2030. RDP would benefit all classes of families; however, gains for the poorest would be smaller in terms of wages and job availability. Thus, additional policies to combat inequality and improve worker qualifications would be necessary. Nationally, livestock production would increase with less land use, generating a land-saving effect of 0.44 Mha in 2030. In agricultural frontier regions (Amazon-Acre-Roraima and PiauÍ-Bahia) and Mato Grosso do Sul, however, there would be a rebound effect, with increased deforestation. Considering the potential for SOC fixation by RDP, there would be a reduction in both total greenhouse gas emissions and emission intensity (per unit of product) in livestock in 2030, mitigating some of the emissions originating from the activity.

Keywords: Low carbon emission agriculture, Yield gap analysis, Biophysical modeling, Computable general equilibrium, Socioeconomic and environmental impacts

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diferentes níveis de produtividade e seus respectivos fatores determinantes (definidores, limitantes e redutores)	51
Figura 2. Distribuição espacial das áreas de pastagens no Brasil, conforme LAPIG (2021)	65
Figura 3. Distribuição espacial dos pontos de simulação para estimativa de Y_w	65
Figura 4. Média mensal da radiação solar ($MJ\ m^2\ day^{-1}$) e temperaturas máxima e mínima ($^{\circ}C$), conforme dados climáticos de Xavier <i>et al.</i> (2016).....	67
Figura 5. Média e desvio padrão da taxa diária e mensal de acúmulo de forragem simulada pelo CROPGRO-PFM entre 1980-2016 para os biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica.....	77
Figura 6. Distribuição espacial do acúmulo da produção de biomassa seca mensal (em $kg\ ha^{-1}\ mês^{-1}$)	78
Figura 7. Distribuição espacial da produção de biomassa seca anual (em $kg\ MS\ ha^{-1}\ ano^{-1}$) no cenário de simulação no CROPGRO-PFM.....	79
Figura 8. Produção de biomassa seca anual (em $Mg\ MS\ ha^{-1}\ ano^{-1}$) e desvio padrão por Unidade Federativa no cenário de simulação no CROPGRO-PFM	80
Figura 9. Gráfico de caixas do desempenho animal por estado de 2012 a 2021	83
Figura 10. Taxas de lotação real e atingível em cabeças ha^{-1} nos 141,5 Mha de pastagem contemplados neste estudo	84
Figura 11. Taxa de lotação real (TLR) e taxa de lotação atingível (TLA) por Unidade da Federação (cabeças/ha).....	85
Figura 12. Evolução da Produtividade (PR), Taxa de Lotação (TL) e Desempenho Animal (DA) de 2012 a 2020	87
Figura 13. Produtividade real e atingível da pecuária a pasto nos 141,5 Mha de pastagem contemplados neste estudo	88
Figura 14. Taxa de lotação real (TLR), taxa de lotação atingível (TLA), produtividade real (PR) e produtividade atingível (PA) por UF.....	90
Figura 15. Lacuna de produtividade da pecuária a pasto para os municípios brasileiros.....	91
Figura 16. Distribuição espacial do indicador de infraestrutura pecuária (IIP) e dos seus respectivos componentes: transporte e frigoríficos	112
Figura 17. Distribuição espacial do indicador de infraestrutura de Crédito Rural (ICR).....	113
Figura 18. Regiões Prioritárias para fechamento da lacuna de produtividade na pecuária de corte nos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica.....	114

Figura 19. Estrutura de produção do modelo TERM-BR	118
Figura 20. Representação esquemática da matriz de transição no uso do solo no modelo TERM-BR15	120
Figura 21. Distribuição espacial das regiões agregadas para simulação no TERM-BR15	121
Figura 22. Resultados do modelo. Impacto no PIB real regional. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030.....	131
Figura 23. Resultados do modelo. Impacto no consumo real das famílias regional. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030.....	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Lista de variáveis de dados do solo, suas definições, referências e metodologias de derivação	69
Tabela 2. Resultados da simulação com o CROPGRO-PFM entre 1980-2016. Média e desvio padrão da produção atingível de biomassa seca por bioma	79
Tabela 3. Médias estaduais e desvio padrão (SD) do desempenho animal (DA)*, taxa de lotação real (TLR), taxa de lotação atingível (TLA), produtividade real (PR) e produtividade atingível (PA)	89
Tabela 4. Médias estaduais e desvio padrão (SD) da lacuna de produtividade absoluta e relativa	95
Tabela 5. Pastagens degradadas, meta de RPD para 2030 e choque de produtividade a partir de 2021	124
Tabela 6. Investimento médio do ABC+ (reais por hectare) e choque de investimento de 2021 na atividade pecuária.....	125
Tabela 7. Efeito marginal médio anual da RPD na mitigação de emissões de GEE (%)	126
Tabela 8. Elasticidade produtividade-mitigação para bovinocultura de corte e leite	127
Tabela 9. Resultados do modelo. Impacto macroeconômico. Variação % acumulada em 2030	128
Tabela 10. Parcelas de produção regional da agropecuária e indústria de carnes em 2015	132
Tabela 11. Impacto na produção. Variação % acumulada em 2030.....	134
Tabela 12. Resultados do modelo. Impacto na exportação. Variação % acumulada em 2030.....	135
Tabela 13. Resultados do modelo. Impacto na produção regional. Produtos selecionados. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030	136
Tabela 14. Resultados do modelo. Impacto na exportação regional de produtos selecionados. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030.....	137
Tabela 15. Resultados do modelo. Impacto no consumo real das famílias e no preço da cesta de consumo. Variação % acumulada em 2030	138
Tabela 16. Resultados do modelo. Impacto no preço dos produtos. Variação % acumulada em relação a 2030	139
Tabela 17. Composição setorial da demanda por trabalho, por classes de qualificação do trabalho em 2020	140
Tabela 18. Resultados do modelo. Impacto no salário real. Variação % acumulada em 2030	141
Tabela 19. Resultados do modelo. Impacto no uso de capital. Variação % acumulada em 2030	141

Tabela 20. Resultados do modelo. Impacto regional no consumo real das famílias. Variação % acumulada em relação à 2030	142
Tabela 21. Resultados do modelo. Impacto regional nos preços da cesta de consumo entre as classes de família. Variação % acumulada em relação à 2030	143
Tabela 22. Resultados do modelo. Impactos no mercado de trabalho regional da pecuária. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030.....	144
Tabela 23. Resultados do modelo. Impacto regional no consumo real de alimento das famílias. Variação % acumulada em relação à 2030	145
Tabela 24. Resultados do modelo. Impacto na mudança de uso da terra. Variação % e absoluta acumulada em relação a 2030	146
Tabela 25. Resultados do modelo. Impacto na mudança de uso da terra por setor de atividade. Variação % acumulada em relação a 2030	147
Tabela 26. Resultados do modelo. Impacto regional na mudança de uso da terra. Variação % acumulada em relação à 2030.....	148
Tabela 27. Resultados do modelo. Impacto regional na mudança de uso da terra por setor de atividade. Variação % acumulada em relação à 2030. Setores selecionados.....	149
Tabela 28. Resultados do modelo. Impacto em emissões. Variação na contribuição de cada fonte de emissões para a variação total. Métodos original e alternativo de contabilidade de emissões. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030.....	150
Tabela 29. Resultados do modelo. Impacto em emissões da pecuária bovina. Métodos original e alternativo de contabilidade de emissões. Variação % acumulada em relação à linha de base de 2030	151
Tabela 30. Resultados do modelo. Impacto em emissões e intensidade de emissões nos setores selecionados. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030.....	152
Tabela 31. Resultados do modelo. Impacto em emissões de todos os setores. Métodos original e alternativo de contabilidade de emissões. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030	153
Tabela 32. Resultados do modelo. Impacto em emissões da pecuária bovina. Métodos original e alternativo de contabilidade de emissões. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030	154
Tabela 33. Resultados do modelo. Impacto regional na produção dos setores econômicos. Variação % acumulada em 2030.....	162
Tabela 34. Resultados do modelo. Impacto no uso do trabalho entre os setores de atividades. Variação % acumulada em 2030	164
Tabela 35. Resultados do modelo. Impacto no trabalho e no salário real nos setores agrícolas. Variação % acumulada em 2030	164

Tabela 36. Resultados do modelo. Impacto no trabalho e no salário real nos setores da pecuária bovina. Variação % acumulada em 2030 165

Tabela 37. Resultados do modelo. Impacto no trabalho e no salário real do setor de carnes. Variação % acumulada em 2030..... 165

Tabela 38. Resultados do modelo. Impacto no trabalho e no salário real em outras agroindústrias. Variação % acumulada em 2030 166

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Produtos da agropecuária brasileira	117
Quadro 2. Classificações dos tipos de famílias (POF) e de trabalho (OCC) no modelo EGC. Classes de Famílias	159
Quadro 3. Regiões agregadas no modelo EGC	159
Quadro 4. Produtos agregados no modelo EGC.....	160

1. INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento populacional global previsto para as próximas décadas, somado ao aumento da renda *per capita* e da urbanização em países de renda baixa e média, tendem a elevar consideravelmente a demanda por produtos agropecuários, especialmente, os de proteína animal (Sans; Combris, 2015; Godfray *et al.*, 2018; OECD/FAO, 2022). Uma redução global no consumo *per capita* de carne bovina tem sido observada desde 2007 (OECD/FAO, 2022), porém com uma população próxima de 8,5 bilhões de pessoas prevista para 2030 (ONU, 2022) o consumo total dessa proteína deverá aumentar em 76 milhões de toneladas nos próximos 10 anos, com destaque para os países da Ásia e Pacífico – na China o consumo *per capita* deverá aumentar mais 10% até 2031, depois de ter aumentado 50% na última década (OECD/FAO, 2022).

Atender a essa demanda significará o enfrentamento de desafios socioeconômicos e ambientais relacionados às mudanças climáticas e às restrições de áreas para expansão agrícola (Godfray *et al.*, 2010; Licker *et al.*, 2010, Cohn *et al.*, 2014; Springmann *et al.*, 2018). A superação desses desafios exigirá, entre outros esforços, como as mudanças nos hábitos alimentares (Springmann *et al.*, 2018), a necessidade de fomentar tecnologias agropecuárias de baixa emissão de gases de efeito estufa (GEE) e maior resiliência dos sistemas produtivos (van Zanten *et al.*, 2018). Além disso, para que cada hectare de terra já cultivada produza em patamares mais elevados do que os níveis de produtividade atuais, alguns autores apontam a necessidade de propiciar o fechamento das lacunas de produtividade (*yield gap*) das principais culturas agropecuárias (van Ittersum *et al.*, 2013; Strassburg *et al.*, 2014; Marin *et al.*, 2016).

O Brasil exerce papel central na promoção da segurança alimentar mundial, devido à sua grande capacidade de produção de alimentos (Tollefson, 2010; OECD/FAO, 2022). A pecuária bovina de corte brasileira é uma das mais expressivas no cenário internacional no que se refere ao efetivo animal e valor exportado. O Brasil é o segundo maior exportador mundial de carne bovina (USDA, 2022), atrás apenas dos Estados Unidos. Na última década, a pecuária de corte brasileira experimentou uma crescente expansão e participação em mercados internacionais, com destaque para o mercado asiático. A China é o principal comprador do Brasil, sendo responsável pela importação de cerca de 62% de toda carne bovina que o Brasil enviou ao exterior em 2022 (Brasil, 2023).

Apesar do protagonismo do Brasil na produção de carne bovina mundial, o desmatamento crescente no país é associado, mesmo que indiretamente, à abertura de novas áreas para pastagens. De 1985 a 2022 houve crescimento de 61Mha das áreas de pasto no Brasil (MapBiomass, 2023), sendo que entre 2016-2020 houve uma queda, voltando a crescer nos últimos anos. A pressão de avanço das pastagens sobre os ecossistemas naturais tornou-se uma ameaça para a própria produção pecuária (Stabile, *et al.*, 2020), devido, principalmente, ao aumento das emissões de GEE, a erosão do solo, a perda de biodiversidade entre outros impactos negativos no ambiente biofísico. Deste modo, o setor pecuário tem sido colocado como peça estratégica em qualquer transição de produção convencional para modelos mais sustentáveis, visto sua ampla abrangência territorial, protagonismo nas grandes dinâmicas

de uso da terra e participação na emissão de (GEE) (Cohn *et al.*, 2014; Strassburg *et al.*, 2014; De Oliveira Silva *et al.*, 2017; De Oliveira Silva *et al.*, 2017).

A intensificação da pecuária bovina é colocada como fundamental do ponto de vista das políticas públicas para cumprimento da agenda ambiental brasileira. As áreas cobertas por pastagens já eram consideradas, há quase uma década, suficientes para o crescimento da produção pecuária, via intensificação, sendo que parte ainda poderia ser utilizada para restauração de ecossistemas naturais (Strassburg *et al.*, 2014). Esse processo de intensificação da produção pecuária é indicado para as mais diferentes condições de produção, incluindo desde a pecuária convencional, até sistemas produtivos diversificados como ILPF (Integração Lavoura-Pecuária-Floresta), envolvendo a integração da pecuária com agricultura ou silvicultura e a utilização de pastagens naturais ou plantadas. A intensificação é considerada como estratégia para evitar a conversão do *habitat* natural em agricultura (Phalan *et al.*, 2011), resultando em menos desmatamento. No modelo de pecuária convencional, sugere-se que a intensificação deva ocorrer por meio da adoção de tecnologias, como a melhoria genética do rebanho e de parâmetros zootécnicos e, especialmente, a adoção de melhores práticas de manejo das pastagens, como a recuperação de pastagens degradadas com adubação para suportar maiores taxas de lotação e desempenho animal¹.

Embora a intensificação da pecuária seja apontada como estratégia fundamental para o cumprimento da agenda ambiental brasileira, seus impactos são diversos (ambientais, econômicos e sociais) e ainda são objeto de investigação. Os incrementos dos níveis de produtividade dependem de diversos fatores relacionados a características ambientais (condições edafoclimáticas por exemplo), econômicas e sociais (valores culturais dos produtores, investimento financeiro, retorno financeiro etc.). Assim, é importante entender onde e até que ponto a intensificação da pecuária pode contribuir para maximizar tanto ganhos ambientais como socioeconômicos (De Oliveira Silva *et al.*, 2016). Este tipo de análise é importante especialmente devido a complexa relação entre incremento de produtividade e uso da terra, ou seja, os efeitos da intensificação dependem não somente das atividades agropecuárias a serem intensificadas mas também de onde ocorre, espacialmente, esse processo (Barretto *et al.*, 2013).

Neste contexto, a fim subsidiar o direcionamento de políticas públicas envolvendo intensificação da pecuária no Brasil, dois pontos importantes merecem atenção e estão relacionados aos objetivos desta tese. O primeiro ponto refere-se aos métodos adotados para identificar pastagens degradadas no Brasil ou para mensurar as lacunas de produtividade da pecuária. De acordo com Dias-Filho (2015), não existe uma metodologia uniforme para caracterizar os indicadores de degradação de

¹ Um exemplo de política pública brasileira na direção da agropecuária sustentável é o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Brasil, 2012) - Plano ABC. Entre o período de 2010 e 2020, a recuperação de áreas de pastagens degradadas foi um dos principais componentes do plano, tendo sido estabelecidas como metas a recuperação de 15 Mha de pasto. Passado sua primeira fase, o governo federal realizou uma extensão do referido plano, agora chamado de Plano ABC +, onde há como meta recuperar mais 30 milhões de hectares de pasto no Brasil entre 2020-2030 (Brasil, 2022).

pastagens. Geralmente a caracterização de uma pastagem como degradada se dá quando ela apresenta indicadores de baixa produtividade da pecuária, principalmente baseados na baixa taxa de lotação animal (UA. ha⁻¹)² (Arantes et al., 2018; Feltran-Barbieri; Féres, 2021; Stocco et al., 2020; Strassburg et al., 2014). No entanto, esta premissa nem sempre é verdadeira, uma vez que existem áreas de pasto com baixa capacidade de suporte³ devido às limitações físicas (solo, clima, relevo etc.), mas que não se encontram necessariamente degradadas. Isto é, os valores de baixa produtividade (em termos de taxa de lotação animal) para algumas regiões podem não ser sinônimo de pastagem degradada, e sim de baixa capacidade biofísica para desenvolvimento das forrageiras. O segundo ponto é como o fechamento das lacunas de produtividade são planejadas espacialmente. Isto é, se existe uma forma de priorizar esse fechamento, considerando aspectos importantes para o desempenho da pecuária, tais como a disponibilidade de infraestrutura e crédito rural.

A análise de lacuna de produtividade (*yield gap*) das áreas de pastagens é uma alternativa promissora para a definição de regiões prioritárias para recuperação das pastagens degradadas. Para tanto, toma-se como base o conceito amplamente utilizado para mensuração de lacuna de produtividade das mais diferentes culturas apresentadas por van Ittersum *et al.* (2013), como o adotado pelo Atlas Global de Lacuna da Produtividade (Projeto GYGA)⁴. Para os autores, a lacuna de produtividade é dada pela diferença entre a produtividade potencial ou atingível e a produtividade real⁵. As produtividades potencial e atingível podem ser obtidas por meio de modelos biofísicos de simulação de crescimento de culturas, enquanto a produtividade real é obtida por meio de dados observados ou censitários. Assim, a definição de lacuna de produtividade pode auxiliar na identificação espacial de regiões com maior ou menor potencial biofísico para aumentar a produtividade pecuária via recuperação ou melhoria da qualidade das pastagens, ou alternativamente, pode ser *proxy* para falta de infraestrutura ou preços relativos desfavoráveis à elevação da produtividade para este setor. Complementarmente, o desenvolvimento de indicadores eficientes de mensuração de lacunas de produtividade pode subsidiar a tomada de decisão sobre o processo de intensificação da pecuária.

De acordo com Strassburg *et al.* (2014), as pastagens no Brasil estão muito aquém de sua produtividade potencial, variando de 32% a 34% do que poderia alcançar em termos de taxa de lotação

² UA = Unidade animal. Trata-se de uma unidade para padronizar as diferentes categorias animais a pasto, em 1 UA refere-se a um animal com 450 kg de peso vivo.

³ Um conceito bastante prático de capacidade de suporte é o seguinte: quantidade de animais que pode ser mantida em uma determinada área de pastagem, por um determinado período, sem que haja superpastejo ou subpastejo. A capacidade de suporte é específica de uma determinada pastagem, de modo que as várias pastagens de uma mesma propriedade geralmente apresentam diferentes capacidades de suporte que variam entre as diferentes épocas do ano (clima) e ao longo dos anos (manejo e fertilidade do solo) (Andrade, 2005).

⁴ <https://www.yieldgap.org/web/guest/home>

⁵ De acordo com van Ittersum *et al.* (2013), a produtividade real (Yr) é aquela que efetivamente ocorre em condições reais de produção; a produtividade potencial (Yp) é aquela obtida por um genótipo adaptado sob condições ótimas de cultivo, sem qualquer fator limitante (água) ou redutor (pragas, doenças, nutrientes) ao seu crescimento; e a produtividade atingível (Yw) é aquela alcançada por um genótipo adaptado sob condições reais de cultivo, com a desfavorável influência de um ou mais fatores limitantes (água) ou redutores (pragas, doenças, nutrientes) ao seu crescimento.

animal. Araujo (2018) e Santos (2021), utilizando a abordagem do Atlas Global de *Yield Gap*, analisaram as lacunas de produtividade da pecuária bovina a pasto para regiões brasileiras. Araujo encontrou que a pecuária bovina no estado de São Paulo está 46% aquém do seu potencial biofísico. Enquanto, Santos (2021) mostrou que a região central do Brasil, considerando o cenário mais intensivo em condições de sequeiro, apresenta potencial para aumentar a sua taxa de lotação crítica entre 0,19 e 0,69 UA ha⁻¹, atingindo no máximo 1,21 UA ha⁻¹ para a região Leste do Sudeste (Cordeiro).

A inserção de melhorias de manejo no sistema produtivo pecuário, como a recuperação de pastagens degradadas, pode gerar impactos econômicos e ambientais. De Oliveira Silva *et al.* (2016) destacam como o manejo melhorado de pastagens pode incrementar os resultados econômicos e ambientais em relação ao cenário de manejo tradicional, especialmente em relação ao potencial de sequestro de carbono. Stocco *et al.* (2020) apresentam um passo importante na busca por mensurar os impactos econômicos e ambientais de um fechamento da lacuna de produtividade das pastagens no Brasil, por meio do modelo de equilíbrio geral computável, o TERM-BR (do inglês *The Enormous Regional Model*). No entanto, os autores utilizam o conceito de lacuna de produtividade pautado, especialmente, na taxa de lotação animal (UA.ha⁻¹) e, apesar de usarem um indicador de aptidão agrícola para ponderar o valor da lacuna, não incluem diretamente na mensuração o potencial que o meio físico teria para suportar esses incrementos na taxa de lotação. Os autores estimam que seria possível poupar cerca de 4,7 milhões de hectares de pastagens com o fechamento da lacuna de produtividade nas áreas de alta e muito alta aptidão agrícola, gerando uma ampliação de 0,43% do PIB real brasileiro em 2030. Porém, esse valor pode ter uma grandeza diferente, especialmente em escalas mais desagregadas, com um refinamento na maneira como as lacunas de produtividade são calculadas.

O presente estudo tem como objetivo geral analisar os potenciais impactos socioeconômicos e ambientais do fechamento de lacuna de produtividade da pecuária bovina de corte (ciclo completo) a pasto no Brasil, considerando as condições do meio físico para desenvolvimento da pecuária. Por meio da adaptação e aplicação da metodologia de modelagem de culturas (mecanicista), espacialmente explícita, para modelos econômicos (Equilíbrio Geral), o estudo busca auxiliar a avaliação e o direcionamento de políticas públicas em escala nacional e regional, bem como as tomadas de decisão do setor privado, para que sejam condizentes com a elaboração de diretrizes para o desenvolvimento rural sustentável.

Entre os objetivos específicos do estudo, estão: (i) estimar e analisar espacialmente a evolução da produtividade da pecuária a pasto no Brasil; (ii) estimar a lacuna de produtividade da pecuária brasileira, considerando o potencial biofísico para incremento de produtividade e em um nível territorial detalhado, com base em modelagem mecanicista - CROPGRO *Perennial Forage*; e (iii) analisar os possíveis impactos socioeconômicos e ambientais resultantes do fechamento da lacuna de produtividade da pecuária brasileira em regiões prioritárias para uma intensificação sustentável, por meio do Modelo de Equilíbrio Geral Computável – TERM-BR.

Este trabalho difere de estudos prévios descritos na literatura em dois principais aspectos: i) incorporar fatores biofísicos para obtenção da lacuna de produtividade, ou seja, buscar identificar as áreas com potencial de intensificação da pecuária de corte, via modelagem mecanicista, de acordo com a capacidade de suporte do meio físico (clima, solo, genética da planta, etc.); e ii) referir-se ao grau de factibilidade para fechamento dessa lacuna, por meio da definição de regiões consideradas prioritárias para o desenvolvimento da pecuária. Essa priorização de regiões parte do pressuposto de que, em termos de direcionamento de políticas públicas, as dinâmicas e ciclos econômicos e políticos influenciam a dinâmica do uso da terra (Moraes *et al.*, 2017).

Para o alcance dos objetivos propostos e para responder essas perguntas, a tese está estruturada em três capítulos, além desta introdução geral. O segundo capítulo apresenta uma ampla contextualização sobre a pecuária bovina brasileira, sua importância, conceitos e *trade-offs* relacionados à intensificação do setor. O terceiro capítulo tem como objetivo principal apresentar uma abordagem metodológica alternativa para mensuração da lacuna de produtividade da pecuária de corte no Brasil, pensada no âmbito da produtividade atingível das áreas de pasto de acordo com sua limitação biofísica. O capítulo quatro, por sua vez, apresenta os impactos econômicos provenientes do fechamento de lacuna de produtividade da pecuária de corte brasileira, obtidos por meio de um modelo de Equilíbrio Geral Computável (o TERM-BR) e considerando as regiões prioritárias para sua ocorrência, com base nas condições biofísicas, econômicas e de infraestrutura para a produção pecuária.

Referências

- ARANTES, Arielle Elias; COUTO, Victor Rezende de Moreira; SANO, Edson Eyji; FERREIRA, Laerte Guimarães. Livestock intensification potential in Brazil based on agricultural census and satellite data analysis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 53(9), 1053-1060, 2018. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000900009>.
- ABIEC, Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes. Perfil da Pecuária no Brasil. **Beef Reporte: Perfil da Pecuária no Brasil 2022**, p. 70, 2022. Disponível em: < https://www.abiec.com.br/wp-content/uploads/Beef-Report-2022_atualizado_jun2022.pdf>.
- ARAÚJO, Marcela Almeida de. Eficiência da produção da pastagem e potencial de intensificação da pecuária bovina no estado de São Paulo: instrumentos para avaliação e proposição de políticas públicas. 2018. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018. doi:10.11606/D.11.2018.tde-11102018-103029.
- BARRETTO, A. G. O. P.; BERNDDES, G.; SPAROVEK, G.; WIRSENIUS, S. Agricultural intensification in Brazil and its effects on land-use patterns: An analysis of the 1975-2006 period. **Global Change Biology**, v. 19, n. 6, p. 1804–1815, 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária 2020-2030**: Plano Operacional / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação. – Brasília: Mapa/DEPROS, 2021. 133p. ISBN: 978-65-86803-63-1. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/final-isbn-plano-setorial-para-adaptacao-a-mudanca-do-clima-e-baixa-emissao-de-carbono-na-agropecuaria-compactado.pdf>.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para Consolidação da Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – PLANO ABC**. Brasília, 2011. Disponível: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/download.pdf>>.

BRASIL. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços – MDIC. **Exportação e Importação Geral**. Março 2023. Anual. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/76958>>.

COHN, Avery S. et al. Cattle ranching intensification in Brazil can reduce global greenhouse gas emissions by sparing land from deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, n. 20, p. 7236-7241, 2014.

DE OLIVEIRA SILVA, R.; BARIONI, L. G.; HALL, J. A. J.; FOLEGATTI MATSUURA, M.; ZANETT ALBERTINI, T.; FERNANDES, F. A.; MORAN, D. Increasing beef production could lower greenhouse gas emissions in Brazil if decoupled from deforestation. *Nature Climate Change*, v. 6, n. 5, p. 493–497, 2016.

DE OLIVEIRA SILVA, R.; BARIONI, L. G.; HALL, J. A. J.; MORETTI, A. C.; FONSECA VELOSO, R.; ALEXANDER, P.; CRESPOLINI, M.; MORAN, D. Sustainable intensification of Brazilian livestock production through optimized pasture restoration. *Agricultural Systems*, v. 153, p. 201–211, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2017.02.001>>.

DIAS-FILHO, M. B. Uso de pastagens para a produção animal no Brasil: estado da arte e a necessidade de intensificação de forma sustentável e ambientalmente adequada. In: Da Silva, S.C.; Pedreira, C.G.S.; Moura, J.C. *Simpósio sobre Manejo da Pastagem, 27.*, 2015, Piracicaba. *Sistemas de Produção, Intensificação e Sustentabilidade da Produção Animal: Anais*. Piracicaba: FEALQ, 2015. p. 7-31.

FELTRAN-BARBIERI, Rafael; FÉRES, José Gustavo. Degraded pastures in Brazil: improving livestock production and forest restoration. *Royal Society Open Science*, v. 8, n. 7, p. 201854, 2021

GODFRAY, H. C. J. et al. Meat consumption, health, and the environment. *Science*, 361, 6399, 2018. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aam5324>.

GODFRAY, H. C. J.; BEDDINGTON, J. R.; CRUTE, I. R.; HADDAD, L.; LAWRENCE, D.; MUIR, J. F.; PRETTY, J.; ROBINSON, S.; THOMAS, S. M.; TOULMIN, C. **Food Security: The Challenge of feeding 9 billion people**. *Science*, v. 327, n. February, p. 812–818, 2010.

LICKER, Rachel *et al.* Mind the gap: how do climate and agricultural management explain the ‘yield gap’ of croplands around the world. *Global ecology and biogeography*, v. 19, n. 6, p. 769-782, 2010.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomias – Coleção 8.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/o-projeto/>.

MARIN, F. R.; PILAU, G. P.; SPOLADOR, H. F. S.; OTTO, R.; PEDREIRA, C. G. S. Intensificação sustentável da agricultura brasileira. *Revista de Política Agrícola*, v. Ano XXV, n. 3, p. 108–124, 2016.

MORAES, M. C. P.; MELLO, K.; TOPPA, R. H. Protected areas and agricultural expansion: Biodiversity conservation versus economic growth in the Southeast of Brazil. *Journal of Environmental Management*, v. 188, p. 73-84, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.075>

OECD/FAO (2022), OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/f1b0b29c-en>.

OECD/FAO (2020), OECD-FAO Agricultural Outlook 2020-2029, OECD Publishing, Paris/FAO, Rome, <https://doi.org/10.1787/1112c23b-en>.

PHALAN, B.; ONIA, M.; BALMFORD, A.; GREEN, R.E. Reconciling food production and biodiversity conservation: Land sharing and land sparing compared. *Science* 333, 6047, 1289–1291, 2011. Disponível em: <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/science.1208742>.

PEQUENO, D. N. L. **Agronomic performance and adaptation of the CROPGRO - Perennial Forage Model to predict growth of three tropical forage grasses under irrigated and rainfed conditions.** Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

SANS, P.; COMBRIS, P. World meat consumption patterns: an overview of the last fifty years (1961–2011). *Meat Sci.* 109, 106–111, 2015.

SANTOS, Mariely Lopes dos. Yield-gap in pasture-based animal production systems in Central-west and Southeast of Brazil (Central Brazil). 2021. Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021. DOI:10.11606/T.11.2021.tde-09092021-165205.

SPRINGMANN, M.; CLARK, M.; MASON-D’CROZ, D. *ET AL.* Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* 562, 519–525, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>

STABILE, M.C.C.; GUIMARÃES, A. L.; SILVA, D. S.; RIBEIRO, V.; MACEDO, M.N.; COE, M.T.; PINTO, E.; MOUTINHO, P.; ALENCAR, A. **Solving Brazil's land use puzzle: Increasing production and slowing Amazon deforestation**, *Land Use Policy*, Volume 91, 2020, 104362, ISSN 0264-8377. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104362>.

STRASSBURG, B. B. N.; LATAWIEC, A. E.; BARIONI, L. G.; NOBRE, C. A.; DA SILVA, V. P.; VALENTIM, J. F.; VIANNA, M.; ASSAD, E. D. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 28, n. 1, p. 84–97, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.001>>.

TOLLEFSON, J. Food: The global farm. *Nature* 466, 554–556, 2010. Disponível: <https://doi.org/10.1038/466554a>.

TILMAN, D.; BALZER, C.; HILL, J.; BEFORT, B. L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 50, p. 20260–20264, 2011. Disponível em: <<http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1116437108>>.

USDA. U.S Department of Agriculture. **Brazil: Livestock and Products Semi-annual. 2022.** Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/brazil-livestock-and-products-semi-annual-5>.

VAN ITTERSUM, M. K.; CASSMAN, K. G.; GRASSINI, P.; WOLF, J.; TITTONELL, P.; HOCHMAN, Z. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4–17, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>>.

VAN ZANTEN, H.; HERRERO, M.; VAN HAL, O.; ROOS, E.; MULLER, A.; GARNETT, T.; GERBER, P.J.; SCHADER, C.; DE BOER, I.J.M. Defining a land boundary for livestock production. **Glob. Chang. Biol.** 24, 4185–4194, 2018.

2. ASPECTOS GERAIS DA PECUÁRIA DE CORTE NO BRASIL E SEU PROCESSO DE INTENSIFICAÇÃO

As pastagens ocupam cerca de 38% das terras agricultáveis do mundo (1,8 bilhões de hectares). Neste espaço estão alocados cerca de 1,5 bilhões de bovinos (FAO, 2020). No Brasil, as pastagens abrangem cerca de 159 milhões de hectares, ou 19% da área total do país (LAPIG, 2021), abrigando um rebanho bovino de cerca de 234 milhões de animais, segundo a Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM) (IBGE, 2022). O país é o segundo maior exportador de carne bovina do mundo e possui o segundo maior rebanho (USDA, 2022). Em 2021, o Brasil produziu um volume de 9,7 milhões de toneladas de equivalente-carcaça (TEC). Desse total, 25% ou 2,5 milhões de TEC foram exportadas (ABIEC, 2022).

Em um futuro próximo, a pecuária brasileira deverá produzir e exportar mais. Tomando como referência o ano de 2021, a produção brasileira de carne bovina deve crescer cerca de 17% até 2030 (MAPA, 2021; FIESP, 2020) e projeta-se que as exportações do produto registrem alta de até 42% até 2030 (USDA, 2020). Segundo relatório da ABIEC (2022), esse aumento só será possível com um incremento de 45% na produtividade média da pecuária brasileira⁶.

Aumentar a produção sem a abertura de novas áreas (desmatamento) significa, em outras palavras, intensificar a produção ou, ainda, considerando o cenário atual de mudanças climáticas, intensificar a produção de forma sustentável (van Zanten *et al*, 2018). O Brasil é signatário de tratados, convenções e acordos internacionais, nos quais assumiu compromissos que precisa cumprir, sob pena de sanções econômicas e diplomáticas. Entre os compromissos está a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), assumida durante o Acordo de Paris, ratificada em 2016, onde o país se comprometeu a neutralizar 37% das suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) até 2025 e 43% até 2030, além de restaurar 12 milhões de hectares de vegetação nativa até 2030 (ambos em relação a 2005). Recentemente, sob desdobramentos da COP 27 realizada em 2021 na cidade de Glasgow, o Brasil enviou uma nova NDC, onde dispôs-se a reduzir suas emissões líquidas totais de GEE em 37% até 2025 (em relação a 2005), e em 50% até 2030, bem como de acabar com o desmatamento ilegal até 2028 (Brasil, 2022)⁷.

A pecuária, em razão da fermentação entérica - digestão de materiais orgânicos pelos ruminantes -, é responsável por 65% das emissões de gases do efeito estufa gerados pela agropecuária no Brasil (Observatório do Clima, 2021). Além disso, a expansão de áreas de pastagens é muitas vezes associada, mesmo que indiretamente, ao desmatamento (Barona, 2010), outra fonte de emissões de GEE. Na Amazônia, por exemplo, cerca de 80% da vegetação nativa que é desmatada é convertida em pastagens

⁶ De acordo com o Relatório 2022 da ABIEC: “No cenário mais conservador, as exportações de carne bovina brasileira ultrapassarão a marca das três milhões de toneladas entre 2025 e 2030. Para garantir o atendimento do mercado interno e externo, a produção de carne precisará aumentar 35% entre 2020 e 2030. Esse aumento só será possível com um incremento de 45% na produtividade média da pecuária brasileira.”

⁷ <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/comite-interministerial-sobre-mudanca-do-clima/arquivos-cimv/item-de-pauta-3-paris-agreement-brazil-ndc-final-1.pdf>

(Skidmore *et al.*, 2021). Na Mata Atlântica a expansão da pastagem representou 36% das conversões de vegetação nativa para outros usos no ano de 2017 (Rosa *et al.*, 2021).

Diante deste cenário e dos desafios atuais de elevar a produção pecuária e cumprir a agenda ambiental, a intensificação da pecuária brasileira é tida como um caminho promissor para o país atingir níveis de produção que atendam a demanda futura de alimentos sem comprometer a vegetação nativa e a biodiversidade (Strassburg *et al.*, 2014; De Oliveira *et al.*, 2016). Atualmente há uma lacuna em estudos que identifiquem, simultaneamente, os potenciais benefícios da intensificação pecuária e os melhores locais para que ela ocorra por meio da recuperação de pastagens. Isto implica em analisar os fatores biofísicos limitantes para a expressão do potencial de produtividade da pecuária a pasto, tal como as características de solo, relevo, clima e genética da planta forrageira.

A presente revisão de literatura busca apresentar o estado da arte da pecuária de corte no Brasil, especialmente, sobre sua extensão territorial, sua relevância econômica e social, bem como seu papel nas agendas ambientais e os aspectos relacionados à sua intensificação sustentável. O conceito de lacuna de produtividade (*yield gap*) é apresentado como solução analítica para o caso da recuperação de pastagens degradadas no Brasil, inserida em um conceito maior de intensificação sustentável. A revisão apresenta inicialmente a dimensão e importância da pecuária no Brasil, seguidas pela identificação de impactos ambientais que estão atrelados a esta atividade econômica. Posteriormente, a solução posta - a intensificação pecuária - é discutida, apresentando os chamados “efeitos poupa terra” (*land saving*) e “efeito rebote” (*rebound effect*), bem como seus custos e benefícios (*trade-offs*). Finalmente, a análise de lacuna da produtividade (*yield gap*) da pecuária é apresentada como uma solução para analisar onde os processos de intensificação apresentam maior potencial para ocorrer e equacionar os seus *trade-offs* no país.

2.1 A pecuária no Brasil: relevância econômica e social

A história da pecuária no Brasil se inicia praticamente no momento da chegada dos portugueses no país. De acordo com Da Silva *et al.* (2012), na metade do século XVI, a corte real portuguesa incentivava a exportação de gado para o Brasil, com destaque para a região litorânea, em especial a do recôncavo baiano. Com o crescimento gradual da economia na região, a criação de gado foi se estendendo ao interior do território. A tendência da época era a criação de gado rumo ao interior e a produção de açúcar na região litorânea (Da Silva *et al.*, 2012). No século XVII, as fazendas de gado formavam imensos latifúndios no interior do país, especialmente nos estados do Nordeste, e o rebanho bovino já continha cerca de 650 mil cabeças. Nos pampas sulistas a cultura pecuarista surgiu no século XVIII, baseada no uso de pasto nativo (Esselin, 2011).

De forma geral, a pecuária de corte brasileira desenvolveu-se por meio da expansão da fronteira agrícola (que ocorre por meio do desmatamento em regiões desprovidas de infraestrutura, especialmente de estradas) e, em menor incidência, pela utilização de terras esgotadas pela agricultura (Barretto *et al.*, 2013; Barbosa *et al.*, 2015; Maranhão *et al.*, 2019). Atividades agrícolas sempre foram vistas como mais

exigentes em termos de condições edafoclimáticas, preparo do solo, uso de insumos e mão de obra, em relação às atividades pecuárias. De modo geral essa característica ainda prevalece, como pode ser observado nos dados do Censo Agropecuário (IBGE, 2017), ao se comparar os estabelecimentos rurais de perfil agrícola *versus* pecuário, mesmo que a pecuária moderna e produtiva faça cada vez mais uso intensivo de insumos e tecnologias. Além disso, devido à sua capacidade de auto locomoção, o gado adequa-se a regiões onde estradas e meios de transporte são precários e as distâncias do mercado consumidor são grandes, o que é característico de muitas regiões de fronteira agrícola (Dias Filho, 2010).

A maior facilidade de implantar a pecuária no território resultou em predomínio de áreas de pastagens em relação a outros usos do solo. Este fato é observado desde o início da série histórica de levantamentos sobre utilização das terras nos estabelecimentos agropecuários pelo Censo Agropecuário (IBGE) e perdura até hoje para qualquer recorte de produtor (pequeno, médio ou grande, agricultura familiar ou agricultura não familiar, de maior ou menor renda), em um padrão de 2 a 3 hectares de pastagem para cada hectare de agricultura.

Os dados do IBGE, os quais são autodeclaratórios, mostram que entre os anos 1975 e 2017 as áreas de pastagem diminuíram cerca de 7 Mha (4,2%). Entre os anos de 2006 e 2017, período entre os dois últimos Censos Agropecuários, o padrão também é de redução. Neste intervalo de aproximadamente uma década, a área de pastagem diminuiu cerca de 1%. Simultaneamente à redução das áreas de pastagem, o rebanho nacional de bovinos cresceu cerca de 70%, passando de 101 milhões de animais em 1975 para 172 milhões de animais em 2017, segundo dados dos Censos Agropecuários (IBGE), indicando a intensificação da atividade produtiva no país.

Em relação ao número de estabelecimentos, o Censo Agropecuário de 2006 aponta que cerca de 2,7 milhões de estabelecimentos criavam bovinos no país, sendo a pecuária a principal atividade econômica em 1,7 milhões destes estabelecimentos (64,4%). Em 2017, 2,5 milhões de estabelecimentos possuíam efetivo bovino, sendo que em 1,8 milhões, ou 72,6%, a pecuária era a principal atividade econômica. Ou seja, embora o número de estabelecimentos rurais com criação de bovinos tenha diminuído cerca de 6% no período, a importância da atividade pecuária cresceu nos estabelecimentos, se tornando a principal atividade econômica.

A pecuária tem grande relevância na economia do país, gerando empregos e contribuindo para o valor bruto de produção (VBP) dos estabelecimentos agropecuários e para o PIB brasileiro. É possível observar a participação da pecuária na geração de empregos por meio dos dados da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS, Ministério do Trabalho) e da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD Contínua, IBGE). De acordo com os dados da RAIS (2019), o total de trabalhadores empregados pelo setor pecuário representou 32% do total empregado na agropecuária – 0,44 de 1,36 milhões de indivíduos, em 2006. Em 2017, esse valor aumentou levemente para aproximadamente 0,5 de 1,5 milhões de indivíduos (33%), e em 2019 para 0,51 de 1,48 milhões (34%). Segundo Garcia (2017), em um cenário de intensificação sustentável da pecuária haveria um potencial aumento de 54%

no número de trabalhadores contratados pelo setor pecuário como um todo, considerando um período de 12 anos.

O VBP da pecuária mostra a evolução do desempenho da atividade ao longo do ano e corresponde ao faturamento bruto dentro do estabelecimento. No ano de 2021 a pecuária gerou um VBP de 159,2 bilhões de reais, contribuindo com 13% do VBP agropecuário nacional. Em 2017, o VBP da pecuária foi de 101,4 bilhões de reais, o que também representou cerca de 13% do VBP agropecuário total do Brasil (Brasil, 2022). Entre esse período, de 2017 a 2021, o VBP da pecuária no Brasil cresceu cerca de 57%. Já com relação ao PIB, que representa a soma de todos os bens e serviços finais produzidos no país, a pecuária foi responsável por 489,9 milhões de reais em 2017 e 604,5 milhões de reais em 2021 (aumento de 23% no período) (CEPEA, 2021). Em 2017 o PIB da pecuária representou cerca de 28% do PIB total do agronegócio e em 2021 cerca de 25%. A participação da pecuária no PIB do agronegócio evidencia a representatividade do setor na economia nacional. Nos últimos anos, grande parte da receita gerada pelo setor ocorreu devido à inserção da pecuária brasileira no mercado internacional (CEPEA, 2022).

O Brasil ocupa a posição de segundo maior produtor de carne bovina, atrás apenas dos Estados Unidos, e é o maior exportador da *commodity*, segundo dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2022 - sigla em inglês). Também de acordo com o USDA, as exportações de carne bovina atingiram 2,5 milhões de toneladas de carcaça equivalente (TEC) em 2020. As exportações brasileiras de carne bovina apresentam três períodos bem definidos em termos de preço e toneladas de carne exportada entre os anos 1997 e 2020: 1997 a 2008, 2009 a 2014 e 2015 a 2020. O maior faturamento ocorreu no final do primeiro período (mais especificamente em 2008), atingindo aproximadamente 10 bilhões de reais⁸ (Brasil, 2021).

O período mais recente, entre 2015 e 2020, evidencia um expressivo crescimento do volume de exportações de carne bovina, atingindo o maior volume exportado em 2020, superior a 2,7 milhões de TEC. Esse volume exportado correspondeu a R\$ 8,4 bilhões⁹ em receita e representou mais de 26% de toda a carne bovina produzida no país no mesmo ano. O principal destino das exportações de carne bovina brasileira em 2020 foi a China, com US\$ 4,0 bilhões e 868 mil TEC (Brasil, 2021).

Além da produção de carne bovina para o mercado interno e externo, a pecuária desempenha diversas funções sociais. A atividade é importante culturalmente e pode cumprir certas funções como: provedora de emprego para o agricultor e/ou familiares; ajuda no alcance de segurança alimentar e suprimento protéico da dieta das famílias; reserva de valor na forma de efetivo animal; seguro contra reveses nas fontes de renda; e contribuição para a igualdade de gênero. Por outro lado, também pode

⁸ Preços reais de julho de 2020, deflacionados pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA).

⁹ Preços reais de julho de 2020, deflacionados pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA).

funcionar como estratégia de garantia a posse de terra em locais de baixa governança fundiária (como será detalhado no próximo item) (Riethmuller, 2003; Parente *et al.*, 2017; Miranda, 2019).

Há de se considerar, além dos aspectos da pecuária mais relacionados à dimensão social, os impactos ambientais gerados pela atividade, como será tratado no próximo tópico. De acordo com Pontes *et al.* (2018), atualmente, a maioria dos sistemas de produção pecuária no Brasil são concentrados na monocultura, com forrageiras mal manejadas e de baixa qualidade, que resultam em baixa produção e pequena capacidade em realizar o sequestro de carbono da atmosfera. No Brasil, a atividade agropecuária é apresentada como um dos principais vetores de desmatamento (Ferraz 2001; Perz, 2002; Muchagata; Brown, 2003; Kuschning *et al.*, 2021; Skidmore *et al.*, 2021), em particular nos biomas Amazônia e Cerrado (Malaguti, 2021), e contribui significativamente para as emissões de GEE (Brasil, 2020).

2.2 Externalidades ambientais ligadas à atividade pecuária

A pecuária é considerada um dos setores produtivos que mais contribui para as mudanças climáticas globais, a degradação de terras e da água e para a perda da biodiversidade (Foley *et al.*, 2011; Nijdam *et al.*, 2012; Coimbra; Gomes-Jr; Fernandez, 2020). O impacto pode ser direto, por meio da eructação animal, por exemplo, ou indireto, como vetor de desmatamento, seja via expansão das pastagens e posterior substituição por monocultivos agrícolas (soja ou cana-de-açúcar, por exemplo), seja via expansão das próprias áreas cultivadas com soja para alimentação animal (Steinfeld, 2006; Kuschning *et al.*, 2021). Este estudo abordará, de forma breve, os efeitos negativos sobre a dimensão ambiental com ênfase na expansão das áreas de pastagem (via desmatamento) e contribuição para a emissão de GEE.

2.2.1 Dinâmica de expansão das áreas de pastagem e seus efeitos

O setor da pecuária é apontado como um dos principais responsáveis pelas transformações globais da cobertura e do uso da terra após a década de 1960 (Lambin, 2001). No Brasil, segundo o LAPIG (2020), a área de pastagem expandiu cerca de 31% em 36 anos (1985 a 2020), passando de 121 milhões de hectares (Mha) em 1985 para cerca de 159 Mha em 2021.

Os dados do MapBiomas (2023) mostram uma dinâmica semelhante. De acordo com a Coleção 8 dessa fonte de dados, nos últimos 37 anos (1985 a 2022) a área de pastagem expandiu aproximadamente 60% (61 Mha) no Brasil, aumentando de 103 Mha para 164 Mha, dos quais cerca de 74 Mha de vegetação nativa foram convertidos para este uso (MapBiomas, 2023). representando 73% das conversões de vegetação nativa para áreas agropecuárias. Como padrão, o primeiro uso da terra após o desmatamento de áreas de vegetação nativa no Brasil é a pastagem (Cardille; Foley, 2003; Barona *et al.*, 2010). Mais tarde, geralmente esse mesmo espaço é ocupado por culturas agrícolas economicamente mais rentáveis, como a soja e a cana-de-açúcar (Sparovek *et al.*, 2009; Scheffler *et al.*, 2011). Em 35

anos (1985-2020), cerca de 7,4Mha de pastagem foram convertidos em soja e 4,6 Mha em cana-de-açúcar (MapBiomias, 2021).

A expansão de áreas de pastagem no Brasil, porém, ocorreu de forma heterogênea no território. De acordo com Parente *et al.* (2019), nas regiões de fronteira agrícola brasileira, a mudança de uso da terra predominante é a conversão de vegetação nativa (via desmatamento) para a pastagem destinada à produção pecuária. O estudo identificou que a expansão ocorreu principalmente na região Norte do país e, em menor escala, no Centro-Oeste, sendo que os estados que ganharam mais área de pastagem entre 1985 e 2017 foram Mato Grosso (~14 Mha), Pará (~14 Mha) e Rondônia (~6,3 Mha), enquanto os que mais retraíram as áreas de pastagem foram São Paulo (~6,3 Mha), Rio Grande do Sul (~3,5 Mha) e Paraná (~2,9 Mha). Na região Norte do país, em especial no sul do bioma Amazônia, o setor pecuário é considerado como o principal agente econômico que pressiona pela abertura de grandes áreas de vegetação nativa, uma vez que a pecuária é praticada extensivamente (Santos *et al.*, 2021).

Vale destacar que desde meados de 2002, a área de pastagem está relativamente estável no Brasil, variando entre cerca de 175 Mha e 178 Mha em 2017. A maior parte da expansão ocorreu entre 1985 e 2002, com um aumento de cerca de 57 Mha em apenas 17 anos (Parente *et al.*, 2019). Os biomas Mata Atlântica e Pampa se destacam por apresentarem queda de área de pastagens em detrimento do crescimento de culturas agrícolas mais intensivas e economicamente lucrativas como soja e cana-de-açúcar (Parente *et al.*, 2019), e até mesmo de regeneração de vegetação nativa (MapBiomias, 2021). Nesses locais, onde há maior governança territorial e onde os mecanismos da produção agrícola já estão consolidados, houve maior intensificação da pecuária.

A conversão de áreas de vegetação nativa em pastagens também é historicamente utilizada como estratégia para assegurar a propriedade da terra no Brasil (Miranda, 2019). O preço de mercado das áreas naturais consiste não só no valor relacionado com os usos da terra com a cobertura de vegetação nativa (por exemplo, produtos florestais), mas também nas receitas esperadas dos usos futuros da terra, tais como pastagens (Barreto *et al.*, 2008; Carrero; Fearnside, 2011; Strassburg *et al.*, 2014). A dinâmica observada pelo estudo de Parente *et al.* (2019) reforça a tese da utilização de pastagens como reserva de terra e demonstra a importância dessas áreas sob o ponto de vista econômico e social no Brasil, como apresentado no item 2.1. A consolidação da pecuária brasileira no norte do país e a conversão de pastagens localizadas no centro-sul para outros usos, confirma o papel das áreas de pastagem como importantes reservas de terras (Parente *et al.*, 2017).

Por outro lado, a conversão de vegetação nativa em pastagens pode gerar, entre outros impactos, erosão e compactação e empobrecimento do solo, dificultando a regeneração de espécies nativas e causando impactos nos corpos hídricos, como assoreamento e redução na qualidade da água (Mello *et al.*, 2020). Além disso, a perda e fragmentação de habitats naturais geradas pelo desmatamento podem levar à redução da biodiversidade, afetando os serviços ecossistêmicos prestados por ela, como polinização, controle natural de pragas e estoque de carbono (Medeiros *et al.*, 2019; Tiltonell, 2021).

Apesar de apresentar área de pastagem e tamanho de rebanho bovino estáveis desde 2006, o Brasil mostra uma dinâmica espacial de deslocamento da atividade pecuária (principalmente do bioma Mata Atlântica para o Cerrado e a Amazônia), principalmente, motivada pelo baixo valor das terras desmatadas (Parente *et al.*, 2019; Ferreira, 2018). No centro-sul, a expansão agrícola sobre as áreas de pastagens consolidadas está associada à produção de *commodities* e exportação de grãos e cana-de-açúcar, em função, especialmente, da facilidade de acesso aos insumos e de escoamento da produção (Parente *et al.*, 2019).

Embora a intensificação da pecuária esteja ocorrendo em todo o país (quando os números agregados são analisados para o Brasil), ela não está prevenindo a conversão de áreas de vegetação nativa em algumas regiões, como no bioma Amazônia. Enquanto a taxa de lotação animal fora do bioma subiu de 1,09 para 1,28 cabeças/ha de 1985 para 2019, respectivamente, essa taxa se manteve em 1,2 na Amazônia no mesmo período. Isso reforça mais uma vez a ideia de que, para algumas regiões, a pecuária vem se intensificando, e para outras, ela vem também se expandindo sobre áreas de vegetação nativa, refletindo, entre outros fatores, termos de troca desfavoráveis para os insumos necessários para incrementar a taxa de lotação animal em regiões mais remotas. A pastagem para a pecuária bovina na Amazônia representava 11,8% do total no Brasil em 1985, e passou para 29% em 2018 (França *et al.*, 2021). Por sua vez, o rebanho de bovinos na Amazônia aumentou de 5,3 milhões de animais em 1985 para 41,81 milhões de cabeças em 2019, enquanto a área total de pastagem no bioma cresceu de 16,4 a 52,7 Mha no mesmo período. Estes autores ainda destacam que o aumento de 221% em área convertida para pastagens não leva em conta o desmatamento de 1,1 Mha no bioma Amazônia em 2020, e que no mínimo 17% da produção de carne bovina e 20% da exportação de soja brasileiras para a União Europeia têm sido associadas ao desmatamento ilegal nos biomas Amazônia e Cerrado.

A intensificação da pecuária de corte é colocada como uma das principais estratégias para a redução do desmatamento (legal ou ilegal) e a consequente redução das emissões de GEE (Bowman *et al.*, 2012; Bustamante *et al.*, 2012; Latawiec *et al.*, 2014; Strassburg *et al.*, 2014; Garrett. *et al.*, 2018). Entretanto, Piipponen *et al.* (2022) aponta que elevadas taxas de lotação animal podem causar degradação do solo, erosão acelerada e desertificação. O planejamento da intensificação da pecuária deve levar em consideração as áreas com restrições do meio físico. Por outro lado, o pastoreio adequadamente gerenciado pode contribuir para a prestação de serviços ecossistêmicos, contribuindo para o sequestro de carbono no solo e para a resiliência do planeta frente às mudanças climáticas (Piipponen *et al.*, 2022).

2.2.2 Emissão de gases de efeito estufa (GEE)

As emissões de GEE são consideradas as externalidades negativas mais evidentemente associadas ao setor pecuário, contribuindo para o aquecimento global (Reisinger; Clark, 2018; Moran; Blair, 2021). O relatório mais recente do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023) revela que o mundo possivelmente atingirá ou ultrapassará 1,5 °C de aquecimento nas duas

próximas décadas e que a temperatura média mundial já subiu 1,1°C (acima dos níveis pré-industriais), alertando para a urgência em cortes ambiciosos nas emissões de GEE. Para tanto, é necessária uma transformação profunda nos sistemas produtivos, com destaque para a pecuária, onde a redução da intensidade de emissões (GEE por unidade de produto) tem sido tema central das pesquisas do setor (Moran; Blair, 2021). A carne bovina é frequentemente destacada como tendo uma das maiores pegadas de carbono entre os produtos alimentares agrícolas (Clune *et al.*, 2017).

Em 2020 as emissões do setor agropecuário no Brasil foram as maiores já registradas até o momento, totalizando 577 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, um acréscimo de 2,5% em relação ao ano anterior (562,9 milhões). De acordo com a Ferramenta de Indicadores de Análise Climática (CAIT) do World Resources Institute (WRI, 2020), o Brasil é o terceiro no *ranking* mundial de maiores emissões pela agropecuária (atrás apenas da Índia e China) O subsetor que mais contribuiu com as emissões do agro foi a fermentação entérica, com 373 MtCO₂ (65% do total), um incremento de 1,5% em relação a 2019. As emissões de CH₄ (metano) geradas pela digestão dos ruminantes respondem por quase dois terços das emissões do setor da pecuária, com destaque para os rebanhos de bovinos de corte e de leite, que juntos totalizam 96,9% dessas emissões em 2020 (Observatório do Clima, 2021).

O compromisso brasileiro assumido no Acordo de Paris em 2015 de reduzir em 43% nas emissões de CO₂ até 2030, em relação ao valor emitido em 2005, corresponde a 1.281 Mt de CO₂ equivalente a menos na atmosfera por ano. Contudo, no ano de 2020 o setor agropecuário do Brasil emitiu mais CO₂ de toda a série histórica registrada (Observatório do Clima, 2021). Soluções de mitigação das emissões pelo setor se tornam necessárias e urgentes para que os impactos ambientais possam ser reduzidos e para que a meta da NDC seja cumprida a tempo. Apesar do processo de intensificação na pecuária, provavelmente, gerar maiores emissões totais do que previamente, devido ao uso de insumos na recuperação das pastagens e ao aumento do rebanho bovino, a melhoria na qualidade dos pastos pode ser uma forma de mitigar as emissões de GEE (Strassburg *et al.*, 2014), especialmente, se considerar o potencial se sequestro de Carbono no solo em pastagens bem manejadas (Gianetti, 2023).

2.3 Intensificação da pecuária de corte no Brasil

A intensificação da pecuária pode ser definida como o uso de insumos externos à propriedade rural, serviços e manejo adequado para elevar a produtividade em termos de quantidade de produto por unidade de área, alcançando-se um rendimento por animal e unidade de trabalho (mão-de-obra) superior ao obtido por meio de uma pecuária não intensiva (Bebe *et al.*, 2011). Em outras palavras, a intensificação significa obter maior rendimento na mesma unidade de área (Ferreira, 2021) por meio da gestão mais avançada da propriedade.

No Brasil, o processo de intensificação da pecuária envolve melhoria na qualidade das pastagens, manejo adequado do gado (com uso de ração e concentrados, rotação de pastagens, confinamento etc.) e uso de tecnologias, para transformação e resiliência do sistema produtivo (Arantes *et al.*, 2018; Vale *et al.*, 2019). Além disso, pode ser feita por meio de sistemas adaptáveis a praticamente

qualquer tipo de condição produtiva (Strassburg, *et al.*, 2014; De Oliveira Silva *et al.*, 2017; Harfuch *et al.*, 2016; Arantes *et al.*, 2018), seja no modelo convencional de produção, via monocultivo de pastagens, seja incluindo sistemas diversificados ou integrados (ILPF – Integração Lavoura-Pecuária-Floresta ou simplificações desses sistemas, como ILP ou ILF). Fatores como aptidão do clima e do solo, tamanho de propriedade, infraestrutura disponível, distância a mercados, preços de insumos e da carne devem ser levados em consideração para que o processo de intensificação obtenha sucesso (Bowman *et al.*, 2012; Gil; Siebold; Berger, 2015).

O Plano Nacional sobre Mudança do Clima, por meio dos seus planos setoriais de agricultura de baixo carbono (Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura - Plano ABC+) e prevenção e controle do desmatamento (Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal - PPCDAM e Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado - PPCerrado), são os principais exemplos normativos em que a intensificação da agropecuária aparece como uma solução multifuncional, que visa diversos objetivos ambientais, sociais e econômicos, simultaneamente.

Como visto no item 2.1 a intensificação da pecuária a pasto vem ocorrendo nas últimas décadas no Brasil, com algumas diferenças regionais. No período de 1975 a 2017, a taxa de lotação média da pecuária passou de 0,6 cabeças por hectare para 1,1 cabeças por hectare, e o efetivo bovino cresceu de 102 milhões para 173 milhões de cabeças, enquanto a área ocupada por pastagens (total) diminuiu cerca de 6 milhões de hectares. Entretanto, no período entre 2006 e 2017, as taxas de lotação mantiveram-se estáveis e ao redor de 1,1 cabeças por hectare (IBGE, 2017). Apesar dos ganhos de produtividade, o crescimento da produção ocorreu, principalmente, pela expansão das áreas de pastagens sobre a vegetação nativa em regiões desprovidas de infraestrutura, como na Amazônia. O rebanho bovino dos estados da Amazônia, por exemplo, cresceu cinco vezes a mais que a média brasileira entre os anos de 1990 e 2017 (IBGE, 2017).

A literatura aponta que a pecuária de corte brasileira apresenta potencial para incremento da eficiência produtiva e, consequentemente, para redução dos impactos negativos ambientais ligados à atividade. Além de suprir à crescente demanda nacional e internacional por carne bovina, reduzir a intensidade de emissões de GEE e aumentar a rentabilidade dos agricultores (Tilman *et al.* 2011; Cardoso *et al.* 2016), a intensificação da pecuária poderá liberar áreas para a expansão da produção agrícola e para restauração de ecossistemas naturais (Bustamante *et al.* 2012; Strassburg *et al.* 2014; Stocco *et al.*, 2020). Entretanto, esta não é uma tarefa fácil, considerando a heterogeneidade desta cadeia em termos de escala de produção, níveis de tecnificação, padrões de distribuição, variabilidade edafoclimática e cultura do Brasil (Batista, 2020).

Embora a intensificação da pecuária tenha sido indicada como uma alternativa viável para atender às demandas de aumento produtivo e alcance das metas de redução de emissões de GEE do país (Arantes *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2017), ela não deve ser vista como solução única para o setor, que é

bastante heterogêneo. Estudos devem ser desenvolvimentos para avaliar os aspectos positivos e negativos da intensificação. Baseados na hipótese de Borlaug (“efeito poupa-terra”), diversos autores (Martha Jr. *et al.*, 2012; Strassburg *et al.*, 2014; Balmford *et al.*, 2015; Meyfroidt *et al.*, 2018; Garcia *et al.*, 2020; Villória, 2019) defendem que a intensificação da pastagem pode liberar áreas da atividade para expansão agrícola e restauração de ecossistemas, produzindo a mesma quantidade em menor área mediante recuperação de áreas degradadas, inovações tecnológicas, uso de insumos e de capital humano, reduzindo a pressão pelo desmatamento (*land saving*). Por outro lado, essa mesma ação pode causar um “efeito rebote” (*rebound effect*) ou Paradoxo de Jevons (Alcott, 2005; Hertel, 2012). Este fenômeno é observado quando a intensificação, ao gerar maiores retornos devido ao aumento de produtividade, leva ao aumento no uso de recursos econômicos (terra, capital e trabalho). No caso do recurso terra, a elevação de produtividade, ao invés de diminuir a pressão por expansão via desmatamento, incentiva os produtores a buscar mais terras para produzir devido a maior rentabilidade alcançada no sistema de produção intensificado, tanto para agricultura quanto para pastagem.

2.3.1 Degradação e recuperação de pastagens e aspectos relevantes para a intensificação da pecuária bovina

Apesar de a agricultura brasileira ter demonstrado seguir uma abordagem baseada na ciência nas últimas décadas (Martha Jr.; Alves, 2018), todo esse processo é complexo e há pontos que requerem uma elaboração mais aprofundada, como por exemplo compreender o conceito de degradação de pastagens e de produtividade pecuária, analisar em que medida a intensificação resulta em maior produção por unidade de área, bem como revisitar os conceitos e estratégias ligados ao limites da intensificação em função dos condicionantes biofísicos e econômicos existentes.

No Brasil existem sistemas semi-intensivos e intensivos de produção pecuária, os quais adotam tecnologias modernas, especialmente envolvendo a genética e a suplementação alimentar. No entanto, a realidade predominante da pecuária brasileira tem como base o uso extensivo de pastagens, favorecido pela dimensão territorial e disponibilidade de terras. Assim, mesmo que a recuperação de pastagens esteja entre as estratégias colocadas como chave no processo de intensificação da pecuária, o uso de tecnologias mais intensivas em capital é menos frequente nesses sistemas extensivos, o que agrega complexidade adicional à tomada de decisão quanto à recuperação de pastagens nos diferentes recortes regionais.

Por outro lado, há de se levar em consideração que a definição e os métodos de mensuração de pastagem degradada se encontram em constante aprimoramento no meio científico. De acordo com Dias-Filho (2017), a degradação da pastagem é um processo de declínio dos níveis de produtividade ao longo do tempo, a qual tende a aumentar na medida em que nenhuma ação de recuperação seja aplicada e, quanto mais avançada a degradação, mais difícil, custosa e demorada será a sua recuperação. O autor indica dois principais tipos de degradação de pastagem: (i) degradação agrícola, em que há um aumento elevado de plantas daninhas na pastagem e a capacidade produtiva do pasto fica temporariamente

diminuída ou inviabilizada por causa da competição, reduzindo sucessivamente a produção de forragem e a eficiência de uso da pastagem pelo gado; e (ii) degradação biológica, em que a queda de produtividade da pastagem está principalmente associada à deterioração do solo - onde aumento de solo descoberto (sem vegetação) facilita a erosão, a perda de matéria orgânica e de nutrientes do solo. A degradação biológica é, portanto, uma condição mais drástica de degradação da pastagem, se comparada à degradação agrícola.

Deste modo, como compreensão geral, a degradação de pastagens pode ser entendida como o processo evolutivo de perda de vigor, de produtividade e de capacidade de recuperação natural das plantas forrageiras, bem como a perda da sua capacidade para superar os efeitos nocivos de pragas, doenças e invasoras, resultantes do manejo inadequado das pastagens (Macedo; Zimmer, 1993). A progressiva perda da capacidade produtiva da pastagem determina uma deterioração da sua capacidade de suporte, refletida na taxa de lotação, normalmente expressa em unidade animal (UA) por unidade de área (hectare) em um dado período.

Por esse motivo, a taxa de lotação animal é utilizada como um indicativo de degradação de pastagens por alguns autores na literatura (Strassburg *et al*, 2014 Arantes *et al*; 2018; Araujo, 2018; Santos, 2021). Porém, usar uma baixa taxa de lotação animal (UA.ha⁻¹) como *proxy* para a degradação das pastagens pode levar a interpretações equivocadas, uma vez que existem áreas naturalmente com baixa capacidade de suporte em função de limitações de solo, clima e relevo, mas que não se encontram necessariamente degradadas.

Outro método para definir degradação da pastagem é a análise de imagens geradas por sensoriamento remoto. Há diversas iniciativas que visam mapear as áreas de pastagem e seus respectivos níveis de degradação, tais como o projeto TerraClass do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)¹⁰, – que classifica pasto como solo exposto, limpo ou sujo; o projeto MapBiomias¹¹, o Geodegrade da Embrapa¹² e o Atlas Digital das Pastagens Brasileiras¹³.

De acordo com o Atlas das Pastagens do LAPIG (2021), o Brasil apresenta cerca de 65,8Mha de pastagem em nível intermediário de degradação, 35Mha em severa degradação e 58,1 Mha sem degradação - o dado refere-se ao mapeamento da qualidade das pastagens por meio de índices de vegetação obtidos por sensoriamento remoto.

A coleta de dados das áreas degradadas por meio de imagens de satélite também é um desafio complexo devido à elevada dinâmica anual, bem como à alta sensibilidade dos sensores aos efeitos da sazonalidade climática, o que gera padrões espectrais muito distintos para uma mesma área de pastagem. Assim, a quantificação de áreas de pastagens degradadas e recuperadas é desafiadora e exige investimentos em ciência e tecnologia.

¹⁰ http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/dados_terraclass.php

¹¹ <https://mapbiomas.org/o-projeto>

¹² <https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/37897/geodegrade---desenvolvimento-de-geotecnologias-para-identificacao-e-monitoramento-de-niveis-de-degradacao-em-pastagens>

¹³ <https://pastagem.org/map>

O planejamento das estratégias de recuperação de pastagens degradadas deve ser fundamentado no entendimento das principais causas de degradação. Assim, por exemplo, em uma pastagem degradada devido ao ataque contínuo e severo de pragas, a estratégia de recuperação não deveria ser, necessariamente, a adubação do solo (Dias-Filho, 2014). Segundo Dias-Filho (2012), as estratégias de recuperação de pastagens podem ser categorizadas em três formas principais: renovação (ou reforma) da pastagem, implantação de sistemas integrados (envolvendo agricultura e/ou floresta), e pousio da pastagem. Cada estratégia é adequada para diferentes objetivos de intervenção na pastagem com degradação, que sua vez dependem de uma combinação de fatores agronômicos, ambientais e socioeconômicos. Tais fatores são influenciados pela capacidade financeira do produtor, pelo tamanho da área e sua localização geográfica, pelo nível e tipo de degradação do pasto, preço da terra, pelo preço do boi, entre outros (Dias-Filho, 2014).

De acordo com especialista do setor¹⁴, é importante ressaltar que a recuperação de pastagens degradadas e intensificação da produção de pastagens são dois conceitos diferentes – é possível recuperar um pasto e não, necessariamente, intensificar a pecuária. Existe um certo pacote tecnológico e manejo do gado associado à intensificação de pastagens, como o pastejo rotacionado e adubação, que não necessariamente faz parte da recuperação da pastagem somente. Além disso, é necessário entender o conceito de produtividade pecuária, para compreender os caminhos e estratégias para a intensificação dessa produtividade nas pastagens, como será abordado a seguir.

2.3.2 “Efeito poupa terra” (*land-saving effect*) versus “efeito rebote” (*rebound effect*)

Um ponto que ainda não é consenso entre os diferentes fóruns de debate sobre impactos ambientais da atividade agropecuária é se a intensificação da pecuária seria um mecanismo eficiente para liberar terras para a produção agrícola e para cumprir a agenda ambiental de redução de emissões de GEE, diminuindo a pressão pelo desmatamento (Kreidenweis *et al.*, 2018). Em outras palavras, discute-se se o processo de intensificação da pecuária teria ou não o efeito de poupar terra, do inglês “*land-saving effect*”.

A teoria por trás do efeito de poupar terra tem influência de Norman Borlaug, conhecido como pai da revolução verde e prêmio Nobel da Paz na década de 1970, e é denominada “hipótese de Borlaug” (Stevenson *et al.*, 2013). A ideia central é que a intensificação da agricultura seria a chave para preservar florestas e outros ecossistemas naturais do processo de desmatamento, pois a terra seria utilizada com maior eficiência, evitando o processo de expansão sobre áreas de vegetação nativa. Desde então, muitos estudos buscam compreender a relação do processo de intensificação da pecuária com os aspectos ambientais e de uso da terra, prevalecendo entre eles a conclusão de que a intensificação resulta em um efeito poupa terra (Martha Jr. *et al.*, 2012; Strassburg, *et al.*, 2014; Cohn *et al.*, 2014; De Oliveira Silva *et al.*, 2017; Villoria, 2019; Stocco *et al.*, 2020).

¹⁴ Patrícia Menezes Santos, pesquisadora da Embrapa Pecuária Sudeste.

Gouvello *et al.* (2010), em um cenário de desmatamento próximo a zero, encontraram que o aumento da produtividade no “sistema baixo carbono” no Brasil poderia liberar a terra necessária para a expansão de lavouras voltadas a produção de alimentos e biocombustíveis, ao mesmo tempo que atenderia à demanda de carne bovina até 2040. De acordo com os autores, essas ações provavelmente reduziriam as emissões de GEE pelo decréscimo de metano por unidade de produto, desmatamento evitado e incremento dos estoques de carbono orgânico do solo. Da mesma forma, Strassburg *et al.* (2014) identificaram que a produtividade dos pastos cultivados no Brasil era de 32 a 34% do seu potencial e que seria suficiente aumentar a produtividade para 49 a 52% do potencial para suprir, até pelo menos 2040, às demandas de carne, agricultura, produtos madeireiros e biocombustíveis, sem conversão adicional de ecossistemas naturais.

Martha Jr. *et al.* (2012), usando dados do IBGE, mostraram que a intensificação de áreas de pastagens no Brasil entre 1950 e 2006 teve um efeito poupa terra de aproximadamente 525 milhões de hectares, o que é uma área equivalente a toda a cobertura de vegetação nativa atual no Brasil, estimada em quase 570 milhões de hectares (MapBiomas, 2021). Para a estimativa do efeito poupa-terra, os autores desenvolveram um modelo identidade que relaciona as variáveis com influência na produção de carne, como área de pasto, produção de carne por cabeça e estoque de gado, sem, no entanto, fazerem uso de uma função de produção (teoria econômica da produção). Os autores apontaram que o crescimento da produção pecuária esteve atrelado à expansão da área de pastagens até meados da década de 1980. A partir daí, os ganhos de produtividade passaram a ser o fator que mais explica a variação da produção, evidenciando que a produção de carne bovina no Brasil passou por significativas mudanças ao longo do período analisado. Entre 1950 e 2006 os autores estimaram que os ganhos de produtividade explicavam cerca de 79% do aumento da produção.

Cohn *et al.* (2014) estudaram o efeito de políticas direcionadas à intensificação da pecuária bovina no Brasil. Essas políticas foram representadas pela aplicação de um imposto sobre a pecuária convencional ou um subsídio para a pecuária semi-intensiva, com o objetivo de reduzir as emissões globais de GEEs, poupando a terra do desmatamento. Para a análise, utilizaram um modelo de uso da terra global no período de 2010 a 2030 e concluíram que, com a implementação de qualquer uma das políticas (imposto ou subsídio), o Brasil poderia conseguir uma considerável poupança de vegetação nativa e reduzir a emissão dos GEEs, favorecendo o cumprimento das metas climáticas nacionais.

Já De Oliveira Silva *et al.* (2016) analisaram as consequências das mudanças no consumo de carne bovina sobre as emissões de GEEs. O estudo adotou um modelo para otimização da produção de carne bovina, parametrizado para o Cerrado brasileiro, incluindo processos de degradação e de recuperação de pastagens, emissões provenientes de animais e do desmatamento, dinâmica do carbono orgânico do solo (SOC) e inventários de ciclo de vida. Os autores analisaram os impactos econômicos em dois cenários: (i) desacoplamento do vínculo desmatamento *versus* pecuária, uma linha de base com taxas de desmatamento controladas por uma política efetiva de comando e controle, e (ii) desmatamento acoplado à pecuária, ou seja, mudanças na demanda por carne influenciando as taxas de desmatamento.

Os resultados mostraram que no primeiro cenário, o aumento da produção de carne bovina leva a sistemas mais eficientes com elevação do estoque de C no solo, reduzindo a intensidade emissões de GEEs, ao passo que um consumo reduzido implica sistemas menos produtivos e associados a maiores intensidades de emissões. Por sua vez, o segundo cenário apontou que um aumento da produção gera emissões 60% superiores às observadas no primeiro cenário. Os resultados contribuem para compreensão dos efeitos do controle sobre o desmatamento sobre uma política de intensificação produtiva, em especial de carne bovina no Cerrado.

Como visto, o argumento mais aceito do ponto de vista do efeito poupa terra (*land saving*), é de que a intensificação da produção e os aumentos dos rendimentos produtivos parecem maneiras eficientes de satisfazer às demandas crescentes por alimentos e biocombustíveis, sem comprometer a cobertura com vegetação nativa. No entanto, há razões para temer que o aumento na produtividade e a consequente ampliação nos rendimentos levem ao resultado contrário ao esperado, ou seja, os produtores poderiam ser estimulados a expandir as áreas de produção para comportar maiores rendimentos. Trata-se do paradoxo de Jevons¹⁵ ou efeito rebote (*rebound effect*) (Paul *et al.*, 2019; Villoria, 2019).

O efeito rebote é quando a eficiência do uso de um recurso, como terra para produção agropecuária, torna a atividade mais atrativa e lucrativa, o que culmina em um aumento líquido no consumo daquele recurso. Nesta situação, Hertel (2012) aponta que a oferta de terras e a elasticidade-preço das *commodities* podem ter um papel mais preponderante na expansão do uso da terra do que no aumento da produtividade. De acordo com o autor, é mais provável que o efeito rebote ocorra quando a produtividade de uma determinada região é relativamente baixa e a demanda pela produção é responsiva a preço. Deste modo, preços atrativos de *commodities* tendem a gerar intensificação associada à expansão em regiões com muitas lacunas produtivas a serem preenchidas.

No caso da pecuária de corte no Brasil, observa-se ao longo dos anos um menor uso de área para a mesma quantidade de produção, sugerindo uma tendência progressiva de intensificação (Martha Jr. *et al.*, 2012). No entanto, diversos autores ressaltam que não se pode afirmar que no Brasil essa tendência esteja associada a uma redução da pressão de conversão de novas áreas para a agropecuária, nem que exista qualquer relação causal evidente entre a intensificação e a preservação ambiental (De Oliveira Silva *et al.*, 2016).

De acordo com Vale (2015), há uma relação intrínseca entre os processos de intensificação e extensificação, de modo que enquanto em locais mais densamente povoados a produtividade da terra pode ser alavancada, a expansão horizontal em terras marginais dificilmente cessará, pois, agricultores incapazes de lidar com o processo de intensificação procurarão áreas onde a abundância de terras lhes permite aderir a um sistema de produção com menos trabalho intensivo.

¹⁵ William Stanley Jevons notou em meados do século XIX que, à medida que os motores movidos a carvão se tornavam mais eficientes, a quantidade total de carvão utilizada não diminuía, mas aumentava. Em um contexto agrícola, o paradoxo de Jevons aumentos na produtividade aumenta a rentabilidade da produção agropecuária em comparação aos usos alternativos da terra (como florestas), incentivando a expansão da fronteira agrícola (Phalan, 2018) .

O efeito rebote é frequentemente aplicado à compreensão da dinâmica do desmatamento, já que tecnologias agrícolas e pecuárias mais eficientes podem retroalimentar a demanda e compensar os ganhos de curto prazo gerados pelo aumento de produtividade (Angelsen & Kaimowitz, 2001). Nessa linha, Barretto *et al.* (2013), observando a correlação entre intensidade de uso da terra e desmatamento na escala nacional (Brasil), com dados extraídos de imagens de satélite, constataram que a intensificação da pastagem ocorre predominantemente em áreas consolidadas (já desmatadas), em conjunto com um processo mais amplo de intensificação do uso agrícola da terra.

Vale (2015), por meio de modelagem econométrica, apontou que um aumento da produtividade em áreas consolidadas está associado a um menor desmatamento tanto em áreas de fronteira quanto em áreas consolidadas. Segundo o autor, um aumento de 10% da produtividade entre o período de 1996 a 2006 culminou em uma queda de 4,5% do desmatamento entre 2007 e 2012, o que corresponde a 226,8 km² de desmatamento evitado. Apesar de parecer óbvio que o aumento da produtividade poderia enfraquecer a demanda por mais terras (expansão de área), o autor argumenta que um efeito oposto pode ocorrer, devido a efeitos secundários. A demanda por terra em determinadas localidades pode ser impactada pelo uso mais intensivo de terra em localidades adjacentes, levando a mais desmatamento no longo prazo. Esse mecanismo estaria relacionado às mudanças na renda provenientes da intensificação em áreas consolidadas e ao modo como isso influencia a migração na fronteira agrícola (Vale, 2015).

Esta visão é compartilhada por Latawiec *et al.* (2014), que afirmam que a intensificação cumpre as metas de aumento da produção com menor uso da terra, porém a maior produtividade estimula a expansão produtiva à medida que a atividade se torna mais lucrativa. De acordo com os autores, com maiores rendimentos, o custo de oportunidade para manter a preservação das florestas nativas é mais alto. Para mitigar o efeito rebote seria necessário estimular a produtividade para ampliar ainda mais os ganhos na produção sem expandir as terras.

Koch *et al.* (2019) analisaram os municípios da Amazônia brasileira e observaram que a causalidade entre desmatamento e aumento da produtividade para a produção de carne bovina (usando taxa de lotação e número de cabeças de gado como *proxy* para produtividade) ocorre em áreas com grandes diferenças nos níveis de produtividade e em regiões onde as tecnologias de alto rendimento estão prontamente disponíveis, o mesmo apontado por Hertel *et al.* (2014).

Por sua vez, Stocco *et al.* (2020) analisaram os impactos do fechamento parcial da lacuna de produtividade (*yield gap*) da pecuária no Brasil, com enfoque na redução do desmatamento e da emissão de GEE. Os autores utilizaram um indicador de aptidão agrícola para ponderar os valores de lacuna de produtividade, de modo que regiões com alta aptidão agrícola foram consideradas como mais propícias para seu fechamento. Os autores utilizaram um modelo de equilíbrio geral para a economia brasileira (o TERMBR), permitindo a análise dos impactos do fechamento de lacuna de produtividade, tanto do ponto de vista socioeconômico como ambiental. A taxa de lotação animal foi levada em conta para o cálculo da lacuna de produtividade no estudo, porém a capacidade de suporte, ou a capacidade biofísica das pastagens brasileiras não foi considerada. Os autores concluíram que a intensificação da pecuária pode

levar à maior produção por área, resultando em menor pressão por expansão das pastagens e consequente redução no desmatamento. O fechamento da lacuna de produtividade da pecuária liberaria 4,7 Mha de pasto para outros usos da terra. De acordo com os autores, considerando que a intensificação aumenta, até certo ponto, o armazenamento de carbono no solo, as emissões líquidas diminuiriam. Entretanto, caso o armazenamento de carbono nos solos não seja levado em conta, o aumento das emissões associado ao crescimento do rebanho excederia a redução das emissões geradas pelo efeito poupa-terra.

Em síntese, as tecnologias que elevam a maior produtividade parcial da terra (rendimento), por definição, são do tipo “poupa-terra”, pois para um dado nível de produção há necessidade de menos terra sob maiores níveis de produtividade. A questão colocada é se esse aumento na produtividade/produção seria acompanhado de um efeito rebote, e em qual escala isso poderia ocorrer, da regional à global, isto é, se a intensificação da pecuária poderia causar expansão de área de pastagem sobre áreas de vegetação nativa.

2.3.3 Outros trade-offs da intensificação da pecuária

A intensificação produtiva da pecuária convencional pode ser avaliada por diversas abordagens que consideram o balanço entre ganhos e perdas, a fim de se identificar *trade-offs*.

Primeiramente, é preciso não considerar a pecuária brasileira como um conjunto homogêneo de soluções e sistemas de produção. Esta seria uma postura desconectada da realidade, uma vez que os sistemas de produção de bovino de corte, especialmente, são desenvolvidos em todos os brasileiros e são bastante diversos em função de fatores históricos, culturais, econômicos e ambientais (Latawiec *et al.*, 2014). Propor um único modelo de intensificação da produção pecuária no Brasil seria uma solução simplificada e equivocada. A pecuária varia em função do animal, da composição de raça, estrutura de rebanho, tipo de manejo, tipo de alimentação, tipo de produto, lotação, condições edafoclimáticas e outras variáveis de desempenho produtivo. Por tais motivos, é útil a tentativa de caracterizar tipos de pecuária com o propósito múltiplo de facilitar a compreensão das dinâmicas existentes e possibilitar a construção de soluções para os principais problemas. A questão que se coloca é qual variável (ou conjunto de variáveis) e quais premissas devem ser adotadas para segmentar a pecuária e, com isso, buscar formas de se atuar no território.

Outro ponto importante a ser observado no âmbito da intensificação da pecuária está ligado à dinâmica socioeconômica desse processo para o produtor rural. A intensificação requer muito investimento financeiro e técnico (Domingues *et al.*, 2017). Além disso, a melhoria na produção e qualidade dos volumosos¹⁶, aperfeiçoamento genético do rebanho, transições tecnológicas e transferência de conhecimento requerem muito tempo e esforço. O tempo de aprendizado sobreposto ao investimento requerido na fase inicial do processo de intensificação lançam o produtor em uma primeira

¹⁶ Os alimentos volumosos podem ser úmidos ou secos, com altas taxas de fibras, como por exemplo: as forragens, a silagem de milho, as capineiras e o feno.

fase de balanço contábil negativo que pode ser revertida, mas que inevitavelmente traz insegurança financeira ou mesmo endividamento em curto e médio prazos. Ainda que esse período seja passageiro, é difícil assumir que dezenas de milhares de estabelecimentos que vivem da pecuária estejam preparados para um processo desse tipo, especialmente considerando o aumento de risco financeiro.

Mesmo em grupos aparentemente homogêneos de produtores, há grande variação na capacidade de endividamento, investimento e absorção de tecnologias que serão determinantes no sucesso ou fracasso da intensificação. O custo mais caro da intensificação da pecuária refere-se ao animal (Dias-Filho, 2014), de modo que a intensificação depende consideravelmente do preço do animal de reposição para as atividades de recria e engorda. Em uma análise de custo de oportunidade, qualquer preço desfavorável do animal de reposição há uma inviabilização do processo de intensificação.

Por fim, outro *trade-off* importante de ser exemplificado no contexto da intensificação pecuária são os custos associados à estratégia de recuperação de pastagens degradadas (De Oliveira Silva *et al.*, 2017). Muitos solos tropicais apresentam baixa fertilidade química, ou seja, uma agricultura produtiva é quase inviável se não contar com uso de fertilizantes. Isso significa que para manter taxas de lotação mais elevadas na pecuária a pasto, ou se repõe a fertilidade do solo via aplicação de fertilizantes ou via integração com as lavouras. O aumento do uso de fertilizantes para recuperar pastagens degradadas (ou abaixo do potencial biofísico) pode gerar um aumento de custo para a produção de outras culturas, como a cana-de-açúcar e o milho, as quais demandam significativa quantidade de nitrogênio. Isso implica dizer que um uso, ainda que de pequenas quantidades, de fertilizantes para se elevar a produtividade das pastagens, determinaria uma pressão nos custos de produção de outras culturas agrícolas, dados a ampla área das pastagens no Brasil e o comportamento inelástico dos preços dos fertilizantes. Possivelmente haveria então diversas taxas de lotação de equilíbrio, com recortes regionais, de modo que diferentes possibilidades de intensificação e diferentes preços relativos seriam considerados. Acima desse limiar, o custo ficaria muito alto e, portanto, inviável para o produtor.

Considerando a limitação do simplismo em assumir a intensificação como uma estratégia genérica aplicável em larga escala, é necessário repensar o conceito de intensificação pecuária para aproximar a política pública e as estratégias do setor privado da realidade brasileira, de modo que os benefícios ambientais, sociais e econômicos, atribuídos consensualmente à intensificação pecuária, sejam de fato alcançáveis.

A análise de lacuna de produtividade pode contribuir para a avaliação desses limiares da intensificação da pastagem e com isso para o direcionamento de políticas públicas e apoio à tomada de decisão do setor.

Referências

ALCOTT, B. Jevon's paradox. *Ecological Economics*, v. 54, n. 1, p. 9-21, 2005.

ANGELSEN, ARILD, AND DAVID KAIMOWITZ, ed. 2001. *Agricultural technologies and tropical deforestation*. Wallingford: CABI.

ARANTES, Arielle Elias; COUTO, Victor Rezende de Moreira; SANO, Edson Eyji; FERREIRA, Laerte Guimarães. Livestock intensification potential in Brazil based on agricultural census and satellite data analysis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 53(9), 1053-1060, 2018. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000900009>.

ARANTES, A.E. **Caracterização biofísica e potencial à intensificação sustentável da pecuária brasileira em pastagens**. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais), Universidade Federal de Goiás, 2017.

ARAUJO, Marcela Almeida de. Eficiência da produção da pastagem e potencial de intensificação da pecuária bovina no estado de São Paulo: instrumentos para avaliação e proposição de políticas públicas. 2018. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018. doi:10.11606/D.11.2018.tde-11102018-103029.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNE - ABIEC. **BeefReport Perfil da Pecuária no Brasil**. p. 72, 2022.

BALMFORD, A.; GREEN, R.; PHALAN, B. Land for food & land for nature? **Deadalus**, v. 144, n. 4, p. 57-75. 2015

BARBOSA, Fabiano Alvim, *et al.* **Cenários para a pecuária de corte amazônica**. 1. ed. - Belo Horizonte: Ed. IGC/UFMG. 146 p. 2015.

BARIONI, L. **Método para o Zoneamento Agrícola de Risco Climático da Produção de Bovinos em Pastagens no Brasil**, 2020.

BARONA, Elizabeth *et al.* The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 5, n. 2, p. 024002, 2010.

BARRETO, Paulo *et al.* **Quem é dono da Amazônia?**: uma análise do recadastramento de imóveis rurais. IMAZON, Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, 2008.

BARRETTO, Alberto G. O. P. *et al.* Agricultural intensification in Brazil and its effects on land-use patterns: an analysis of the 1975–2006 period. **Global change biology**, v. 19, n. 6, p. 1804-1815, 2013.

BATISTA, E. L. da S. *et al.* **Cenários para intensificação da bovinocultura de corte brasileira**. 1 ed. – Belo Horizonte: Ed. IGC/UFMG. 65 p. 2020.

BEBE, B. O.; UDO, H. M. J.; THORPE, W. Development of smallholder dairy systems in the Kenya highlands. **Outlook on Agriculture**, v. 31, n. 2, p. 113-120, 2002.

BOWMAN, Maria S. *et al.* Persistence of cattle ranching in the Brazilian Amazon: A spatial analysis of the rationale for beef production. **Land use policy**, v. 29, n. 3, p. 558-568, 2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio Brasil 2020/2021 a 2030/2031. Projeções de Longo Prazo**. P 101, 2021.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - MCTIC. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**, 2020. Disponível em: <http://sirene.mcti.gov.br/publicacoes>.

BRASIL. **Valor Bruto da Produção Agropecuária 2022**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA. Disponível em <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/vbp-de-2022-e-estimado-em-r-1-236-trilhao/VBPRESUMOABRIL2022.xlsx/view>>.

BUSTAMANTE, Mercedes M. C.; NOBRE, Carlos A.; SMERALDI, Roberto; AGUIAR, Ana P. D.; BARIONI, Luis G.; FERREIRA, Laerte G.; LONGO, Karla; MAY, Peter; PINTO, Alexandre S.; OMETTO, Jean P. H. B. (2012) Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. **Climatic Change** 115:559–577. 2012.

CARDILLE, Jeffrey A.; FOLEY, Jonathan A. Agricultural land-use change in Brazilian Amazonia between 1980 and 1995: Evidence from integrated satellite and census data. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 4, p. 551-562, 2003.

- CARRERO, Gabriel C.; FEARNSTIDE, Philip M. Forest clearing dynamics and the expansion of landholdings in Apuí, a deforestation hotspot on Brazil's Transamazon Highway. **Ecology and Society**, v. 16, n. 2, 2011.
- CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA - CEPEA; CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA AGRICULTURA E PECUÁRIA - CNA. **PIB do agronegócio brasileiro de 1996 a 2021**. 2021.
- CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA - CEPEA,. Aumento dos custos causa queda de 0,8% no PIB do agronegócio neste início de ano. **PIB do Agronegócio**, 2022. Disponível em: [https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Cepea_CNA_PIB-do-Agronegocio-20junho22\(1\).pdf](https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Cepea_CNA_PIB-do-Agronegocio-20junho22(1).pdf)
- COIMBRA, Zulmira H.; GOMES-JR, Luiz; FERNANDEZ, Fernando A. S. Human carnivory as a major driver of vertebrate extinction. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 18, n. 4, p. 283-293, 2020.
- COHN, Avery S. *et al.* Cattle ranching intensification in Brazil can reduce global greenhouse gas emissions by sparing land from deforestation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 20, p. 7236-7241, 2014.
- CLUNE, Stephen; CROSSIN, Enda; VERGHESE, Karli. Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 766-783, 2017.
- DA SILVA, Marcelo Corrêa; BOAVENTURA, Vanda Maria; FIORAVANTI, Maria Clorinda Soares. História do povoamento bovino no Brasil Central. **Revista UFG**, v. 13, n. 13, 2012.
- DE OLIVEIRA SILVA, R.; BARIONI, L. G.; HALL, J. A. J.; MORETTI, A. C.; FONSECA VELOSO, R.; ALEXANDER, P.; CRESPOLINI, M.; MORAN, D. Sustainable intensification of Brazilian livestock production through optimized pasture restoration. *Agricultural Systems*, v. 153, p. 201–211, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2017.02.001>>.
- DIAS-FILHO, M. B. Degradação de pastagens: o que é e como evitar. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em: <http://www.embrapa.br/amazonia-oriental/publicacoes>. ISBN 978-85-7035-688-8.
- DIAS-FILHO, M. B. Estratégias de recuperação de pastagens na Amazônia. **Intensificação da Produção Animal em Pastagens**. Embrapa, 2014.
- DIAS-FILHO, M. B. Os desafios da produção animal em pastagens na fronteira agrícola brasileira. Embrapa, 2012.
- DIAS-FILHO, Moacyr Bernardino. Produção de bovinos a pasto na fronteira agrícola. **Embrapa Amazônia Oriental-Documentos** (INFOTECA-E), 2010.
- DOMINGUES, J., RYSCHAWY, J., BONAUDO, T., GABRIELLE, B., & TICHIT, M. Unravelling the physical, technological and economic factors driving the intensification trajectories of livestock systems. **Animal**, 12(8), 1652-1661, 2017. DOI:10.1017/S1751731117003123
- ESSELIN, Paulo Marcos. **A pecuária bovina no processo de ocupação e desenvolvimento econômico do pantanal sul-mato-grossense** (1830 – 1910). Dourados: Ed. UFGD, 2011. Disponível em: <https://files.ufgd.edu.br/arquivos/arquivos/78/EDITORA/catalogo/a-pecuaria-bovina-no-processo-de-ocupacao-e-desenvolvimento-economico-do-pantanal-sul-mato-grossense-1830-1910-paulo-marcos-esselin.pdf>.
- ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. U.S Department of Agriculture. **Brazil: Livestock and Products Semi-annual**. 2022. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/brazil-livestock-and-products-semi-annual-5>.
- FERRAZ, Cláudio. Explaining agriculture expansion and deforestation: evidences from the Brazilian Amazon - 1980/98. **Texto para discussão**, Rio de Janeiro, n. 828, 2001.
- FERREIRA, G. C. V. **Espacialização, intensificação e sustentabilidade da pecuária bovina no estado de Goiás**. 2021. 142 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2021.
- FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Departamento do Agronegócio. **Outlook FIESP: projeções para o agronegócio brasileiro 2029**. São Paulo: FIESP, 2020. 84 p.

- FOLEY, Jonathan A. *et al.* Solutions for a cultivated planet. **Nature**, v. 478, n. 7369, p. 337-342, 2011.
- FRANÇA, Filipe; SOLAR, Ricardo; LEES, Alexander C.; MARTINS, Lucas Pereira; BERENGUER, Erika; BARLOW, Jos. Reassessing the role of cattle and pasture in Brazil's deforestation: A response to "Fire, deforestation, and livestock: When the smoke clears". **Land Use Policy**. 2021.
- GARCIA, V. R.; GASPART, F.; KASTNER, T.; MEYFROIDT, P. Agricultural intensification and land use change: assessing country-level induced intensification, land sparing and rebound effect. **Environmental Research Letters**, v. 15, [s.n.], p. 1-11, 2020.
- GARCIA, Edenise *et al.* Costs, benefits and challenges of sustainable livestock intensification in a major deforestation frontier in the Brazilian Amazon. **Sustainability**, v. 9, n. 1, p. 158, 2017.
- GARRETT, Rachael D. *et al.* Intensification in agriculture-forest frontiers: Land use responses to development and conservation policies in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 53, p. 233-243, 2018.
- GIANETTI, Giovani William. Impactos socioeconômicos e ambientais da recuperação de pastagens degradadas no Brasil. 2023. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2023. doi:10.11606/T.11.2023.tde-03102023-150206.
- GIL, Juliana, SIEBOLD Matthias, BERGER Thomas. Adoption and development of integrated crop–livestock–forestry systems in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 199: 394-406, 2015.
- GODFRAY, H. C. J. *et al.* Meat consumption, health, and the environment. **Science**, 361, 6399, 2018. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aam5324>.
- GOUELLO, Christophe *et al.* **Brazil low carbon country case study**. Washington, DC: World Bank, 2010.
- HERTEL, T. W. Implications of Agricultural Productivity for Global Cropland Use and GHG Emissions: Borlaug vs. Jevons. GTAP Working Paper, 69, 1–36, 2012. <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/6110.pdf>.
- HERTEL, T. W., RAMANKUTTY, N. & BALDOS, U. L. C. Global market integration increases likelihood that a future African Green Revolution could increase crop land use and CO2 emissions. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 111, 13799–13804 (2014). <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1403543111>.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM)**. Efetivo dos rebanhos por tipo de rebanho. 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3939>.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC, 2023. Summary for Policymakers. In: LEE, H.; ROMERO, J. (Eds.). **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC 2023, pp. 1-34, DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- KOCH, N., ZU ERMGASSEN, E.K.H.J., WEHKAMP, J., OLIVEIRA FILHO, F.J.B. AND SCHWERHOFF, G. (2019), Agricultural Productivity and Forest Conservation: Evidence from the Brazilian Amazon. *American Journal of Agricultural Economics*, 101: 919-940. <https://doi.org/10.1093/ajae/aay110>
- KREIDENWEIS, U.; HUMPENÖDER, F.; KEHOE, L. *et al.* Pasture intensification is insufficient to relieve pressure on conservation priority areas in open agricultural markets. **Glob Change Biol**. 24: 3199– 3213, 2018. <https://doi.org/10.1111/gcb.14272>
- KUSCHNIG, N., CUARESMA, J. C., KRISZTIN, T. *et al.* Spatial spillover effects from agriculture drive deforestation in Mato Grosso, Brazil. **Sci Rep** 11, 21804, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00861-y>.
- LAMBIN, Eric F. *et al.* The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. **Global environmental change**, v. 11, n. 4, p. 261-269, 2001.
- LABORATÓRIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E GEOPROCESSAMENTO - LAPIG. **Atlas das Pastagens**. <https://atlasdaspastagens.ufg.br/>.

- LATAWIEC, Agnieszka E. *et al.* Intensification of cattle ranching production systems: socioeconomic and environmental synergies and risks in Brazil. **Animal**, v. 8, n. 8, p. 1255-1263, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731114001566#section-cited-by>.
- MACEDO, M. C. M.; ZIMMER, A. H. Sistemas pasto-lavoura e seus efeitos na produtividade agropecuária. In: FAVORETTO, V.; RODRIGUES, L. R. A.; REIS, R. A. (Ed.). **Simpósio sobre Ecossistemas das Pastagens**, 2, 1993, Jaboticabal. Anais... Jaboticabal: FUNEP: UNESP, 1993. p. 216-245.
- MALAGUTI, Gustavo Abreu. **Impacto da intensificação da pecuária de corte nos municípios com biomas Cerrado e Amazônia**. Tese (Doutorado em Geografia), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.
- MAPBIOMAS. Projeto MapBiomias – Coleção 8.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. 2023. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/o-projeto/>.
- MARANHÃO, Rebecca Lima Albuquerque *et al.* The spatiotemporal dynamics of soybean and cattle production in Brazil. **Sustainability**, v. 11, n. 7, p. 2150, 2019.
- MARTHA JR, Geraldo B.; ALVES, Eliseu; CONTINI, Elisio. Land-saving approaches and beef production growth in Brazil. **Agricultural Systems**, v. 110, p. 173-177, 2012.
- MARTHA JR, Geraldo B.; ALVES, Eliseu. Brazil's agricultural modernization and Embrapa. In: **The Oxford Handbook of the Brazilian Economy**. Oxford University Press, p. 309, 2018.
- MEDEIROS, H. R. *et al.* Landscape structure shapes the diversity of beneficial insects in coffee producing landscapes. **Biological Conservation**. V. 238, p. 108193, 2019. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2021.664103/full>.
- MELLO, K. *et al.* Multiscale land use impacts on water quality: assessment, planning, and future perspectives in Brazil. **Journal of Environmental Management**, v.270, p. 110879, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.030>
- MEYFROIDT, P. *et al.* Middle-range theories of land system change. **Global Environmental Change**, v. 53, [s.n.], p. 52-67. 2018
- MIRANDA, Javier *et al.* Land speculation and conservation policy leakage in Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 4, p. 045006, 2019.
- MORAN, D., BLAIR, K. J. Review: Sustainable livestock systems: anticipating demand-side challenges. **Animal** 15, 100288, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100288>.
- MUCHAGATA, Márcia; BROWN, Katrina. Cows, colonists and trees: rethinking cattle and environmental degradation in the Brazilian Amazon. **Agricultural Systems**, New York, n. 76, 2003.
- NIJDAM, Durk; ROOD, Trudy; WESTHOEK, Henk. The price of protein: Review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes. **Food policy**, v. 37, n. 6, p. 760-770, 2012.
- OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970 - 2020**. Brasil, 2020.
- PARENTE, Leandro *et al.* Monitoring the Brazilian pasturelands: A new mapping approach based on the Landsat 8 spectral and temporal domains. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 62, p. 135-143, 2017.
- PARENTE, Leandro; MESQUITA, Vinícius; MIZIARA, Fausto; BAUMANN, Luis; FERREIRA, Laerte. Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. **Remote Sensing of Environment**. 2019.

- PAUL, C.; TECHEN, A. K.; ROBINSON, J. S.; HELMING, K. Rebound effects in agricultural land and soil management: Review and analytical framework. **Journal of Cleaner Production**, 1 ago 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.115>.
- PERZ, Stephen G. The changing social context of deforestation in the Brazilian Amazon. **Social Science Quarterly**, Boston, v. 83, n. 1, 2002.
- PIIPPONEN, Johannes *et al.* Global trends in grassland carrying capacity and relative stocking density of livestock. **Global Change Biology**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.16174>.
- PONTES, Laíse da Silveira *et al.* Performance and methane emissions by beef heifer grazing in temperate pastures and in integrated crop-livestock systems: The effect of shade and nitrogen fertilization. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 253, p. 90-97, 2018.
- REISINGER, Andy; CLARK, Harry. How much do direct livestock emissions actually contribute to global warming? **Global change biology**, v. 24, n. 4, p. 1749-1761, 2018.
- RIETHMULLER, Paul. The social impact of livestock: a developing country perspective. **Anim. Sci. J.**, 74, pp. 245-253, 2003. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1046/j.1344-3941.2003.00113.x>.
- ROSA *et al.*, 2021. Hidden destruction of older forests threatens Brazil's Atlantic Forest and challenges restoration programs **Sci. Adv.**, 7, 2021. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abc4547>.
- SANS, P.; COMBRIS, P. World meat consumption patterns: an overview of the last fifty years (1961–2011). **Meat Sci.** 109, 106–111, 2015.
- SANTOS, Alex Mota *et al.* Deforestation drivers in the Brazilian Amazon: Assessing new spatial predictors. **Journal of environmental management**, v. 294, p. 113020, 2021.
- SANTOS, Mariely Lopes dos. **Yield-gap in pasture-based animal production systems in Central-west and Southeast of Brazil** (Central Brazil). 2021. Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021. DOI:10.11606/T.11.2021.tde-09092021-165205.
- SANTOS, C. O. D.; MESQUITA, V. V.; PARENTE, L. L.; PINTO, A. D. S.; FERREIRA JR, L. G. Assessing the Wall-to-Wall Spatial and Qualitative Dynamics of the Brazilian Pasturelands 2010–2018, Based on the Analysis of the Landsat Data Archive. **Remote Sens.** 14, 1024, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14041024>.
- SCHEFFLER, Raphael *et al.* Soil hydraulic response to land-use change associated with the recent soybean expansion at the Amazon agricultural frontier. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 144, n. 1, p. 281-289, 2011.
- SKIDMORE, Marin Elisabeth; MOFFETTE, Fanny; RAUSCH, Lisa; CHRISTIE, Matthew; MUNGER, Jacob; GIBBS, Holly K. Cattle ranchers and deforestation in the Brazilian Amazon: Production, location, and policies. **Global Environmental Change**, Volume 68, 2021, 102280, ISSN 0959-3780. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102280>.
- SOUZA JR, Carlos M. *et al.* Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020.
- SPAROVEK, Gerd *et al.* Environmental, land-use and economic implications of Brazilian sugarcane expansion 1996–2006. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 14, n. 3, p. 285-298, 2009.
- STEINFELD, Henning *et al.* Livestock's long shadow: environmental issues and options. **Food & Agriculture Org.**, 2006.
- STEVENSON, J. R.; VILLORIA, N.; BYERLEE, D.; KELLEY, T.; MAREDIA, M. Green revolution research saved an estimated 18 to 27 million hectares from being brought into agricultural production. **Proc. Nat. Acad. Sci.** 110, 8363–8368, 2013. DOI: 10.1073/pnas.1208065110.

- STOCCO, Leandro; DE SOUZA FERREIRA FILHO, Joaquim Bento; HORRIDGE, Mark. Closing the Yield Gap in Livestock Production in Brazil: New Results and Emissions Insights. In: **Environmental Economics and Computable General Equilibrium Analysis**. Springer, Singapore, p. 153-170, 2020.
- STRASSBURG, Bernardo B.N.; LATAWIEC, Agnieszka E.; BARIONI, Luis G.; NOBRE, Carlos A.; SILVA, Vanderley P. da; VALENTIM, Judson F.; VIANNA, Murilo; ASSAD, Eduardo D. (2014). When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**. 2014.
- TILMAN, David *et al.* Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 108, n. 50, p. 20260-20264, 2011.
- UNITED NATIONS DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, POPULATION DIVISION. **World Population Prospects 2022: Summary of Results**. UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3, 2022.
- VALE, Petterson *et al.* The expansion of intensive beef farming to the Brazilian Amazon. **Global Environmental Change**, v. 57, p. 101922, 2019.
- VALE, P.M. The conservation versus production trade-off: does livestock intensification increase deforestation? The case of the Brazilian Amazon. Fondazione Eni Enrico Mattei. **NOTA DI LAVORO**. 2015. 37 p.
- VAN DIJK, M.; MORLEY, T.; JONGENEEL, R.; VAN ITTERSUM, M.; REIDSMA, P.; RUBEN, R.. Disentangling agronomic and economic yield gaps: An integrated framework and application. **Agricultural Systems**, 154, 90–99, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.03.004>
- VAN ITTERSUM, Martin K. *et al.* Yield gap analysis with local to global relevance—a review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4-17, 2013.
- VILLORIA, N. B. Technology Spillovers and Land Use Change: Empirical Evidence from Global Agriculture. **American Journal of Agricultural Economics**, 101, 870-893, 2019. <https://doi.org/10.1093/ajae/aay088>.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE. WRI, 2020. Climate Watch (CAIT): Country Greenhouse Gas Emissions Data. Disponível em: <https://www.wri.org/data/climate-watch-cait-country-greenhouse-gas-emissions-data>.

3. LACUNA DE PRODUTIVIDADE DA PECUÁRIA DE CORTE A PASTO NO BRASIL

3.1 Aspectos gerais sobre análise de lacuna de produtividade (Yield Gap) e sua aplicabilidade

As projeções futuras de aumento na demanda global por alimentos (OECD/FAO, 2020), incluindo a proteína animal, requerem a adoção de estratégias adequadas para o aumento da produção agropecuária. Ao mesmo tempo, o mundo enfrenta problemas fundamentais, como insegurança alimentar, além de desafios ambientais associadas às mudanças do clima e perda de biodiversidade (Cohn *et al.*, 2014; Godfray, 2015; Jagermeyr *et al.*, 2021; Fujimori *et al.*, 2022). Uma mudança transformadora dos sistemas alimentares é necessária para enfrentar esses desafios, entre os quais alguns autores destacam a intensificação sustentável da produção agrícola e pecuária (Strassburg *et al.*, 2014; Godfray, 2015; De Oliveira *et al.*, 2017; Stocco *et al.*, 2020; Sekaran *et al.*, 2021; Marin *et al.*, 2022).

As pastagens constituem um dos principais fatores de produção para a bovinocultura de corte no Brasil. Em 2017, 45,4% da área total dos estabelecimentos agropecuários era ocupada por pastagens (IBGE, 2019), e, de acordo com dados mais recentes, o Brasil possui, aproximadamente, 159Mha de pasto, evidenciando sua representatividade na utilização de terras (LAPIG; 2021). Além disso, mais de 60% das dessas áreas apresentam algum nível de degradação (Parente *et al.*, 2019). Nesta perspectiva, desenvolver uma abordagem para estimar o potencial incremento da produtividade animal em pastagens, refletindo sobre as condições biofísicas pode ser uma importante ferramenta para direcionar a tomada de decisão voltadas à intensificação sustentável do setor pecuário.

A análise de lacuna de produtividade da agropecuária, conceito bastante consolidado na literatura, surge da compreensão sobre as definições para produtividade agrícola (Lövenstein *et al.*, 1995; van Intersum *et al.*, 2013). Isto é, do ponto de vista biofísico (genética da planta, solo, clima e relevo), a lacuna de produtividade resulta da diferença, dada a tecnologia adotada, entre a produtividade potencial ou atingível de determinada cultura ou produção animal a pasto e a produtividade real alcançada pelos produtores – em alguma escala espacial e temporal – indicando, portanto, as oportunidades para expandir a produção por meio da margem intensiva (Lobell *et al.*, 2009; van Intersum *et al.*, 2013; Licker *et al.*, 2010; Lobell *et al.*, 2013). Quanto mais próximo da produtividade potencial, espera-se que as taxas de crescimento da produtividade da terra diminuam, considerando que a resposta produtiva aos insumos utilizados segue retornos decrescentes (Koning *et al.*, 2008; Cassman *et al.*, 2003; Lobell *et al.*, 2009), revelando assim desafios agronômicos e econômicos.

Esse tipo de abordagem vem se mostrando um importante componente para a análise de impactos ligados às mudanças climáticas e para a simulação de cenários futuros da produção agropecuária e uso da terra (Ittersum *et al.*, 2013; Marin *et al.*, 2022). Diversos estudos aplicaram com sucesso essa abordagem, onde as análises ocorrem em diferentes escalas (local, regional, nacional ou global) e os resultados são capazes de fornecer o quanto é possível, biofísicamente, aumentar a produção de alimentos sem ultrapassar a capacidade de suporte de determinado local. Esses resultados, por sua

vez, podem ser utilizados como dados de entrada em modelos econômicos de equilíbrio geral e parcial, por exemplo, o que possibilita que projeções futuras referente à segurança alimentar e ao uso de recursos naturais sejam criadas (Cassman *et al.*, 2003; Lobell *et al.*, 2009; Ittersum *et al.*, 2013; van Bussel *et al.*, 2015; FAO, 2015; González-Quintero *et al.*, 2022; Marin *et al.*, 2022).

A aplicação do conceito biofísico de lacuna de produtividade (*yield gap*) de pastagens pode ser um importante fator para ponderar as combinações economicamente ótimas para produção pecuária, de modo a identificar as regiões mais ou menos propícias para incremento de produtividade, com base nos fatores do meio físico que influenciam o desenvolvimento dos pastos. Além disso, pode auxiliar a definição de estratégias no setor pecuário, sugerindo metas para pesquisa e desenvolvimento, apoiando decisões públicas e privadas sobre uso de recursos e adoção de políticas, como assistência técnica e crédito rural.

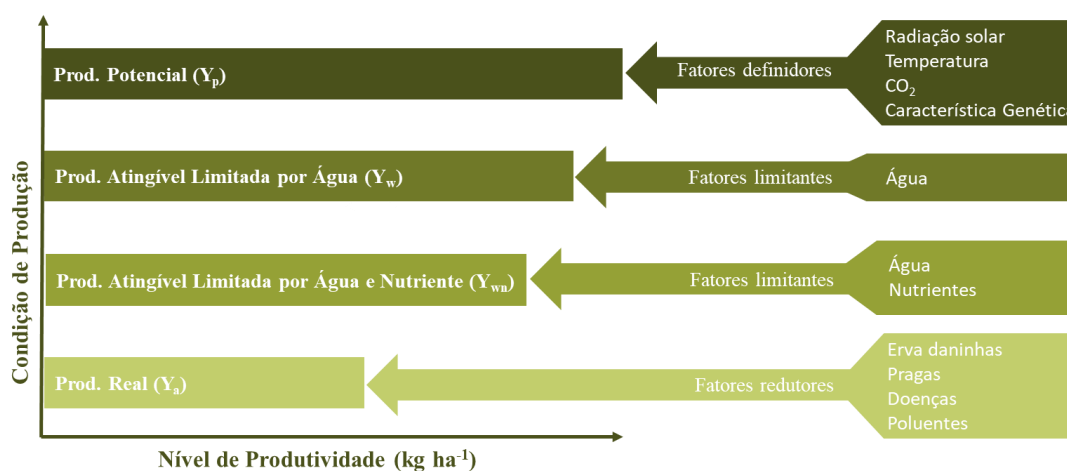
3.1.1 Conceito e aplicação de análise de *yield gap* na agropecuária

Intensificar, do ponto de vista biofísico, significa aumentar a produção por meio de ganhos de produtividade da terra, onde cada hectare já utilizado pela agropecuária deveria produzir em patamares superiores aos atuais (van Ittersum *et al.*, 2013; Ferreira, 2021). As regiões com produção agropecuária diferem entre si quanto ao potencial biofísico para sustentar aumentos de produtividade, em função de diversos fatores, como clima, solo e relevo. Enquanto em algumas regiões a produtividade atual média pode ser baixa em relação ao que é alcançável sob um manejo ideal (sem déficit hídrico e com suprimento nutricional adequado para cada cultura), outras podem já estar com produtividade próxima ou acima da capacidade possibilitada pelo meio físico (van Ittersum *et al.*, 2013; Strassburg *et al.*, 2014; Dos Santos *et al.*, 2022).

Com o objetivo de identificar oportunidades para a intensificação agropecuária, diversos estudos de escalas locais a globais têm utilizado o conceito de lacuna de produtividade (do inglês *yield gap* - Yg). Em termos gerais, a lacuna de produtividade representa a diferença entre a produtividade potencial (*potential yields* - Yp) ou atingível (*attainable yields* - Yw) de uma atividade agropecuária e a produtividade real (*actual yields* - Yr), em alguma escala espacial e temporal específica (Lobell *et al.*, 2009; Licker *et al.*, 2010; van Ittersum *et al.*, 2013; Lobell *et al.*, 2013).

A Figura 1 ilustra os níveis de produtividade utilizados no conceito de lacuna de produtividade.

Figura 1. Diferentes níveis de produtividade e seus respectivos fatores determinantes (definidores, limitantes e redutores)



Fonte: Adaptado de Lövenstein *et al.* (1995) e van Ittersum *et al.* (2013).

A produtividade potencial (Y_p) é aquela obtida por uma cultura sob condições ótimas de cultivo, sem qualquer fator limitante (água e nutrientes) ou redutor (plantas daninhas, pragas, doenças, poluentes) ao seu crescimento (Lövenstein *et al.*, 1995; Lobell *et al.*, 2009; van Ittersum *et al.*, 2013). Neste caso, a taxa de crescimento da cultura é determinada por fatores definidores (radiação solar, temperatura, CO_2 atmosférico) e por características genéticas da planta (fisiologia, arquitetura da planta, fenologia, índice de colheita etc.) que orientam seu ciclo de crescimento e a interceptação de luz (Lövenstein *et al.*, 1995; van Ittersum *et al.*, 2013). Já a produtividade atingível é aquela alcançada por uma cultura sob uma desfavorável influência de um ou mais fatores limitantes para seu crescimento: pela água – denominada produtividade atingível limitada pela água (Y_w), ou pela água e por nutrientes – denominada produtividade atingível limitada pela água e nutrientes (Y_{wn}) (Lövenstein *et al.*, 1995; van Ittersum *et al.*, 2013).

Em regiões sem grandes restrições do solo, o termo produtividade potencial é usualmente utilizado para representar sistemas irrigados, pois assume-se que a cultura irrigada é suprida de quantidade adequada de água durante seu crescimento. Para culturas de sequeiro, a referência mais relevante é produtividade atingível limitada pela água (Y_w), equivalente à produtividade potencial limitada pela água, uma vez que a maioria das culturas de sequeiro sofre algum déficit de água durante alguma fase do seu crescimento (Lobell *et al.*, 2009; van Ittersum *et al.*, 2013). No entanto, Lobell *et al.* (2009) destacam que é praticamente impossível para uma parcela significativa de agricultores manter um manejo “ótimo” da cultura e do solo necessário para atingir Y_p ou Y_w , e que geralmente não é viável fazê-lo, dado que a resposta da produtividade aos insumos aplicados para sua elevação segue retornos decrescentes, à medida que a produtividade agropecuária se aproxima do seu máximo.

Além disso, a produtividade real (Y_a), definida como aquela que realmente é alcançada no campo pelo agricultor (van Ittersum *et al.*, 2013), geralmente será menor do que a produtividade atingível. Isso ocorre porque, na prática, adicionalmente aos fatores limitantes (água e nutrientes), existem também os fatores redutores que restringem os níveis reais de produtividade das culturas, como erva daninhas, pragas, doenças, poluentes, entre outros (Lövenstein *et al.*, 1995; Cassman *et al.*, 2003; van Ittersum *et al.*, 2013; Fischer, 2015). Para estimar a variação da produtividade real média alcançada pelos produtores no tempo e no espaço, são consideradas as práticas de manejo mais utilizadas (data de plantio, maturidade da cultivar e densidade de plantas ou animal, manejo de nutrientes etc.). Também deve-se levar em conta um período (entre 5 e 10 anos), que expresse a variabilidade climática ocorrida na localidade, isolando, assim, os efeitos temporais referente às tendências de produtividade com os ganhos tecnológicos (van Ittersum *et al.*, 2013; van Bussel *et al.*, 2015).

Considerando essas definições, a análise da lacuna de produtividade (*yield gap*) fornece um indicativo da quantidade adicional máxima de produção que pode ser gerada, em função dos fatores que a restringem (limitantes e redutores), do manejo adotado e da tecnologia disponível (Ittersum *et al.*, 2013; Beddow *et al.*, 2014; van Dijk *et al.*, 2017; Marin *et al.*, 2022). Esse tipo de abordagem é bastante encontrado na literatura e vem sendo apontado como um potencial elemento para planejamento estratégico da segurança alimentar em diferentes escalas (regional, nacional e global) (van Ittersum *et al.*, 2013; van Bussel *et al.*, 2015; Marin *et al.*, 2016; Deng *et al.*, 2019; González-Quintero *et al.*, 2022; Marin *et al.*, 2022), uma vez que indica o quanto é possível aumentar a produção de alimentos sem ultrapassar a capacidade biofísica de determinado local. O desafio latente reside na habilidade de harmonizar a dimensão biofísica com a esfera econômica, visando uma aplicação efetiva desse conceito no cenário prático.

Deng *et al.* (2019) relatam a importância de estimar a lacuna de produtividade das áreas irrigadas de arroz na China, considerando a representatividade do país na produção mundial da cultura, sua ampla transição demográfica observada nos últimos anos e a intensa competição por terras e recursos hídricos. Os autores consideraram a lacuna de produtividade como sendo a diferença entre as produtividades potencial (quando a cultura é cultivada sem limitações de deficiências nutricionais, pragas de insetos ou doenças) e real. Além disso, utilizaram os protocolos desenvolvidos pelo GYGA (*Global Yield Gap Atlas*), que utilizam dados primários específicos sobre solo, clima, manejo, entre outros, e uma metodologia consolidada de aumento de escala para estimar a lacuna de produtividade em níveis maiores de agregação espacial, como por exemplo, zonas climáticas (CZ), regiões e escalas nacionais.

Para analisar os principais fatores que direcionam a produtividade do milho na Etiópia, segunda maior produtora da cultura na África Subsaariana, Assefa *et al.* (2020) subdividiram a lacuna de produtividade em componentes de eficiência, recursos e tecnologia, além de contabilizar um conjunto amplo de insumos e técnicas de manejo utilizados na produção agrícola. A análise de fronteira estocástica foi combinada com conceitos de ecologia de produção para estimar e explicar a produtividade tecnicamente eficiente, bem como as lacunas de produtividades de eficiência e recursos.

Os autores utilizaram os protocolos do GYGA para estimar a lacuna de produtividade da tecnologia, baseados na produtividade atingível do milho, considerando a água como fator limitante para o seu desenvolvimento. Neste caso, nota-se que o *yield gap* pode ser avaliado por diversos métodos e que o uso de análise de fronteira estocástica proporciona reflexões pertinentes na integração da dimensão biofísica com a econômica.

No Brasil, visando subsidiar formuladores de políticas e tomadores de decisão, Battisti *et al.* (2018) quantificaram a lacuna de produtividade da soja causada por déficit hídrico e manejo sub-ótimo. Um modelo de simulação de crescimento de cultura foi utilizado para estimar as produtividades potencial e atingível da soja, com base em variáveis de solo, dados climáticos e de evapotranspiração; enquanto a produtividade real dos agricultores foi obtida a partir de dados do Comitê Estratégico da Soja (CESB).

Mais recentemente, Marin *et al.* (2022) investigaram até que ponto a intensificação das áreas agrícolas no Brasil pode contribuir para que o país concilie produção e metas ambientais, simultaneamente. Focados em quatro Biomas (Pampas, Mata Atlântica, Cerrado e Amazônia) e com base no projeto GYGA, os autores avaliaram a lacuna de produtividade explorável da soja e do milho, dada pela diferença entre a produtividade atingível de cada cultura e a respectiva produtividade real média dos agricultores. Para o cálculo produtividade atingível foram utilizados modelos de crescimento de culturas, com dados de clima, solo e manejo.

A mesma abordagem baseada em diferenças das produtividades real, atingível e potencial pode ser aplicada para avaliar as lacunas de produtividade na pecuária (Araujo, 2018; Monteiro *et al.*, 2020; González-Quintero *et al.*, 2022; Santos, 2021), como será abordado no próximo item.

Por fim, é importante frisar que a lacuna de produtividade apresentada acima e ilustrada pela literatura parte de uma definição agrônômica, portanto, não está diretamente vinculada a um conceito econômico. Vários conceitos são úteis para a compreensão da lacuna de produtividade sob uma perspectiva econômica. O primeiro é a relação entre o que é produzido, o que é utilizado para se produzir e como é produzido. Esta relação entre produção, insumos e tecnologia caracteriza as “possibilidades de produção”, sendo que cada local e situação social requer um balanço específico.

Do ponto de vista econômico, como aponta Beddow *et al.* (2014), as lacunas de produtividade refletiriam diferenças nas escolhas dos agricultores, bem como outras diferenças nas circunstâncias de produção, que não podem ser totalmente controladas no ambiente. De acordo com os autores, mesmo que os agricultores estejam utilizando uma tecnologia recomendada, ou mesmo alocando eficientemente a terra e outros insumos, em termos econômicos, podem ser observadas "lacunas de produtividade" nas explorações agrícolas, na medida em que os custos unitários dos fatores de produção, os valores unitários dos produtos, ou as quantidades de outros fatores de produção fixos variam. Assim, sob um aspecto econômico é importante considerar o porquê de se verificar lacunas de produtividade, o que é respondido geralmente por modelos de fronteira estocástica (eficiência técnica e alocativa), ou, por outro lado, se a

sua redução ou até mesmo o seu fechamento é vantajoso e em qual medida, onde os modelos de equilíbrio geral computável se tornam uma ferramenta útil.

Deste modo, os resultados da análise de lacuna de produtividade sob a perspectiva agrônômica são insumos-chave para modelos econômicos computáveis de equilíbrio geral (EGC) e parcial que avaliam, entre outros aspectos, o resultado gerado por uma determinada política (como o aumento de produtividade agropecuária) sobre a geração de Produto Interno Bruto (PIB), emprego, renda, segurança alimentar e mudança de uso da terra (como controle de desmatamento) em diferentes escalas espaciais. Esses modelos econômicos normalmente dependem de tendências históricas de produtividade com algum tipo de extrapolação para o futuro. No entanto, a base agrônômica de tais projeções e os requisitos de recursos associados podem ser amplamente aprimorados por meio de análises mais detalhadas de lacunas de produtividade (Ittersum *et al.*, 2013).

3.1.2 Aplicabilidade da análise de *yield gap* na pecuária a pasto

Apesar de existirem sistemas semi-intensivos e intensivos de produção pecuária¹⁷ no Brasil, a realidade predominante do setor tem como base o uso de uma ampla área de pastagens com pecuária extensiva (Parente *et al.*, 2019; Vale *et al.*, 2019; Dos Santos *et al.*, 2022). Essas áreas possuem um elevado potencial para alcance de melhores indicadores de produtividade, favorecidos pelas condições climáticas do país.

O perfil extensivo associado ao manejo inadequado das pastagens pode, entre outros aspectos, resultar na baixa eficiência ou baixa produtividade da pecuária, que por sua vez estão associadas ao processo de degradação dessas áreas e aumento de emissões de GEE, de modo que boa parte das políticas públicas destinadas ao processo de intensificação sustentável do setor focalizam na recuperação do pasto (Oliveira-Silva *et al.*, 2017).

A aplicação do conceito agrônômico de lacuna de produtividade (*yield gap*) de pastagens pode ser um importante fator para ponderar as combinações economicamente ótimas para produção pecuária, de modo a indicar as regiões com melhores condições biofísicas (genética da planta, solo, clima e relevo) para incremento de produtividade dos pastos (Fetzel *et al.*, 2017). Com isso, a estimativa do *yield gap* biofísico pode contribuir para a adoção de diversas estratégias no setor pecuário, apoiando tomadas de decisão por parte de gestores públicos e iniciativa privada na destinação de recursos e ações para a recuperação de pastagens degradadas, tais como disponibilização e uso de linhas de crédito.

Estudos foram desenvolvidos para avaliar as lacunas de produtividade pecuária em nível global. Monteiro *et al.* (2020) avaliaram a lacuna de produtividade em pastagens permanentes no mundo usando uma abordagem de classificação climática. Os autores utilizaram cerca de 2.000 avaliações empíricas

¹⁷ Em sistemas semi-intensivos são aplicadas técnicas como manejo de pastagem, cuidados sanitários, separação do rebanho por peso e oferta de suplementação mineral no cocho. Já os sistemas intensivos, caracterizam-se pelo maior uso de capital e trabalho em relação à terra e com uma dieta nutricional adequada para promover a engorda em um curto período (90 a 120 dias).

para a produção de carne e leite de bovinos, ovinos e caprinos, classificando as pastagens em zonas climáticas definidas pela precipitação anual total e graus-dia de crescimento.

Fetzel *et al.* (2017) também avaliaram lacunas de produtividade de pastagem para o mundo todo, considerando limites ecológicos para a intensidade de pastejo (i.e., a fração da produção primária líquida consumida por animais em pastejo) e as limitações geradas pela sazonalidade em pastagens naturais. Deste modo, os autores estimaram uma intensidade de pastejo potencial limitado pela sazonalidade e compararam com dados reais, encontrando uma intensidade real 39%, em média, abaixo do seu potencial. Para os autores, o aproveitamento da lacuna existente poderia aumentar a produção mundial de leite em 5%, de carne em 4%, ou contribuir para liberar até 2,8 milhões de km² de área de pastagem em escala global para outros usos.

Para avaliar a capacidade de suporte das pastagens globalmente, Piipponen *et al.* (2022) primeiro estimaram a biomassa acima do solo que está disponível para os animais em pastagens no mundo todo, com base no produto MODIS Net Primary Production. Esse dado foi então usado para calcular as capacidades de carga do pasto (em termos de taxa de lotação) usando variáveis como declividade, cobertura florestal e necessidades de forragem animal como restrições.

Na Colômbia, González-Quintero *et al.* (2022) avaliaram a lacuna de produtividade da pecuária de corte e leite. Para tanto, foram utilizadas características ambientais, edafoclimáticas e fundiárias das propriedades. A partir de um conjunto de dados de 1.505 fazendas pesquisadas, foi aplicada uma análise de *benchmarking* de lacuna de produtividade para estimar o potencial de aumentar a produção de carne e leite em cada uma das zonas agroecológicas identificadas (ZAE). A produção atingível foi estabelecida como o 90º percentil¹⁸ em cada ZAE (ou seja, o valor que acumula 90% dos dados) e a produtividade atual como a média atual observada dentro de cada ZAE, calculada como a média de produção de todas as propriedades. As fazendas mais produtivas, isto é, aquelas com produção igual ou maior que a produção atingível, foram denominadas “melhores propriedades”, enquanto o restante da amostragem populacional foi incluído dentro do grupo “propriedades operando abaixo do potencial”. Segundo os autores, este último deveria ter um aumento de produção de carne (kg de peso vivo por UA) entre 51 e 104% para atingir a produção das melhores propriedades. Para estes autores, o aumento de produtividade das propriedades agropecuárias aconteceria pelo incremento das habilidades gerenciais (por exemplo, estratégias de manejo de pastejo, métodos de controle de plantas daninhas e uso apropriado de fertilizantes), da qualidade e disponibilidade de forragens, da adoção de pastos melhorados, de práticas de manejo reprodutivo e do uso adequado de insumos e de tecnologia.

No caso do Brasil, estudos recentes de análise de lacuna de produtividade também ampliaram seu escopo para incluir as perspectivas apresentadas pela produtividade pecuária em sistemas pastoris (Dias *et al.*, 2016; Araujo, 2018; Stocco *et al.*, 2020; Monteiro *et al.*, 2020; Santos, 2021). No geral,

¹⁸ O "percentil 90" é um conceito estatístico que representa a medida de posição na qual 90% dos dados de uma amostra estão abaixo desse valor. Em termos simples, ele divide os 90% inferiores dos 10% superiores dos dados.

esses estudos consideram as taxas de lotação animal observada ao longo dos anos como uma *proxy* para a produtividade real em pastagens (Strassburg *et al.*, 2014; Arantes *et al.*, 2018; Araujo, 2018; Monteiro *et al.*, 2020; Stocco *et al.*, 2020; Santos, 2021).

Dias *et al.* (2016) e Stocco *et al.* (2020) estimaram a lacuna de produtividade da pecuária brasileira utilizando basicamente valores de taxas de lotação animal (UA/ha). Os primeiros autores estimaram a lacuna de produtividade ao considerar a média dos 5% dos municípios mais produtivos comparados à média geral de todos os municípios de uma determinada região. Os autores encontraram o maior valor de lacuna de produtividade na região Sul (52% mais baixo do que o potencial), enquanto o menor valor de lacuna de produtividade foi encontrado na região Sudeste, 40% mais baixo do que o topo (os municípios mais produtivos). O valor da lacuna de produtividade para o bioma Amazônia foi estimado 44% abaixo do topo, e no bioma Cerrado e na região Centro-Oeste, a média de cabeças de bovinos por hectare foi 45% menor em comparação aos mais produtivos (Dias *et al.*, 2016). Já Stocco *et al.* (2020) adotaram uma forma modificada da metodologia proposta por Dias *et al.* (2016) para o cálculo da lacuna de produtividade. Ao invés de utilizarem a escala simples dos municípios para se chegar aos mais produtivos, estes autores selecionaram os municípios mais produtivos situados no *quantil* estatístico superior dentre um conjunto de municípios de dada região para, então, estimar a média entre os valores daqueles mais produtivos. No entanto, os autores utilizam o conceito de lacuna de produtividade pautado, especialmente, na taxa de lotação animal (UA.ha-1) e, apesar de usarem um indicador de aptidão agrícola para ponderar o valor da lacuna, não incluem diretamente na mensuração do gap o potencial que o meio físico teria para suportar esses incrementos na taxa de lotação. pecuária.

Strassburg *et al.* (2014), com base em diversos modelos e um conjunto de dados climáticos, reproduziram uma primeira estimativa sobre o potencial de incremento da produtividade da pecuária brasileira no âmbito das condições físicas (solo e clima). De acordo com os autores, o país se encontra entre 32 a 34% aquém de sua produtividade potencial. Além disso, aumentar a produtividade pecuária entre 49 a 52% do que é potencialmente alcançável seria suficiente para liberar áreas de pastagem para outras culturas, atendendo às demandas por carne, grãos, produtos madeireiros e biocombustíveis até pelo menos 2040. Para os autores, esse incremento de produtividade ocorreria sem significativa conversão de ecossistemas naturais e mitigaria até 14,3 Gt CO₂ Eq.

Arantes *et al.* (2018) avaliaram o potencial de intensificação da pecuária de corte no Brasil, estimando as taxas de lotação animal de acordo com o Censo Agropecuário do IBGE de 2006. A capacidade de suporte das pastagens foi estimada pela combinação de imagens MODIS (espectrorradiômetro de imagem de resolução moderada/*moderate resolution imaging spectroradiometer*) da produção bruta primária e dados de demanda de matéria seca (MS) por unidade animal (UA). A taxa de lotação animal e capacidade de suporte médias do Brasil foram de 0,97 e 3,60 UA ha⁻¹, respectivamente. Portanto, o potencial de intensificação da pecuária de corte brasileira encontrada por Arantes *et al.* (2018) foi de 2,63 UA ha⁻¹. O maior potencial de intensificação foi observado na região Sul (3,62 UA ha⁻¹), e os menores para as regiões Norte (2,13 UA ha⁻¹) e Nordeste

(2,22 UA ha⁻¹). Já o potencial de intensificação para a região Centro-Oeste ficou entre 1,1 e 3,3 UA ha⁻¹. Neste trabalho, a produção de forragem de base anual foi estimada pela divisão da MS no período de crescimento por 0,8 e a produção diária de MS foi obtida pela divisão da produção anual de MS (kg MS) por 365 (dias). A taxa de lotação animal foi calculada por meio da divisão da produção diária de MS pela ingestão diária animal de uma UA (11,25 kg MS). A pesquisa em questão não considerou a sazonalidade e os autores ressaltam que os modelos para capacidade de suporte de pastagem e potencial de intensificação foram baseados em estimativas envolvendo somente a relação entre o consumo diário médio e produção de matéria seca controlada por condições climáticas. Afirmam ainda que, para uma estimativa mais precisa deste potencial, outros fatores devem ser considerados, como limitações locais de solo e topografia, condições de mercado e impactos nas emissões de GEEs.

Como visto, a taxa de lotação animal (UA.ha-1) é um parâmetro comumente utilizado como proxy da produtividade da pecuária (como nos estudos de Strassburg et al., 2014; Araujo, 2018; Stocco et al., 2020; Monteiro et al., 2020; Santos, 2021). Entretanto, segundo Martha Jr (2021a), há limitações nesta abordagem, pois ela abarca apenas uma fração das produtividades observadas no mundo real, uma vez que em sistemas baseados em pastagens, como na pecuária bovina de corte, a produtividade dada é obtida pelo produto entre as taxas de lotação (cabeças/hectare) e o desempenho animal (kg de carne/cabeça).

Segundo Martha Jr. et al. (2012), em sistemas a pasto é fundamental considerar esses dois componentes, pois um componente (taxa de lotação, desempenho animal) interage com o outro. Além disso, um desempenho animal baixo pode ampliar os impactos ambientais negativos, como por exemplo, o aumento na intensidade das emissões de metano (Cohn et al., 2014; de Oliveira Silva et al., 2016, 2017; Strassburg et al., 2014). Assim, o uso da taxa de lotação como proxy para a produtividade da terra carrega *trade-offs* que podem levar a uma visão distorcida ou parcial da pecuária brasileira, o que teria implicações na formulação de políticas ambientais, onde a redução da intensidade de emissões (emissões de GEE por unidade de produto) (Moran; Blair, 2021) é central e está associada ao desempenho animal, especialmente sobre o uso de melhores rações e técnicas de alimentação e redução de idade de abate (Opio et al., 2013; D'Aurea et al., 2021).

O uso de modelos de simulação de produção de forragem é estratégico para previsões de lacunas de produtividade para a pecuária a pasto. No entanto, poucos estudos aplicaram tais modelos para simulações de longo prazo no Brasil (Araujo, 2018; Dos Santos *et al.*, 2022) e nenhum testou sua aplicação com o uso combinado de dados de solo e clima em alta resolução espacial.

Araujo (2018) pesquisou a lacuna de produtividade explorável (Yg) da pecuária bovina no estado de São Paulo empregando o modelo CROPGRO Perennial Forage (CROPGRO-PFM) da plataforma DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) para simulações de longo prazo da produção de forragem de *Brachiaria brizantha* cultivar Marandu (atualmente conhecido por capim-marandu ou *Urochloa brizantha* cv. Marandu). Para a determinação da produtividade real,

utilizou como *proxy* a taxa de lotação animal, estimada por meio de dados do IBGE: Censo Agropecuário de 2006 e Produção da Pecuária Municipal (PPM) de 2007 a 2016. A autora concluiu que a taxa de lotação animal da pecuária bovina do estado de São Paulo poderia aumentar de 1,33 para 2,29 UA ha⁻¹, sendo o Yg da produção de forragem de 5,8 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹.

Mais recentemente Dos Santos *et al.* (2022) aplicaram o CROPGRO-PFM e o Modelo Agrometeorológico Integrado (IAM) para simular a produção de forragem potencial e atingível do capim-marandu para nove localidades do Brasil central, sob diferentes níveis de adubação, ao longo de 36 anos (1980–2016). O CROPGRO-PFM foi aplicado seguindo o esquema de Zonas Agroecológicas, como proposto por van Wart *et al.* (2013), onde identificam-se zonas climáticas homogêneas e um número mínimo de pontos de simulação por zona. Apesar desse procedimento facilitar a organização dos dados de entrada e reduzir o tempo de processamento computacional demandado pelos modelos de simulação, ele reduz o detalhamento espacial dos dados de entrada, especialmente de solo. Isto ocorre porque para cada zona homogênea são considerados os dados de uma única classe de solo que nela seja predominante, e geralmente uma zona ocupa uma extensa área – no caso de Dos Santos *et al.* (2022) foram nove zonas homogêneas representando 68Mha de pastagens, cada uma com um tipo de solo para representar a região do Brasil central. Por outro lado, de forma inédita, Dos Santos *et al.* (2022) criaram uma forma de modificar adequadamente as entradas do modelo CROPGRO-PFM para que fosse possível considerar os efeitos da ciclagem de nutrientes via urina e fezes de animais para a manutenção das pastagens, uma vez que a versão mais atual do modelo não modela explicitamente a interface entre o animal e o pasto.

Além disso, os autores associaram os resultados da simulação com um modelo para calcular as taxas de lotação animal superior (*upper limit stocking rate*)¹⁹ e crítica (*critical stocking rate*)²⁰, baseado em Barioni (2020), sendo possível considerar a sazonalidade de produção de pasto. Este aspecto é importante e foi apontado por Martha Jr (2021a) como uma limitação na análise de *yield gap* encontrada em diversos trabalhos anteriores. Segundo o autor, a capacidade de carga das pastagens (e.g taxa de lotação), na maioria dos estudos, é estimada por meio da relação entre a produção anual de matéria seca e o consumo anual pelos animais (Strassburg *et al.* 2014; Arantes *et al.*, 2018; Araujo, 2018), desconsiderando a relação entre oferta e demanda de forragem ao longo do ano. Esta limitação foi superada, portanto, no estudo de Dos Santos *et al.* (2022) a partir das contribuições de Barioni (2020). Assim, Dos Santos *et al.* (2022) simularam a produção de forragem de acordo com cenários que representam sistemas intensivos e não intensivos da pecuária de corte a pasto no Brasil central e encontraram os seguintes resultados: 1) 34,9 Mg por hectare ano (ha⁻¹y⁻¹) de produtividade potencial (Yp) das pastagens, sem déficit hídrico e ou de nitrogênio; 2) 26,3 Mg (ha⁻¹ y⁻¹) de produtividade

¹⁹ A taxa de lotação animal superior expressa o potencial produtivo e a capacidade de suporte dos sistemas pelo uso de uma taxa de lotação animal variável, ajustada pela compra e venda de animais, permitindo o melhor uso da forragem produzida ao longo do ano.

²⁰ A taxa de lotação animal crítica expressa o potencial produtivo e a capacidade de suporte das pastagens manejadas com uma taxa de lotação animal fixa, onde esta é limitada ou definida pelos períodos críticos do ano.

atingível (Y_w) dos pastos em sequeiro, onde há restrição hídrica apenas; 3) 19,7 Mg ($\text{ha}^{-1} \text{y}^{-1}$) de produtividade atingível em sequeiro e altamente fertilizado com nitrogênio inorgânico (N400); 4) 24,8 Mg ($\text{ha}^{-1} \text{y}^{-1}$) de produtividade atingível em sequeiro e altamente fertilizado tanto com nitrogênio inorgânico quanto orgânico (N400ret); (5) 11,7 Mg ($\text{ha}^{-1} \text{y}^{-1}$) de produtividade atingível com restrição hídrica e baixa fertilização (N50ret); e 6) 15,4 Mg ($\text{ha}^{-1} \text{y}^{-1}$) de produtividade atingível com restrição hídrica e de nutrientes (N50ret), com baixa fertilização de N inorgânico e orgânico.

Por fim, Santos (2021) apresenta em sua tese de doutorado uma estimativa de lacuna de produtividade biofísica da pecuária a pasto no Brasil central, com base no projeto GYGA. Os resultados sobre as estimativas das produtividades potencial e atingível são os mesmos apresentados na publicação Dos Santos *et al.* (2022). A média simulada da taxa de lotação de limite superior do cenário Y_p foi semelhante em todas as localidades, o que pode ser resultado da baixa variabilidade espacial dos dados de clima e solo utilizados nas simulações.

É importante ressaltar que embora essas perspectivas agronômicas e zootécnicas sejam necessárias, e bastante úteis, se não houver conexão com a parte econômica, mudanças mais transformadoras podem ser inviabilizadas. As implicações econômicas são muitas vezes um impulsionador-chave para a adoção de novas práticas na agricultura e pecuária. Essa abordagem integrada é fundamental para promover transformações significativas e sustentáveis no setor, o que este trabalho busca explorar.

3.1.3 Objetivos

O objetivo geral deste capítulo é estimar a lacuna de produtividade da pecuária a pasto no Brasil, considerando o potencial biofísico para o desenvolvimento das pastagens.

Entre os objetivos específicos estão:

- a) Adaptar os protocolos do Atlas Global de Yield Gap (*Global Yield Gap Atlas*) para a estimar com maior resolução espacial a lacuna de produtividade da pecuária a pasto nos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica;
- b) Estimar por meio de modelagem de simulação de longo prazo – CROPGRO-PFM, a produção atingível de biomassa seca de capim-marandu mediante variáveis de solo e clima espacialmente explícitas;
- c) Estimar a produtividade atingível da pecuária a pasto, dada pelo produto entre o desempenho animal e a taxa de lotação animal, considerando a relação entre produção sazonal atingível de biomassa seca e a demanda animal ao longo do ano;
- d) Estimar a lacuna de produtividade da pecuária a pasto, dada pela diferença entre as produtividades atingível e real.

3.2 Material e Métodos

Nesta tese de doutorado foi investigada uma nova abordagem de análise de lacuna de produtividade em sistemas pastoris para os biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica. A escolha dos três biomas se deu, primeiramente, pelo fato dos três concentrarem, juntos, cerca de 125,9 Mha de pastagem (79% de toda área de pasto do Brasil) (LAPIG, 2020).

No caso da Amazônia, bioma reconhecido como sendo um *hotspot* de biodiversidade, a análise de *Yield Gap* tem grande potencial de contribuir especialmente para políticas de controle do desmatamento, como o PPCDAM, uma vez que pode gerar informações quantitativas sobre o possível efeito poupa terra do preenchimento das lacunas de produtividade da pecuária. Já o Cerrado, importante polo de produção agrícola mundial e bioma que compreende a grande parte da fronteira agrícola nacional, a análise de *Yield Gap* traz, além de contribuições para políticas de controle do desmatamento (como o PPCerrado), importantes subsídios para direcionamento de investimentos em políticas voltadas à mitigação e adaptação às mudanças climáticas (como o Plano ABC+), uma vez que aponta áreas com maior potencial para a recuperação de pastagens degradadas. O mesmo ocorre para o bioma Mata Atlântica, região consolidada de produção agrícola e sem espaço para expansão agropecuária (protegida pela Lei da Mata Atlântica), porém com potencial para recuperar pastagens degradadas, contribuindo assim para o aumento da produção pecuária, concomitante à redução das taxas de emissões de GEE. Os biomas Pampa, Pantanal e Caatinga, por sua vez, não foram abordados, tanto por compreenderem menor porcentagem de contribuição de áreas de pastagens no Brasil, quanto pelo fato de possuírem áreas relevantes de pastagens naturais ou que se utilizam de outras forrageiras adaptadas, que não o capim-marandu, modelado no presente estudo.

Deste modo, nesta tese os protocolos sugeridos no projeto GYGA (*Global Yield Gap Atlas*)²¹ foram adaptados para mensuração da lacuna de produtividade (*yield gap*) da pecuária a pasto (dado pela diferença entre produtividade atingível e produtividade real) com foco na ampliação do detalhamento espacial das análises e em uma melhor reprodução da realidade produtiva deste setor no Brasil. Primeiramente, foi estimada a produtividade atingível (Y_w - *water-limited potential yield*)²² das pastagens nos três biomas (Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica) por meio de modelagem biofísica de crescimento de forragem (Hoogenboom et al., 2019; Dos Santos et al., 2022), de forma espacialmente explícita, combinada com um modelo para estimativa de taxa de lotação animal crítica, baseado na sazonalidade de produção de pasto (Barioni, 2020). Em segundo lugar, foram combinados esses resultados com a abordagem proposta por Martha Jr. et al. (2012) sobre a estimativa da produtividade da carne bovina a pasto, produto entre o desempenho animal e as taxas de lotação, em escala municipal

²¹ <http://www.yieldgap.org/>

²² Optou-se pela estimativa do Y_w – produtividade potencial limitada pelo déficit hídrico - uma vez que no Brasil a maioria das áreas de pasto depende apenas das chuvas para suprir a necessidade hídrica, sendo que a adoção da irrigação na pecuária é pouco representativa.

- tanto para produtividade real (Y_a – *actual yield*) quanto atingível – informações necessárias para o cálculo da lacuna de produtividade.

A seguir serão apresentados: (i) uma síntese acerca dos protocolos apresentados pelo GYGA e a adaptação adotada para este estudo para mensuração do *yield gap*; e (ii) os procedimentos estabelecidos para a estimativa da produtividade atingível das áreas de pastagens, englobando a descrição do modelo mecanicista adotado, as condições para simulação, o banco de dados, a escala utilizada e as estratégias de tratamento dos resultados simulados; (iii) os procedimentos para estimar a produtividade real para a pecuária a pasto; bem como (iv) a mensuração final do *yield gap* da pecuária.

3.2.1 Projeto GYGA – Atlas Global de Yield Gap

O Atlas Global de Yield Gap (GYGA) é um projeto de colaboração internacional, cujo objetivo é estabelecer um protocolo padrão para avaliar “gaps” de produtividade. Entre os indicadores incluídos no projeto, estão a produtividade potencial (Y_p), produtividade potencial limitada pela água (Y_w), lacunas (*gaps*) de produtividade (Y_g) e produtividade da água (WP) para diversas culturas e países. A mensuração de tais indicadores é realizada por meio de bases de dados disponíveis, modelos de simulação de culturas e uma abordagem *bottom-up* de obtenção de resultados locais que podem ser extrapolados para a escala de região e país.

De acordo com van Wart *et al.* (2013), os protocolos sugeridos na abordagem GYGA buscam, inicialmente, definir zonas climáticas mais homogêneas, onde se espera que as condições relacionadas ao solo e ao clima sejam suficientemente homogêneas. Com esse protocolo, minimiza-se o número de pontos necessários para a simulação. A seguir são listados sinteticamente os procedimentos preconizados pelo GYGA para gerar as estimativas de *yield gap* e, em seguida, é apresentado o detalhamento do método adotado para este estudo, que por sua vez gera adaptações do proposto pelo GYGA:

- a) **Definição das zonas climáticas homogêneas (CZs):** o primeiro procedimento estipulado nos protocolos GYGA é definir zonas climáticas homogêneas (CZs). O mapa de CZs é gerado por meio na combinação matricial entre as variáveis categóricas: graus dias (GDD), estimados conforme Licker *et al.* (2010); sazonalidade da temperatura, obtida com dados do WorldClim (~1950-2000) e Bioclim4; e índice anual de aridez (AI), extraídos do CGIAR-CSI;
- b) **Seleção de estações meteorológicas e definição das regiões de simulação:** o segundo procedimento é selecionar os pontos para execução das simulações em modelos de crescimento de cultura. Para a execução das simulações, é preconizada a seleção do menor número possível de pontos. Para isso, são considerados os pontos próximos às estações meteorológicas, que se localizem dentro de uma zona climática homogênea, e que estejam em regiões representativas em termos de área total ocupada pela cultura

(em relação ao território como um todo) considerada na análise. Para maior eficácia dos resultados, o Projeto GYGA sugere que ao menos 75% das áreas plantadas sejam consideradas nas simulações.

- c) **Seleção dos dados de clima e solo:** o terceiro passo indicado é sistematizar para cada ponto de simulação os dados climáticos das estações selecionadas e os dados de perfis de solo. Os parâmetros do solo devem ser obtidos a partir de mapeamentos consolidados, como mapas nacionais, e do próprio modelo de simulação a ser utilizado. O GYGA propõe a criação de um *buffer* de 100 km ao redor de cada ponto, baseado na localização de cada estação meteorológica, para a seleção de um tipo de solo predominante. Os parâmetros de solo utilizados, portanto, referem-se a um tipo de solo por ponto (região) de simulação;
- d) **Produtividade potencial (Y_p) e atingível (Y_w):** o projeto GYGA sugere que a simulação de Y_p e Y_w considere, portanto, cada tipo de cultivo (área da cultura agrícola ou de pastagem) *versus* o solo predominante *versus* os dados climáticos das estações meteorológicas selecionadas. As estimativas de Y_p e Y_w podem ser extrapolados dentro de cada zona climática homogênea (onde estão os pontos de simulação), considerando a proporção da área plantada e cada combinação clima *versus* solo *versus* zona climática.
- e) **Produtividade real das culturas:** paralelamente às simulações de Y_p e Y_w , o último passo é a estimativa da produtividade real (Y_r) das culturas. Para o projeto GYGA as principais fontes de informações para estimar Y_r estão em escala municipal. Para mensuração da produtividade real em culturas de sequeiro, sugere-se uma média dos valores obtidos em um período de 10 anos devido à variabilidade entre um ano e outro.

Para o presente estudo a principal adaptação em relação aos protocolos GYGA se deu sobre a definição dos pontos de simulação no modelo mecanicista adotado, que tem a finalidade de alcançar uma melhor resolução espacial nos resultados finais do estudo. Ao invés de gerar zonas climáticas homogêneas (em termos de solo e clima), para minimizar o número de pontos para simulação, como indicado por van Wart *et al.* (2013), a abordagem utilizada foi gerar as simulações para um *grid* de 0,25°, aproximadamente 28 km, onde ganha-se um melhor detalhamento espacial sobre os dados de solos e clima.

A dificuldade de processamento das simulações de crescimento da pastagem no DSSAT foi superada através da criação de rotinas em linguagem R para a formatação dos dados de entrada - solo e clima -, bem como para as simulações finais, que se apoiaram em técnicas de paralelização dos processos.

3.2.2 Estimativa da produtividade atingível (Y_w) das áreas de pastagens

3.2.2.1 Modelo CROPGRO Perennial Forage

O modelo mecanicista utilizado para a estimativa da produtividade atingível (Y_w) das pastagens é o CROPGRO Perennial Forage (CROPGRO-PFM). Calibrado para as forrageiras tropicais, como a *Brachiaria brizantha* cv Marandu (Pedreira *et al.*, 2011; Pequeno *et al.*, 2014, Pequeno *et al.*, 2018), o CROPGRO-PFM está inserido na plataforma do DSSAT (do inglês *Decision Support System for Agrotechnology Transfer*). A plataforma DSSAT compreende modelos de simulação de culturas para mais de 42 culturas (a partir da Versão 4.7.5), bem como ferramentas para facilitar o uso efetivo dos modelos.

O modelo CROPGRO é utilizado para prever o crescimento e a composição morfológica das culturas por meio de dados de clima e solo, de processos fisiológicos das plantas e do manejo adotado na produção. Sua aplicabilidade é abrangente, permitindo simulação do balanço de água e nitrogênio no solo, da dinâmica da matéria orgânica (MOS), bem como dos efeitos de pragas e doenças nas plantas (Pequeno, 2014).

Em 2017, o CROPGRO-PFM foi trazido para o código *shell* da versão V4.7 do DSSAT, com parametrização de espécies e arquivos de dados para *Brachiaria brizantha* Stapf cv. Marandu e ‘Tifton 85’ bermuda (*Cynodon* spp.) desenvolvida por Pequeno *et al.* (2017). A última versão do CROPGRO-PFM disponível na plataforma DSSAT contempla a calibração para o capim-marandu realizado por Pequeno *et al.*, 2018, o qual utiliza três anos de dados experimentais de parcelas colhidas mecanicamente submetidas a tratamentos de sequeiro e irrigado. Apesar de alcançar ajustes aceitáveis para ambas as condições, os autores relatam limitações de partição e dormência durante o inverno e período de floração, o que reduz o potencial de rebrota e produção de forragem no início da primavera.

De acordo com Santos (2021), existe uma série de desafios para estimar os níveis de produtividade de pastagens a médio e longo prazo utilizando modelos de simulação, principalmente devido à carência de dados experimentais. Para a autora, há uma baixa disponibilidade de experimentos de longo prazo que apresentem um histórico sobre manejo e crescimento da forrageira, que monitorem as interações solo-planta-animal, que realizem uma boa medição sobre a produção total de plantas e partição de fotoassimilados em condições de pastejo, bem como sobre a área foliar residual e seu efeito na rebrota. Além disso, a autora destaca que o CROPGRO-PFM ainda não foi testado para baixa fertilidade ou más condições de manejo.

Além disso, como aponta Bosi *et al.* (2020), o CROPGRO-PFM em sua versão atual não considera na modelagem de crescimento do pasto a interface com os animais em pastejo, incluindo os efeitos da ciclagem de nutrientes via urina e fezes de animais, o pastejo seletivo, o pisoteio e outras perdas de pastejo relacionadas às taxas de lotação. Para contornar isso, de forma inédita, Dos Santos *et al.* (2022) criou uma forma de modificar adequadamente as entradas do modelo CROPGRO-PFM para considerar os efeitos da ciclagem de nutrientes via urina e fezes de animais para a manutenção das pastagens. Essa estratégia desenvolvida por Dos Santos *et al.*, (2022) foi também testada neste estudo,

porém, com resultados poucos significativos, ou seja, com baixo acréscimo adicional na formação de biomassa seca. Como as simulações desta tese adotaram elevado nível de adubação inorgânica (como será visto mais à frente), esse cenário com reposição de N orgânico não entrou nas análises.

3.2.2.2 Preparativos para simulação

3.2.2.2.1 Escala e geografia das simulações

Para realizar a estimativa da produtividade atingível das pastagens no Brasil, foi realizada uma série de simulações de crescimento do capim-marandu (*Urochloa brizanta* cv. Marandu) no modelo CROPGRO-PFM. Essas simulações seguiram algumas premissas e padrões previamente estabelecidos.

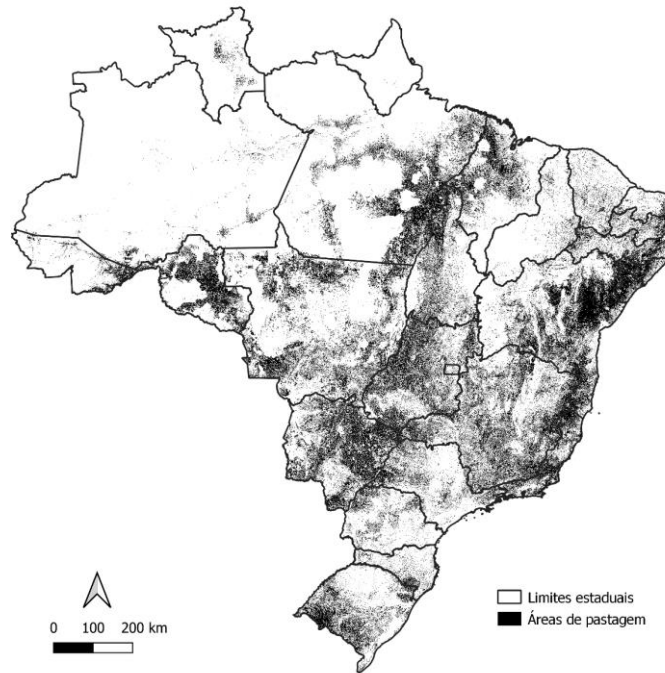
O primeiro passo foi definir a distribuição espacial das simulações. Nesse sentido, dentre as escalas dos dados de entrada espacialmente explícitos, ou seja, de solo e clima, optou-se por utilizar a de maior tamanho. O grid de simulação, portanto, seguiu o padrão de resolução dos dados climáticos, com resolução de 0,25° (~ 28 km) cobrindo a totalidade do território brasileiro, em um total de 11.225 quadrículas.

Cada quadrícula compreende uma região quadrada de aproximadamente 28 quilômetros de lado e será referida como ponto de simulação. Cada ponto de simulação apresenta um dado de clima e solo, de modo que o resultado da simulação serve para toda a área compreendida pela quadrícula. Mais à frente será detalhado como foi obtido o dado de solo e clima para cada ponto.

Dada a dimensão espacial das áreas de pastagens no território brasileiro e as condições edafoclimáticas para qual o modelo CROPGRO-PFM foi calibrado, foi realizada uma filtragem nos pontos de simulação. Considerando o valor aproximado de 28 km de lado para cada ponto de simulação, sabe-se que a área máxima de pastagem no interior de um ponto de simulação é de 784.000.000 m² ou 78.400 hectares (28.000 m x 28.000 m). Nesse caso, a área máxima de pastagem a ser representada por cada ponto de simulação é 78.400 hectares e a área mínima é maior que zero.

Para selecionar as regiões de simulação no DSSAT, o mapa de *grids* de dados climáticos de Xavier *et al.* (2016) foi sobreposto ao mapa de áreas de pastagens, disponibilizado pelo Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG, 2021) sob a forma de arquivo matricial (Figura 2), para então selecionar somente as quadrículas que possuem sobreposição com pelo menos um pixel classificado como pastagem.

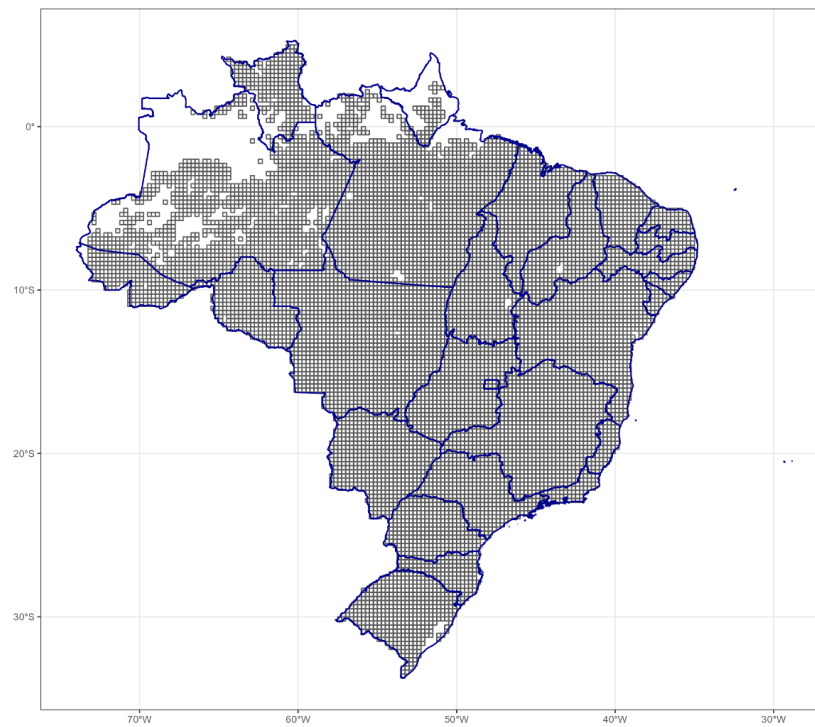
Figura 2. Distribuição espacial das áreas de pastagens no Brasil, conforme LAPIG (2021)



Fonte: LAPIG, 2021

Como apresentado na Figura 2, foram selecionados 9.873 pontos de simulação no DSSAT, para todo o Brasil.

Figura 3. Distribuição espacial dos pontos de simulação para estimativa de Y_w



Fonte: Elaboração própria com base em Xavier et al. (2016).

Em função do modelo mecanicista indicar menor desempenho nas simulações para regiões como elevado déficit hídrico, como o caso do Bioma Caatinga, o que era esperado em função de sua calibração, considerou-se como recorte geográfico para análise dos resultados neste estudo os pontos que possuíam qualquer intersecção com polígonos de pastagem, além de estarem situados nos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica.

Não foram considerados os resultados da simulação para os pontos que: (i) concentram áreas de pastagens localizados nos biomas Pantanal e Pampa, onde predominam pastos naturais e que não constituem objeto de análise deste estudo, representando respectivamente 3,4% e 3,9% do rebanho brasileiro em 2020 (IBGE, 2020); e (ii) estão localizados no bioma Caatinga, onde ocorre maior restrição climática para desenvolvimento das pastagens e onde são adotadas espécies forrageiras nativas ou adaptadas ao bioma (como palma forrageira, capim *buffel*), representando 7% do rebanho brasileiro em 2020 (IBGE, 2020).

3.2.2.2 Dados de entrada no DSSAT

- **Clima:**

Os dados climáticos advêm de uma série histórica diária para um período de 36 anos disponibilizados por Xavier *et al.* (2016)²³. A resolução espacial das variáveis de clima é de 0,25 graus, o que totaliza 11.225 pontos (quadrículas) para todo o território brasileiro, como já ilustrado na Figura 2. Os dados são disponibilizados no formato *Network Common Data Form* (NETcdf²⁴) e apresentam-se como imagens de diversas bandas em que cada banda representa um dia. A partir desses dados NETcdf foi criada uma rotina em linguagem de programação R para transformá-los em formato tabular, de modo que para cada quadrícula do grid apresentado fosse gerado uma tabela de 13.515 linhas e 12 colunas, cada linha representando um dia e cada coluna uma informação.

A partir dos dados tabulados e organizados, foi necessária uma etapa complementar para a criação dos arquivos climáticos no formato requisitado pelo *software* DSSAT. Para tanto, foi desenvolvida outra rotina em linguagem R, com auxílio do pacote ‘DSSAT’²⁵, por meio da qual se formataram os dados, de modo que para cada ponto de simulação foi gerado um arquivo de clima.

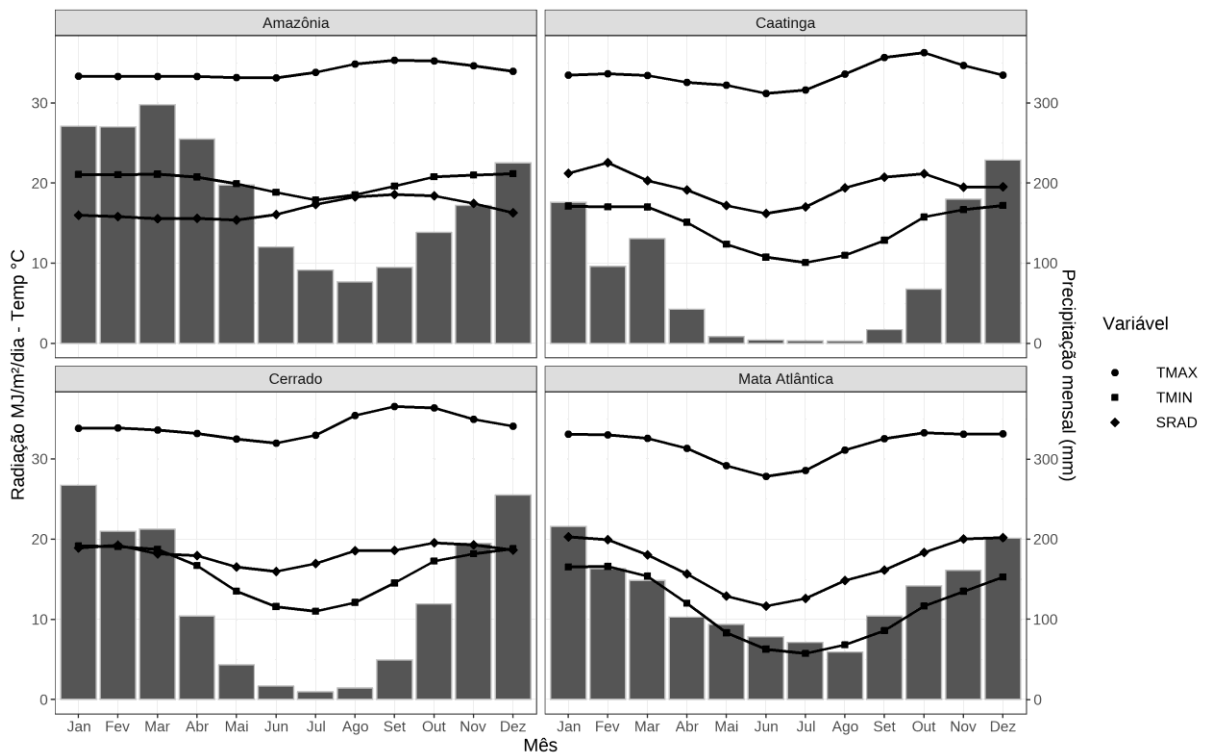
As variáveis climáticas utilizadas neste estudo foram: precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento. Os dados de precipitação estão disponíveis para o período de 01/01/1980 a 31/12/2016, e demais variáveis, de 01/01/1980 a 31/07/2017. Para padronização utilizou-se o período 01/01/1980 a 31/12/2016 para todas as variáveis, totalizando 36 anos de dados climáticos para a simulação.

²³ Os dados publicados por Xavier *et al.*, 2016 passam por constantes atualizações e no âmbito deste estudo foram utilizadas as versões: (i) 2 para as variáveis evapotranspiração potencial, umidade relativa do ar, velocidade dos ventos, temperatura máxima, temperatura mínima e radiação e (ii) 2.2 para precipitação Os dados podem ser encontrados em: <https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA/folder/4247252285>

²⁴ <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>

²⁵ <https://github.com/palderman/DSSAT>

Figura 4. Média mensal da radiação solar ($\text{MJ m}^2 \text{day}^{-1}$) e temperaturas máxima e mínima ($^{\circ}\text{C}$), conforme dados climáticos de Xavier *et al.* (2016)



Fonte: Elaboração própria.

Para a construção dos arquivos climáticos a informação de altitude também é necessária e para isso utilizou-se a informação proveniente do banco de dados da Missão Topográfica Radar Shuttle (acrônimo em inglês SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*) SRTM da United States Geological Survey (USGS) (FARR *et al.*, 2007), que pode ser acessado livremente através da plataforma *Google Earth Engine*. A partir do dado bruto foi calculada a altitude média para cada quadrícula do grid de simulação, com o intuito de obter uma altitude representativa de toda a área abrangida pela região de 78.400 hectares.

- **Solos:**

Os dados referentes aos atributos de solo (teor de argila, areia e pH) foram extraídos do banco de dados do projeto SoilGrids versão 2 e do *United States Geological Survey* (USGS), por meio da plataforma *Google Earth Engine*. Outras variáveis não presentes nesse banco foram derivadas dos atributos de solo oriundos do SoilGrids (versão 2), e calculadas segundo Saxton e Rawls, 2006 mediante a implementação das funções de pedotransferência em linguagem de programação R no pacote

rcropmod²⁶, sendo elas: ponto de murcha (*wiltling point*), capacidade de campo (*field capacity*), teor de umidade saturado (*saturated moisture content*), densidade matricial (*matric density*), densidade aparente (*bulk density*), teor de água saturado (*saturated water content*) condutividade hidráulica saturada (*saturated hydraulic conductivity*) e água disponível (*plant available water*).

Não se optou neste estudo pelo uso das bases de dados de solos da Embrapa, os quais são mapas que se enquadram na categoria “mapas exploratórios”, em função da escala pouco detalhada (1:1.000.000) e por não contemplarem dados quantitativos como teor de argila, teor de areia, pH etc.

Para a estimativa de informações espaciais do solo, a base de dados digital de solos *SoilGrids* é gerada por modelos de predição que combinam algoritmos de aprendizagem de máquina e informações ambientais de fácil aquisição (e.g. imagens de satélite, modelo digital de elevação etc.). Esse banco de dados apresenta cobertura mundial, incluindo o Brasil, de acordo com metodologia e bases de dados disponibilizadas pelo *International Soil Reference and Information Center (ISRIC)* e detalhado em Hengl *et al.* (2017). As informações de solo do Projeto *SoilGrids* em formato matricial, gerada por modelos de predição, possui uma acurácia média de 60% e fornece informações com resolução espacial de 250 metros. Os dados em sua segunda versão, também na escala de 250m, abrangem as profundidades 0, 10, 30, 60, 100 e 200 centímetros (cm) para diferentes atributos físicos, químicos e enquadramento taxonômico, segundo o sistema internacional de classificação de solos *World Reference Base* da FAO (IUSS, 2015).

Foram utilizados para a modelagem os dados do *SOILGRIDS* para todas as camadas disponíveis (0, 10, 30, 60, 100 e 200) referentes à textura (teor de argila e areia) e pH em água. Além disso, foram também coletadas as informações de declividade, calculadas por meio da função *slope*²⁷ aplicada ao dado de altitude. Vale ressaltar que a extração dos dados para todas as camadas de profundidade é necessária para compor o perfil do solo completo, assim como demanda o modelo DSSAT. Assim, dentro de cada grid de simulação (região no interior da quadrícula) foi calculado o valor médio de cada variável, considerando cada uma das camadas de solo. O intuito foi obter um valor representativo, por variável e por camada de profundidade, para a região da quadrícula.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de solos requeridos pelo DSSAT, com respectivas descrições, referências e procedimentos adotados para derivação.

²⁶ <https://github.com/ldemaz/rcropmod/>

²⁷ <https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-terrain-slope>

Tabela 1. Lista de variáveis de dados do solo, suas definições, referências e metodologias de derivação

Variável DSSAT	Descrição	6 camadas de profundidades	Método de derivação/Referência
SLCF	Teor de areia (>2 mm), % - CRFVOL	sim	SoilGrids
SLCL	Teor de argila (<0.002 mm), % - CLYPPT	sim	SoilGrids
SLOC	Teor de matéria orgânica, %	sim	Valor referência DSSAT ²⁸
SLB	Profundidade, base da camada, cm Camadas: 0, 10, 30, 60, 100, 200	sim	SoilGrids
SLLL	Teor de água no solo - Limite inferior (ponto de murcha permanente), cm ³ .cm ⁻³	sim	Função soil_hydraulis() pacote rcropmod
SDUL	Teor de água no solo drenado (capacidade de campo) - cm ³ .cm ⁻³	sim	Função soil_hydraulis() pacote rcropmod
SSAT	Teor de água no solo saturado, cm ³ .cm ⁻³	sim	Função soil_hydraulis() pacote rcropmod
SSKS	Condutividade hidráulica saturada, cm.h ⁻¹	sim	Função soil hydraulis() pacote rcropmod
SLRO*	Declividade	não	Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS)

*A declividade é usada para calcular a *Runoff curve*.

Fonte: Elaboração própria

3.2.2.2.3 Cenário de simulação da pastagem

As simulações feitas pelo software DSSAT baseiam-se em um modelo que deve ser executado a cada ponto em que se deseja obter resultados. Para cada ponto, como já mencionado, foi composto um banco de dados específico, que representa as informações climáticas e de solo para aquela região compreendida pela quadrícula. Além disso, é preciso compor um conjunto de parâmetros de cultura como data de plantio, datas de colheita, datas de aplicação e quantidade de fertilizante, cultivar utilizada, tipo de fertilizante, método e volume de irrigação, altura de colheita da forragem etc. Ao estabelecer cada um desses parâmetros mediante ao software DSSAT, um arquivo, denominado “Arquivo X” é formado, e a partir dele a simulação pode ser executada.

No presente caso, foram necessárias 9.873 rodadas de simulação e para isso, uma rotina em linguagem R foi construída para executá-las. A cada rodada foram selecionados os bancos de dados de entrada correspondente à quadrícula em questão.

Os dados de manejo da pastagem, condições de simulação e parâmetros genéticos do capim-marandu, gerados por Pequeno (2014) foram selecionados no "Arquivo X". Além disso, foram feitas algumas alterações nesses parâmetros propostas por Dos Santos et al. (2022) para melhor refletirem a

²⁸ O teor de matéria orgânica é uma variável muito sensível no modelo DSSAT e para cada simulação o ideal que seja feita a calibração manual para obtenção dos melhores valores. No âmbito desse estudo, pelo alto número de simulações optou-se por deixar o valor da variável em branco e com isso, usar o valor *default* calculado pelo DSSAT a partir da textura do solo.

realidade dos parâmetros nos biomas avaliados no estudo: (i) na aba com os dados genéticos sobre o capim-marandu, o parâmetro RTSEN (fração do comprimento da raiz existente que pode senescer por dia fisiológico) foi alterado de 0,008 para 0,005 - a fim de desacelerar a taxa de senescência das raízes, evitando a morte da planta em situações climáticas adversas – como secas prolongadas; (ii) na aba com os dados de análise de solo, o fator de proporção de carbono estável no solo foi alterado de 0,57²⁹ para 0,8 – segundo a autora, para melhor representar os solos tropicais, os quais naturalmente possuem baixa fertilidade, podendo ter alto teor de carbono orgânico estável (cerca de 0,90) e alta taxa de decomposição; (iii) na aba de condições da simulação, o método de evaporação do solo foi alterado de Suleiman-Richie para o Ritchie-CERES – a autora aponta que o método Suleiman-Richie causa uma evaporação excessiva de água do solo

No que diz respeito ao calendário de plantio e colheita foi estabelecido que a planta forrageira seria semeada no dia 15 de outubro de 1980 em um solo na condição de capacidade de campo e sucedida por irrigação de 10,5mm por aspersão, para garantir a germinação da semente. A partir da semeadura, foi estabelecido que a primeira desfolha seria realizada 84 dias após o plantio, considerando que a literatura indica que, geralmente, as pastagens levam de sessenta a noventa dias para se estabelecerem (Pequeno, 2014).

De acordo com a distribuição das chuvas pelo território brasileiro foram adotadas duas etapas de manejo envolvendo a adubação, a frequência de desfolha e a altura do corte do pasto durante as simulações, uma vez que a brachiaria (capim-marandu) é uma planta perene e permanece no campo o ano todo. Essas estratégias foram escolhidas visando uma representação mais fidedigna da realidade produtiva de pastagens no Brasil e alterações do manejo ao longo do ano.

A primeira etapa envolve a época de águas, período entre meados de outubro (dia 15) de um ano até meados de abril (dia 15) do ano seguinte, totalizando 185 dias de simulação de crescimento da forragem. Durante esse período, as desfolhas simuladas ocorreram a cada 28 dias, considerando um corte a 20 cm de altura acima do solo. As aplicações de nitrato de amônio (NH_4NO_3) foram realizadas neste período de águas, conforme Oliveira *et al.* (2004). Para efeito de simulação considerou-se um total aplicado de 400 kg/ha/ano do fertilizante, conforme calibrado por Pequeno *et al.* (2014) – as aplicações foram fracionadas em seis parcelas de aplicações (55 kg, 60 kg, 75 kg, 75 kg, 75 kg e 60 kg), realizadas sempre após a cada data de desfolha simulada.

A segunda etapa, por sua vez, envolve a época das secas, período entre meados de abril de um ano até meados de outubro do ano mesmo ano, totalizando 180 dias de simulação de crescimento da forragem. Durante esse período não foi simulada a aplicação de fertilizantes. A altura simulada dos cortes foi semelhante à considerada para a época das águas, a 20 cm do solo, mas a frequência de cortes simulada para a seca foi de 56 dias³⁰.

²⁹ Como calibrado no modelo CROPGRO-PFM por Pequeno et al., 2014.

³⁰ Os períodos de simulação e o manejo adotado seguiram sugestões, conforme comunicação pessoal, do especialista do setor Dr. Geraldo Martha Jr, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital.

Com a simulação foi quantificada a matéria seca acumulada da parte aérea – variável “CWAD – Tops weight” (em quilogramas por hectare) no *software* – observada diariamente para cada ponto de simulação. Esses resultados possibilitam a estimativa das produtividades atingíveis em diferentes escalas espaciais, que vão desde a escala da quadrícula de simulação até as de municípios, estados, biomas e assim por diante; bem como em diferentes escalas temporais, desde a diária (escala de simulação), até mensal e anual. Para a estimativa da produtividade atingível mensal de matéria seca, o primeiro passo é calcular o ganho diário de matéria seca (MS_t), pela diferença do valor acumulado no dia t com o valor do dia anterior ($MS_t = CWAD_t - CWAD_{t-1}$).

Posteriormente, foram calculadas as médias de ganho diário de matéria seca (MS_t) para os dias correspondentes de cada ano. Dessa forma, foi gerado um ano modelo para cada ponto de simulação, em que o valor de ganho diário de matéria seca em cada dia do ano modelo corresponde à média de ganho diário desse mesmo dia em todos os 36 anos de simulação. Com esse ano modelo, foi calculado o ganho médio mensal de matéria seca.

3.2.2.3 Estratégias de mensuração da produtividade atingível

- **Metodologia de cálculo da taxa de lotação crítica utilizando os *outputs* do modelo mecanístico de produtividade potencial da pastagem**

Para obter a produtividade atingível da pecuária a pasto é necessário, em uma primeira etapa, converter o resultado do modelo de crescimento de forragem, cujo *output* é a biomassa seca da parte aérea da pastagem, em taxa de lotação animal. Para isso, deve-se considerar a sazonalidade da produção do pasto, pois na época de seca a queda da produção de biomassa exige a redução da taxa de lotação. Sendo assim, pode-se considerar sistemas com taxa de lotação variável, nos quais o produtor tem capacidade de alterar a taxa de lotação de acordo com a oferta de pasto, ou sistemas com taxa de lotação fixa, nos quais o produtor opta por manter uma taxa de lotação constante que mais próxima à capacidade de suporte da pastagem em períodos críticos, como a época de seca.

Santos (2021) propõe o cálculo de 2 tipos de taxa de lotação para caracterizar cada um dos sistemas citados acima. Para os sistemas com taxa de lotação variável, a autora propõe o cálculo do **limite superior de taxa de lotação, correspondente à divisão do total de biomassa de pasto produzido anualmente pela demanda anual de uma unidade animal**. Este valor corresponde à máxima taxa de lotação que o produtor poderá atingir no ano, considerando que há a possibilidade de variação ilimitada da taxa de lotação de acordo com a capacidade de suporte da pastagem. Para o sistema com taxa de lotação fixa, a autora propõe o cálculo de uma taxa de lotação crítica, a partir dos trabalhos de Barioni (2020), que corresponde ao maior valor de taxa de lotação que não resulte em um déficit de pastagem considerado crítico em nenhum momento do ano.

Para este trabalho foi calculada a taxa de lotação crítica, considerando sistemas de produção de pecuária de ciclo completo cujo produtor não alterará o tamanho do seu rebanho ao longo do ano por meio da compra e venda de novos animais. Sendo assim, foi utilizado o modelo desenvolvido a partir

dos trabalhos de Barioni (2020) e citado por Santos (2021), que permite o cálculo diário do déficit acumulado de pastagem, por meio da equação 1.

$$CFD_{t+\Delta t} = \max(CFD_t + (D_t - P_t) * \Delta t, 0) \quad (1)$$

Considerando que o cálculo foi diário, ou seja, $t = 1$ e $\Delta t = 1$, CFD_t é o déficit acumulado de pastagem no dia t (kg ha^{-1}), P_t é a produção diária de forragem no dia t (kg MS ha^{-1}) e D_t é a demanda de forragem pelos animais no dia t (ingestão + perdas, $\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$).

A produção diária de forragem (P_t) foi extraída do modelo de crescimento da pastagem do DSSAT, sendo ela a variável CWAD (Tops weight) (kg MS ha^{-1}). Foi gerado um ano modelo, considerando um valor médio de produção de forragem para cada dia do ano abrangendo os 36 anos da série (1980-2016), e esses valores foram aplicados na equação para a obtenção do déficit acumulado em cada ponto de simulação.

A demanda de pastagem pelos animais (D_t) pode ser calculada por meio da equação 2.

$$D_t = \frac{TL * CD}{EPP} \quad (2)$$

Em que TL é a taxa de lotação, CD é o consumo médio diário de matéria seca de pasto por unidade animal, e EPP é a eficiência potencial de pastejo.

O consumo médio diário (CD) e a eficiência potencial de pastejo (EPP) foram definidos como $8,8 \text{ kg MS UA}^{-1}$ (Allen *et al.*, 2011) e 50% (consulta a especialista do setor pecuário), respectivamente. Dessa forma, pode-se estimar os valores de taxa de lotação que evitem eventos críticos de déficit de pastagem. Foi definido como um evento crítico de déficit de pastagem quando o valor acumulado chegar a $2.500 \text{ kg MS ha}^{-1}$ (Santos, 2021).

Sendo assim, primeiramente foi calculado o limite superior da taxa de lotação, correspondente ao maior valor atingível naquele local (equação 3). Este valor foi aplicado na equação 2, e o resultado de D_t foi aplicado no modelo desenvolvido a partir de Barioni (2020) (equação 1). Nos pontos de simulação em que o modelo resultou em um déficit acumulado superior a $2.500 \text{ kg MS ha}^{-1}$ em algum dia do ano, a taxa de lotação foi reduzida em 5% e o cálculo foi refeito. Esse processo foi repetido, incrementalmente de 5% em 5%, até chegar na taxa de lotação crítica para cada ponto, que evita o acontecimento de eventos críticos ao longo de cada ano.

$$TL_{sup} = \frac{PAP}{DAUA} \quad (3)$$

Em que PAP é a média de produção anual de pastagem para os 36 anos da série ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e DAUA é a demanda anual de forragem por unidade animal ($\text{kg MS UA}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), estimada em $6.428,4 \text{ kg UA}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, considerando um consumo diário de $8,8 \text{ kg UA}^{-1}$ e uma eficiência de pastejo de 50%.

A taxa de lotação animal obtida em UA ha⁻¹ foi convertida para cabeças ha⁻¹ utilizando fatores médios de conversão para cada estado brasileiro. Para isso, foram utilizados de RAMOS (2005) os fatores de conversão de cabeças animais para unidades animais, conforme a cada categoria animal e a região de cada estado (Sul-Sudeste-Centro-Oeste; Norte; e Nordeste). Esses fatores de conversão foram aplicados sobre os dados estaduais sobre o número de cabeças animais em cada categoria (touro, vaca, novilha de 1 a 2 meses, novilha de 2 a 3, bezerra, bezerro, garrote de 1 a 2, garrote de 2 a 3 meses e boi), obtidos do Anuário da Pecuária Brasileira (Anualpec) entre 2015 e 2020. Assim, para cada ano deste período foi estimado o rebanho bovino em unidades animais, permitindo calcular um valor total de UA inserido em cada estado. Com isso, o número total de cabeças foi dividido pelo número total de UA em cada estado e ano da série, e a média dos 6 anos de dados resultou em um fator de conversão médio para cada estado.

A taxa convertida de cada local foi multiplicada pelo desempenho animal estimado de cada estado para obter a produtividade potencial em kg EC ha⁻¹ ano⁻¹.

3.2.3 Estimativa da produtividade real da pecuária a pasto

De acordo com Martha Jr. *et al.* (2012), a produção animal em pastejo é resultante da área (hectares) e da produtividade (produto entre taxa de lotação e desempenho). Segundo os autores, a partir dos anos 1980, melhorias na genética, saúde e nutrição animal (mineralização e suplementação alimentar) associadas à melhoria da qualidade da forragem, por meio de um melhor valor nutritivo e manejo da pastagem, contribuíram para elevar o desempenho animal na pecuária brasileira. Isso explica, segundo os autores, o papel positivo e relevante que a produção por animal desempenhou após 1985, respondendo por 65-70% do crescimento (positivo) da produção de carne bovina de 1985 e 2006.

Por isso, como destaca Martha Jr (2021a), em sistemas pastoris é importante considerar os dois componentes da produtividade (desempenho animal e taxas de lotação). Para o autor, com um aumento nas taxas de lotação a um nível que reduza significativamente o desempenho animal, a produtividade animal e o desempenho econômico são prejudicados. Além disso, com um desempenho animal inferior, a intensidade das emissões de metano aumenta. Se um nível mais alto de desempenho animal está associado a uma taxa de lotação muito baixa, os desempenhos técnico e econômico também são comprometidos. De acordo com o autor, cada situação deve ser avaliada com cautela e a eficiência alocativa nos sistemas pastoris deve levar em consideração os preços e as taxas de transformação para ambos os componentes de produtividade, incluindo a possibilidade de uso de suplementos para os animais em pastejo.

Deste modo, o presente estudo adota conceito de produtividade em pastagens, considerando a taxa de lotação animal e o desempenho animal, como apresentado por Martha Jr. *et al.* (2012). De acordo com os autores, a produção pecuária a pasto pode ser definida por:

$$p = Ya * A \quad (4)$$

em que p representa a produção, Ya representa a produtividade da terra, e A representa a área de pastagem. A produtividade (Ya) pode ser expressa como:

$$Ya = DA * TL \quad (5)$$

em que DA representa a produção por animal; e TL é a taxa de lotação animal, representada pelo número de animais (h) por unidade de área (geralmente por hectare) em um dado período (usualmente um ano), ou seja, $TL = \frac{h}{ha}$.

As relações representadas pelas equações 4 e 5 podem ser agrupadas na identidade representada pela equação 6, a qual possibilita estimar os fatores de crescimento responsáveis pela variação da produção pecuária a pasto:

$$p = DA * TL * A = DA * \frac{h}{ha} * A \quad (6)$$

A seguir são apresentados os bancos de dados e os procedimentos utilizados, adaptados de Martha Jr. *et al.* (2012) e, em particular, exemplificados por Martha Jr. (2021b), para possibilitar a análise da produtividade da pecuária a pasto na escala municipal.

3.2.3.1 Bases de dados para o cálculo da produtividade

Para calcular a taxa de lotação, desempenho animal e produtividade estimada por município foram utilizadas as seguintes bases de dados:

- Área de pastagem por município: série histórica de 1997 a 2021, do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG, 2021).
- Efetivo bovino por município: série histórica de 1997 a 2021, da Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM) do IBGE.
- Peso de carcaça abatida de bovinos por estado: série histórica de 1997 a 2021, da Pesquisa Trimestral de Abate (PTA) do IBGE.
- Peso de carcaça abatida de bovinos do Brasil: série histórica de 1997 a 2021, da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB).
- Número de cabeças abatidas por estado: série histórica de 1997 a 2021, da Pesquisa Trimestral de Abate (PTA) do IBGE.
- Número de animais confinados por estado: série histórica do Anuário da Pecuária (Anualpec) de 2012 a 2021.

3.2.3.2 Cálculo da taxa de lotação, desempenho animal e produtividade da pecuária

As variáveis calculadas no nível municipal foram a taxa de lotação e a estimativa da produtividade. O desempenho animal foi calculado no nível estadual, adaptado de Martha Jr. *et al.* (2012), conforme Martha Jr. (2021b).

Assim, a produtividade foi estimada por meio da equação 7.

$$Ya = TL * DA \quad (7)$$

Em que PR = produtividade em kg ha⁻¹ ano⁻¹, TL = taxa de lotação em cabeças ha⁻¹, e DA = desempenho animal em kg cabeça⁻¹ ano⁻¹.

A taxa de lotação no nível municipal foi calculada por meio da equação 8.

$$TL = \frac{EB_{PPM}}{AP} \quad (8)$$

Em que EB_{PPM} = efetivo bovino do município em quantidade de cabeças da PPM e AP = área de pastagens do município em hectare.

Para evitar valores discrepantes, foram excluídos do cálculo municípios com área de pastagem menores que 100 hectares, e municípios com efetivo bovino igual a zero.

O desempenho animal representa o ganho de peso médio por animal por unidade de tempo. Segundo Martha Jr. (2012), este parâmetro pode ser estimado por meio da divisão da produção estadual de carne bovina pela quantidade de rebanho do estado. Entretanto, a produção estadual da PTA subestima a produção de carne dos estados, pois considera somente o abate formal. Sendo assim, como sugerido por Martha Jr. (2021b), optou-se por calcular um peso para cada estado, referente à proporção de abate do estado em relação ao total do Brasil, por meio da equação 9.

$$P = \frac{ABe}{ABb} \quad (9)$$

Em que P = peso do estado, ABe = quantidade de abate do estado, e ABb = total de abate do Brasil. As quantidades de abate para este cálculo foram extraídas da PTA.

Este peso foi multiplicado pela produção anual da CONAB, que considera o abate formal e informal, resultando em uma estimativa com maior acurácia da produção anual de carne por estado. Além disso, para esta tese o peso adquirido pelo rebanho bovino durante o período que passa por confinamento foi subtraído da estimativa de produção anual de carne de cada estado, a fim de isolar o peso de abate do gado manejado a pasto. Para estimativa do ganho efetivo de peso em confinamento foram utilizados os dados do Anuário da Pecuária (Anualpec), para o período de 2012 a 2021, referente ao número de animais confinados e aos parâmetros zootécnicos desses animais (período de confinamento, ganho de peso em confinamento e rendimento de carcaça). Dessa forma, o desempenho animal para cada estado foi obtido por meio da equação 10.

$$DA = (P * PROD_{CONAB} - PROD_{CONF}) / (EB_{PPM}) \quad (10)$$

Em que $PROD_{COAB}$ = Produção anual da CONAB, $PROD_{CONF}$ = produção anual de carne durante o período do animal em confinamento, EB_{PPM} = efetivo bovino do estado da PPM, e EB_{CONF} = efetivo bovino confinado do estado.

3.2.4 Estimativa da lacuna de produtividade da pecuária

Para a avaliação de lacuna de produtividade (*yield gap*) absoluta e relativa ao nível municipal foram utilizados os dados de produtividade atingível e produtividade real (apresentados neste documento), nas fórmulas representadas pelas Equações 11 e 12:

$$Yg_m = 0,8 * Yw_m - Ya_m \quad (11)$$

$$YgRel_m = \frac{Yg_m}{0,8 * Yw_m} * 100 \quad (12)$$

Em que Yg_m representa a lacuna *de produtividade* para o município m dado em kg EC.ha⁻¹; $YgRel_m$ representa a lacuna de produtividade relativa para o município m dado em %; Yw_m representa a produtividade atingível para o município m dado em kg EC.ha⁻¹; e Ya_m representa a produtividade real para o município m dado em kg EC.ha⁻¹. A produtividade atingível (Yw_m) é multiplicada por 0,8, pois foi considerado o conceito de lacuna de produtividade explorável, detalhado no item 1 (Cassman, 1999; van Ittersum; Rabbinge, 1997 *apud* van Ittersum *et al.*, 2013).

Dessa forma, uma lacuna de produtividade relativa de 60% significa que o município já produz 40% da produtividade atingível explorável ($0,8 * Yw_m$), e faltam os outros 60% para completar essa lacuna.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Simulação da produção de forragem pelo modelo CROPGRO-PFM

O CROPGRO-PFM³¹ para 36 anos de simulação foi capaz de captar a sazonalidade no crescimento do capim-marandu, como resposta a variabilidade climática, conforme características particulares dos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica. A sazonalidade da produção forrageira é mais evidente no bioma Cerrado (assim como apontado por Valle *et al.*, 2000)³², onde há uma marcante queda na produção de biomassa no período seco, entre os meses de maio a setembro.

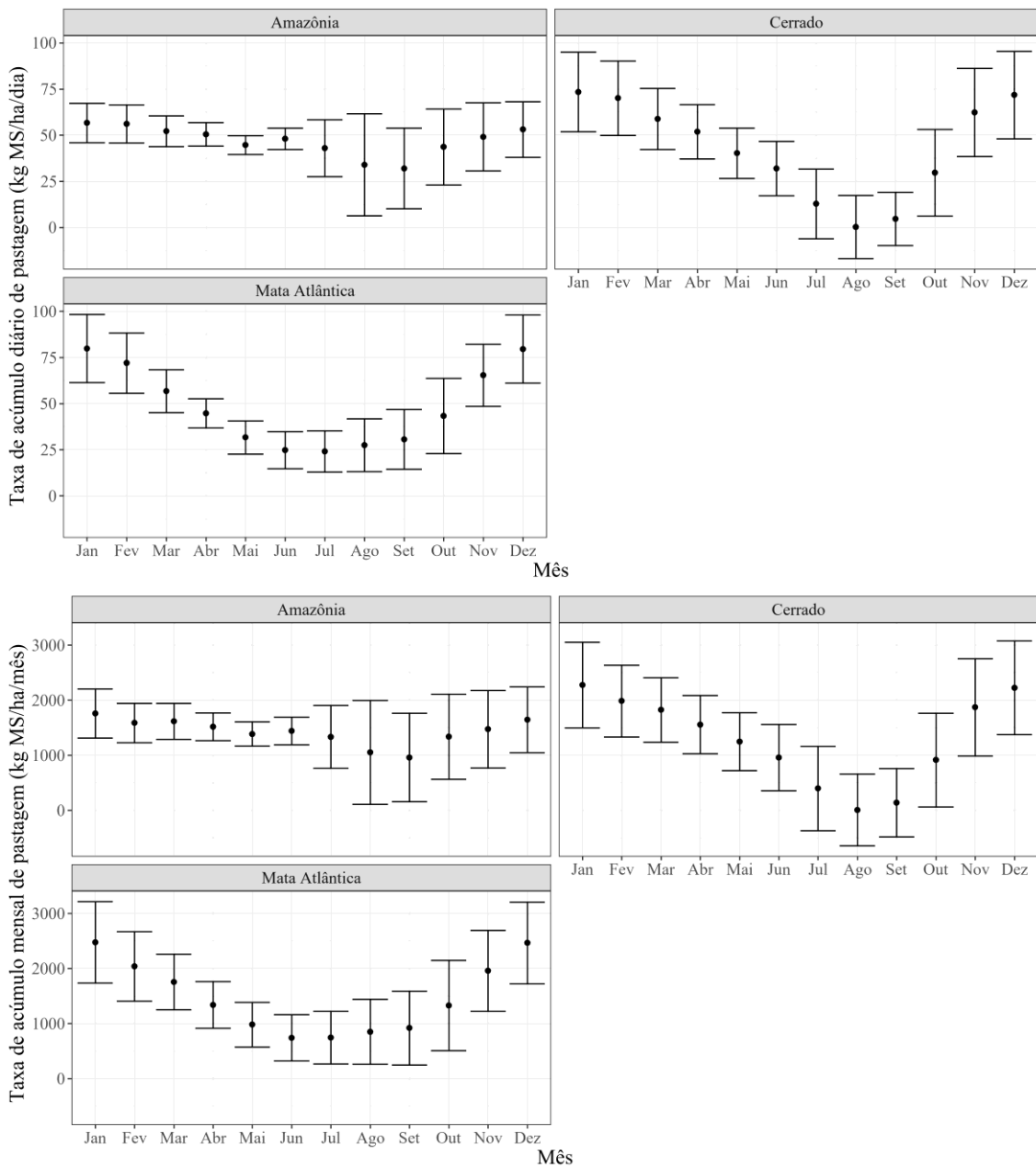
De maneira geral, a simulação capturou o efeito esperado de redução nas taxas de crescimento da forrageira durante os meses mais secos do ano, de maio a setembro (Figuras 5 e 6). No entanto, a queda na produção de biomassa seca acima do solo nestes meses foi menos expressiva em locais onde a distribuição de chuvas é mais regular, localizados, principalmente, no bioma Amazônia. Por outro lado, especialmente no Cerrado, região com clima tropical, onde há duas estações bem definidas, inverno (seco) e verão (chuvoso), como nos estados de Mato Grosso (MT), Goiás (GO) e Tocantins (TO), , a

³¹ As calibrações do modelo CROPGRO-PFM para o Brasil (Pedreira *et al.*, 2011; Pequeno *et al.*; 2014; Pequeno *et al.*, 2018; Bosi *et al.*, 2020) foram realizadas a partir de dados experimentais de pastagens irrigadas, com moderada ou elevada fertilização, para poucas localidades do território. Apesar disso, com algumas adaptações apresentadas por Santos *et al* (2021), o modelo permitiu gerar simulações consistentes de longo prazo e com considerável resolução espacial para o capim-marandu.

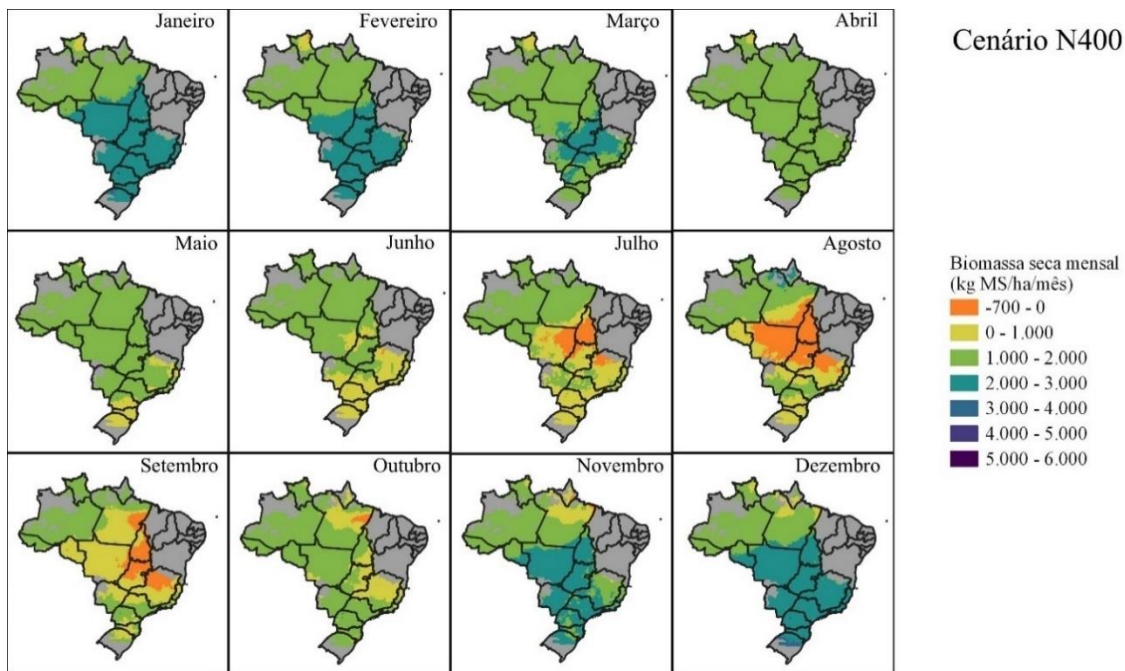
³² De acordo com Vale *et al.* (2000), no Cerrado, enquanto o período de águas é caracterizado pela ocorrência de temperaturas e índices pluviométricos elevados, com altas taxas de evapotranspiração; o período de seca apresenta fotoperíodo mais curto, com baixas temperaturas noturnas e a baixa umidade; em função da menor pluviosidade - o que limita o crescimento das forrageiras, promovendo acentuado comportamento estacional.

produção de biomassa sofreu uma queda acentuada durante os meses de julho a setembro, devido ao déficit hídrico acumulado nessa época do ano. O mesmo ocorreu em regiões do bioma Mata Atlântica, onde as baixas temperaturas do inverno limitaram o crescimento de forrageiras principalmente de junho a agosto (Figura 6).

Figura 5. Média e desvio padrão da taxa diária e mensal de acúmulo de forragem simulada pelo CROPGRO-PFM entre 1980-2016 para os biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica



Fonte: Elaboração própria com dados de Xavier et al. (2016).

Figura 6. Distribuição espacial do acúmulo da produção de biomassa seca mensal³³ (em kg ha⁻¹ mês⁻¹)

Fonte: Elaboração própria. Resultado do Modelo CROPGRO-PFM.

A Figura 6 apresenta a distribuição espacial da produção de biomassa seca anual (em kg MS ha⁻¹ ano⁻¹). Considerando os 8.818 pontos de simulação, os quais abrangem os biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica, observa-se uma produção anual média de 16,9 Mg MS ha⁻¹ e desvio padrão de $\pm 3,6$ Mg MS ha⁻¹. De maneira geral, em locais com distribuição mais regular de chuvas entre os períodos de água e seca, como Amazônia e Mata Atlântica, os valores anuais de biomassa seca acima do solo foram superiores, com valores acima de 17 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹. Os valores de desvio padrão nestes biomas também foram menores (1,6 Mg MS ha⁻¹ na Amazônia e 2,7 Mg MS ha⁻¹ na Mata Atlântica), indicando maior homogeneidade. No Cerrado, onde a sazonalidade das chuvas é mais marcante, a média de produção de biomassa seca foi em torno de 11% menor do que nos outros dois biomas. Além disso, o desvio padrão neste bioma foi o dobro (5,2 Mg MS ha⁻¹) do desvio encontrado na Mata Atlântica, e mais de três vezes o desvio do bioma Amazônia, indicando uma alta heterogeneidade espacial devido às secas severas que atingem algumas regiões (Tabela 2).

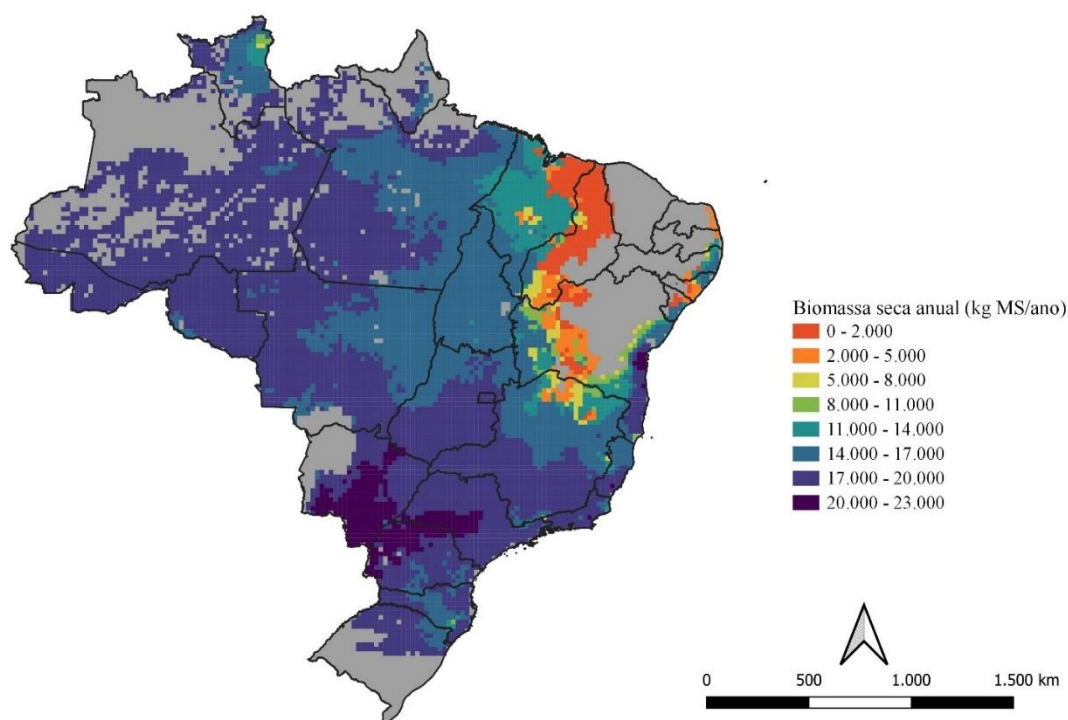
³³ Valores negativos de acúmulo de produção de biomassa seca indicam lugares onde a forrageira perdeu biomassa seca ao longo do mês devido às condições climáticas desfavoráveis.

Tabela 2. Resultados da simulação com o CROPGRO-PFM entre 1980-2016. Média e desvio padrão da produção atingível de biomassa seca por bioma

Bioma	Produção atingível de biomassa seca (MS)	Desvio padrão
	<i>Kg MS ha⁻¹ ano⁻¹</i>	<i>Kg MS ha⁻¹ ano⁻¹</i>
Amazônia	17.121	1.637
Cerrado	15.344	5.210
Mata Atlântica	17.587	2.695
Brasil	16.919	3.644

Fonte: Elaboração própria. Resultado do Modelo CROPGRO-PFM.

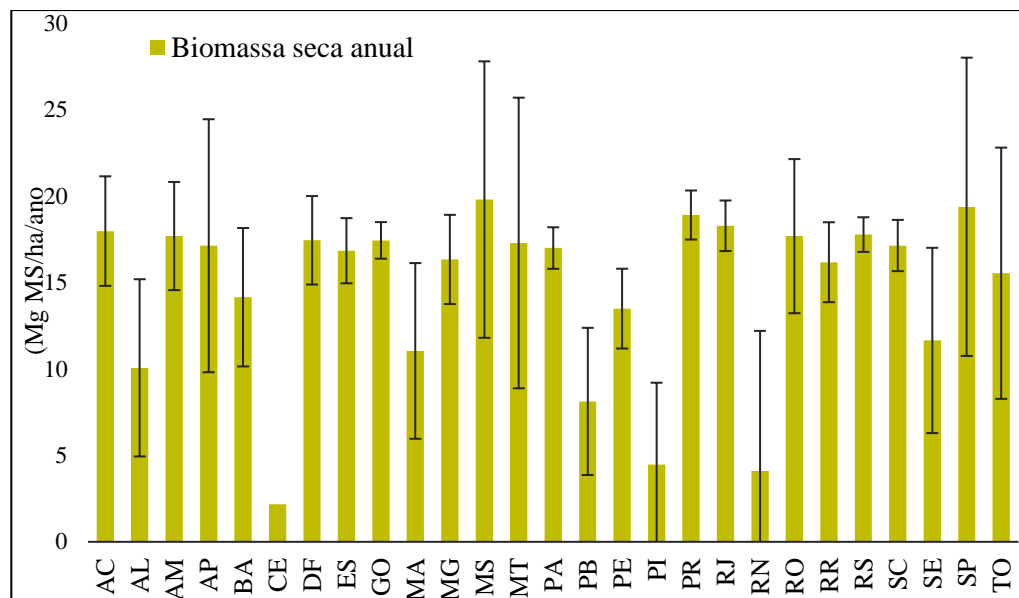
Figura 7. Distribuição espacial da produção de biomassa seca anual (em kg MS ha⁻¹ ano⁻¹) no cenário de simulação no CROPGRO-PFM



Fonte: Elaboração própria. Resultado do Modelo CROPGRO-PFM.

A produção média de biomassa seca (entre 1980 a 2016) simulada pelo CROPGRO-PFM foi de 19,8 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹ em Mato Grosso do Sul (MS), a maior entre todas as Unidades Federativas do Brasil, seguido pelo estado de São Paulo (SP) em que a produção de biomassa seca foi de 19,4 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹ (Figura 7). Em ambos os estados o desvio padrão é de cerca de ± 8 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹, indicando grande heterogeneidade entre as regiões. Ambos os estados estão localizados na ocorrência de mais de um bioma, Mata Atlântica e Cerrado.

Figura 8. Produção de biomassa seca anual (em Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹) e desvio padrão por Unidade Federativa no cenário de simulação no CROPGRO-PFM



Fonte: Elaboração própria. Resultado do Modelo CROPGRO-PFM.

Paraná (PR) e Rio de Janeiro (RJ) apresentam produção de biomassa seca similares, 18,9 e 18,3 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. Nos estados do Acre (AC), Rio Grande do Sul (RS), Amazonas (AM), Rondônia (RO), Distrito Federal (DF), Goiás (GO), Mato Grosso (MT), Santa Catarina (SC) e Amapá (AP), a média de produção de biomassa simulada pelo CROPGRO-PFM foi de cerca de 17 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹. Dentre estes estados, o MT apresentou o maior desvio padrão (cerca de $\pm 8,4$ 17 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹). No estado do Pará (PA), Espírito Santo (ES), Minas Gerais (MG), Roraima (RR) e Tocantins (TO), a média de produção de biomassa seca foi de cerca de 16 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹. O estado do TO apresentou o maior desvio padrão, $\pm 7,3$ Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹.

Os estados da região Nordeste do Brasil apresentaram as menores médias de produção de biomassa seca anual, considerando os pontos inseridos nos 3 biomas (Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica). No Ceará (CE) a produção anual de biomassa simulada foi de aproximadamente 2,2 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹, a menor entre todos os estados do país. No Rio Grande do Norte (RN) e Piauí (PI) a média de produção de biomassa seca foi de cerca de 4 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹, com desvio padrão de 8,1 e 4,7 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. Alagoas (AL), Maranhão (MA) e Sergipe (SE) apresentaram média de cerca de 11 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹. Nos estados Pernambuco (PE) e Bahia (BA) a produção média de biomassa foi de cerca de 12 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹. A região Nordeste é marcada por períodos de seca intensa. O modelo CROPGRO-PFM foi capaz de simular a produção de biomassa na região, considerando essa característica biofísica.

Dos Santos *et al.* (2022) encontraram valores relativamente superiores para o mesmo tipo de forragem e de cenário. Os autores estimaram a média anual da biomassa seca acumulada com o modelo CROPGRO-PFM em nove municípios inseridos na região central do Brasil (estados de Mato Grosso,

Mato Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro e São Paulo), englobando os biomas Amazônia, Mata Atlântica e Cerrado. O trabalho de Dos Santos *et al.* (2022), semelhante a esta tese, fez estimativas para o período de 1980 e 2016 e considerou um cenário com aplicação de 400 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de fertilizante (nitrogênio inorgânico), com déficit hídrico (pastagem não irrigada). A média anual de biomassa seca acumulada nestas condições foi de 19,7 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹ (2,8 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹ a mais do que a média estimada na simulação realizada nesta tese). De acordo com Dos Santos *et al.* (2022), a produção média anual de biomassa seca foi de 21,1 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹ no bioma Amazônia (considerando a média de produção de biomassa seca em cada município localizado no bioma e contemplado no estudo), 18,1 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹ no bioma Cerrado e 19,4 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹ no bioma Mata Atlântica. Portanto, em geral, os valores estimados por Dos Santos *et al.* (2022) são mais altos do que os estimados neste trabalho (19% maior no bioma Amazônia, 15% maior no Cerrado e 9% maior no bioma Mata Atlântica).

Deve-se considerar que os autores utilizaram zonas climáticas homogêneas (com raio de 100 km), considerando apenas nove pontos de simulação (um para cada município), enquanto neste estudo houve um maior detalhamento espacial, englobando 8.818 pontos de simulação. As variáveis de solo utilizadas nos trabalhos também foram distintas. Enquanto Dos Santos *et al.* (2022) utilizaram a base de solos da Embrapa, que possui escala pouco detalhada, neste estudo foi considerada as bases de dados do SoilGrids e da USGS.

Segundo a EMBRAPA, o capim-marandu prospera em solos com boa drenagem e fertilidade média a alta, apresentando uma produção de biomassa anual que varia entre 8 e 20 Mg ha⁻¹ ao ano, como documentado por Nunes *et al.* (1984). Esses valores se alinham com as descobertas de Pequeno *et al.* (2015) em um experimento realizado em Piracicaba-SP (município com 57% de área de Cerrado e 43% de área de Mata Atlântica), onde foram observados rendimentos semelhantes, sendo eles: (i) em sistema sequeiro 17,8 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ para cortes a cada 28 dias, e 16,3 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ para cortes a cada 42 ; (ii) em sistema irrigado 19,3 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ para cortes a cada 28 dias e 23 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ cortados cada 42 dias. Nesse experimento, o capim-marandu foi submetido a um intervalo de rebrota de 28 dias e recebeu uma considerável fertilização em condições de sequeiro, com a aplicação de 400 kg de N ha⁻¹ ao ano na forma de NH₄NO₃ em parcelas após cada colheita.

As médias por bioma estimadas pelo CROPGRO-PFM para o cenário N400 (de 15,3 a 17,6 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹) estão dentro da faixa média de produção anual de forragem indicados por Nunes *et al.* (1984) e Pequeno *et al.* (2015). Santos (2016), por sua vez, encontrou resultados dentro da mesma faixa de valores, em um experimento realizado em Sinop-MT (bioma Amazônia), com aplicação de fertilização de 550 kg N ha⁻¹ ano⁻¹, no qual a produção anual de forragem do capim-marandu foi de 20,4 Mg ha⁻¹ por ano⁻¹. Da Silva *et al.* (2020) estimaram valores de produção anual de forragem do capim-marandu de cerca de 12,3 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. O experimento de Da Silva *et al.* (2020) incluiu diferentes condições de manejo, como o efeito da presença de animais na pastagem.

Dos Santos *et al.* (2022) relacionaram a diferença da produção de biomassa seca entre os municípios analisados no estudo com as estações chuvosas. Assim como nesta tese, os resultados de Dos Santos *et al.*, (2022) indicam que em regiões com distribuição de chuva regular durante o ano, como nos biomas Amazônia e Mata Atlântica, a produção de biomassa tende a ser maior, quando comparada à produção da biomassa em regiões onde as estações de chuva e seca são bem demarcadas, como é o caso do bioma Cerrado. Dos Santos *et al.* (2022) indicaram a consistência do CROPGRO-PFM para simulações de longo prazo, afirmando que o clima é o principal fator determinante da produção de forragem nas regiões avaliadas.

As adaptações em relação aos protocolos GYGA realizados neste estudo, com a definição dos pontos de simulação (8.818) formados por um grid de 0,25° (aproximadamente 28 km), geraram um detalhamento espacial sobre os dados de solos e clima, permitindo identificar a variação espacial da produção de biomassa seca de forragem no território nacional. Os resultados encontrados, estimados a partir do modelo CROPGRO-PFM, indicam similaridade com as estimativas de produção de matéria seca do capim-marandu realizadas em experimento de Pequeno *et al.* (2018).

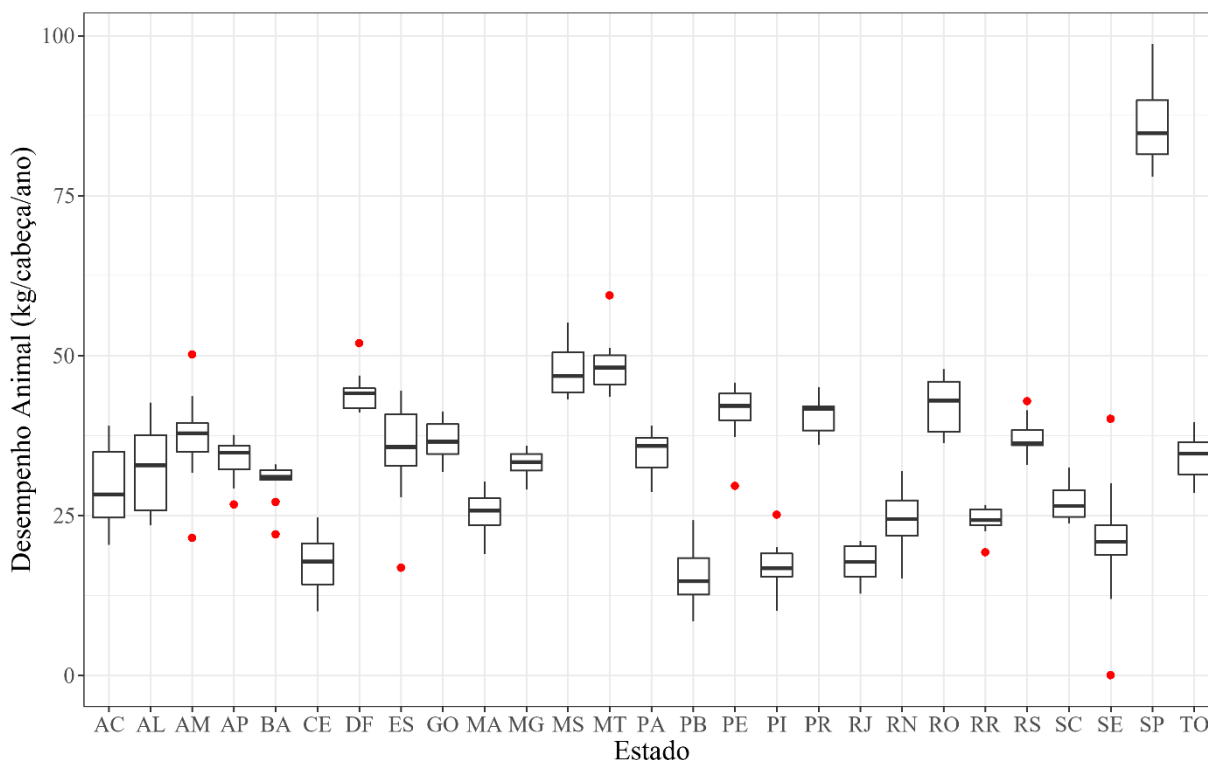
3.3.2 Produtividade da pecuária a pasto

No Brasil, a principal fonte de alimentos para a bovinocultura é o pasto. Assim, o conhecimento sobre a produção de biomassa seca da forragem, sua variação temporal e espacial, bem como sua interação com o animal é essencial para decisões referentes à produção pecuária. Compreender os aspectos relacionados ao consumo de biomassa seca é de fundamental importância, pois além de afetar o desempenho animal, o consumo da forrageira tem impacto direto nos custos de produção (Souza, 2021). Entre os fatores que influenciam o consumo de biomassa seca pelos bovinos destacam-se as características do alimento, a condição fisiológica e nutricional do animal, o ambiente e o manejo alimentar (Herd; Arthur, 2009).

Neste tópico serão apresentados os resultados da produtividade real e atingível da pecuária a pasto. A análise foi feita em 3.731 municípios com dados biofísicos disponíveis, que acumulavam 141,5 Mha de pastagem em 2021, representando 89% da área total de pastagens no Brasil neste ano (LAPIG, 2021).

3.3.3 Desempenho animal

O desempenho animal para as 27 Unidades da Federação (UF), de 2012 a 2021, variou de 8,4 a 98,7 kg cabeça⁻¹ ano⁻¹, com as médias estaduais indo de 15,6 a 86,5 kg cabeça⁻¹ ano⁻¹ (Figura 9 e Tabela 3). O estado de São Paulo apresentou o maior desempenho animal (86,5 kg cabeça⁻¹ ano⁻¹), seguido pelas UFs da região Centro-Oeste: Mato Grosso (48,5 kg cabeça⁻¹ ano⁻¹), Mato Grosso do Sul (47,6 kg cabeça⁻¹ ano⁻¹) e Distrito Federal (44,3 kg cabeça⁻¹ ano⁻¹).

Figura 9. Gráfico de caixas do desempenho animal por estado de 2012 a 2021

Fonte: Elaboração própria.

*Valor “zero” de Sergipe (SE) deve-se a indisponibilidades de dados e não a produção zero.

Estudos que utilizam a taxa de lotação animal ($UA.ha^{-1}$) como *proxy* da produtividade da pecuária, (como os de Strassburg *et al.*, 2014; Araujo, 2018; Stocco *et al.*, 2020; Monteiro *et al.*, 2020; Santos, 2021), consideram apenas uma fração das produtividades observadas no mundo real, pois em sistemas baseados em pastagens, a produtividade dada é obtida pelo produto entre as taxas de lotação ($cabeças ha^{-1}$) e o desempenho animal (kg de carne/cabeça). A produtividade animal a pasto é o produto entre a taxa de lotação e o desempenho animal. Considerar apenas um desses componentes implica, de acordo com Martha Jr (2021a), em uma visão parcial, e por vezes distorcida, da produtividade real da pecuária a pasto. Assim, estimar o desempenho animal ($kg. cabeça^{-1} ano^{-1}$) é útil para sanar essa limitação metodológica apontada pelo autor.

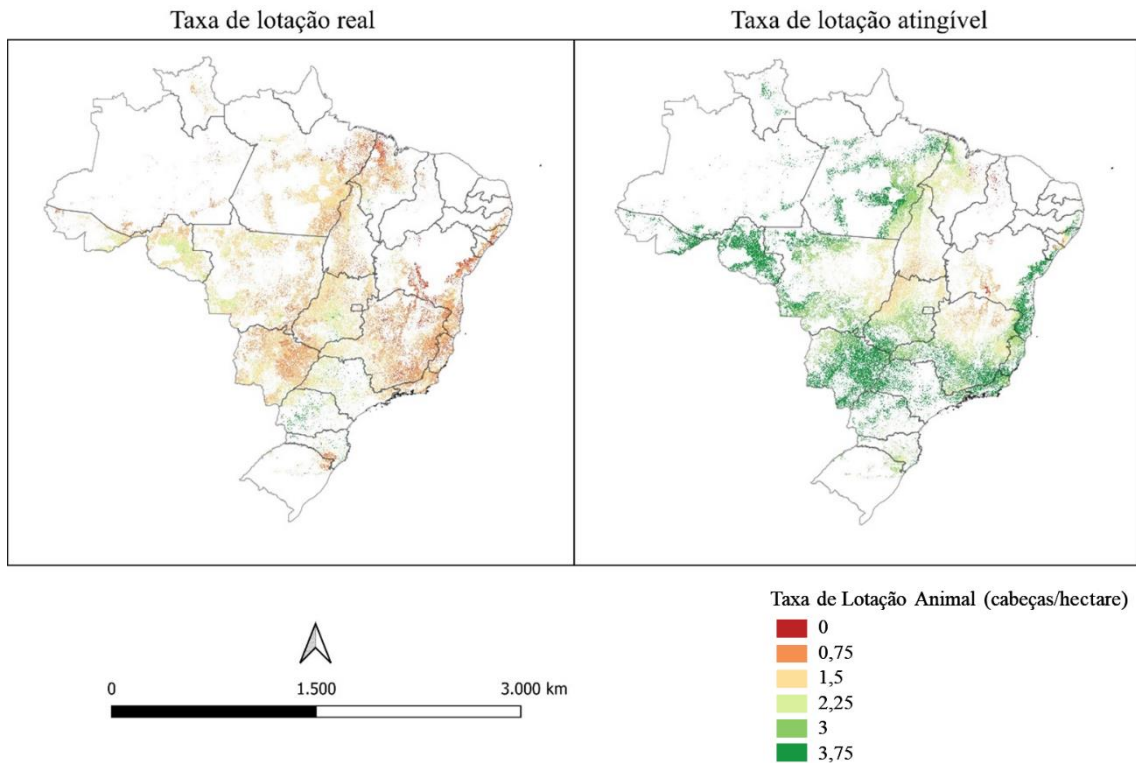
3.3.4 Taxa de lotação real e atingível

A taxa de lotação real de 2012 a 2021 estimada pelo COPGRO-PFM para os 3.731 municípios com dados disponíveis variou de valores próximo a 0 a 5,43 cabeças ha^{-1} , enquanto as médias estaduais³⁴ variaram de 0,7 a 2,8 cabeças ha^{-1} . Os pastos com maior taxa de lotação se encontram na região Sul do país, principalmente no Paraná e Santa Catarina, e no estado de São Paulo. Por outro lado, os pastos

³⁴ Todas as médias estaduais apresentadas neste trabalho são médias das variáveis municipais ponderadas pela área de pastagem de cada município.

localizados na Mata Atlântica da região Nordeste são aqueles com menores taxas de lotação, seguidos por alguns municípios da região Norte.

Figura 10. Taxas de lotação real e atingível em cabeças ha^{-1} nos 141,5 Mha de pastagem contemplados neste estudo



Fonte: Elaboração própria.

*o valor "0" é arredondado, pois o menor valor da série é 0,0005 (cabeças por hectare).

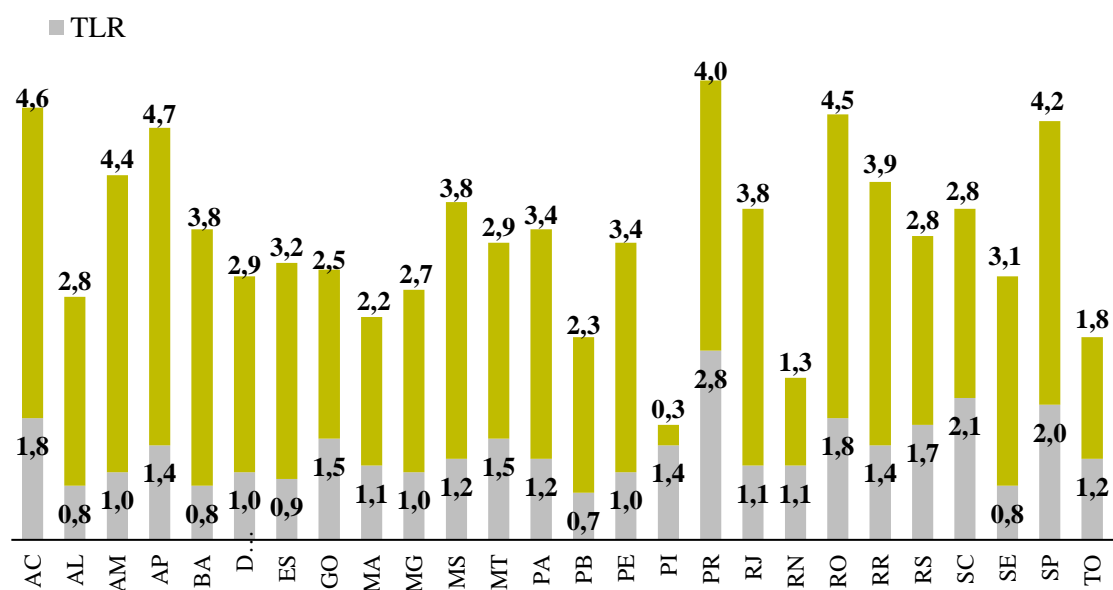
A taxa de lotação atingível, por sua vez, variou de 0,1 a 7,2 cabeças ha^{-1} . As médias estaduais variaram de 0,3 a 4,7 cabeças ha^{-1} , sendo que as maiores médias estão na região Norte do país. As maiores limitações biofísicas para a pecuária a pasto no Brasil estão na região do semiárido no norte de Minas Gerais e nos arredores do bioma Caatinga.

O Paraná apresenta a maior taxa de lotação real (TLR) do Brasil, 2,8 cabeças ha^{-1} (Figura 11). Contudo, apresenta uma taxa de lotação atingível (TLA) de 4,0 cabeças ha^{-1} , ou seja, existe potencial biofísico para ampliar a taxa de lotação do estado. As maiores taxas de lotação atingível, bem como os maiores *gaps* (TLA - TLR) estão nos estados da região Norte do Brasil, localizados no bioma amazônico. Amapá apresenta uma TLR de 1,4 cabeças ha^{-1} e uma TLA de 4,7 cabeças ha^{-1} , ou seja, apresenta uma lacuna de 3,3 cabeças ha^{-1} . O Acre possui uma lacuna de taxa de lotação de 2,8 cabeças ha^{-1} (TLR de 1,8 e TLA de 4,6). Roraima apresenta taxa de lotação real de 1,8 cabeças ha^{-1} e TLA de 4,5 cabeças ha^{-1} .

¹ (lacuna de 2,7 cabeças ha⁻¹) e o Amazonas apresenta lacuna de taxa de lotação animal de 3,4 cabeças ha⁻¹ (TLR de 1,0 e TLA de 4,4 cabeças ha⁻¹).

O estado do Piauí (PI) apresenta taxa de lotação animal atingível de 0,3 cabeças ha⁻¹ e taxa de lotação real de 1,4 cabeças ha⁻¹, ou seja, apresenta lacuna de taxa de lotação negativa (-1,1 cabeças ha⁻¹), indicativo de que o estado está operando acima de sua capacidade de suporte.

Figura 11. Taxa de lotação real (TLR) e taxa de lotação atingível (TLA) por Unidade da Federação (cabeças/ha)



Fonte: Elaboração própria.

Santos (2021) estimou a taxa de lotação crítica³⁵, que é, assim como nesta tese, comparável à taxa de lotação atingível, para nove municípios brasileiros, em diferentes cenários: um cenário potencial (Yp) (sem limitação de água e nutrientes) e em um cenário com limitação de água (sequeiro) e aplicação de 400 kg de nitrogênio inorgânico por hectare ao ano, considerando a reciclagem do nitrogênio (N400+ret). A média da taxa de lotação animal crítica para o primeiro cenário foi de 6,13 UA ha⁻¹. No cenário N400+ret, Santos (2021) encontrou uma taxa de lotação crítica que variou de 0,91 UA ha⁻¹ a 2,03 UA ha⁻¹.

Em Santos (2021), os locais com registros de menores temperaturas mínimas durante os meses de inverno também demonstraram maiores limitações na produção de forragem e na taxa de lotação crítica. Além disso, as taxas de lotação crítica não responderam positivamente ao aumento do nível de fertilização dos cenários de sequeiro N400+ret devido à sazonalidade da produção de forragem. Devido

³⁵ A taxa de lotação crítica é definida como a taxa de lotação do limite superior atingível antes de exceder uma determinada probabilidade. Na prática, ela representa a capacidade de carga das pastagens gerenciadas, limitada por variações sazonais e interanuais da produção de forragem.

a mudanças nas taxas de crescimento das espécies forrageiras, causadas por flutuações nos fatores climáticos que determinam a produção vegetal, há uma redução na oferta de forragem produzida, bem como na qualidade da forragem armazenada para os animais, tornando necessária a adição de fontes nutricionais suplementares que possam garantir o desempenho do animal continuamente ao longo do ano, a menos que a taxa de lotação animal seja reduzida para atingir a capacidade de suporte ideal da pastagem (Hoffmann *et al.*, 2014; Soares *et al.*, 2015). Portanto, a sazonalidade da produção de forragem entre os períodos seco e chuvoso deve ser considerada nas estimativas e análises do potencial produtivo do sistema pecuário, uma vez que os valores da capacidade de suporte da pastagem são diretamente influenciados pela variação da produtividade e da qualidade da forragem durante o ano (Santos, 2021).

3.3.5 Produtividade real e atingível

A produtividade real é uma função da taxa de lotação e do desempenho animal, como mencionado no item 3.2.1. Logo, o comportamento dessas duas variáveis afeta diretamente a produtividade real.

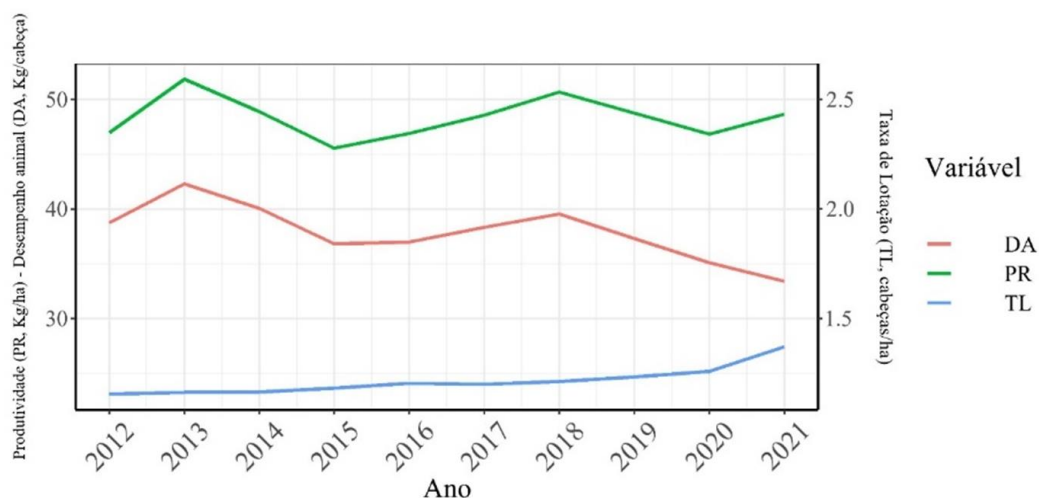
A taxa de lotação média do país aumentou quase de forma linear durante todo o período, com um aumento mais expressivo de 2020 a 2021, saindo de 1,1 cabeças por hectare em 2012 e chegando a 1,4 cabeças por hectare em 2021, refletindo os esforços de intensificação da pecuária em algumas regiões do país.

Já o desempenho animal sofreu grandes variações ao longo da série histórica. Isso se deve, entre outros fatores, a mudanças estruturais no setor (ganhos de eficiência, como melhores indicadores reprodutivos, tempo de abate etc.), mas também aos números de efetivo bovino e ao fato de ter sido utilizada como *proxy* para a sua determinação o peso de abate de bovinos, que está ligado ao fenômeno chamado ciclo da pecuária. O ciclo da pecuária consiste na flutuação dos preços do gado e da carne, que alternam entre fases de baixa e de alta em um determinado período. Quando há uma grande oferta de bois gordos no mercado, os preços caem, forçando os produtores a venderem mais fêmeas para o abate para amenizar os impactos financeiros da queda de preço, aumentando a quantidade de animais abatidos. Com o tempo, o abate de fêmeas resulta em uma escassez de matrizes, e conseqüentemente de bezerras para a engorda. Dessa forma, a falta de bois gordos no mercado causa um aumento de preço e diminui a oferta de fêmeas para o abate, fechando um ciclo que dura em média de 6 a 7 anos (SCOT Consultoria, 2023).

Até 2021, percebe-se que as curvas de desempenho animal e produtividade real são muito semelhantes, pois a variação da taxa de lotação é muito sutil. Porém, no último ano da série é possível ver que, apesar da queda no desempenho animal, a produtividade aumentou devido ao aumento expressivo na taxa de lotação.

De forma agregada, a produtividade da pecuária brasileira a pasto apresentou uma certa estabilidade na última década, variando de 45,6 kg EC há⁻¹ a 51,8 kg EC ha⁻¹, com a produtividade de 2021 sendo apenas 3,7% maior que a produtividade de 2012 (Figura 12).

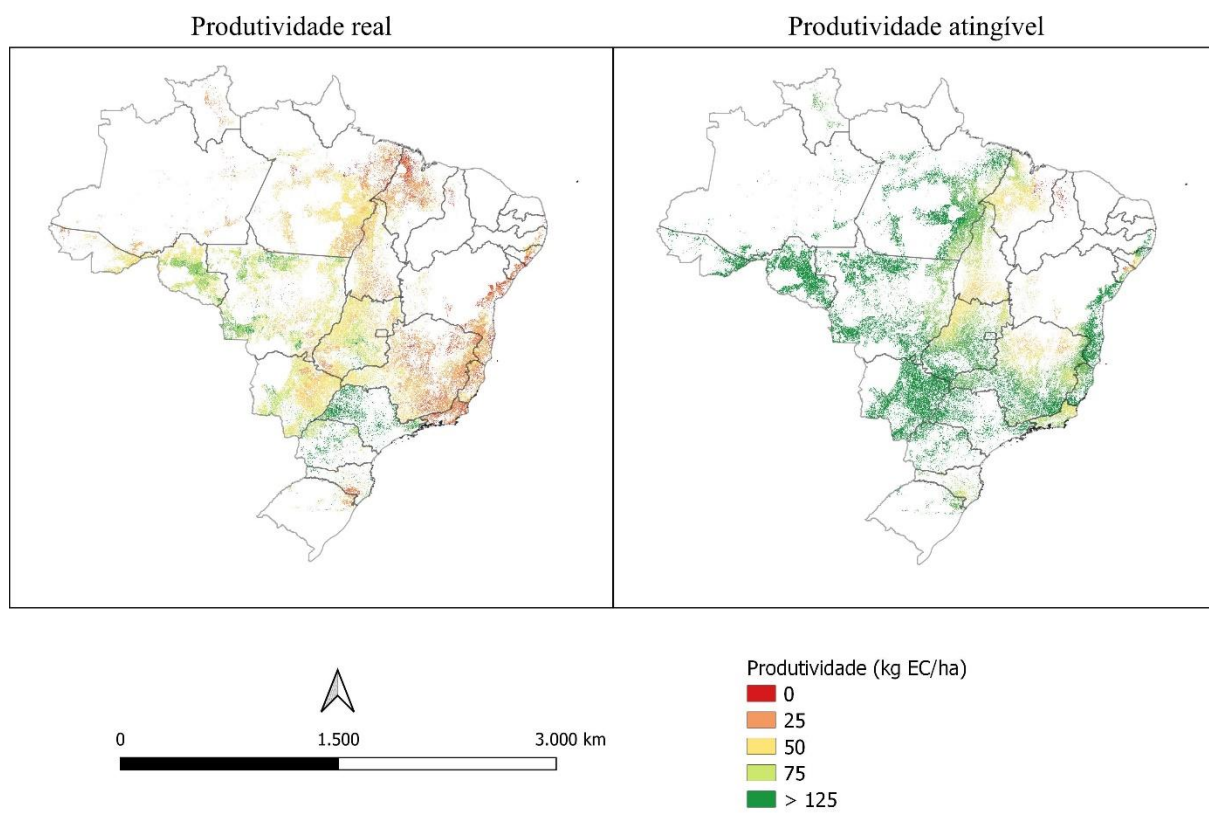
Figura 12. Evolução da Produtividade (PR), Taxa de Lotação (TL) e Desempenho Animal (DA) de 2012 a 2020



Fonte: Elaboração própria.

Os valores municipais de produtividade real de 2012 a 2021 variaram de 0,1 a 518,3 kg EC ha⁻¹ ano⁻¹, enquanto as médias estaduais variaram de 9,43 a 173,1 kg EC ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 3 e Figura 14). São Paulo e Paraná lideram o ranking de produtividade real, enquanto os estados do Nordeste e o Rio de Janeiro são aqueles com menor produtividade real da pecuária a pasto. Segundo Martha Jr. (2021b), a produtividade média real do Brasil para o ano de 2006 foi de 43 kg EC ha⁻¹ ano⁻¹. No ano de 2017, ainda segundo o autor, a produtividade média real da pecuária a pasto nas cinco regiões brasileiras variou de 15,3 a 68,7 kg EC ha⁻¹ ano⁻¹. Os valores de produtividade atingível por município variaram de 1,6 a 409,8 kg EC ha⁻¹ ano⁻¹, enquanto as médias estaduais variaram de 5,2 a 359,4 kg EC ha⁻¹ ano⁻¹. Assim como para a taxa de lotação, a região Nordeste é a que apresenta menor potencial biofísico para aumento da produtividade do pasto, incluindo a porção do semiárido localizada no bioma Cerrado. Com exceção dessa região, todo o restante do Brasil possui alto potencial produtivo (> 125 kg EC ha⁻¹ ano⁻¹), com destaque para os estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Rondônia.

Figura 13. Produtividade real e atingível da pecuária a pasto nos 141,5 Mha de pastagem contemplados neste estudo



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3. Médias estaduais e desvio padrão (SD) do desempenho animal (DA)*, taxa de lotação real (TLR), taxa de lotação atingível (TLA), produtividade real (PR) e produtividade atingível (PA)

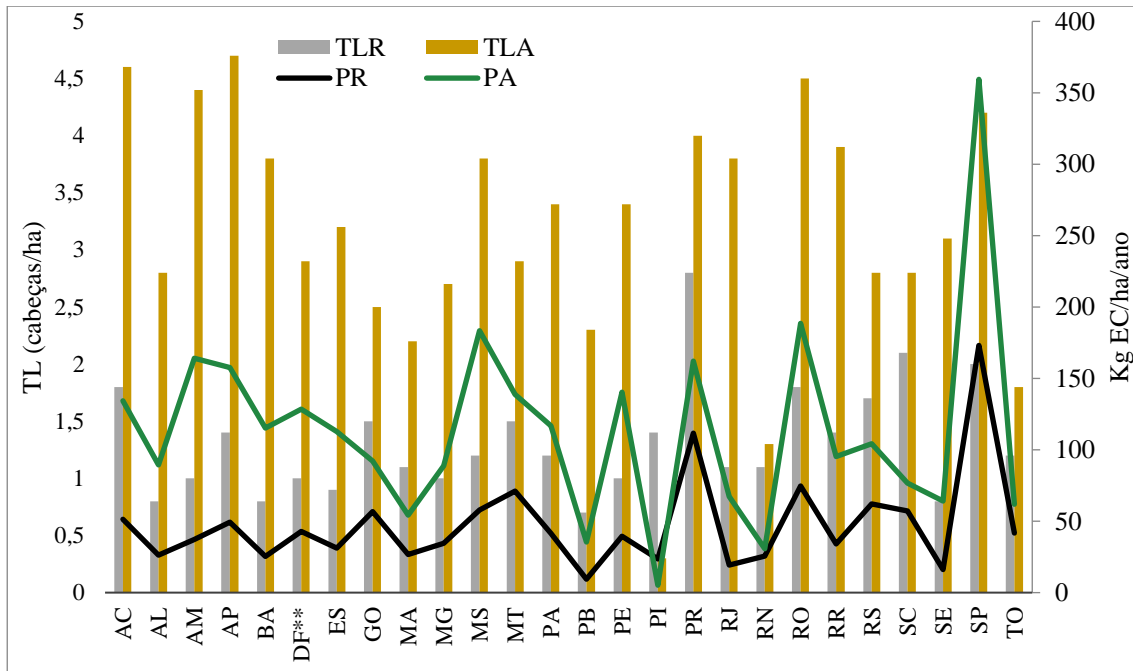
UF	DA	TLR	SD_TLR	TLA	SD_TLA	PR	SD_PR	PA	SD_PA
	kgcabeça ⁻¹ ano ⁻¹			cabeças ha ⁻¹				kg EC ha ⁻¹ ano ⁻¹	
AC	29,5	1,8	0,5	4,6	0,1	51,3	15,9	134,3	2,5
AL	32,5	0,8	0,5	2,8	1,5	26,2	15,9	89,4	47,9
AM	37,1	1,0	0,7	4,4	0,1	37,3	24,1	164,1	2,7
AP	33,7	1,4	0,6	4,7	0,0	49,4	20,9	157,5	1,4
BA	30,2	0,8	0,6	3,8	2,0	25,3	17,9	115,3	60,7
DF**	44,3	1,0		2,9		42,8		128,5	
ES	35,0	0,9	0,4	3,2	0,7	31,1	14,1	112,8	24,7
GO	36,8	1,5	0,6	2,5	0,6	56,7	22,0	92,2	22,9
MA	25,1	1,1	0,9	2,2	0,8	26,6	23,3	54,2	20,1
MG	33,0	1,0	0,5	2,7	0,8	34,5	16,3	88,9	27,4
MS	47,6	1,2	0,4	3,8	0,3	57,9	19,8	183,3	14,3
MT	48,5	1,5	0,5	2,9	0,7	71,0	23,5	138,7	32,2
PA	34,7	1,2	0,5	3,4	0,8	41,5	18,1	116,8	29,2
PB	15,6	0,7	0,7	2,3	0,8	9,4	10,7	35,5	11,9
PE	41,1	1,0	0,6	3,4	1,0	39,4	22,6	140,3	40,4
PI	17,0	1,4	1,2	0,3	0,5	23,6	20,8	5,2	8,3
PR	40,5	2,8	1,1	4,0	0,5	111,7	42,6	162,0	18,6
RJ	17,6	1,1	0,4	3,8	0,5	19,4	6,7	67,3	8,6
RN	24,2	1,1	1,3	1,3	0,1	25,6	31,1	30,7	3,1
RO	42,3	1,8	0,4	4,5	0,1	74,7	16,5	188,6	5,9
RR	24,2	1,4	1,4	3,9	0,6	34,0	33,4	95,3	14,0
RS	37,2	1,7	1,3	2,8	0,2	62,2	48,1	104,3	8,2
SC	27,0	2,1	1,1	2,8	0,4	57,2	30,7	76,6	9,9
SE	20,8	0,8	0,3	3,1	1,5	16,1	6,8	64,2	31,2
SP	86,5	2,0	0,9	4,2	0,3	173,1	81,6	359,4	29,0
TO	34,0	1,2	0,5	1,8	0,4	41,7	18,5	61,8	12,6
BRASIL	41,5	1,3	1,1	3,2	1,2	54,2	71,1	127,7	100,2

* O desempenho animal (DA) não possui desvio padrão pois foi calculado no nível do estado.

** O Distrito Federal não possui desvio padrão pois possui apenas 1 município.

Fonte: Elaboração própria.

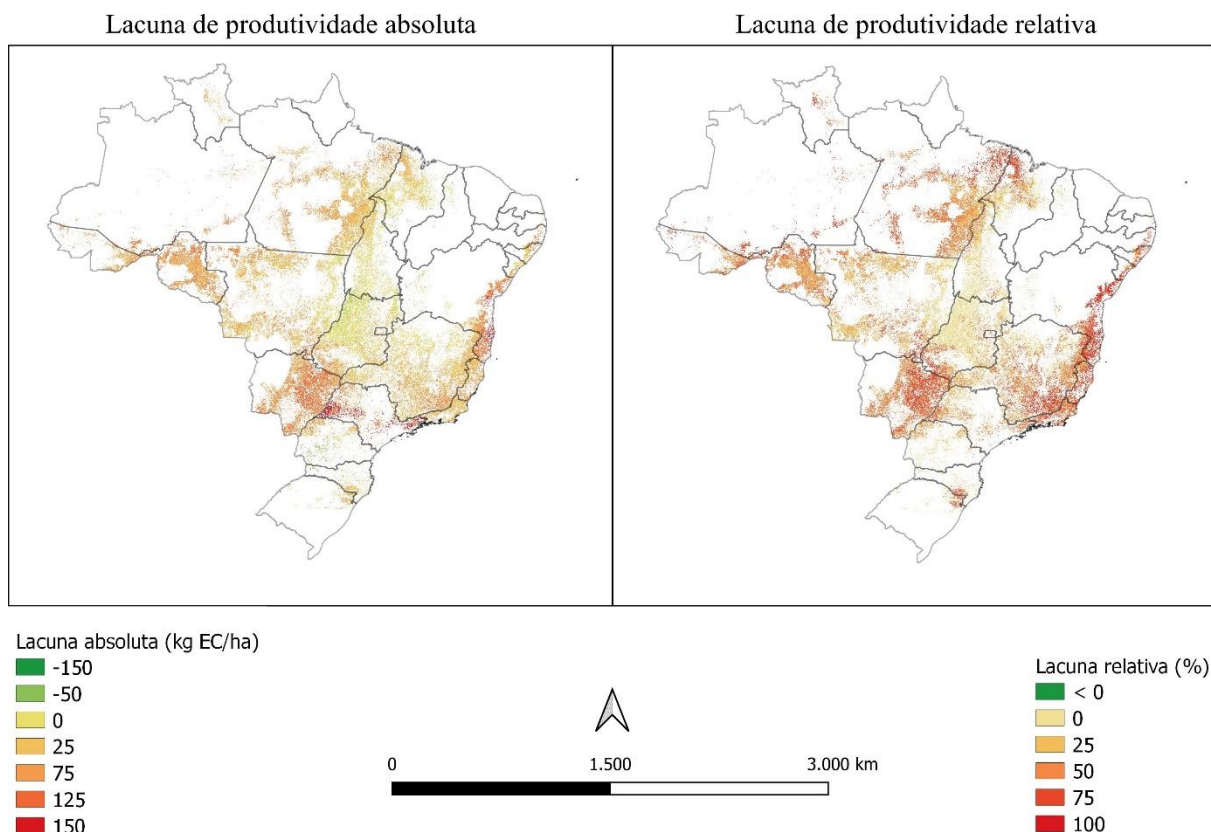
Figura 14. Taxa de lotação real (TLR), taxa de lotação atingível (TLA), produtividade real (PR) e produtividade atingível (PA) por UF



Fonte: Elaboração própria.

3.3.3 Lacuna de produtividade da pecuária (*yield gap*)

A Figura 15 sintetiza as comparações feitas neste estudo, indicando as regiões com maior lacuna de produtividade. A média nacional da lacuna de produtividade absoluta, considerando os valores ponderados pela área de pastagem de cada unidade da federação, é de cerca de 48 kg EC ha⁻¹ano⁻¹.

Figura 15. Lacuna de produtividade da pecuária a pasto para os municípios brasileiros

Fonte: Elaboração própria.

Os tons de verde nos mapas representam as localidades que já ultrapassaram os limites biofísicos estimados pelo modelo de produtividade atingível, e estão atuando acima da capacidade de suporte dos pastos. No geral, em torno de 9% da área total de pastagem nos municípios considerados na análise (141,6 Mha) está com lacuna de produtividade negativa, ou seja, ultrapassaram os limites biofísico de produtividade. Os estados do Piauí e Rio Grande do Norte apresentam lacuna de produtividade negativa, -19,4 e -1,1 kg EC ha⁻¹ano⁻¹, respectivamente³⁶. As regiões mais amareladas dos mapas não possuem lacuna, ou seja, os níveis de produtividade atuais já atingiram ou estão muito próximos do seu potencial biofísico. Uma significativa parcela dessas áreas estão também concentradas nos arredores da Caatinga. Os municípios que possuem lacuna de produtividade quase zerada, onde a produtividade real representa mais de 90% da produtividade atingível, acumulam 3,3% da área total de pastagem analisada neste estudo. Essa concentração de valores de lacuna de produtividade negativos ou próximos de zero nesses locais se deve principalmente à baixa produtividade atingível da região, ou seja, não significa que sua produtividade real seja alta.

³⁶ Como dito anteriormente, para os estados da região Nordeste os resultados gerados se baseiam em simulações realizadas em áreas inseridas nos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica, as áreas inseridas no bioma Caatinga (maior área do Nordeste), portanto, não foram consideradas nesta análise.

Por outro lado, é possível observar uma predominância dos tons verde e amarelo em regiões que coincidem espacialmente com a agricultura mais consolidada no Brasil, notadamente na região Centro-Oeste, nos estados de Goiás, Tocantins e Mato Grosso. A proximidade de áreas de agricultura consolidada e de alto desempenho provavelmente induz à utilização mais intensiva das áreas de pastagens, resultando em pouca ou nenhuma lacuna de produtividade. Isso acontece porque geralmente, a agricultura ao se consolidar, também atrai melhorias, como de infraestrutura (estradas, armazéns, silos etc.). Com a melhoria da infraestrutura de uma determinada região, o custo de oportunidade se eleva, mas também há melhora nos preços relativos produto-insumos, o que possibilita a intensificação dos sistemas agropecuários (“fechamento das lacunas de produtividade”), quer seja de pecuária ou de lavoura (Gasques et al. 2018; Garcia e Vieira Filho, 2021). A existência de produtores operando com lacuna de produtividade negativa nestas regiões indica, por um lado, que para se manterem na atividade pecuária com as exigências do mercado e pressões econômicas por substituição do uso da terra para agricultura, precisam ser competitivos e inovadores (Barros et al., 2003; Sparovek et al., 2009). Por outro lado, indica que o uso das pastagens está ocorrendo acima da sua capacidade de suporte (do ponto de vista biofísico), o que requer atenção na formulação de políticas e ações que visem o controle da degradação das pastagens. Uma outra hipótese é que a função de produção da pecuária nessas regiões pode ter alterado sob influência de uma agricultura dinâmica, indicando que as premissas para estimativa da produtividade atingível nestes casos seriam outras. Estudos adicionais podem explorar essa possibilidade para buscar uma maior individualização das estimativas de produtividade potencial/atingível para melhor representar os contrastes regionais e dos sistemas de produção.

Por sua vez, quanto mais avermelhada a região, maior é a lacuna de produtividade. As maiores oportunidades de aumento de produtividade da pecuária em termos absolutos estão nos estados de Mato Grosso do Sul, Pará, Mato Grosso, Minas Gerais, São Paulo e Rondônia (Figura 15), que possuem grandes extensões de pastagem (em torno de 27,9 Mha) com lacuna de produtividade acima de 75 kg EC ha⁻¹ ano⁻¹. No geral, aproximadamente 25% da área de pastagem dos municípios envolvidos na análise possui lacuna de produtividade acima de 75 kg EC ha⁻¹. Ao comparar os mapas de lacuna de produtividade absoluta e relativa (Tabela 4), percebe-se que mesmo nas regiões onde a lacuna absoluta é menor, em termos relativos essa lacuna ainda é grande, indicando que há um grande esforço a ser feito em praticamente todo o país para atingir os níveis de produtividade atingível estimados neste trabalho.

Dentre os locais com maiores lacunas de produtividade, merece a observação de que as estratégias para o fechamento dessas lacunas devem ser diferenciadas, pois há padrões distintos de ocupação desses territórios. O primeiro padrão de áreas com lacunas de produtividade pode ser observado onde a pecuária de corte também possui uma maior importância para a economia regional, como os estados do Mato Grosso do Sul, as porções sul e norte do Mato Grosso e sul de Goiás, onde predominam grandes propriedades rurais.

Nessas regiões, onde há, geralmente, produtores mais capitalizados com acesso a crédito rural e assistência técnica especializada, é importante considerar desafios biofísicos, como a baixa fertilidade

do solo e a presença de uma estação seca que dura entre quatro e seis meses por ano, como é comum na região do Cerrado. Portanto, para fechar as lacunas de produtividade nessa região, é fundamental adotar estratégias para lidar com a estação seca, como o uso de alimentação suplementar em pastagens, confinamentos, ou a venda de gado, entre outras medidas (Barioni et al., 2003).

O segundo padrão ocorre notadamente em São Paulo, estado que se destaca por apresentar a maior lacuna absoluta ($114,4 \text{ kg EC ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), ou seja, considerando a capacidade biofísica da pastagem do estado, a produtividade poderia ser aumentada em cerca de 39,5%. Neste estado, as regiões com maiores lacunas se caracterizam pelo predomínio de propriedades rurais de pequeno porte, englobando agricultores familiares e médios produtores, sendo elas o Pontal do Paranapanema, o vale do Paraíba e a serra da Mantiqueira. Estas duas últimas localidades apresentam relevo declivoso, o que se caracteriza como um fator restritivo para o cultivo agrícola, sendo esse um dos motivos da forte presença das pastagens. Além de São Paulo, outras localidades que apresentam o mesmo padrão quanto ao perfil de produtores é o sul de Minas Gerais, o norte e oeste do Rio de Janeiro (ambos englobando também a serra da Mantiqueira, além da faixa próxima ao litoral do Nordeste. Grande parte dos agricultores familiares e médios produtores dessas regiões não acessam crédito rural, bem como não têm acesso à Assistência Técnica e Extensão Rural (ATER), seja pública ou privada. Ou, ainda, recebem ATER pública de forma descontinuada e não especializada, o que dificulta a adoção de práticas para a recuperação de pastagens e fechamento da lacuna de produtividade. As estratégias para o fechamento do *yield gap* para esse grupo passa pela melhoria do acesso e da qualidade de ATER, bem como pela redução da burocracia de acesso ao crédito, adequando-a à realidade das pequenas unidades produtivas e tornando o processo mais ágil.

Por sua vez, um terceiro padrão é observado na região da fronteira agrícola, o chamado arco do desmatamento, que engloba parte do estado de Rondônia, Amazonas, Tocantins, Pará e Maranhão. O Amazonas, apesar da pouca representatividade em termos de área de pasto, é o estado brasileiro que apresenta a maior lacuna de produtividade relativa. A produtividade atingível do estado é cerca de 71,5% maior do que a sua produtividade real ou, em termos absolutos, $94 \text{ kg EC ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ maior.

Considerando a importância do bioma Amazônia para preservação ambiental, pensar em estratégias de intensificação da pecuária na região pode não ser necessariamente uma alternativa para o controle do desmatamento ou redução de áreas da pecuária (efeito poupa-terra). Segundo Villoria (2019), a ampliação da produtividade pode levar ao resultado contrário do esperado (expansão de áreas ou efeito rebote), devido ao benefício econômico dos produtores. De fato, em regiões de fronteira agrícola, caso da região amazônica, Parente et al. (2019) identificou que a mudança de uso da terra predominante nas últimas três décadas foi a conversão de vegetação nativa para pastagens destinadas à produção bovina. Santos et al. (2021) verificou que no sul do bioma amazônico o setor pecuário é o principal agente econômico que pressiona pela abertura de grandes áreas, uma vez que a pecuária é praticada extensivamente. Dessa maneira, deve-se considerar os efeitos positivos e negativos da intensificação da pecuária especialmente nesta região (tema será abordado com mais detalhes no capítulo 4 desta tese).

Comparando a lacuna de produtividade pecuária obtida neste trabalho com os resultados de outros autores, percebe-se que nem sempre os valores são compatíveis, pois as escalas de análise são diversas. Além disso, diferentes abordagens são utilizadas para estimar a lacuna de produtividade das pastagens brasileiras. Os trabalhos de Araujo (2018) e Santos (2021) adotaram uma abordagem semelhante desta tese para mensuração da lacuna de produtividade da pecuária, ou seja, fazendo uso dos protocolos GYGA e o modelo CROPGRO-PFM para estimar a produção de forragem.

Araujo (2018) realizou uma análise de *yield-gap* ou lacuna de produtividade para pastagens do capim-marandu no estado de São Paulo. A eficiência média de produção de pastagem foi de 46%, com um *yield-gap* explorável de 5,8 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, sugerindo um possível aumento de 0,96 UA ha⁻¹ em comparação com a taxa de lotação real de 1,33 UA ha⁻¹, reportado no Censo Agropecuário do IBGE de 2006. No trabalho, a equação de Strassburg et al. (2014) foi utilizada para determinar a produção real do capim-marandu e a capacidade de suporte da pastagem, considerando a sazonalidade de forma parcial. Utilizando a abordagem da produtividade expressa em kg EC ha⁻¹ano⁻¹, a lacuna de produtividade encontrado nesta tese para o estado de São Paulo foi de 39,5%, valores relativamente inferiores aos encontrados em Araujo (2018).

Santos (2021) apontou que a região central do Brasil (simulação realizada com nove zonas homogêneas), considerando o cenário mais intensivo em condições de sequeiro, apresenta potencial para aumentar a sua taxa de lotação crítica entre 0,19 e 0,69 UA ha⁻¹, atingindo no máximo 1,21 UA ha⁻¹ (ou 148%) em município do Rio de Janeiro (Cordeiro), inserido no bioma Mata Atlântica. Nesse estudo, as lacunas de produtividade estaduais variam de 4,0 kg EC ha⁻¹ ano⁻¹ (Santa Catarina) a 114,4 kg EC ha⁻¹ ano⁻¹ (São Paulo), sendo que a lacuna relativa encontrada para o Rio de Janeiro foi de 63,5% e desvio padrão de ±13,6%. Para Santos (2021), a menor lacuna simulada foi de 5% para o município de Bom Despacho (localizado no estado de Minas Gerais, bioma Cerrado), enquanto neste trabalho, para o estado de Minas Gerais a lacuna relativa foi de 47,9%, com desvio padrão de ±23,7%. Ressaltando que Santos (2021), diferentemente desta tese, não considera o componente desempenho animal para estimativa da produtividade.

Tabela 4. Médias estaduais e desvio padrão (SD) da lacuna de produtividade absoluta e relativa

UF	Lacuna absoluta	SD_absoluto	Lacuna relativa	SD_relativo
	kg EC ha ⁻¹		%	
AC	56,2	14,2	52,4	14,4
AL	45,3	35,2	57,9	25,6
AM	94,0	25,0	71,5	18,9
AP	76,6	19,8	60,8	16,1
BA	67,0	51,6	58,1	39,8
DF*	60,0		58,4	
ES	59,1	18,7	64,8	13,1
GO	17,1	24,8	15,5	29,6
MA	16,8	32,7	22,1	472,6
MG	36,6	24,4	47,9	23,7
MS	88,7	19,3	60,2	12,2
MT	40,0	29,7	33,5	25,0
PA	51,9	29,2	53,9	19,4
PB	19,0	15,6	63,6	63,7
PE	72,8	34,8	59,4	21,0
PI	-19,4	19,9	-749,8	1059,1
PR	17,9	44,7	12,0	35,6
RJ	34,4	10,1	63,5	13,6
RN	-1,1	31,7	-3,9	133,4
RO	76,2	16,6	50,5	10,9
RR	42,2	39,9	53,6	58,4
RS	21,3	46,7	28,3	52,0
SC	4,0	27,8	12,1	40,7
SE	35,2	26,2	37,7	98,8
SP	114,4	80,5	39,5	27,6
TO	7,7	20,5	12,4	41,6

* O Distrito Federal não possui desvio padrão pois possui apenas 1 município.

Fonte: Elaboração própria.

Conforme o estudo sobre o potencial de intensificação da pecuária no Brasil conduzido por Arantes et al. (2018), a taxa de lotação potencial média nas pastagens brasileiras foi de 3,60 UA ha⁻¹, enquanto o potencial médio de intensificação da pecuária foi de 2,63 UA ha⁻¹. Neste trabalho, a lacuna média absoluta foi de 46,9 kg EC ha⁻¹ ano⁻¹. Na região Centro-Oeste, os autores estimaram uma capacidade de suporte de pastagens de 3,45 UA ha⁻¹, apontando um potencial de intensificação entre 1,1 e 3,3 UA ha⁻¹. A média da lacuna de produtividade estimada neste trabalho foi de 51,4 kg EC ha⁻¹ ano⁻¹

no Centro-Oeste (média dos estados de MS, MT, GO e DF). Para a região Sudeste Arantes et al. (2018) estimou potencial de intensificação de 3,4 UA ha⁻¹, enquanto neste trabalho a média da lacuna de produtividade foi de 61,1 kg EC ha⁻¹ ano⁻¹ contabilizando os estados de RJ, SP, MG e ES. A metodologia utilizada por Arantes et al. (2018) apresenta algumas similaridades e algumas disparidades com a metodologia utilizada neste trabalho. Os autores calcularam a produção anual de forragem ao dividir a produção de matéria seca durante o período de crescimento por 0,8. A taxa de lotação foi então calculada ao dividir a produção diária de matéria seca pela ingestão diária de uma unidade animal (UA), resultando em uma demanda diária de 22,5 kg de MS por UA. No entanto, os autores não consideraram a sazonalidade na produção de pastagens, o que pode afetar os resultados da capacidade de suporte.

Cavalcante et al. (2017) estimou o número potencial de cabeças de bovinos que as pastagens brasileiras poderiam suportar, considerando aspectos biofísicos do território. Utilizando dados do Censo Agropecuário de 1995 e de 2006, e adotando a taxa de lotação no percentil 90 (indicando o valor abaixo do qual 90% dos dados estão localizados) como uma taxa de lotação potencial, ou seja, a taxa que cada bioma teria de atingir para obter maior rendimento das pastagens, o número de cabeças ideais teria de ser aumentado em cerca de 60% no bioma Amazônia, 57% no bioma Cerrado e 74% no bioma Mata Atlântica. Considerando a taxa de lotação no percentil 50 como a taxa de lotação potencial, o número ideal de cabeças teria de ser aumentado em 12% no bioma Amazônia, 11% no Cerrado e 15% na Mata Atlântica.

3.4 Considerações Finais

A produção futura de carne bovina no Brasil enfrentará desafios biofísicos, climáticos e socioeconômicos. Superar esses desafios requer abordagens baseadas na ciência, políticas eficazes e compromisso a longo prazo. Novos métodos de modelagem são necessários para avaliar melhor as limitações e oportunidades nessas áreas.

Os resultados desta tese destacam que a abordagem baseada em diferenças das produtividades real, atingível e potencial pode ser aplicada para avaliar as lacunas de produtividade na pecuária (assim como em Araujo, 2018; Santos, 2021). No entanto, vale ressaltar que apesar da intensificação ter o potencial para aumentar a produção de carne bovina, usando estratégias de recuperação de pastagens, por exemplo, perseguir essa estratégia não é uma tarefa simples nem isenta de riscos.

A análise das áreas onde há lacuna de produtividade da pecuária sugere que a agenda de intensificação deve ser pensada de forma diferenciada entre as regiões brasileiras. Se por um lado existem lacunas em regiões de maior importância da pecuária e com predomínio de grandes propriedades rurais, localizadas no Brasil central (como Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e sul de Goiás), por outro, essas lacunas também incidem sobre áreas de fronteira agrícola (na região do arco do desmatamento) ou ainda, estão em franjas de regiões consolidadas, muitas delas coincidindo com locais onde há predominância da agricultura familiar e de médios produtores (como sul de Minas Gerais, serra da Mantiqueira, vale do Paraíba, litoral do Nordeste), sendo que em muitas também há restrições biofísicas

(normalmente terrenos mais declivosos). Assim, não é possível endereçar um pacote homogêneo de intensificação que atenda regiões com dinâmicas heterogêneas.

Para a região consolidada do Brasil central, predominam produtores mais capitalizados, com acesso a crédito rural e assistência técnica especializada, um dos principais desafios é vencer limitações biofísicas como a baixa fertilidade dos solos e a ocorrência de estação seca, o que exigirá estratégias como o uso de alimentação suplementar. É preciso também atentar para o fato destas áreas coincidirem com locais onde há agricultura consolidada de alta performance, além de boa infraestrutura, o que tem alavancado a superexploração das áreas de pastagens, que precisam ser competitivas, resultando em utilização acima de sua capacidade de suporte.

Nas áreas de fronteira agrícola, o chamado arco do desmatamento, concentradas principalmente no bioma Amazônia, deve-se avaliar se a intensificação da pecuária é uma alternativa sustentável, na medida em que pode haver efeito rebote devido ao custo de oportunidade favorável para a compra de terras. Este efeito não é desejável e vai contra o esperado da estratégia de intensificação e preenchimento de lacuna de produtividade. Uma maior discussão sobre efeito poupa-terra e efeito-rebote pode ser vista no Capítulo 4 desta tese.

Já nas regiões onde predominam pequenos e médios produtores, o fechamento das lacunas de produtividade exige acesso a crédito e ATER de qualidade e continuada.

Referências

- ALLEN, V. G. *et al.* An international terminology for grazing lands and grazing animals. **Grass Forage Sci.** 66, 2–28, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2010.00780.x>.
- ARANTES, Arielle Elias; COUTO, Victor Rezende de Moreira; SANO, Edson Eyji; FERREIRA, Laerte Guimarães. Livestock intensification potential in Brazil based on agricultural census and satellite data analysis. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(9), 1053-1060, 2018. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000900009>.
- ARAUJO, Marcela Almeida de. Eficiência da produção da pastagem e potencial de intensificação da pecuária bovina no estado de São Paulo: instrumentos para avaliação e proposição de políticas públicas. 2018. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018. doi:10.11606/D.11.2018.tde-11102018-103029.
- ASSEFA, B.T., CHAMBERLIN, J., REIDSMA, P. *et al.* Unravelling the variability and causes of smallholder maize yield gaps in Ethiopia. **Food Security**. 12, 83–103, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12571-019-00981-4>
- BARIONI, L. **Método para o Zoneamento Agrícola de Risco Climático da Produção de Bovinos em Pastagens no Brasil.** 2020.
- BARIONI, L., MARTHA JÚNIOR, G., RAMOS, A., VELOSO, R., RODRIGUES, D. DE C., VILELA, L., 2003. Planejamento e gestão do uso de recursos forrageiros na produção de bovinos em pastejo. *Simpósio sobre Manejo da Pastagem* 20, 105–154.
- BEDDOW, J. M.; HURLEY, T. M.; PARDEY, P. G.; ALSTON, J. M. Food Security: yield gap. 2014. Disponível em: <https://scitechconnect.elsevier.com/wp-content/uploads/2017/02/Food-Security-Yield-Gap.pdf>.
- BATTISTI, R., SENTELHAS, P. C., PASCOALINO, J. A. L. *et al.* Soybean Yield Gap in the Areas of Yield Contest in Brazil. **Int. J. Plant Prod.** 12, 159–168, 2018. <https://doi.org/10.1007/s42106-018-0016-0>
- BEDDOW, J. M.; HURLEY, T. M.; PARDEY, P. G.; ALSTON, J. M. Food Security: yield gap. 2014. Disponível em: <https://scitechconnect.elsevier.com/wp-content/uploads/2017/02/Food-Security-Yield-Gap.pdf>.

BOSI, C., SENTELHAS, P.C., PEZZOPANE, J.R.M., SANTOS, P.M., 2020. CROPGRO-Perennial Forage model parameterization for simulating Piatã palisade grass growth in monoculture and in a silvopastoral system. *Agric. Syst.* 177, 102724. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102724>

CASSMAN, K.G. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 96 (1999), pp. 5952-5959. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.96.11.5952>.

CAVALCANTE LEITE, Christiane *et al.* How much cattle can Brazil pastures support? An analysis based on "yield gap". *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 8, n. 4, 2017.

COHN, A. S. *et al.* Cattle ranching intensification in Brazil can reduce global greenhouse gas emissions by sparing land from deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, n. 20, p. 7236-7241, maio 2014.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Informações Agropecuárias: Oferta e Demanda de Carnes. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/oferta-e-demanda-de-carnes>

DA SILVA, F. S. *et al.* Herbage accumulation, nutritive value and beef cattle production on marandu palisadegrass pastures in integrated systems. *Agrofor. Syst.* 94, 1891–1902, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00508-3>.

D'AUREA, A. P. *et al.* Mitigating Greenhouse Gas Emissions from Beef Cattle Production in Brazil through Animal Management. *Sustainability*, 13, 7207, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13137207>. <https://doi.org/10.3390/su13137207>.

DE OLIVEIRA SILVA, R.; BARIONI, L. G.; HALL, J. A. J.; MORETTI, A. C.; FONSECA VELOSO, R.; ALEXANDER, P.; CRESPOLINI, M.; MORAN, D. Sustainable intensification of Brazilian livestock production through optimized pasture restoration. *Agricultural Systems*, v. 153, p. 201–211, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2017.02.001>.

DENG, N., GRASSINI, P., YANG, H. *et al.* Closing yield gaps for rice self-sufficiency in China. *Nature Communications* 10, 1725, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09447-9>.

DIAS, L. C. P. *et al.* Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. *Global Change Biology*, p. 1-16, 2016.

DOS SANTOS, M. L. *et al.* Applying the CROPGRO Perennial Forage Model for long-term estimates of Marandu palisadegrass production in livestock management scenarios in Brazil. *Field Crops Research*, 286, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108629>.

FAO and DWFI. 2015. Yield gap analysis of field crops – Methods and case studies, by Sadras, V.O., Cassman, K.G.G., Grassini, P., Hall, A.J., Bastiaanssen, W.G.M., Laborte, A.G., Milne, A.E., Sileshi, G., Steduto, P. FAO Water Reports No. 41, Rome, Italy.

FARR, T. G., *et al.* 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.*, 45, RG2004, DOI:10.1029/2005RG000183. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005RG000183>.

FERREIRA FILHO, J. B. S. **Introdução aos modelos de equilíbrio geral: conceitos, teoria e aplicações.** Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2010. Disponível em: <http://escolhas.org/wpcontent/uploads/2018/09/Serie-Didatica-120-ESALQ.pdf>.

FETZEL, T., HAVLIK, P., HERRERO, M. AND ERB, K.-H., Seasonality constraints to livestock grazing intensity. *Glob Change Biol*, 23: 1636-1647, 2017. <https://doi.org/10.1111/gcb.13591>

FISCHER, R.A. Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. *Field Crops Research* 182, 9–18, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.12.006>

- FUJIMORI, S.; WU, W.; DOELMAN, J. *et al.* Land-based climate change mitigation measures can affect agricultural markets and food security. **Nat Food** 3, 110–121, 2022. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00464-4>.
- GASQUES, José Garcia, BACCHI, M. R. P., & BASTOS, E. T. Crescimento e Produtividade da Agricultura Brasileira de 1975 a 2016. Carta de Conjuntura do Ipea, (38), 9. 2018. http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/conjuntura/180302_cc38_nt_crescimento_e_producao_da_agricultura_brasileira_1975_a_2016.pdf.
- GARCIA, J. R.; VIEIRA FILHO, J. E. R. A nova geografia da agropecuária brasileira e os desafios logísticos. *Confins*, n. 50, p. 1-14, 2021.
- GODFRAY, H.C.J. The debate over sustainable intensification. *Food Sec.* 7, 199–208 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0424-2>
- GONZÁLEZ-QUINTERO, Ricardo; VAN WIJK, Mark T.; RUDEN, Alejandro; GÓMEZ, Manuel; PANTEVEZ, Heiber; CASTRO-LLANOS, Fabio; NOTENBAERT, An; ARANGO, Jacobo. Yield gap analysis to identify attainable milk and meat productivities and the potential for greenhouse gas emissions mitigation in cattle systems of Colombia. **Agricultural Systems**, 195 (2022) 103303, 2022.
- HENGL, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B. M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., and Kempen, B.: SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning, *PLoS ONE*, 12, e0169748, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>, 2017.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Pesquisa Trimestral do Abate de Animais. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9203-pesquisas-trimestrais-do-abate-de-animais.html?=&t=series-historicas>.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM). Efetivo dos rebanhos por tipo de rebanho. 2022. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?edicao=34981>.
- HERD, R. M.; ARTHUR, P. F. Physiological basis for residual feed intake. **Journal of animal science**, v. 87, n. suppl_14, p. E64-E71, 2009.
- HOFFMANN, A., MORAES, E.H.B.K., MOUSQUER, C.J., SIMIONI, T.A., GOMES, F.J., FERREIRA, V.B., SILVA, H.M., 2014. Produção de Bovinos de Corte no Sistema de Pasto-Suplemento no Período Seco. *Nativa* 2, 119–130. <https://doi.org/10.14583/2318-7670.v02n02a10>
- HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; SHELIA, V.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; WHITE, J.W.; ASSENG, S.; LIZASO, J.I.; MORENO, L.P.; PAVAN, W.; OGOSHI, R.; HUNT, L.A.; TSUJI, G.Y.; JONES, J.W. 2019. The DSSAT crop modeling ecosystem, in: *Advances in Crop Modeling for a Sustainable Agriculture*. Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, pp. 173–216. <https://doi.org/10.19103/AS.2019.0061.10>
- JÄGERMEYR, J.; MÜLLER, C.; RUANE, A.C. *et al.* Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. **Nat Food** 2, 873–885 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00400-y>.
- LABORATÓRIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E GEOPROCESSAMENTO - LAPIG. **Atlas das Pastagens**. <https://atlasdaspastagens.ufg.br/>.
- LICKER, Rachel *et al.* Mind the gap: how do climate and agricultural management explain the ‘yield gap’ of croplands around the world? **Global ecology and biogeography**, v. 19, n. 6, p. 769-782, 2010.

- LOBELL, D. B., CASSMAN, K. G., FIELD, C. B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. **Annu. Rev. Environ. Recurso.** 34, 179–204, 2009. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.041008.093740>.
- LÖVENSTEIN, H.; LANTINGA, E.A.; RABBINGE, R.; VAN KEULEN, H. Principles of Production Ecology. Department of Theoretical Production Ecology Agricultural University of Wageningen, 1995.
- MARIN, F.R., Zanon, A. J., Monzon, J. P. *et al.* Protecting the Amazon Forest and reducing global warming via agricultural intensification. **Nat Sustain** 5, 1018–1026, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00968-8>.
- MARIN, F. R. *et al.* Intensificação sustentável da agricultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v. Ano XXV, n. 3, p. 108–124, 2016.
- MARTHA JUNIOR, G. B. "Potential land-saving effects from integrated crop-livestock-forestry systems." In: WORLD CONGRESS ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK-FORESTRY SYSTEMS, 2., 2021. Proceedings reference. Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 989-997., 2021a.
- MARTHA JR., GB. Estimativa da produtividade da pecuária a pasto em nível municipal – Mato Grosso. Campinas: Embrapa Agricultura Digital (Nota Técnica, apoio à metodologia técnico-científica, apresentado à Chefia de P&D), 11p, 2021b.
- MARTHA JR, G. B.; ALVES, Eliseu; CONTINI, Elisio. Land-saving approaches and beef production growth in Brazil. **Agricultural Systems**, v. 110, p. 173-177, 2012.
- MARTHA JR, G. B.; ALVES, Eliseu; CONTINI, Elísio. **Pecuária brasileira e a economia de recursos naturais**. 2011.
- MONTEIRO, L.A., A.M. Allee, E.E. Campbell, L.R. Lynd, J.R. Soares, D. Jaiswal, J. Castro Oliveira, M. Santos Vianna, A.E. Morishige, G.K.D.A. Figueiredo, R.A.C. Lamparelli, N.D. Mueller, J. Gerber, L.A.B. Cortez, J.J. Sheehan. Assessment of yield gaps on global grazed-only permanent pasture using climate binning *Glob. Chang.Biol.*, 26 (2020), pp. 1820-1832, 10.1111/gcb.14925
- MORAN, D., BLAIR, K. J. Review: Sustainable livestock systems: anticipating demand-side challenges. **Animal** 15, 100288, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100288>.
- NETWORK COMMON DATA FORM – netCDF. <https://doi.org/10.5065/D6H70CW6>.
- NUNES, S.G., BOOCK, A., PENTEADO, M. I. de O., GOMES, D.T. **Brachiaria brizantha cv. Marandu**. EMBRAPA-CNPQC. Documentos 21, 31, 1984. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/317899>.
- NWIGWE, Cecilia *et al.* Technical efficiency of beef cattle production technologies in Nigeria: A stochastic frontier analysis. *African Journal of Agricultural Research*, v. 11, n. 51, p. 5152-5161, 2016.
- OLIVEIRA, P. P. A.; TRIVELIN, P. C. O.; CORSI, M. **Resposta de pastagens de capim-marandu em solo de cerrado à adubação com nitrogênio, em condições de sequeiro ou sob irrigação**. Embrapa Pecuária Sudeste-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2004. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/43093>.
- OPIO, C. *et al.* **Greenhouse gas emissions from ruminant supply chains** – A global life cycle assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, 2013. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i3461e/i3461e.pdf>.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT - OECD; FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. **Agricultural Outlook 2020-2029**. FAO/OECD Publishing Rome/Paris, 2020.
- PARENTE, L; MESQUITA, V; MIZIARA, F; BAUMANN, L; FERREIRA, L. Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. **Remote Sensing of Environment**. 2019.

PEDREIRA, B.C., PEDREIRA, C.G.S., BOOTE, K.J., LARA, M.A.S., ALDERMAN, P.D., 2011. Adapting the CROPGRO perennial forage model to predict growth of *Brachiaria brizantha*. *F. Crop. Res.* 120, 370–379. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.11.010>

PEQUENO, D. N. L. **Agronomic performance and adaptation of the CROPGRO - Perennial Forage Model to predict growth of three tropical forage grasses under irrigated and rainfed conditions.** Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens), Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2014.

PEQUENO, D. N. L.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J.; ALDERMAN, P. D.; FARIA, A. F. G. Species-genotypic parameters of the CROPGRO Perennial Forage Model: Implications for comparison of three tropical pasture grasses. **Grass Forage Sci.** 1–16, 2018. <https://doi.org/10.1111/gfs.12329>

PEQUENO, D. N. L.; PEDREIRA, C. G. S.; SOLLENBERGER, L. E.; DE FARIA, A. F. G.; SILVA, L.S. Forage accumulation and nutritive value of brachiariagrasses and Tifton 85 bermudagrass as affected by harvest frequency and irrigation. **Agronomy Journal**, 107, 1741–1749, 2015. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0115>.

PIIPPONEN, Johannes *et al.* Global trends in grassland carrying capacity and relative stocking density of livestock. **Global Change Biology**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.16174>.

RAMOS, P. Índices de rendimento da agropecuária brasileira / Pedro Ramos. -- Brasília: Ministério do Desenvolvimento Agrário : nead, 2005. 96 p.; 21 x 28 cm -- (nead Debate ; 5)

SANTOS, J.A; FERREIRA FILHO, J.B.S. Substituição de combustíveis fósseis por etanol e biodiesel no Brasil e seus impactos econômicos: uma avaliação do Plano Nacional de Energia 2030. **Pesquisa e Planejamento Econômico.** V.47, no.3, 2017.

SANTOS, Mariely Lopes dos. **Potencial de produção e modelagem da assimilação de carbono para *Panicum maximum* cv. Mombaça e *Brachiaria brizantha* cv. Marandu.** Dissertação (Mestrado em Zootecnia), Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop, Brasil.

SANTOS, Mariely Lopes dos. **Yield-gap in pasture-based animal production systems in Central-west and Southeast of Brazil** (Central Brazil). 2021. Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021. DOI:10.11606/T.11.2021.tde-09092021-165205.

SEKARAN, U; LAI, L; USSIRI, D.A.N; KUMAR, S; CLAY, S. Role of integrated crop-livestock systems in improving agriculture production and addressing food security – a review *J. Agric. Food Res.*, 5 (2021), DOI 10.1016/j.jafr.2021.100190.

SCOT Consultoria. Mercado do boi gordo. 2023. Disponível em: <https://www.scotconsultoria.com.br/noticias/artigos/56698/#:~:text=por%20Equipe%20Scot%20Consultoria&text=Estamos%20vivendo%20os%20efeitos%20ciclo,isso%20acontece%2C%20a%20produ%C3%A7%C3%A3o%20aumenta.>

SOUZA, Ana Paula de Oliveira. **Abordagens alternativas para estimativa de características de eficiência alimentar em bovinos de corte confinados.** Dissertação (Mestrado em Ciência Animal), Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

STOCCO, L; FERREIRA FILHO, J. B. S; HORRIDGE, M. Closing the Yield Gap in Livestock Production in Brazil: New Results and Emissions Insights. In: MADDEN, J. R.; SHIBUSAWA, H; HIGANO, Y. (Eds). **Environmental Economics and Computable General Equilibrium Analysis. Essays in Memory of Yuzuru Miyata.** Springer. 414 p, 2020.

STRASSBURG, B. B. N.; LATAWIEC, A. E.; BARIONI, L. G.; NOBRE, C. A.; DA SILVA, V. P.; VALENTIM, J. F.; VIANNA, M.; ASSAD, E. D. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 28, n. 1, p. 84–97, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.001>.

VALLE, C. B.; EUCLIDES, V. P. B.; MACEDO, M. C. M. Características das plantas forrageiras do gênero *Brachiaria*. In: **Simpósio sobre Manejo da Pastagem**, 17., 2000, Piracicaba. Anais... Piracicaba: FEALQ, 2000. p. 65-108.

VAN BUSSEL, L.G.J., GRASSINI, P., VAN WART, J., WOLF, J., CLAESSENS, L., YANG, H., BOOGAARD, H., DE GROOT, H., SAITO, K., CASSMAN, K.G., VAN ITTERSUM, M.K., 2015. From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates. *F. Crop. Res.* 177, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.005>.

VAN DIJK, M.; MORLEY, T.; JONGENEEL, R.; VAN ITTERSUM, M.; REIDSMA, P.; RUBEN, R.. Disentangling agronomic and economic yield gaps: An integrated framework and application. *Agricultural Systems*, 154, 90–99, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.03.004>

VAN ITTERSUM, M. K.; CASSMAN, K. G.; GRASSINI, P.; WOLF, J.; TITTONELL, P.; HOCHMAN, Z. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4–17, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>>.

VAN WART, J., KERSEBAUM, K.C., PENG, S., MILNER, M., CASSMAN, K.G., 2013. Estimating crop yield potential at regional to national scales. *F. Crop. Res* 143, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.018>.

XAVIER, A. C.; KINGB, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *International Journal of Climatology*, Wiley Online Library, v. 36, p. 2644-2659, 2016.

4. IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS DO FECHAMENTO DA LACUNA DE PRODUTIVIDADE DA PECUÁRIA DE CORTE

4.1 Impactos do incremento de produtividade na pecuária

Para atender ao aumento projetado na demanda global por alimentos, incluindo proteína animal, é imprescindível adotar estratégias adequadas para aumentar a produção agropecuária de maneira sustentável (Godfray *et al.*, 2010; Licker *et al.*, 2010, Cohn *et al.*, 2014; van Zanten *et al.*, 2018). A produção pecuária tem um papel crucial nas dimensões sociais e econômicas no Brasil, contribuindo significativamente para a geração de emprego, renda e segurança alimentar. No entanto, seus impactos negativos na dimensão ambiental, particularmente as mudanças no uso da terra e as emissões de gases de efeito estufa (GEE), têm recebido crescente atenção (Reisinger; Clark, 2018; Parente *et al.*, 2019; Moran; Blair, 2021).

A intensificação sustentável da pecuária tem sido central nos diferentes debates de políticas ambientais e, com vistas a aumentar os rendimentos enquanto se reduzem os impactos ambientais negativos da produção. O fechamento de lacunas de produtividade é um caminho estratégico para a redução da intensidade das emissões (GEE por unidade de produto) e a expansão da produção associada à economia de terra (Cohn *et al.*, 2014; Strassburg *et al.*, 2014; Ferreira Filho; Horridge; 2017; Santos *et al.*; 2022; Stocco *et al.*; 2020; Gianetti, 2023). Políticas como o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas visando à Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC+ 2020-2030), que prevê, entre outras ações, a recuperação de pastagens degradadas, vão nesse sentido.

Aumentar a produtividade da terra para a produção pecuária desempenha um importante papel na redução das emissões de GEE. Isso ocorre porque pastos bem manejados apresentam potencial de aumentar o sequestro de Carbono no solo (Cerri *et al.*, 2007; Braz *et al.*, 2013; Stocco *et al.*; 2020; Gianetti, 2023) e uma maior produtividade pode reduzir a necessidade de expandir as áreas agropecuárias sobre vegetação nativa (conhecido como "efeito poupa terra"), ao mesmo tempo em que preserva os recursos naturais e a biodiversidade (Kreidenweis *et al.*, 2018) (Stevenson *et al.*, 2013). No entanto, é importante estar ciente do "paradoxo de Jevons", que pode surgir quando os ganhos de produtividade têm o efeito oposto ("efeito-rebote"). Isso ocorre especialmente em situações em que a demanda global por alimentos é influenciada pelos preços (Hertel, 2012; Hertel *et al.* (2014).

Modelos de Equilíbrio Geral Computável (EGC), como o TERM-BR15 (*The Enormous Regional Model for Brazil*) se mostram como uma ferramenta promissora para analisar uma política como o Plano ABC+, considerando as variações na sua implementação e suas diferentes respostas entre as regiões brasileiras. O modelo determina, após a aplicação de choques específicos, uma nova posição de equilíbrio na economia, fornecendo dados percentuais sobre o impacto nas variáveis econômicas e sociais da política em cada cenário e região, em relação ao ano base considerado no modelo.

Comparado a modelos globais como o modelo dinâmico recursivo de Equilíbrio Geral Computável (chamado EPPA), o TERM-BR se destaca ao considerar as complexas variações regionais

no Brasil, o que é essencial para analisar os efeitos da recuperação de pastagens degradadas no âmbito do ABC+. Outros modelos regionais, como o BBGEM (*Brazilian Biomes General Equilibrium Model*), concentram-se principalmente em aspectos econômicos, enquanto modelos globais, como o utilizado por Golub et al. (2008), não oferecem o mesmo nível de detalhamento regional. O TERM-BR permite uma análise detalhada das interações entre a política em questão e mudanças no uso da terra, emissões de GEE e aspectos socioeconômicos no heterogêneo território brasileiro. Essas análises geram informações úteis para o planejamento, ajuste e redirecionamento de políticas públicas que visam o desenvolvimento rural sustentável.

Estudos sobre os impactos socioeconômicos e ambientais da recuperação de pastagens degradadas têm sido realizado por diversos pesquisadores no Brasil, especialmente no âmbito da política de agricultura de baixo carbono, utilizando modelos de Equilíbrio Geral Computável (EGC), mesmo para o território brasileiro, que possui elevada heterogeneidade edafoclimática, fundiária e produtiva.

Gurgel e Laurenzana (2016) avaliaram a adoção de práticas sustentáveis na agropecuária, incentivadas pelo Plano ABC por meio de um modelo dinâmico recursivo de Equilíbrio Geral Computável (EGC) (chamado de EPPA), calibrado para 2015 e detalhado para 16 regiões/países, incluindo o Brasil. Os autores reconhecem limitações no modelo ao avaliar práticas sustentáveis, como a RPD e a ILPF, devido à dificuldade em medir variações no estoque de carbono do solo. No entanto, é importante destacar que modelos agronômicos detalhados também enfrentam esse tipo de desafio devido à diversidade em microclima, solo e sistemas de produção resultantes dessas práticas. De acordo com os autores, no curto prazo, as políticas de redução de emissões não afetariam significativamente a produção agropecuária, mas até 2050, elas levariam a uma queda de 3% na produção agrícola e de 10% na produção pecuária em relação ao cenário econômico base.

A Fundação Getúlio Vargas (FGV, 2017), através do modelo *Brazilian Land Use Model* (Blum)³⁷, analisou as metas da primeira fase do Plano ABC (2010 – 2020) de recuperar 15 Mha de pastagens degradadas e implementar 4 Mha de ILPF. No estudo, pastagens degradadas foram definidas de acordo com a densidade de animais por hectare, considerando áreas com valores inferiores a 0,75 Unidade Animal (UA)³⁸ por hectare como degradadas. Os autores calcularam os subsídios necessários para implementar essas práticas comparando os custos de recuperação com os valores de crédito por hectare fornecidos pelo Programa ABC. Dois cenários foram avaliados: um com alocação em áreas prioritárias, onde a degradação das pastagens era mais alta, e outro com alocação livre de recursos. Os autores apontaram a necessidade de investimentos entre R\$ 34,4 bilhões e R\$ 39 bilhões, sendo o valor mais baixo relacionado à alocação livre e o mais alto às áreas prioritárias. No cenário de alocação livre, haveria um aumento de R\$ 8 bilhões no consumo das famílias em comparação com a situação base, já

³⁷ Modelo estático, de equilíbrio parcial, detalhado para seis regiões com diferentes biomas e com base em dados de 2009.

³⁸ UA = Unidade animal. Trata-se de uma unidade para padronizar as diferentes categorias animais a pasto, em 1 UA refere-se a um animal com 450 kg de peso vivo.

nas áreas prioritárias ocorreria uma redução de R\$ 0,724 bilhão. O estudo prevê ainda que as áreas de vegetação nativa aumentariam entre 4,85 e 5,09Mha, e reduziram-se em 50,1 Tg de CO₂eq as emissões de GEE da agropecuária (comparado ao cenário base), representando cerca de 31% a 37% das metas de redução do Plano ABC.

Os impactos do crédito Programa ABC destinado a RPD foram avaliados por Souza et al. (2020) mediante ao modelo de EGC *Brazilian Biomes General Equilibrium Model* (BBGE, o qual é dinâmico recursivo, *bottom-up*, detalhado para os biomas e Unidades da Federação do Brasil, com 48 regiões, calibrado para o ano de 2015. Na análise os autores adotaram a hipótese de que os financiamentos desse crédito foram interrompidos entre 2015 e 2018. Uma queda de -0,4% no PIB de 2025 (em comparação à linha de base) seria observada como resultante da diminuição da produtividade e da produção pecuária. De acordo com os autores, quanto maior a representatividade do financiamento em relação ao valor da produção da pecuária, maior seria a queda acumulada do PIB da região, destacando a importância do Programa no crescimento econômico de regiões onde a pecuária não é tão grande, contudo, apresentam uma alta relação entre a produção e valor financiado.

Ferreira Filho e Horridge (2016) analisaram os efeitos da mudança no uso da terra, em relação a adequação do código florestal (CF) e recuperação de pastagens, por meio do TERMBR - modelo de EGC dinâmico recursivo, *bottom-up*, desagregado para os 27 estados brasileiros, calibrado para 2005. As simulações foram realizadas em três cenários para o período de 2016 e 2030: i) CF sem compensação de reserva legal: conversão de 21Mha de pastagens para vegetação nativa; ii) CF com compensação de reserva legal: redução para 13,1Mha na conversão de pastagens para vegetação nativa; iii) o cenário ii mais um aumento da produtividade das pastagens (o dobro da alcançada em áreas de baixa produtividade). Os autores concluíram que, em relação a linha de base, o PIB reduziria (cerca de 0,56%, 0,35% e 0,19% nos cenários i, ii iii, respectivamente), bem como o consumo das famílias (cerca de 0,44%, 0, 28% e 0,14% nos cenários i, ii iii, respectivamente). Além disso, os resultados de mitigação de GEE até 2030 (na ordem de 19,0% a 12,2%) ficou aquém da meta da NDC de 43%. Sem considerar os efeitos sobre o carbono no solo, o cenário com aumento da produtividade das pastagens apresentou o pior resultado, com aumento das emissões de GEE devido ao crescimento da atividade pecuária.

Abordando ainda exclusivamente a RPD, outros autores mais recentemente por meio do Modelo TERMBR estimaram os impactos socioeconômicos e ambientais do incremento de produtividade da pecuária brasileira.

Stocco et al. (2020) apresentam um passo importante na busca por mensurar os impactos do fechamento de 50% da lacuna de produtividade da pecuária de corte em 66 Mha de pastos no Brasil, por meio do modelo de equilíbrio geral TERM-BR (mesmo modelo de Ferreira Filho e Horridge, 2016; 2017). Contudo, a taxa de lotação foi levada em conta para o cálculo da lacuna de produtividade no

estudo, não sendo considerada a capacidade de suporte³⁹, em especial a capacidade biofísica das pastagens brasileiras (diferencial desta tese). As simulações, que consideram o período de 2016 a 2030, revelam que o aumento da produtividade pecuária, no agregado, geraria uma redução no consumo das famílias em -0,05% e um aumento no PIB real em 0,43%. Em termos ambientais, os autores indicam que haveria efeito poupa-terra, com a pecuária liberando 4,69 Mha para outras atividades, e ao incorporar os benefícios da melhoria da qualidade dos pastos com a RPD no coeficiente de emissões de GEE, reduziria-se as emissões do setor em -18,29%, diante de um acréscimo de 0,9%, desconsiderando esse benefício.

Por sua vez, Gianetti (2023) analisou os efeitos socioeconômicos e ambientais da recuperação de pastagens degradadas no Brasil (entre 2015 e 2035). Para isso, o autor utilizou também o modelo TERMBR, porém, calibrado para o ano de 2015. Quando comparados à linha de base para 2035, os resultados mostram que a recuperação de pastagens impulsionaria o crescimento econômico, ampliando o PIB em 0,47% e o consumo real das famílias em 0,59% e pouparia terra nacionalmente, evitando o desmatamento de 972,6 mil hectares – apesar de que nas regiões de fronteiras agrícolas (Acre, Amazonas e Roraima, e Maranhão, Tocantins e Piauí) seria observado um aumento de desmatamento. Analisando o impacto da RPD sobre as emissões de GEE, o autor encontrou que pelo método original (do inventário de emissões do Brasil) as emissões se elevariam, porém, pelo método alternativo (considera a fixação de carbono orgânico no solo gerada pela melhora na qualidade de pastagens) as emissões seriam mitigadas, mas ainda insuficientes para atender às metas e redução de emissões da NDC brasileira até 2030.

4.1.1 Objetivo

O objetivo geral deste capítulo é analisar os possíveis impactos socioeconômicos e ambientais resultantes do fechamento da lacuna de produtividade da pecuária brasileira, tomando como referência as metas de recuperação de pastagens degradadas do Plano ABC+.

Entre os objetivos específicos estão:

- a) Identificar áreas prioritárias nos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica para incrementar a produtividade na pecuária, considerando a capacidade de expansão da produção, infraestrutura disponível e acesso a crédito rural para promover a intensificação;
- e
- b) Avaliar, por meio do Modelo de Equilíbrio Geral Computável – TERM-BR, os impactos do fechamento da lacuna de produtividade da pecuária a pasto sobre os agregados macroeconômicos, uso da terra e emissões de GEE entre as regiões brasileiras.

³⁹ Refere-se a taxa máxima de lotação que atingirá um nível desejado de desempenho animal, em um sistema de pastoreio específico, que pode ser aplicado ao longo de um período definido sem deterioração das pastagens (Allen et al., 2011).

4.2 Material e Métodos

Para o alcance do principal objetivo desta tese, que é analisar os impactos socioeconômicos e ambientais do fechamento da lacuna de produtividade da pecuária de corte no Brasil, diversos passos metodológicos foram estruturados.

O primeiro passo, como apresentado no capítulo anterior, foi identificar espacialmente essas lacunas, considerando o potencial biofísico para desenvolvimento da pecuária a pasto nos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica. O segundo foi definir regiões prioritárias, inseridas nesses três biomas, para a adoção de uma política de incremento de produtividade do setor, considerando a quantidade produção pecuária (e.g. quilo de carne) que pode ser ampliada, bem como a disponibilidade de infraestrutura e crédito para viabilizar essa intensificação sustentável por meio do progresso tecnológico. Por fim, o terceiro passo foi utilizar um modelo de Equilíbrio Geral Computável (EGC), que represente a economia brasileira, para simular os efeitos da política de fechamento das lacunas de produtividade nas regiões identificadas como prioritárias.

Assim, a presente seção se dedica a detalhar os dados, procedimentos e estratégias adotadas nestas duas últimas etapas.

4.2.1 Regiões prioritárias para o fechamento da lacuna de produtividade na pecuária de corte

A primeira contribuição deste estudo, em relação aos trabalhos apresentados na literatura, é o aperfeiçoamento da estimativa da lacuna de produtividade (*yield gap*), por meio de modelagem mecanicista de crescimento de cultura, partindo de uma escala detalhada, como apresentada no capítulo anterior.

Uma segunda contribuição, a qual antecede a estimativa dos impactos econômicos, sociais e ambientais, refere-se à análise de como o fechamento da lacuna de produtividade na pecuária de corte seria factível no território, por meio da definição de regiões consideradas prioritárias para o desenvolvimento desse setor. Essa priorização territorial pode servir de base sobre a qual podem ser estruturados, de forma analítica, os planos setoriais, programas, projetos e ações do Governo Federal e demais instâncias, apontando estratégias para o fomento à intensificação sustentável da pecuária com base na agricultura de baixo carbono.

A priorização de regiões neste estudo, portanto, parte do pressuposto de que, em termos de direcionamento de políticas públicas, as dinâmicas econômicas precisam ser pautadas por uma vontade política a priori. No caso da pecuária, por exemplo, dada sua ampla dimensão territorial, não seria factível intensificar em todas as áreas com lacuna de produtividade⁴⁰. Neste sentido, tal como um

⁴⁰ Entre outros fatores, para manter taxas de lotação mais elevada por meio da restauração dos pastos, seria necessário, por exemplo, um aumento significativo na demanda por fertilizantes nitrogenados. Isso tem um custo alto para as outras culturas como cana-de-açúcar e milho, por exemplo, que demandam bastante por nitrogênio.

procedimento esperado na implementação de políticas, algumas travas e alguns incentivos são propostos nesta análise, a fim de proceder o cômputo de áreas prioritárias para esse fechamento de forma mais coerente com as realidades regionais. Esses recortes foram aprimorados com apoio e consulta à especialistas do setor.

Para definir as áreas prioritárias para intensificação da pecuária foi tomado o Plano ABC+ como referência. Deste modo, este estudo se propõe a contribuir para o alcance do compromisso de Recuperação de Pastagens Degradadas (RPD) assumidos pelo Brasil via Plano ABC+ (Brasil, 2022), indicando, por um lado, as regiões onde a política poderia prioritariamente incidir nos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica, e, por outro, avaliando quais os efeitos dessa incidência sobre a economia brasileira.

O modelo adotado para selecionar as áreas prioritárias é baseado, inicialmente, em uma classificação territorial que define graus de factibilidade para intensificação da pecuária. Esses graus são definidos com base em um processo de classificação e chaveamento, o qual resulta da adaptação da metodologia descrita em Sparovek *et al.* (2015), baseada em variáveis categóricas e ou numéricas, para modular cenários de mudanças de uso da terra.

É importante ressaltar que essa classificação territorial subsidiou a elaboração dos cenários simulados no modelo de Equilíbrio Geral Computável (EGC). Assim, a definição de critérios para seleção de áreas prioritárias para intensificação permitiu gerar uma medida de choque de produtividade baseada nas lacunas de produtividade, que por sua vez se voltaram às regiões mais promissoras para a ocorrência deste processo. Neste sentido, foi computado para o modelo EGC o tamanho de lacuna de produtividade que potencialmente pode ser fechada em cada região.

O processamento de priorização territorial opera inicialmente na escala de imóveis rurais e, posteriormente, na de municípios e funciona em três etapas.

- ***Etapas 1: Contabilização de área de pastagem em imóveis rurais de municípios da Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica.***

A primeira etapa objetiva contabilizar a área de pastagem existente nos municípios da Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica e que esteja inserida apenas dentro de imóveis rurais.

- ***Etapas 1.1 - Remoção da área de pastagem fora de imóveis rurais:*** com base no cruzamento espacial entre a malha fundiária do Brasil, estimada por Freitas *et al.* (2018), e o mapa das áreas de pastagem, conforme estimado por LAPIG em 2022, foram removidas as áreas de pastagem localizadas fora de imóveis rurais no Brasil. O mapa final de pastagem utilizado para a priorização de áreas totaliza 159Mha, de onde foram removidos 42,3Mha localizados fora de imóveis rurais.
- ***Etapas 1.2 - Cômputo da área de pastagem nos municípios:*** foram contabilizadas as áreas de pastagem que constam em imóveis rurais, inseridas em municípios localizados nos Biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica – biomas cujos resultados de lacuna

de produtividade para a pecuária foram gerados no capítulo anterior. Para relacionar os municípios brasileiros ao recorte geográfico de biomas, foi considerado o critério de área predominante (ou seja, em qual bioma localiza a maior parte da área de cada município).

- **Etapa 2: 1ª Hierarquização de municípios com base na capacidade de ampliação da produção pecuária e nas metas do ABC +.**
 - **Etapa 2.1 - Definição da meta estadual de recuperação de pastagem:** como dito anteriormente, o Plano ABC + serviu de referência para a priorização das áreas para fechamento da lacuna de produtividade da pecuária de corte no Brasil. Assim, tomou-se como base a meta federal do plano de adotar a tecnologia Recuperação de Pastagens Degradadas (RPD) entre 2020 e 2030: 30Mha. Como a política não apresenta uma metodologia oficial (padronizada entre os estados) e que ainda não foram definidas as metas para todos os estados brasileiros, para esta tese a meta federal foi distribuída entre as unidades da federação conforme a sua parcela no total de pastagens degradadas no país, conforme mapeamento de qualidade de pastagens (LAPIG, 2021), sem distinção das pastagens para pecuária de corte ou de leite.⁴¹
 - **Etapa 2.2 - 1º Ranqueamento dos municípios:** a partir dos dados sobre área de pastagem (dentro de imóveis) e o valor de *yield gap* médio dos municípios (localizados nos Biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica) foi estimado o valor total de produção potencialmente gerado com o respectivo aumento da produtividade (indicada pela lacuna existente), como indicada a equação a seguir.

$$P_m = (0.5 A_i * yg) \quad (13)$$

em que P_m se refere à produção incremental total com o fechamento do *yield gap* (em kg EQC) do município m , A_i representa a área de pasto dentro de imóveis e yg o tamanho da lacuna de produtividade neste município. Assumiu-se que o incremento de produtividade (fechamento do *gap*) da pecuária de corte ocorreria em 50% da área de pasto de cada município, considerando que uma parcela de área é ocupada pela pecuária é destinada a produção de leite, e a factibilidade na aplicação da política de RPD (que dificilmente ocorreria numa área total de pasto no município).

Na sequência, os municípios inseridos nos três biomas foram ranqueados dentro dos seus respectivos estados, conforme a produção incremental total (do maior para o menor) e, então, selecionados aqueles que, conjuntamente, somam mais 125% (ou 1,25 vezes) a quantidade de área estadual estimada para a RPD pelo Plano ABC + (como indicado na etapa 2.2). Foi considerado 125%

⁴¹ Vale ressaltar que, apesar de não ser colocada como metodologia oficial, uma vez que cada estado tem a liberdade de apontar a sua meta, de acordo com sua capacidade de execução, o MAPA, também sugere que os estados, eventualmente, adotem como ponto de partida o mapeamento de qualidade de pastagens do LAPIG.

da área prevista no Plano para que houvesse uma sobra dessa meta para a execução de um novo ranqueamento (descrito a seguir).

- ***Etapa 3: 2ª Hierarquização de municípios com base em indicadores de infraestrutura e crédito rural.***

Os municípios selecionados na etapa anterior foram novamente ranqueados, de acordo com a disponibilidade de infraestrutura e acesso ao crédito rural, para finalmente identificar as regiões prioritárias para o fechamento da lacuna de produtividade da pecuária de corte. A seguir é apresentada a descrição dos passos realizados.

- ***Etapa 3.1 - Processamento do Indicador de Infraestrutura para a pecuária (IIP):*** O indicador de infraestrutura para pecuária (IIP) toma como referência metodológica o indicador de infraestrutura para agricultura (IIA) construído no âmbito do estudo de Brasil (2020)⁴². Para esta tese o indicador IIP é adaptado à escala municipal e construído a partir de dois componentes individuais que visam representar um fator que pode restringir o desempenho da produção pecuária no território:

- ***Proximidade aos modais de transporte:*** calculado por meio da distância entre linhas dos modais de transporte (rodoviário e ferroviário), obtida a partir da união de arquivos vetoriais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT)⁴³. Os valores originais de proximidade (m) foram matematicamente transformados para aumentar o realce espacial dos dados. A equação 14 demonstra como foi realizado o cálculo do índice de caracterização da infraestrutura referente à proximidade dos modais de transporte (α).

$$\alpha_i = 100 \left(1 - \left(\frac{\log_{10}(1+T_i) - \log_{10}(1+T_{min})}{\log_{10}(1+T_{max}) - \log_{10}(1+T_{min})} \right) \right) \quad (14)$$

em que T_i se refere à distância média (m) de modais de transporte ferroviário e rodoviário do i -ésimo município, e T_{min} e T_{max} a distância média mínima e máxima estimada para todo o território nacional, respectivamente.

- ***Proximidade de frigoríficos dentro da região rural:*** O índice de caracterização da infraestrutura para abate, indicada pela proximidade aos frigoríficos (δ), foi calculado para as regiões rurais, conforme a Equação 15.

⁴² “Plano de Ação Imediata da Agricultura Irrigada no Brasil para o período 2020-2023”: desenvolvido pelo Grupo de Políticas públicas da ESALQ (GPP) e FEALQ junto ao Ministério de Desenvolvimento Regional (MDR), com financiamento da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO). Neste estudo, o IIA, composto pelos componentes de transporte, energia e armazenamento foi desenvolvido com o intuito de identificar as regiões que apresentam potencial de desenvolvimento a curto e médio prazo da agricultura irrigada no Brasil.

⁴³ Foram considerados estradas de rodovias federais e estaduais, pavimentadas e não pavimentadas.

$$\delta_i = 100 \left(1 - \left(\frac{\log_{10}(1+F_i) - \log_{10}(1+F_{min})}{\log_{10}(1+F_{max}) - \log_{10}(1+F_{min})} \right) \right) \quad (15)$$

em que F_i se refere à distância média ao frigorífico mais próximo do i -ésimo município, e F_{min} e F_{max} a distância média mínima e máxima estimada para todo o território nacional, respectivamente. Os dados de localização dos frigoríficos são disponibilizados pelo LAPIG para o ano de 2022. A proximidade aos frigoríficos visa produzir uma representação espacial que contemple o perfil regional, uma vez que um frigorífico, eventualmente, pode atender a oferta de bovinos de um raio de atuação maior do que um município.

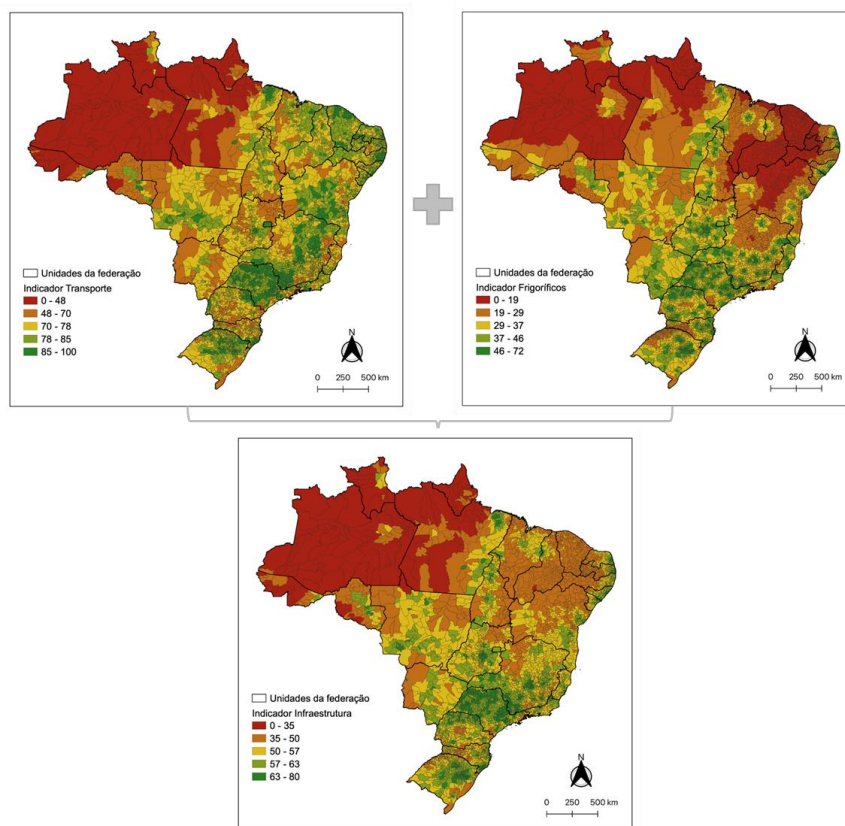
Em ambos os componentes (proximidade de modais de transporte e de locais de abate), foram transformadas as distâncias para a escala logarítmica na base 10 para que fosse realçado a magnitude das diferenças espaciais entre os municípios⁴⁴. O valor para o i -ésimo município foi normalizado para o intervalo de 0 a 1 empregando os valores médios mínimos e máximos existentes no território nacional. Na sequência, esse resultado, foi subtraído de 1 e multiplicado por 100, com o objetivo de inverter a escala original e apresentar o indicador no intervalo 0 a 100. Deste modo, os maiores valores de α indicam os municípios com maior proximidade aos modais de transporte rodoviário e ferroviário, ao passo que os maiores valores de δ indicam os municípios com maior proximidade aos frigoríficos.

A elaboração de um indicador de infraestrutura pecuária que integre os modais de transporte e frigoríficos é restrita pela resolução espacial desses dois elementos. Como visto, a representação da proximidade da estrutura viária de transporte pode ser feita de maneira contínua na paisagem por imagens. Já a informação de infraestrutura para abate está limitada pelo contexto regional, onde a proximidade aos frigoríficos é utilizada a fim de se obter um indicador que descreva os locais de abate para além das redondezas do abatedouro. Assim, a abordagem mais apropriada para padronizar a escala de análise foi apresentar os valores dos indicadores na malha municipal (Figura 16). Para integrar as informações e compor o indicador de infraestrutura para pecuária (IIP), foi utilizada a média aritmética entre os componentes, conforme expresso na Equação 16.

$$IIP = \frac{\alpha + \delta}{2} \quad (16)$$

⁴⁴ Especialmente no caso do indicador de transporte, uma vez que na região amazônica há concentração de grandes distâncias.

Figura 16. Distribuição espacial do indicador de infraestrutura pecuária (IIP) e dos seus respectivos componentes: transporte e frigoríficos



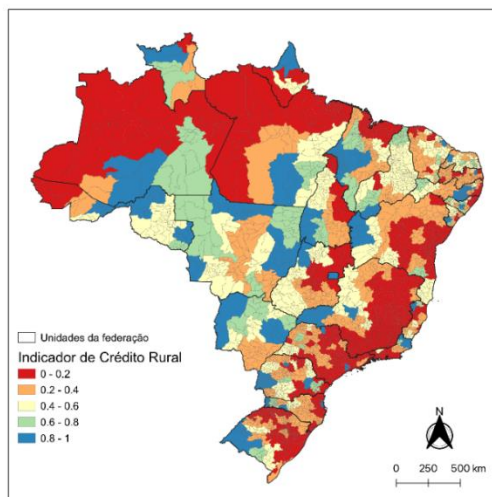
- **Etapa 3.2 - Processamento do indicador de crédito rural (ICR):** Foi estimado com base em dados de execução de crédito rural, entre os anos de 2015 e 2020, disponibilizados pelo Sistema de Operações do Crédito Rural do Banco Central do Brasil (SICOR). Considerou-se os créditos de custeio e de investimento⁴⁵ para pecuária executados por diferentes programas: PRONAF (acessado por pequenos produtores), PRONAMP e Programa ABC⁴⁶ (acessado por médios produtores) e crédito não vinculado a programas específicos (acessado por grandes produtores). A partir dos dados de execução de crédito municipais foi definido um valor médio considerando a escala da microrregião. Em seguida aplicou-se uma normalização da distribuição obtida em cada um dos estados do Brasil. Assim, cada microrregião foi ranqueada conforme a aplicação de crédito segundo o estado (Figura 17). O indicador é uma *proxy* sobre existência ou não de infraestrutura de crédito de determinada microrregião que possa viabilizar a recuperação de pastagens de pequenos, médios e grandes produtores. Foi

⁴⁵ Crédito de custeio destina-se a cobrir despesas normais dos ciclos produtivos, da aquisição de insumos até a fase de colheita e o crédito de investimento para aplicações em bens ou serviços cujo benefício se estenda por vários momentos de produção. Bacen, 2022.

⁴⁶ Atual Renovagro

atribuído o mesmo valor dos indicadores de aplicação de crédito rural para todos os municípios da mesma microrregião. Os maiores valores de CR indicam os municípios que apresentam maior acesso de crédito para pecuária.

Figura 17. Distribuição espacial do indicador de infraestrutura de Crédito Rural (ICR)

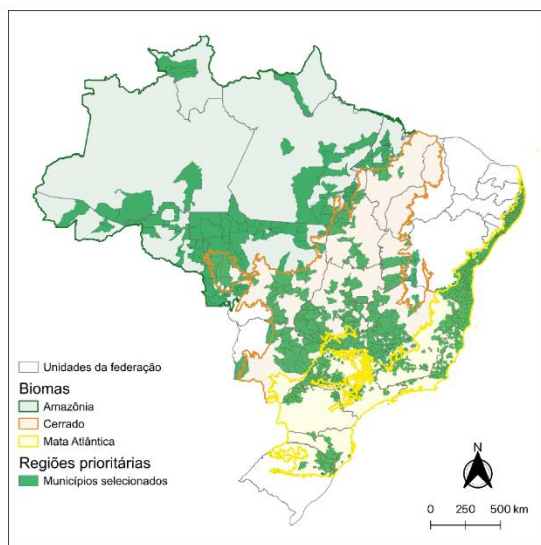


- **Etapa 3.3 - Processamento do indicador normalizado de infraestrutura e crédito rural:** A partir dos componentes de qualidade de infraestrutura pecuária e aplicação de crédito rural foi computado um indicador final, por média aritmética, de todos os componentes normalizados.
- **Etapa 3.4 - Definição das regiões prioritárias:** Por fim, os municípios dos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica foram ranqueados com base no indicador final (IIP+ICR). Quanto maior o indicador final, maior foi o posicionamento dos municípios dentro de cada estado. Aqueles mais bem ranqueados foram selecionados para compor as metas de área e de tamanho de choque de produtividade para simular os efeitos da recuperação de pastagem degradadas via modelagem econômica (TERM-BR).

- **Regiões Prioritárias**

Foram selecionados 1.124 municípios, dos quais 116 estão localizados no bioma Amazônia, 276 no Cerrado e 732 na Mata Atlântica (Figura 18). A área de pastagem a ser recuperada em cada bioma é 8,7 milhões de hectares (Mha) no bioma Amazônia, 11,5 Mha no Cerrado e 6Mha na Mata Atlântica, totalizando 26,3 Mha no Brasil. Isso representa quase 90% da meta de Recuperação de Pastagens Degradadas (RPD) estabelecidas no Plano ABC+ (30Mha).

Figura 18. Regiões Prioritárias para fechamento da lacuna de produtividade na pecuária de corte nos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica



Fonte: Elaboração própria.

A análise da área de RPD por estado indica que 18⁴⁷ dos 27 estados do Brasil, conseguiriam atingir a meta estadual de recuperação de pastagem prevista no Plano ABC (e estimada para cada estado de acordo com a etapa 2 apresentada neste item), isso considerando apenas os municípios prioritários inseridos nos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica.

Dentre os estados da região Nordeste, apenas o estado do Maranhão atinge a meta estadual. Para que a meta fosse atingida nos outros estados da região Nordeste, seriam necessários mais 3,4 Mha de pastagem recuperada, sendo 1,6Mha apenas no estado da Bahia. Os estados do Ceará e Piauí não apresentariam meta de RPD. Isto porque o estado do Ceará está integralmente localizado na Caatinga, bioma que não foi incluído no estudo, enquanto no caso do Piauí, embora parte do seu território esteja dentro do bioma Cerrado, os municípios que possuem área de pastagem dentro de imóveis rurais e com lacuna de produtividade estão localizados no bioma Caatinga. O fator determinante para os estados da Bahia e da Paraíba não atingirem suas metas de RPD estadual é que a maior parte de seus territórios estão localizados no bioma da Caatinga. Para os estados do Rio Grande do Norte e Pernambuco, além da área limitada no bioma da Mata Atlântica, não há lacunas de produtividade suficientes para alcançar as metas de RPD. Por fim, nos estados de Alagoas e Sergipe, o fator determinante para o não alcance das metas foi a hipótese de que metade da área de pastagem de cada propriedade seria utilizada para a recuperação. Além disso, o estado do Rio Grande do Sul também não atingiria a meta estadual de RPD devido à ausência de áreas com lacuna de produtividade e pastagem dentro de imóveis no bioma da Mata Atlântica.

⁴⁷ Rondônia, Acre, Amazonas, Roraima, Pará, Amapá, Tocantins, Maranhão, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná, Santa Catarina, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás e Distrito Federal.

4.2.2 Modelagem de equilíbrio geral computável

Os modelos de Equilíbrio Geral Computáveis (EGC) são uma classe de modelos aplicados, elaborados para representar uma determinada economia, seja em escala global, nacional e/ou regional, fundamentados com base em um conjunto de equações que especificam as relações e o comportamento de agentes econômicos, tais como famílias, governo e setor produtivo (Silva *et al.*, 2017).

De acordo com Gianetti (2023) a calibração desses modelos é feita com base em uma única observação, considerando apenas os aspectos sistemáticos da economia, não abordando, portanto, fenômenos estocásticos (randômicos) nas respostas das variáveis econômicas a estímulos externos. O desenvolvimento empírico desses modelos tem origem na tradição dos modelos de insumo-produto, iniciada por Leontief em 1936.

De modo geral, os modelos EGC demandam uma especificação completa tanto do lado da oferta quanto da demanda, com o objetivo de representar economias de mercado. Buscam encontrar simultaneamente os preços e quantidades de equilíbrio, considerando o fluxo circular da renda, onde a despesa de um agente econômico se torna receita para outro. Isso resulta em um equilíbrio de mercado competitivo, conhecido como equilíbrio *walrasiano*, onde os preços e quantidades se ajustam para evitar excesso de demanda em todos os mercados.

Além disso, esses modelos podem ser estáticos ou dinâmicos, sendo que os estáticos analisam a economia em sua situação inicial e como ela se ajusta a um novo equilíbrio após um choque em uma variável externa (sem considerar a trajetória da economia ou a evolução dos próprios choques), enquanto os dinâmicos consideram acumulação de capital, investimento, variação populacional e produtividade, permitindo análises ao longo do tempo. Eles também podem ser *top-down*, resolvendo o equilíbrio para um território como um todo e distribuindo os resultados regionalmente, ou *bottom-up*, com cada território tendo seu próprio modelo interligado por comércio inter-regional e mercado de fatores. Modelos *bottom-up* são adequados para políticas implementadas de forma heterogênea entre regiões.

Os modelos EGC, portanto, são versáteis para analisar políticas econômicas, permitindo que os pesquisadores personalizem a abordagem teórica, a dinâmica de simulação e o escopo geográfico de acordo com a política em questão. Assim, permitem analisar os impactos de uma política em toda a economia por meio de simulações de cenários, sem perder sua característica territorial, como, por exemplo, as projeções de ganho de produtividade do setor pecuário ao longo do tempo devido a alguma intervenção no setor.

Vale destacar que nos últimos 30 anos os modelos de EGC evoluíram rapidamente graças ao avanço da capacidade computacional. Isso permitiu, por meio de colaborações internacionais, a criação de modelos de comércio globais mais detalhados e complexos e, por consequência, maiores e mais exigentes em termos de dados. Originalmente criados para analisar o comércio internacional, os modelos têm evoluído para incluir módulos de análise ambiental, abordando uso da terra, água e emissões de

GEE. Modelos como o GTAP (*Global Trade Analysis Project*)⁴⁸, EPPA (desenvolvido pelo *Massachusetts Institute of Technology*, MIT, nos Estados Unidos), MIRAGE (desenvolvido pelo CEPII na França) e MAGNET (desenvolvido na Universidade de Wageningen, na Holanda) agora lidam com questões ambientais. No entanto, devido à sua abordagem global, esses modelos oferecem menos detalhes em níveis regionais, tornando-os menos adequados para analisar políticas com impactos sub-regionais em países específicos.

Para mitigar essas limitações dos modelos globais, muitas vezes é preferível recorrer a modelos desenvolvidos especificamente para um país, que ofereçam um nível mais detalhado de informações regionais. Esse é o caso do modelo TERM-BR (*The Enormous Regional Model*), que foi empregado nesta tese para avaliar o impacto socioeconômico e ambiental do aumento da produtividade da pecuária de corte no Brasil.

4.2.2.1 The Enormous Regional Model - TERM-BR15

O modelo TERM-BR foi concebido inicialmente por Ferreira Filho e Horridge (2014), com o propósito de analisar políticas no contexto brasileiro e se destaca por fornecer um elevado grau de detalhamento em termos de informações regionais dentro do país. Mais recentemente o modelo foi calibrado por Gianetti (2023) para ser capaz de retratar a dinâmica da economia brasileira para o ano de 2015⁴⁹ – passando a ser chamado de TERM-BR15, versão adotada neste estudo.

Caracterizado como um modelo dinâmico de EGC, inter-regional, *bottom-up*, o TERM-BR15, permite representar as diferentes Unidades da Federação do Brasil como economias individuais, interligadas por matrizes de comércio de bens, serviços e fatores produtivos. A matriz de fatores produtivos considera apenas o capital e o trabalho, uma vez que a terra não é móvel entre as regiões. A capacidade de dividir a economia em regiões indica a característica central de um modelo inter-regional *bottom-up*. Isso permite a análise de choques de política, que se originam ao nível das regiões individuais.

O modelo TERM-BR15 diferencia 10 tipos distintos de famílias, estratificadas com base em faixas de renda familiar, e categoriza 10 tipos de trabalho, classificados por faixa salarial, em cada região (ver detalhes das classes no Quadro 2 do Apêndice). A desagregação das famílias e do trabalho desempenha um papel crucial no modelo, uma vez que reflete a diferente composição dos setores de atividade em relação ao tipo de trabalho empregado (isto é, se mais ou menos qualificado) e o peso de tipos de bens e serviços na cesta de consumo de cada tipo de família, entre outros fatores relevantes.

⁴⁸ O GTAP, em particular, tornou-se uma referência padrão para análises do comércio global devido à sua sólida base de dados de comércio internacional, que está em constante evolução. Essa base de dados é amplamente utilizada por muitos dos modelos computacionais em escala global atualmente em uso, como o EPPA e o MAGNET.

⁴⁹ Atualizado de 2010 para 2015, considerando que a matriz insumo-produto oficial e mais recente do Brasil é do ano de 2015.

Uma ampla gama de dados oficiais é utilizada no TERM-BR15 para representar a economia brasileira⁵⁰. O modelo é notável por sua representação detalhada, compreendendo 122 setores produtivos e 122 commodities, baseando-se nas informações das Contas Nacionais para o ano base de 2015. O Quadro 1 ilustra os produtos da agropecuária (ver outros produtos no Quadro 4 do apêndice).

Quadro 1 Produtos da agropecuária brasileira

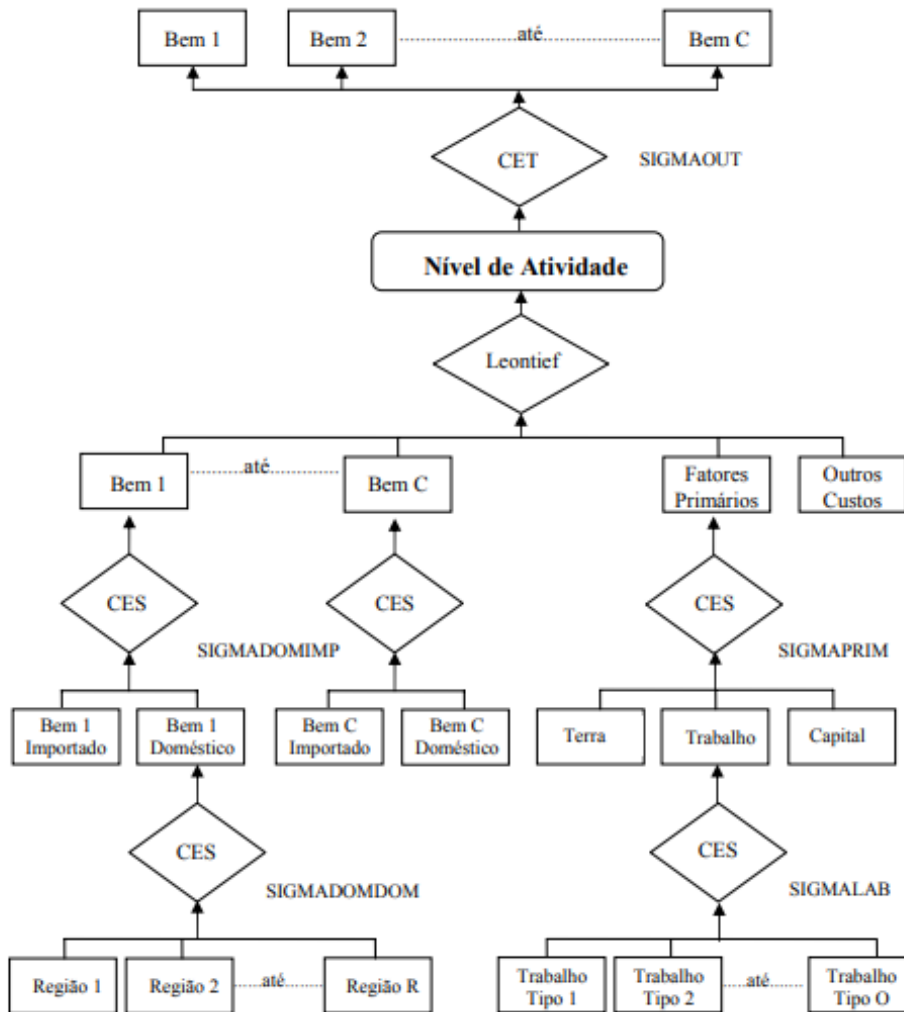
Atividade	Produtos TERM-BR15	PRODUTOS ORIGINAIS DA MIP2015
Agricultura	ArrozTrigOut	Arroz, trigo e outros cereais
Agricultura	MilhoGrao	Milho em grão
Agricultura	AlgodHerb	Algodão herbáceo, outras fibras da lavoura temporária
Agricultura	CanaDeAcucar	Cana-de-açúcar
Agricultura	SojaGrao	Soja em grão
Agricultura	OutPrLavTemp	Outros produtos e serviços da lavoura temporária
Agricultura	Laranja	Laranja
Agricultura	CafeGrao	Café em grão
Agricultura	OutPrLavPerm	Outros produtos da lavoura permanente
Pecuária	BovOutrAnim	Bovinos e outros animais vivos, produtos animais, caça e serviços
Pecuária	LeitVacOuAni	Leite de vaca e de outros animais
Pecuária	Suinos	Suínos
Pecuária	AvesOvos	Aves e ovos
Silvicultura	ExplFlorSilv	Produtos da exploração florestal e da silvicultura
Pecuária	PescaAcq	Pesca e aquicultura (peixe, crustáceos e moluscos)

Fonte: Elaboração própria.

Na estrutura de produção do TERM-BR15, as indústrias e regiões podem decidir como usar insumos intermediários e fatores de produção em uma estrutura hierárquica, como ilustra a Figura 19. No topo superior da estrutura de produção, tem-se que as quantidades de bens e serviços finais em cada região e setor são determinadas por uma função de elasticidade constante de transformação (CET).

⁵⁰ Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), a Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF), a Pesquisa Agrícola Municipal (PAM), a Pesquisa Pecuária Municipal (PPM), o Censo Agropecuário de 2017, além das Contas Nacionais e a Matriz Insumo Produto (MIP) fornecidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Além disso, o modelo incorpora dados do Comex Stat do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, bem como informações da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) do Ministério do Trabalho e Previdência, entre outras fontes.

Figura 19. Estrutura de produção do modelo TERM-BR



Fonte: Fachinello (2008).

No nível de decisão seguinte (de cima para baixo), usa-se uma função de produção a coeficientes fixos (Leontief), para combinar os bens intermediários (domésticos e importados) com fatores primários (capital, trabalho e terra) e impostos. Nesta etapa, por exemplo, o setor pecuário requer insumos intermediários, como sementes de forragem e fertilizantes, além de fatores primários de produção, em uma proporção fixa.

Já no terceiro nível, as empresas determinam a composição de insumos domésticos e importados para a produção de um bem usando uma função Elasticidade Constante de Substituição (CES), com elasticidades de substituição específicas de Armington. Isto é, insumos de diferentes fontes são considerados substitutos imperfeitos entre si. Ainda neste nível, os fatores de produção são combinados usando uma função CES. No último nível, é definida a composição trabalhistas também por meio de uma função CES que combina diferentes tipos de habilidades e as classifica de acordo com os salários regionais, uma *proxy* para as habilidades (10 tipos de trabalho).

Por fim, vale destacar que no TERM-BR15 a demanda final inclui exportações influenciadas por preços e elasticidade de demanda. Por meio da criação de um Sistema Linear de Dispendio, famílias buscam otimizar sua utilidade dentro de limites orçamentários. Outros componentes da demanda, como gastos do governo e investimentos, são determinados com base nas regras do modelo. O modelo também considera aspectos dinâmicos, como a relação entre investimento e estoque de capital, investimento e lucratividade, salário real e oferta de mão de obra regional.

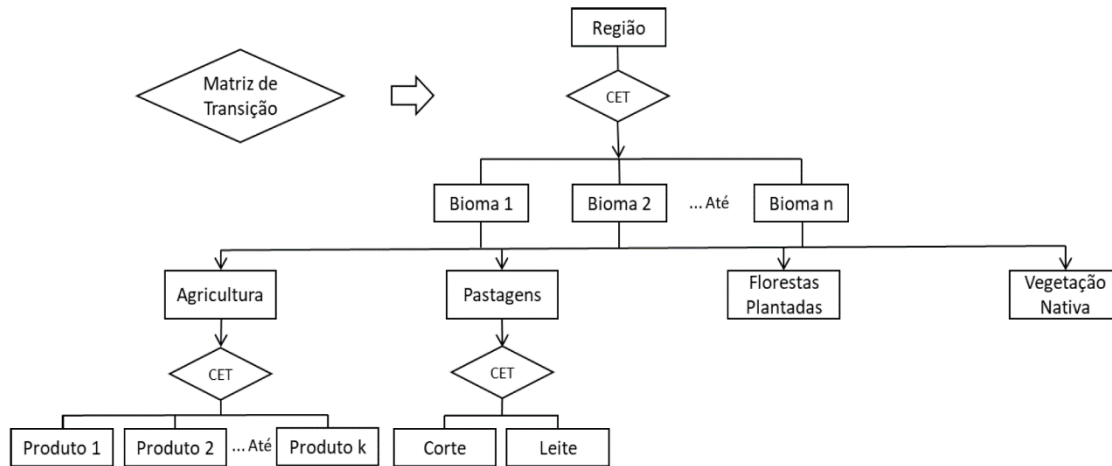
Além da estrutura básica do modelo, o TERM-BR15 conta com um módulo de uso da terra e outro de emissões de GEE, essenciais para a análise proposta nesta tese.

- **O módulo de uso da terra**

No modelo TERMBR15, o módulo de uso da terra é baseado no conceito de matrizes de transição. Na versão mais recente do modelo, utilizado nesta tese, essas matrizes foram aprimoradas por Gianetti (2023) com informações de imagens de satélite que registraram as mudanças no uso da terra entre 2002 e 2010, fornecidas pelo Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE), para cada uma das 27 Unidades Federativas e para os 6 biomas brasileiros⁵¹. As diversas categorias de uso da terra são agrupadas em três principais: Culturas, Pastagens e Florestas (incluindo florestas plantadas), além de uma categoria correspondente à Vegetação Nativa (Figura 20). Os estoques de pastagens, áreas agrícolas e de florestas plantadas foram calibrados com os quantitativos observados em 2015. A informação relativa à Vegetação Nativa é calculada de forma residual após considerar as outras categorias de uso da terra.

A matriz de transição de uso da terra possibilita entender como os diferentes tipos de uso da terra se transformam entre si em um determinado período, entre os bioma e estados (unidade física da terra). Assim, é possível rastrear, por exemplo, o quanto da área de Vegetação Nativa que existia no bioma Amazônico, estado do Amazonas, em 2002, se tornou Pastagem em 2010 (Figura 20).

⁵¹ Amazônia, Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal

Figura 20. Representação esquemática da matriz de transição no uso do solo no modelo TERM-BR15

Fonte: Gianetti (2023). CET: função de elasticidade constante de transformação.

Os preços influenciam as transições de uso da terra, ou seja, o retorno esperado pelas atividades correspondentes. Como exemplo, pode-se notar que a transição de pastagens ou florestas para culturas se acelera com o aumento dos preços relativos dos produtos agrícolas. O modelo ainda é capaz de acomodar projeções externas na mudança do uso da terra para simulação de alguma política, como sobre o nível de desmatamento. Nesta situação, a matriz de transição assegura a consistência das informações, garantindo que o aumento das áreas de pastagem, culturas e silvicultura em um ano esteja de acordo com a área disponível devido ao desmatamento no ano anterior.

As matrizes de transição determinam a quantidade total de terra disponível para cada categoria de uso da terra (Culturas, Pastagem, Florestas e Vegetação Nativa). Uma vez quantificadas, o modelo distribui a terra entre atividades produtivas específicas. Como ilustra a Figura 20, por meio de uma função de elasticidade constante de transformação (*Constant Elasticity of Transformation-CET*), a área de plantio, por exemplo, será alocada entre as nove atividades agrícolas do modelo, considerando os preços relativos dos produtos dessas atividades.

- **O módulo de emissões de gases de efeito estufa (GEE)**

O TERM-BR15 possui duas matrizes principais de emissões que rastreiam todas as emissões na economia. São contabilizadas todas as emissões pelos gases originais e transformadas em equivalentes de CO₂, com base nos coeficientes de aquecimento global potencial para 100 anos (GWP-100) do Quinto Relatório de Avaliação do IPCC - SAR (IPCC, 2014).

A primeira matriz de emissões está relacionada às atividades econômicas (associadas ao nível de atividade de cada setor, como as emissões de CH₄ na pecuária) e ao uso de combustíveis, sendo construída com dados do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) para o ano de 2015 (Gianetti, 2023). O SEEG compreende emissões associadas a diversas categorias, incluindo 28 atividades ligadas à agropecuária, 24 produtos e processos vinculados a 43 tipos distintos de

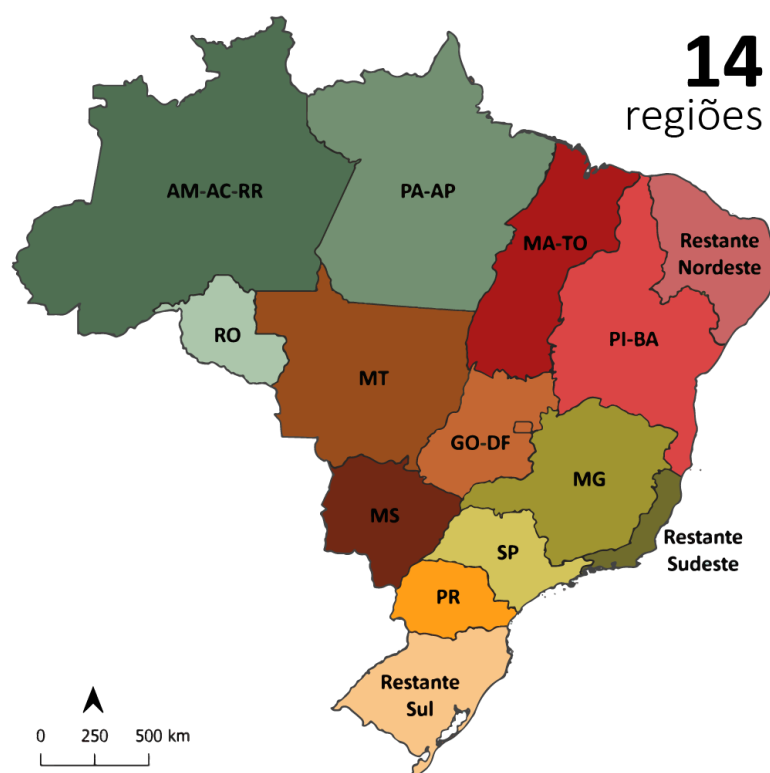
combustíveis, 20 atividades, 9 produtos industriais e 12 fontes de resíduos. Todos esses componentes foram relacionados aos produtos correspondentes da MIP 2015. Quando as fontes de emissões são aplicáveis a mais de um produto, a distribuição é realizada considerando a parcela da matriz de recursos e usos da MIP 2015.

A segunda matriz, por sua vez, contabiliza as emissões geradas pela mudança de uso da terra (associada à matriz de transição de uso da terra discutida acima). Essa matriz, então, identifica o coeficiente de emissões de GEE associado a cada transição de uso da terra, por estado e por bioma. Isso permite uma contabilidade detalhada das emissões nas transições, considerando as especificidades de cada território.

4.2.3 A estratégia de simulação utilizada

Primeiramente, vale destacar que o modelo foi agregado para 14 regiões e 38 produtos para reduzir a complexidade de solução. O detalhamento da agregação regional foi apresentado na Figura 21 e os produtos da indústria e dos serviços foram agrupados como mostrado no Quadro 3 do Apêndice, mantendo agropecuária em seu nível mais detalhado.

Figura 21. Distribuição espacial das regiões agregadas para simulação no TERM-BR15



Fonte: Elaboração própria.

Outro ponto que merece destaque para a definição da estratégia de simulação é que os impactos sobre a economia resultantes do fechamento das lacunas de produtividade da pecuária de corte, via

recuperação de pastagens degradadas, podem ser decompostos em dois efeitos principais: aumento da disponibilidade de terras para a agricultura e florestas ou redução da pressão sobre desmatamento (decorrente da redução da área total de pastagens) e o aumento da produtividade da pecuária de corte. Para esta tese, ambos os efeitos foram tratados nas simulações.

A primeira etapa para realizar a simulação no TERM-BR15 foi criar a linha de base, por meio da utilização das variações observadas de variáveis macroeconômicas a partir de 2015 (PIB, exportações, importações, população etc.), bem como da evolução das áreas de pastagens por região. Essa linha de base⁵² representa o “ponto de referência” para comparar os impactos da simulação de política.

A área de pastagem por região para a linha de base foi elaborada com base nas variações médias de área total de pastagens em três períodos: i) 2016-2020 (histórico); ii) 2021-2025; iii) 2026-2030. Durante o período histórico, a evolução das áreas de pastagens e da produção pecuária, com dados do LAPIG e da Pesquisa Pecuária Anual, respectivamente, foram projetadas. Este procedimento permitiu que o modelo assimilasse indiretamente as mudanças na produtividade pecuária, influenciadas por vários fatores, incluindo investimentos do Plano ABC+. Assim, os efeitos do Plano ABC+ na produtividade foram integrados à linha de base do modelo até 2020. A partir do ano de 2020, a linha de base foi projetada com a produtividade observada até este último ano (2020). Isso é feito para que se possa isolar o efeito da política a ser implementada, ou seja, os efeitos do Plano ABC+ a partir do período histórico.

Após a definição da linha de base, foram incorporados os choques de política, que se traduzem em alterações na produtividade pecuária devido à recuperação de áreas degradadas da meta do Plano ABC+, e dos investimentos para aplicação da tecnologia RPD. Os dados não fazem distinção entre pastagens para a pecuária de corte ou de leite, ou seja, são dados de pastagens totais. No entanto, para efeito das simulações, considerou-se que o incremento de produtividade apenas na pecuária de corte (conforme resultados estimados de *yield gap* no capítulo anterior).

O aumento da intensidade produtiva na pecuária bovina resulta em mudanças na produtividade da terra, tratada indiretamente com a melhoria na qualidade das pastagens. Essas mudanças estão relacionadas a alterações nas taxas de emissão de GEE produto e área, associadas à captura de carbono no solo - um serviço ecossistêmico proporcionado pela RPD. Entretanto, a análise completa do impacto da RPD nas emissões é limitada pela carência de dados sobre fatores como nutrição animal e composição do rebanho bovino.

⁵² Para construção da linha de base, primeiro, é adotado um período histórico para reproduzir o comportamento da economia brasileira entre 2015 e 2020, a partir dos dados do modelo que se inicia em 2015 e dos dados observados. A partir daí inicia-se a etapa de projeção, ou seja, o comportamento das variáveis por estado é projetado para compreender o que vai acontecer entre 2021 e 2030, por meio de hipóteses particulares sobre o futuro da economia.

Por fim, por meio da simulação do choque aplicado no modelo é possível estimar quais foram os efeitos socioeconômicos e ambientais para a economia brasileira resultantes da recuperação de pastagens em áreas prioritárias para fechamento da lacuna de produtividade da pecuária de corte.

4.2.3.1 Elaboração do choque de produtividade de pecuária bovina de corte

A estimativa de lacuna de produtividade da pecuária de corte a pasto foi feita mediante modelagem biofísica, conforme discutido no capítulo anterior. Para esta tese, a ampliação da produtividade nas áreas prioritárias foi simulada via recuperação de pastagens degradadas, que por sua vez propicia aumento da capacidade de suporte das forrageiras, melhorias em indicadores zootécnicos e outros benefícios que podem aumentar a produtividade da pecuária bovina de corte (produção de quilos de equivalente carcaça por unidade de área).

A partir da seleção dos 1.124 municípios prioritários para fechamento da lacuna de produtividade da pecuária de corte foram elaborados os choques de produtividade para cada região de simulação do TERM-BR15. A estratégia foi estimar um fator multiplicador (F_m) para definição do choque de produtividade em cada município m , conforme equação a seguir.

$$F_m = \left(\frac{(P_{tm} * A_{rm}) + (P_{rm} * A_{nr})}{(A_{tm} * P_{rm})} \right) \quad (17)$$

$$P_{tm} = P_{rm} + P_{ygm}$$

Em que P_t é a produtividade total da área recuperada, obtida pela soma da P_r a produtividade real (atualmente observada) e P_{yg} a produtividade do Yield Gap, A_r a área de pasto recuperada, A_{nr} a área de pasto não recuperada e A_t a área total de pasto no município.

O choque de produtividade regional foi obtido com a soma dos choques municipais ponderada pela representatividade do município na área de pastagem regional. Na prática, calculou-se a produção regional total com o fechamento da lacuna de produtividade e comparou-se com a produção regional inicial.

$$P_{sr} = \left(\left(\sum_{m=1}^n \frac{A_{tm} * P_{rm} * F_m}{A_{tm} * P_{rm}} \right) - 1 \right) * 100 \quad (18)$$

A Tabela 5 apresenta a meta de área de RPD para 2030 para cada região, estimada com base em municípios prioritários dos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica e o choque de produtividade necessário, anualmente, a partir de 2021, para o alcance dessa meta.

Tabela 5. Pastagens degradadas, meta de RPD para 2030 e choque de produtividade a partir de 2021

Regiões TERM	Pastagens Degradadas em 2020 (Mha)	Pastagens Degradadas em 2020 (%)	Meta de RPD 2030 (Mha) – regiões prioritárias	Choque de Produtividade Médio Anual (%)
Rondonia	4,7	4,6	1,4	1,8
AmazACRR	1,3	1,3	0,5	2,7
ParaAP	8,3	8,1	2,5	1,5
PiBa	12,5	12,2	1,7	3,8
MaTo	7,0	6,8	2,2	0,8
RNordeste	6,9	6,7	0,5	1,7
MinasG	13,9	13,6	4,1	1,8
SaoPaulo	3,6	3,5	1,1	1,5
RSudeste	2,5	2,4	0,5	2,6
Parana	1,5	1,4	0,4	0,7
RSul	4,4	4,3	0,5	0,5
MtGrSul	12,0	11,7	3,6	3,0
MtGrosso	15,2	14,7	4,5	1,3
GoiasDF	9,0	8,7	2,7	1,1
Brasil	102,8	100,0	26,3	1,7

Fonte: Elaboração própria.

4.2.3.2 Investimentos necessários para a recuperação de pastagens degradadas

Para esta tese, os choques de investimento foram preparados com base na calibração de Gianetti (2023) que utilizou dados do Programa ABC (atual Renovagro), coletados no Banco Central do Brasil⁵³. Para cada região, foram utilizados os valores médios de investimento por hectare para a recuperação de pastagens degradadas, a preços reais de 2015.

A ampliação total de investimentos foi calculada multiplicando as metas de RPD de cada região para 2030 pelo investimento médio por hectare. Dividindo essa ampliação pelo investimento original em atividades pecuárias, como definido na calibração inicial do TERM-BR, obteve-se o aumento percentual de investimentos por região de simulação, que está detalhado na Tabela 6. Esse parâmetro é atualizado anualmente, refletindo as variações ocorridas no estoque de investimentos ao longo do tempo.

⁵³ <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/micrrural>

Tabela 6. Investimento médio do ABC+ (reais por hectare) e choque de investimento de 2021 na atividade pecuária

Região TERM	Recurso total médio do ABC por ha (2015- 2021)	Investimento médio - RPD por ha (2015-2021)	% de investimento nos recursos do ABC	Choque de investimento médio anual (%)
Rondonia	2.715	361	13,3	9,2
AmazACRR	2.586	342	13,2	4,6
ParaAP	2.308	170	7,4	3,2
PiBa	2.433	325	13,4	2,9
MaTo	2.461	310	12,6	4,3
RNordeste	3.363	593	17,6	6,6
MinasG	2.629	153	5,8	2,6
SaoPaulo	3.110	231	7,4	5,7
RSudeste	3.482	686	19,7	4,7
Parana	3.406	409	12,0	2,8
RSul	3.076	280	9,1	3,4
MtGrSul	1.502	51	3,4	2,2
MtGrosso	2.529	109	4,3	3,5
GoiasDF	2.262	73	3,2	1,5
Brasil	2.415	240	9,9	3,9

Fonte: Elaboração própria.

4.2.3.3 Elasticidade de produtividade-emissões de GEE na pecuária bovina

O benefício da Recuperação de Pastagens Degradadas (RPD) na ampliação da fixação de carbono no solo (serviço ecossistêmico de regulação) é incorporado por meio de elasticidade de produtividade-emissões de GEE na pecuária bovina. Para obtenção dessa elasticidade são utilizadas duas informações: i) a ampliação média de produtividade no fechamento da lacuna de produção regional, apresentado na seção 0; e ii) efeito marginal médio anual da RPD na fixação de carbono no solo (mitigação de emissões de GEE), obtida de Gianetti (2023).

Gianetti (2023) utilizou o parâmetro de fixação de carbono no solo obtido por Sanderman *et al.* (2020), que projetaram, com base em coeficientes técnicos do IPCC (2019), a recuperação de todas as pastagens do Brasil. O autor filtrou as áreas de pastagens caracterizadas pelo LAPIG e as informações espaciais de Woolf *et al.* (2020). Então, calculou a variação do estoque de carbono no solo (SOC) nas pastagens linearmente para um período de 20 anos. Comparando essa variação às emissões do módulo de emissões, obteve-se o impacto marginal médio anual de mitigação de emissões de GEE da RPD.

Tabela 7. Efeito marginal médio anual da RPD na mitigação de emissões de GEE (%)

Região TERM	Bovinocultura de Corte	Bovinocultura de Leite
Rondonia	0,5	1,1
AmazACRR	0,3	1,1
ParaAP	0,7	3,5
PiBa	11,2	19,5
MaTo	13,7	28,0
RNordeste	16,0	9,8
MinasG	11,0	3,1
SaoPaulo	2,0	1,5
RSudeste	25,7	9,5
Parana	2,6	1,0
RSul	13,4	8,9
MtGrSul	4,7	34,1
MtGrosso	3,9	21,0
GoiasDF	2,8	2,5
Brasil	7,6	13,7

Fonte: Elaboração própria.

Por meio da relação entre a variação da produtividade com o fechamento da lacuna de produção e a mitigação das emissões de GEE dada fixação de carbono no solo, obtém-se a elasticidade da produtividade-mitigação de GEE da pecuária bovina, conforme a Tabela 8, já agregada conforme as regiões de análise do modelo.

Deste modo, a elasticidade da produtividade-mitigação de GEE da pecuária bovina representa o percentual de mitigação de emissões de GEE, dado pela fixação de carbono no solo, em relação à mudança percentual na produtividade. Assim, por exemplo, um aumento de 1% da produtividade da pecuária bovina de corte em Rondônia resultaria em mitigação de 0,004% nas emissões de GEE dessa atividade; já na pecuária de leite, a mitigação seria de 0,01% nas emissões da atividade. Pode-se observar a baixa elasticidade em todo território nacional, em especial na região Norte. Isso quer dizer que quanto menor a elasticidade, a mitigação das emissões responde menos ao aumento de produtividade. Esse resultado está relacionado às características biofísicas e edafoclimáticas do bioma, que determinam a capacidade das pastagens em fixar, adicionalmente, carbono no solo, em relação a condições médias atuais do território brasileiro (na Amazônia essa capacidade é inferior à observada, por exemplo, no bioma Cerrado).

Tabela 8. Elasticidade produtividade-mitigação para bovinocultura de corte e leite

Região TERM*	Bovinos e Outros Animais	Leite, Vacas e Outros animais
Rondonia	-0,004	-0,01
AmazACRR	-0,002	-0,006
ParaAP	-0,008	-0,038
PiBa	-0,04	-0,069
MaTo	-0,177	-0,372
RNordeste	-0,146	-0,076
MinasG	-0,113	-0,032
SaoPaulo	-0,024	-0,019
RSudeste	-0,147	-0,055
Parana	-0,038	-0,015
RSul	-0,115	-0,072
MtGrSul	-0,025	-0,182
MtGrosso	-0,071	-0,38
GoiásDF	-0,038	-0,034

Fonte: Elaboração própria.

4.3 Resultados e Discussão

Nesta seção são apresentados os resultados de simulação do modelo de Equilíbrio Geral Computável TERM-BR15, para o cenário de recuperação de 26,3 Mha de pastagens degradadas no Brasil entre 2020 e 2030, contribuindo para o atingimento das metas do Plano ABC +.

Os resultados estão organizados nas dimensões socioeconômica e ambiental, que por sua vez apresentam os impactos para os níveis nacional e regional (14 regiões de simulação do modelo).

4.3.1 Impactos socioeconômicos

4.3.1.1 Impactos sobre os agregados macroeconômicos

○ Nível Nacional

A avaliação mostrou que o fechamento das lacunas de produtividade da pecuária bovina de corte no Brasil, considerando os biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica (como visto no capítulo 3), proporcionaria crescimento econômico e ampliação do consumo das famílias brasileiras. Esses efeitos ocorreriam em virtude do incremento de produtividade e dos investimentos correspondentes para a recuperação das pastagens, conforme explicado anteriormente.

A Tabela 9 apresenta, em valores percentuais, o impacto acumulado sobre as principais variáveis macroeconômicas do Brasil em relação à linha de base de 2030 – formato utilizado em todas as análises subsequentes.

Tabela 9. Resultados do modelo. Impacto macroeconômico. Variação % acumulada em 2030

Agregados Macroeconômicos (Brasil)	Impacto (%) (var. em relação à linha base)
PIB Real	0,54
Investimento Real	1,77
Índice Preços dos Alimentos (real)	-0,96
Salário Real	0,93
Consumo das famílias	0,74
Exportações (volume)	-1,36
Importações (volume)	1,63

Fonte: Elaboração própria.

O aumento de produtividade teve um importante efeito geral de aumento da renda interna do país, que pode ser observado mediante a elevação do consumo real das famílias, bem como do seu Produto Interno Bruto (PIB real). Neste estudo, a aplicação do modelo TERM-BR mostrou que aumento de produtividade na pecuária de corte impactaria em 0,54% o PIB real acumulado em 2030 em relação à linha de base (Tabela 9). Esse resultado econômico foi maior (0,73% superior) do que o estimado por Ferreira Filho e Horridge (2016) no cenário onde avaliaram, os efeitos da recuperação de 15Mha de pastagens degradadas no Brasil, simultaneamente ao cumprimento do Código Florestal Brasileiro (Lei 12.651/2012). Por outro lado, se assemelha, em valores percentuais, aos encontrados pelos estudos recentes de Stocco *et al.* (2020), Ferreira Filho (2023) e Gianetti (2023), também relacionados com avaliação de impactos socioeconômicos e ambientais da elevação da produtividade da pecuária no Brasil como consequência da recuperação de pastagens.

No entanto, é importante salientar que a presente tese se difere dos três últimos estudos citados, especialmente no que se refere à intensidade do choque de produtividade e ao tamanho da área de pasto recuperada entre as regiões brasileiras - o que interfere na interpretação e na comparação do impacto sobre o PIB e outras variáveis. No caso de Stocco *et al.* (2020), o ganho de 0,43% no PIB real (0,11 pontos percentuais menor do que nesta tese) decorre do fechamento do hiato de produtividade em uma área 66Mha da pecuária de corte no Brasil. Apesar da área analisada pelos autores ser mais que o dobro da área considerada desta tese (23,3Mha), os autores avaliaram os efeitos do fechamento de apenas 50% do hiato de produtividade. Ainda, o choque de produtividade na pecuária de corte foi menor no caso de Stocco *et al.* (2020), e estimado considerando taxa de lotação animal e uma variável de aptidão do meio físico gerada voltada a culturas anuais e não especificamente a pastagens.

No caso do trabalho de Ferreira Filho (2023), o PIB real brasileiro crescerá 0,31% (0,23 p.p. menor do que nesta tese) em relação a linha de base, devido à recuperação de 26Mha pastagens degradadas durante o primeiro ciclo do Plano ABC (2010-2020). Já Gianetti (2023) observou um aumento de 0,41% do PIB real (0,13 p.p. menor do que nesta tese) com a recuperação de 13Mha de

pastos degradados (menos que a metade da área desta tese). Estes dois últimos autores consideraram tanto um choque de produtividade na pecuária de corte quanto na de leite, estimada com base no efeito marginal da RPD e na tendência de recuperação das regiões brasileiras observada a partir do levantamento da qualidade das pastagens desenvolvido pelo Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG).

É possível também observar que o fechamento das lacunas de produtividade da pecuária propiciaria um retorno significativo sobre o PIB, se comparado aos resultados observados em estudos que avaliam os efeitos de outras políticas públicas setoriais no Brasil. Santos e Ferreira Filho (2017), por exemplo, revelaram que um aumento na produção e no uso de etanol e biodiesel, conforme projeções do Plano Nacional de Energia de 2030, elevaria em 0,033% o PIB, cerca de 0,51 p.p. a menos do que a RPD do ABC+. Por sua vez, Silva e Ferreira Filho (2018) mostraram um aumento de 0,31% do PIB real brasileiro em decorrência dos programas de transferência de renda Bolsa Família e Benefício de Prestação Continuada (BPC), caso fossem financiados com recurso externo no período de 2005 a 2012. Já análises relacionadas ao crédito rural no Brasil realizadas por Assunção e Souza (2018) e Borges e Parré (2018) demonstraram, respectivamente, um aumento de em 0,17% (devido ao incremento em 1% no volume de crédito) e 0,2% (devido a todo crédito utilizado entre 1999 e 2018) sobre o PIB do setor agrícola.

Ainda analisando os efeitos da RPD sobre variáveis macroeconômicas, os resultados da modelagem apontaram que os investimentos para o incremento da produtividade das pastagens (como aquisição de máquinas, equipamentos, tratores, colheitadeiras, armazéns e construção de depósitos, silos, galpões, e outros bens semelhantes), bem como os multiplicadores de investimento⁵⁴, somariam em 2030, 42 bilhões de reais a preços de 2023. Ou seja, comparando os investimentos com as ampliações no PIB real, a política apresentaria retorno social de aproximadamente quatro vezes para cada real investido, descontando-se já os bens e serviços de custeio usados para a recuperação de pastagens, que são consumo intermediário para a produção e que, portanto, reduzem o PIB. Assim, os ganhos apresentados referem-se ao retorno puro dos bens e serviços de investimento usados no processo de RPD, bem como do progresso tecnológico trazido pela tecnologia em áreas com lacunas de produtividade.

A elevação da produtividade da pecuária de corte tem impactos sobre a oferta de alimentos na economia, a qual pode ser observada de duas maneiras, conforme Ferreira Filho (2023). A primeira é quando os incrementos de produtividade são repassados para toda a cadeia de valor da pecuária via redução dos preços de seus produtos. Essa é uma forma mais direta e ocorre porque uma elevação da produtividade pecuária resultaria em um crescimento na produção do setor, tornando possível produzir a mesma quantidade de produto com menor uso de recursos produtivos, ou, o que é equivalente, produzir

⁵⁴ Deve-se notar que o efeito agregado no investimento tem os efeitos do RPD, mais os multiplicadores de investimento. Uma vez que o investimento agregado permaneceu calculado endogenamente.

mais produtos com a mesma quantidade de recursos. Isso, por sua vez, estimularia as demais atividades relacionadas à produção, tais como os setores de insumos, processamento e distribuição, com efeitos de equilíbrio geral sobre o nível desta atividade econômica. Assim, com uma maior disponibilidade de produtos da pecuária bovina ocorreria uma redução dos seus preços, resultando em ganhos de competitividade também nas demais cadeias. A segunda maneira pelo qual esse aumento de produtividade impactaria a oferta de alimentos, mais complexa, é via liberação de fatores de produção (terra, trabalho e capital) para outros setores produtivos da economia, os quais poderiam se expandir mais facilmente. Esse é um efeito de equilíbrio geral e apresenta importantes consequências para a análise dos impactos ambientais da política avaliada, como o apresentado por Tanure *et al.* (2021) no âmbito de políticas para adaptação e mitigação das mudanças climáticas.

Assim, os resultados do modelo aplicado mostram que com o aumento da produtividade pecuária o índice de preços de alimentos apresentaria uma queda de 0,96% em termos reais. São contabilizados neste índice os produtos agrícolas primários e os alimentos deles derivados. Além disso, com o aumento da atividade econômica, haveria uma ampliação do salário real das famílias de 0,93%, acumulados em 2030, em relação à linha de base (Tabela 9). Deste modo, com o aumento do poder de compra (salário real) e diminuição do preço relativo dos produtos, as famílias ampliariam seu consumo real em 0,74% em relação à linha de base em 2030, isto é, entre 42 bilhões de reais de 2023. Na literatura mais recente, Gianetti (2023) também encontrou um aumento no consumo real das famílias devido a RPD, embora menor do que o observado nesta tese (0,53%) é proporcionalmente maior, em razão da recuperação de uma área de pastagens menor adotada pelo autor; enquanto Stocco *et al.* (2020) encontraram uma redução de apenas 0,05% (ambos em relação a linha de base em 2030).

Por fim, o aumento observado na absorção doméstica, determinada pelo crescimento da renda interna, é acompanhado de uma valorização cambial real, com correspondente ganhos nos termos de troca do comércio externo. Deste modo, observa-se uma queda das exportações agregadas do país (Tabela 9), bem como uma elevação das importações. No entanto, como será apresentado a seguir, as exportações relacionadas à pecuária de corte (carne bovina) aumentariam significativamente (19% em relação à linha de base, acumulados em 2030), assim como alguns produtos agrícolas, como a soja.

○ Nível Regional

Quando os impactos do fechamento das lacunas de produtividade da pecuária de corte são analisados regionalmente, observa-se que para todas as 14 regiões de simulação do TERM-BR o PIB real crescerá e o consumo real das famílias também, exceto para a região do Maranhão-Tocantins (Figura 22 e Figura 23).

Com o aumento de produtividade nos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica, os estados do Mato Grosso do Sul, Rondônia e Mato Grosso apresentaram as maiores elevações dos PIB regionais, na ordem de 2,49%, 2,48% e 2,09%, respectivamente, em relação à linha de base em 2030. Isso revela que o incremento de produtividade via recuperação de pastagens teve, para esses estados, importância

relativa maior do que nos demais. Isso ocorre porque nestas regiões a pecuária bovina, além de possuir maiores lacunas para a elevação na produtividade, apresenta uma participação relativa mais expressiva nas respectivas economias - representando 6,7%, 4,7% e 4,3% das produções regionais do RO, MT e MS, respectivamente, em 2015 (Tabela 10).

Assim, é possível observar que o choque de produtividade dado no setor pecuário mostrou capacidade de proporcionar convergência de renda entre as regiões brasileiras, isto é, economias menos desenvolvidas apresentariam maior crescimento no PIB real do que economias mais diversificadas e menos dependentes da pecuária na formação da sua renda, como é o caso dos estados da região Sudeste, em especial o estado de São Paulo, contribuindo para maior equidade no PIB regional.

Figura 22. Resultados do modelo. Impacto no PIB real regional. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 10. Parcelas de produção regional da agropecuária e indústria de carnes em 2015

Parcelas de Produção Regional	Agric.	Milho Grão	Soja Grão	Restante da agricultura	Pec.	Pec. Bovina	BovOutr Anim	LeitVac OuAni	Restante da pecuária	Carne	Sub-Total	Outras
RO	4,2	0,5	1,1	2,6	7,0	6,7	6,0	0,7	0,3	4,5	15,7	84,3
AM-AC-RR	2,6	0,1	0,1	2,4	1,9	1,2	1,1	0,1	0,7	0,7	5,2	94,8
PA-AP	5,3	0,2	0,5	4,6	4,4	2,8	2,6	0,2	1,6	1,5	11,2	88,8
PI-BA	4,8	0,3	1,5	3,0	1,9	1,4	1,2	0,2	0,5	1,0	7,7	92,3
MA-TO	5,9	0,6	3,0	2,3	4,2	3,4	3,1	0,3	0,8	1,5	11,6	88,4
Restante Nordeste	1,4	0,1	0,0	1,3	1,7	1,1	0,8	0,3	0,6	1,1	4,2	95,8
MG	3,6	0,3	0,4	2,9	1,8	1,4	0,7	0,7	0,4	1,9	7,3	92,7
SP	1,5	0,1	0,1	1,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1	0,9	2,6	97,4
Restante Sudeste	0,5	0,0	0,0	0,5	0,4	0,2	0,1	0,1	0,2	0,5	1,4	98,6
PR	5,7	0,7	2,7	2,3	1,8	0,8	0,4	0,4	1,0	5,8	13,3	86,7
Restante Sul	4,3	0,3	1,8	2,2	1,9	1,1	0,6	0,5	0,8	4,3	10,5	89,5
MS	10,5	2,0	5,3	3,2	5,0	4,3	4,1	0,2	0,7	3,1	18,6	81,4
MT	23,4	3,0	15,4	5,0	5,5	4,7	4,5	0,2	0,8	6,2	35,1	64,9
GO-DF	4,5	0,7	1,9	1,9	2,1	1,7	1,2	0,5	0,4	1,0	7,6	92,4

Fonte: Elaboração própria.

O consumo real das famílias apresentou distribuição regional relativamente semelhante à do PIB real, no entanto, além de apresentar menores variações percentuais, observa-se uma queda na região que envolve os estados do Maranhão e Tocantins. Nas regiões no Norte e Nordeste, que possuem maior dependência de trabalho menos qualificado, o crescimento do consumo seria menor do que na região Sul, por exemplo. Isso acontece porque o consumo não é determinado apenas pelos preços da cesta, mas também pela variação da renda familiar. O comportamento do consumo entre as categorias de renda familiar será explicado com maiores detalhes no item 2.1.3.

Figura 23. Resultados do modelo. Impacto no consumo real das famílias regional. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com a Figura 23, Rondônia teria o maior incremento no consumo real das famílias, de 1,92% em relação à linha de base em 2030, seguida pelo Restante do Sul, Paraná e Piauí-Bahia, com incrementos de 1,41%, 1,21% e 1,08, respectivamente. No caso do Mato Grosso, onde observa-se significativa elevação no PIB, o impacto sobre o consumo real seria menor, de 0,26%.

Diversos autores têm evidenciado na literatura que, a depender das características dos choques (e.g., de produtividade ou investimento), os resultados dos cenários de aplicação da política podem ser variados sobre as classes de famílias, especialmente considerando as especificidades dos setores econômicos e regiões em que os choques são aplicados (Gianetti, 2023; Ferreira Filho, 2023; Tanure *et al.*, 2021; Diniz, 2019; Santos; Ferreira Filho, 2017). Neste aspecto, pode-se notar pelos resultados deste trabalho que apesar da elevação da produtividade da pecuária de corte apresentar potencial em contribuir na direção da maior equidade no PIB real entre as regiões brasileiras, este não traria benefícios na mesma proporção sobre o consumo real das famílias. Merece destaque a região do Maranhão-Tocantins, onde o consumo decairia, e as regiões Centro-Oeste e Nordeste do Brasil, onde o consumo cresce em pequena medida.

4.3.1.2 Impactos sobre a produção e exportação dos setores de atividade econômica

○ Nível Nacional

A elevação da produtividade da pecuária de corte proporcionada pela recuperação de pastagens traria um aumento adicional significativo na produção da mesma, ou seja, cerca de 18,14% em relação à linha de base em 2030 (Tabela 11). A pecuária leiteira também crescerá, mas em magnitude inferior (1,14%) (será explicado no próximo item), uma vez que, como dito anteriormente, o choque de produtividade foi dado apenas na pecuária bovina de corte neste trabalho.

Com isso, observa-se um crescimento de 9,15% da indústria de abate e processamento de carnes (Carnes), em relação à linha de base em 2030, motivado pelo aumento da disponibilidade de matérias-primas para este setor e pela redução de seus preços relativos (discutido no item 2.1.3). Além disso, as demais cadeias de produção animal também teriam ganhos de competitividade, com o aumento de produção de suínos (5,23%) e aves (AvesOvos, 3,51%). Por outro lado, seria observada uma diminuição da atividade de produção de outros produtos agroindustriais em resposta ao maior uso de fatores de produção nas cadeias de produção de carne.

Tabela 11. Impacto na produção. Variação % acumulada em 2030

Classes de Atividade	Setores de Atividade	Impacto na Produção (var. em relação à linha base)
Agricultura	ArrozTrigOut	0,10
	MilhoGrao	0,00
	AlgodHerb	-0,31
	CanaDeAcucar	0,34
	SojaGrao	0,31
	OutPrLavTemp	-0,31
	Laranja	-0,32
	CafeGrao	0,36
	OutPrLavPerm	-0,15
Pecuária	BovOutrAnim	18,14
	LeitVacOuAni	1,14
	Suinos	5,23
	AvesOvos	3,51
	PescaAcq	-0,20
Extrativa	ExplFlorSilv	-1,50
	Mineracao	-0,85
Indústria	Carnes	9,15
	OutAliment	-0,59
	OutAgrindus	-2,56
	Etanol	0,62

Fonte: Elaboração própria.

No que se refere aos setores de produção agrícola, os impactos estimados pelo modelo foram irrísórios ou, em alguns casos, negativos, em relação à linha de base em 2030 (Tabela 11). Tais resultados são fruto da reorganização da produção, dados os impactos nos preços relativos e na rentabilidade dos produtos, que estão explorados em termos regionais no próximo item.

Por sua vez, a ampliação da produtividade da pecuária de corte culminaria em ganhos nos termos de troca do comércio externo. Com o crescimento da renda doméstica e valorização cambial, as exportações agregadas seriam reduzidas, enquanto as importações cresceriam. As exportações relacionadas à pecuária de corte, contudo, aumentariam significativamente, em especial, de carnes (9,15% em relação à linha de base acumulados em 2030) (Tabela 12). Crescimento este também

observado por Ferreira Filho (2023) e Gianetti (2023), que observaram que o aumento da produtividade da pecuária de corte e leite levou, respectivamente, ao aumento em 14% e 32,3% das exportações de carnes do setor. Já o crescimento das exportações de bovinos vivos, nesta tese, foi estimado em 18,14%, porém esta categoria é pouco representativa na produção total do setor (era apenas 1% em 2020).

Vale frisar que o aumento das exportações de carnes, mesmo na existência de valorização cambial, decorre do repasse de parte dos ganhos da pecuária para os setores econômicos intrínsecos a ela (isto é, o setor de produção de carnes), uma vez que o choque de produtividade é dado no setor primário. Deste modo, uma queda nas exportações de suínos (-9,49%) e aves vivas (AvesOvos, -8,29%) (Tabela 12) são observados em função da elevação do seu consumo intermediário (uso de matérias-primas), resultante dos ganhos na indústria de abate e processamento de carnes, e do aumento do consumo interno. Vale observar que tais setores exportam um volume *in natura* pouco expressivo.

As mudanças nas exportações relacionadas às cadeias de produção agrícolas resultam de um balanço dos impactos na produção e no consumo interno do país (Tabela 12).

Tabela 12. Resultados do modelo. Impacto na exportação. Variação % acumulada em 2030

Classes de Atividade	Setores de Atividade	Exportação (var. em relação à linha base)
Agrícola	ArrozTrigOut	0,05
	MilhoGrao	0,05
	AlgodHerb	1,7
	CanaDeAcucar	0
	SojaGrao	0,47
	OutPrLavTemp	-0,45
	Laranja	-1,05
	CafeGrao	0,49
	OutPrLavPerm	-0,86
Pecuária	BovOutrAnim	164,31
	LeitVacOuAni	0
	Suinos	-9,49
	AvesOvos	-8,29
	PescaAcq	-7,27
Extrativa	ExplFlorSilv	0,74
	Mineracao	-4,69
Indústria	Carnes	19,3
	OutAliment	-4,98
	OutAgrindus	-6,69
	Etanol	-3,49

Fonte: Elaboração própria.

A ampliação na produção de soja, ainda que tímida (0,31%) (Tabela 11), permitiria crescimento das exportações deste produto de 0,47% em relação à linha de base em 2030. Como a soja teria mais de 70% de sua produção exportada em 2030 e representa um importante produto na pauta de exportações no Brasil, observa-se que o resultado deste setor sustentou a ampliação de exportações agregadas.

○ Nível Regional

Como se pode verificar na Tabela 13, os efeitos regionais na produção de bovinos de corte são semelhantes às magnitudes dos choques de produtividade aplicados na simulação, vistos na Tabela 5.

Os impactos regionais na produção da pecuária leiteira são heterogêneos. Em regiões em que o setor é bastante relevante, como é o caso de MG, PR e Restante do Sul (maiores produtores de leite do país), o incremento da produtividade na pecuária de corte possibilitaria a liberação de áreas de pasto desta atividade para a de leite, propiciando aumento de produção desta última (Tabela 13). Por outro lado, em outras regiões onde a produção da pecuária leiteira é muito pequena em relação à de corte, nota-se que o setor perderia produção, especialmente, MS, PI-BA e AM-AC-RR. Nestas regiões, a pecuária leiteira liberaria área para a pecuária de corte devido à competição por recursos entre as duas atividades, principalmente para o fator primário terra.

Tabela 13. Resultados do modelo. Impacto na produção regional. Produtos selecionados. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030

Regiões	Impacto na Produção (var. em relação à linha base)				
	MilhoGrao	SojaGrao	BovOutrAnim	LeitVacOuAni	Carnes
RO	0,1	-0,2	19,6	-4,3	8,4
AM-AC-RR	-1,5	-1,5	31,2	-8,2	1,0
PA-AP	0,1	0,3	15,5	-1,5	3,4
PI-BA	-0,4	-0,4	47,5	-8,6	0,5
MA-TO	0,3	0,4	6,5	3,1	-0,5
Restante Nordeste	0,0	0,2	18,7	-1,0	-2,2
MG	0,2	0,5	18,1	0,6	5,6
SP	-0,2	0,1	15,5	0,1	11,2
Restante Sudeste	-0,2	0,0	30,8	-6,5	10,2
PR	-0,2	0,2	6,2	3,6	10,7
Restante Sul	0,0	0,4	3,8	5,2	11,9
MS	-0,8	-0,6	35,6	-8,6	10,8
MT	0,2	0,5	12,7	0,6	9,2
GO-DF	0,6	0,9	10,3	1,9	-4,7

Fonte: Elaboração própria.

Os impactos nas atividades agrícolas, como soja e milho, seriam relativamente pequenos (Tabela 13), pois regiões com maior variação percentual nessas atividades, como o AM-AC-RR, possuem pequena produção de soja em termos absolutos. Os efeitos sistemáticos da RPD sobre os preços

relativos na agropecuária e sobre a disponibilidade dos fatores de produção motivam esses impactos na produção agrícola.

Como evidenciado nos impactos apresentados em nível nacional, o ganho de competitividade na cadeia da carne proporcionaria, regionalmente, um importante crescimento nas exportações de carnes processadas e de animais vivos. Assim, MS, Restante do Sudeste e RO alcançariam os maiores incrementos de exportações de carnes, na ordem de 28,8%, 26,7% e 25,8%, em relação à linha de base em 2030, respectivamente (Tabela 14). Esses impactos regionais estão relacionados com as variações na produção, apresentados anteriormente. No caso das exportações de animais vivos, os maiores aumentos seriam observados nas regiões do PI-BA e no MS (295% e 249%, respectivamente, ambos em relação à linha de base em 2030). Contudo, como essas regiões apresentam pequena representatividade da produção de bovinos, teriam pouco impacto para o agregado de exportações.

Tabela 14. Resultados do modelo. Impacto na exportação regional de produtos selecionados. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030

Regiões	Impacto na Exportação (var. em relação à linha base)				
	AlgodHerb	MilhoGrao	SojaGrao	BovOutrAnim	Carnes
RO	1,4	-2.17	-0.02	166.15	25.76
AM-AC-RR	-0,2	-1.83	-1.33	221.22	18.67
PA-AP	1,8	-0.03	0.41	143.65	13.68
PI-BA	1,0	-1.30	-0.33	295.89	14.16
MA-TO	1,9	0.33	0.53	144.44	11.68
Restante Nordeste	1,6	-0.51	0.21	188.64	10.10
MG	1,8	0.50	0.85	220.50	24.49
SP	2,2	-0.04	0.26	184.42	23.22
Restante Sudeste	1,2	-0.11	0.23	234.60	26.68
PR	2,1	0.03	0.42	155.29	18.79
Restante Sul	2,8	0.09	0.45	146.33	18.54
MS	0,9	-0.92	-0.36	249.04	28.76
MT	2,0	0.22	0.71	166.34	24.53
GO-DF	2,2	0.86	1.16	174.29	4.80

Fonte: Elaboração própria.

Regionalmente haveria pequenas variações na exportação de produtos agrícolas (Tabela 14). As diferenças regionais resultam da amplitude dos impactos na produção de tais produtos, bem como das estruturas regionais de consumo das famílias e consumo intermediário (como os de setores industriais).

As exportações do algodão cresceriam em todas as regiões, exceto no AmazACRR (onde este produto é pouco representativo). Esta região registraria também a maior redução na produção (Tabela 13). Em relação a soja e milho, os impactos apresentam magnitudes ainda menores do que às observadas para o algodão. As regiões RO, AM-AC-RR, PI-BA e MS sofreriam uma pequena queda nas exportações de ambos os grãos e teriam redução na produção (exceto o milho em RO) (Tabela 14). As exportações

do arroz (ArrozTrigOut) cairiam em todas as regiões (Tabela 25 do Apêndice), exceto no PR e RSul, onde, em 2020, representavam mais de 75% da produção da cultura no país.

4.3.1.3 Impactos sobre a renda, preços e consumo das famílias

o Nível Nacional

Como visto nos resultados dos agregados macroeconômicos, o fechamento das lacunas de produtividade da pecuária de corte levaria à ampliação no consumo real das famílias brasileiras. As simulações no TERM-BR permitem uma compreensão mais detalhada sobre esse impacto⁵⁵, uma vez que o consumo é determinado, principalmente, pela variação do preço da cesta de consumo e da renda das famílias que, conjuntamente, geram resultados diferentes entre os grupos de renda familiar e entre regiões (como será visto mais a frente).

A Tabela 15 mostra os impactos sobre o consumo real e os preços das cestas de consumo, geral (envolvendo todos os produtos) e específico de alimentos, em cada classe de família. Nota-se, inicialmente, que os preços médios cairiam aos consumidores de todas as classes. Contudo, as maiores reduções seriam observadas para as famílias mais pobres da economia. Isto é, na POF1 (mais pobres), os preços cairiam cerca de 0,45%, enquanto nas famílias mais ricas (POF10) as reduções seriam de 0,06%, ambos em relação à linha de base e acumulados em 2030.

Tabela 15. Resultados do modelo. Impacto no consumo real das famílias e no preço da cesta de consumo. Variação % acumulada em 2030

Famílias	Consumo Real (var. em relação à linha base)		Preços da cesta (var. em relação à linha base)	
	Geral	Alimentos	Geral	Alimentos
POF1	0,50	0,58	-0,45	-0,46
POF2	0,59	0,62	-0,42	-0,43
POF3	0,63	0,67	-0,38	-0,39
POF4	0,66	0,70	-0,33	-0,33
POF5	0,69	0,73	-0,30	-0,31
POF6	0,69	0,69	-0,22	-0,23
POF7	0,75	0,73	-0,21	-0,21
POF8	0,79	0,78	-0,22	-0,22
POF9	0,81	0,75	-0,14	-0,15
POF10	0,83	0,78	-0,06	-0,06

Fonte: Elaboração própria.

⁵⁵ O modelo apresenta 10 classes de famílias, estratificadas por faixas de renda com suas respectivas cestas de consumo, sendo a POF 1 as mais pobres e a POF10 as mais ricas; e 10 classes de trabalhadores, dos menos qualificados (OCC1), os quais recebem os menores salários, aos mais qualificados (OCC10) que por sua vez recebem os maiores salários.

A queda no custo das cestas evidencia que o aumento da produtividade da pecuária de corte levaria a um barateamento na cesta de consumo de todas as famílias. Esse resultado deve-se ao aumento de produção na agropecuária, especialmente de carnes, que passaria a ofertar mais desses produtos e a reduzir seus preços relativos (Tabela 16). Isso justifica a maior queda nos preços da cesta de consumo das famílias mais pobres, uma vez que a alimentação compõe uma parcela importante no rol de produtos consumidos por estas famílias.

Tabela 16. Resultados do modelo. Impacto no preço dos produtos. Variação % acumulada em relação a 2030

Classes de Atividade	Setores de Atividade	Impacto nos preços (var. em relação à linha de base)
Agrícola	ArrozTrigOut	-1.61
	MilhoGrao	-1.71
	AlgodHerb	-1.86
	CanaDeAcucar	-1.37
	SojaGrao	-1.52
	OutPrLavTemp	-1.82
	Laranja	-1.66
	CafeGrao	-1.52
	OutPrLavPerm	-1.56
Pecuária	BovOutrAnim	-19.46
	LeitVacOuAni	-5.01
	Suinos	0.23
	AvesOvos	0.21
	PescaAcq	0.14
Extrativa	ExplFlorSilv	-1.86
	Mineracao	-0.42
Indústria	Carnes	-6.21
	OutAliment	-0.37
	OutAgrindus	-0.16

Fonte: Elaboração própria.

Por outro lado, é interessante notar que apesar do consumo real crescer para todas as classes de famílias, as mais pobres (POF 1) recebem os menores benefícios (o consumo cresceria 0,5%), enquanto, as famílias mais ricas (POF10) seriam mais positivamente impactadas (consumo cresceria 0,83%) (Tabela 15). Como mencionado anteriormente, a alimentação é uma parte importante da cesta de consumo das famílias mais pobres, assim, da POF1 até a POF5 o índice de consumo real de alimentos cresce um pouco mais do que a cesta de produtos como um todo (sendo mais evidente na classe mais

pobre - POF1); na POF6, há igualdade, mas para os últimos quatro estratos de renda mais alta, o consumo geral tem maior variação do que o consumo de alimentos (Tabela 15).

Para compreender como o consumo das famílias mais pobres é impactado em relação às mais ricas, é importante lembrar que, além da mudança nos preços, a variação da renda familiar também determina o consumo. Assim, o consumo das famílias mais pobres cresce menos do que para as mais ricas porque a atividade pecuária, em especial, faz um uso mais intensivo de trabalhadores menos qualificados da economia (Tabela 17), que por sua vez são responsáveis pela maior parte da renda das famílias mais pobres.

Tabela 17. Composição setorial da demanda por trabalho, por classes de qualificação do trabalho em 2020

Trabalho	Agricultura	Pecuária	Bovina	Outras atividades
OCC1	4,2	8,9	10,3	2,4
OCC2	41,6	55,0	54,6	28,6
OCC3	24,7	20,1	20,3	14,7
OCC4	11,7	5,9	5,6	8,8
OCC5	5,3	2,5	2,3	6,2
OCC6	3,0	1,7	1,5	4,7
OCC7	1,8	1,3	1,1	3,8
OCC8	1,1	0,7	0,6	3,1
OCC9	1,6	1,1	1,0	5,0
OCC10	4,8	2,9	2,7	22,6
Total	100	100	100	100

Fonte: Elaboração própria.

Como pode-se verificar na Tabela 17, mais de 10% dos trabalhadores demandados pela pecuária bovina, em 2020, estavam classificados como aqueles com menores qualificações (OCC1), ou de menor salário da economia. Além disso, os trabalhadores classificados nas três primeiras categorias, OCC1, OCC2 e OCC3, compreendiam juntos mais 85% da mão de obra demandada pela pecuária bovina naquele ano. E com o incremento de produtividade na pecuária de corte, esses trabalhadores menos qualificados registrariam menores ganhos no salário real (Tabela 18), uma vez que a atividade pecuária se torna mais “capital intensiva”, substituindo o fator trabalho (Tabela 19).

Tabela 18. Resultados do modelo. Impacto no salário real. Variação % acumulada em 2030

Trabalhos	Salário Real
	(var. em relação à linha de base)
OCC1	0,59
OCC2	0,71
OCC3	0,75
OCC4	0,88
OCC5	1,12
OCC6	1,27
OCC7	1,27
OCC8	1,30
OCC9	1,30
OCC10	1,15

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 19. Resultados do modelo. Impacto no uso de capital. Variação % acumulada em 2030

Classes de Atividade	Setores de Atividade	Uso da Capital
		(var. em relação à linha base)
Agricultura	ArrozTrigOut	-1,42
	MilhoGrao	-1,18
	AlgodHerb	-1,2
	CanaDeAcucar	-0,68
	SojaGrao	-0,83
	OutPrLavTemp	-1,66
	Laranja	-1,52
	CafeGrao	-1,06
	OutPrLavPerm	-1,46
Pecuária	BovOutrAnim	9,91
	LeitVacOuAni	0
	Suinos	4,49
	AvesOvos	3,01
	PescaAcq	0,4
Extrativa	ExplFlorSilv	-1,2
	Mineracao	-0,72
Indústria	Carnes	7,93

Fonte: Elaboração própria.

Os efeitos sobre a demanda de trabalho e salário real pelas classes de trabalho e pelos grupos de setores de atividade da agricultura, pecuária bovina, carnes e agroindústria são apresentados no Apêndice deste trabalho. De acordo com a simulação, a pecuária (corte e leite) reduziria a demanda por trabalho em 3,2% e 3,6%, respectivamente, em relação à linha de base em 2030; enquanto a demanda

por trabalho no setor de carnes aumentaria em 9,7% (Tabela 34 do Apêndice). Como visto na literatura, essa é uma característica comum de políticas relacionadas ao incremento de produtividade da terra na agropecuária, isto é, uma função de produção pode ser afetada pelo progresso tecnológico, priorizando o uso de um fator primário em detrimento de outros (Otsuki, 2013; Queiroz *et al.*, 2018; Spolador & Roe, 2018).

Dessa forma, o menor crescimento da renda entre as famílias mais pobres explica a pequena ampliação do consumo real destas famílias, mesmo com a redução dos preços das cestas de consumo (Tabela 15). Este resultado chama a atenção para a necessidade de desenvolvimento de políticas complementares, especialmente para a requalificação e realocação dos trabalhadores rurais desta atividade para os demais setores da economia (como na agroindústria), a fim de proporcionar maiores benefícios a estas famílias diante de uma mudança tecnológica (aumento na produtividade) na pecuária.

o Nível Regional

O consumo real das famílias, como visto anteriormente, cresceria nas regiões brasileiras, exceto no MA-TO. O resultado mencionado, contudo, não é uniforme entre as classes de famílias. Regionalmente, para algumas classes haveria queda no consumo (Tabela 20). Isso ocorreria de forma mais evidente no MA-TO, onde todas as classes de renda familiar reduziram seus consumos, exceto as famílias mais ricas (POF10). Isto também seria observado em algumas classes da região GO-DF e entre as famílias mais pobres do estado de MG.

Tabela 20. Resultados do modelo. Impacto regional no consumo real das famílias. Variação % acumulada em relação à 2030

Regiões	Consumo real (var. em relação à linha base)									
	POF1	POF2	POF3	POF4	POF5	POF6	POF7	POF8	POF9	POF10
RO	1,6	1,8	1,6	1,7	1,6	1,6	1,8	1,8	2,0	2,4
AM-AC-RR	2,1	1,3	1,0	0,9	0,8	0,6	0,7	0,6	0,6	0,4
PA-AP	0,0	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9
PI-BA	2,2	1,1	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,2	1,1
MA-TO	-2,2	-0,6	-0,5	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	0,0
Restante Nordeste	0,0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7
MG	-0,1	0,6	0,6	0,6	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9
SP	0,9	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,5
Restante Sudeste	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,3
PR	1,2	1,5	1,2	1,2	1,2	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3
Restante Sul	1,0	0,5	0,7	0,8	1,0	1,0	1,2	1,3	1,4	2,0
MS	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8
MT	-0,2	0,8	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4
GO-DF	-0,4	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,3	0,2	0,4	0,7

Fonte: Elaboração própria.

Essa queda de consumo está associada, especialmente, a dois fatores: os preços e a renda familiar. Como pode ser visto na Tabela 21, os preços das cestas de consumo, em geral, se reduzem entre as classes de famílias em todas as regiões. A queda é mais acentuada justamente entre as classes mais pobres do MA-TO, onde o consumo cairia. Haveria uma elevação dos preços apenas para algumas classes, de renda mais elevada, em RO, PR e Restante Sul. Apesar disso, o consumo real dessas famílias aumentaria. Deste modo, constata-se que a renda das famílias foi novamente determinante para as variações regionais de consumo.

Tabela 21. Resultados do modelo. Impacto regional nos preços da cesta de consumo entre as classes de família. Variação % acumulada em relação à 2030

Regiões	Preços (var. em relação à linha base)									
	POF1	POF2	POF3	POF4	POF5	POF6	POF7	POF8	POF9	POF10
RO	0,0	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
AM-AC-RR	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,2	-0,2
PA-AP	-0,6	-0,6	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,2
PI-BA	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	0,1
MA-TO	-0,9	-0,8	-0,7	-0,7	-0,6	-0,5	-0,6	-0,5	-0,5	-0,4
Restante Nordeste	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2
MG	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1
SP	-0,3	-0,4	-0,5	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1
Restante Sudeste	-0,3	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1
PR	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2
Restante Sul	-0,3	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,0	0,1	0,2
MS	-0,8	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,3	-0,2	-0,1	0,0
MT	-0,5	-0,6	-0,5	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,3
GO-DF	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0,2

Fonte: Elaboração própria.

A queda no consumo real no MA-TO e para as famílias mais pobres em MG e GO-DF está relacionada, principalmente, à uma redução na demanda por trabalho das atividades da pecuária (Tabela 22). E como essas regiões apresentam uma parcela relativamente elevada dos empregos do tipo OCC1 no total do emprego regional, o incremento de produtividade na pecuária de corte faz com que haja ajustes no mercado de trabalho, gerando queda na renda real das famílias onde aqueles trabalhadores se situam (POF1), reduzindo assim o seu consumo real.

Além disso, como nestas regiões o PIB não cresceria significativamente (visto no item 2.1.1), o aumento na produção das demais atividades econômicas não compensaria integralmente a redução na demanda por trabalho da OCC1 na pecuária, gerando uma redução mais acentuada da renda desses trabalhadores nessas regiões. Resultado semelhante foi também observado Ferreira Filho (2023), onde o autor ressalta a importância de considerar, no planejamento de políticas econômicas, os efeitos

diferenciados entre a escala nacional e regional que estas apresentam. Ou seja, no caso de políticas de aumento de produtividade na pecuária, podem ser observados efeitos positivos em nível nacional, mas não necessariamente entre as regiões.

Tabela 22. Resultados do modelo. Impactos no mercado de trabalho regional da pecuária. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030

Regiões	BovOutrAnim		LeitVacOuAni	
	Parcela de trabalho OCC1	Impacto na demanda total de trabalho	Parcela de trabalho OCC1	Impacto na demanda total de trabalho
RO	8,8	1,4	8,8	-5,2
AM-AC-RR	17,8	5,9	15,1	-8,2
PA-AP	13,5	-1,8	13,6	-3,2
PI-BA	27,5	8,2	27,5	-8,1
MA-TO	18,9	-7,4	20,0	-0,5
Restante Nordeste	22,8	-2,0	23,0	-3,6
MG	13,7	-6,0	13,7	-3,0
SP	1,3	-4,5	1,3	-4,2
Restante Sudeste	5,4	2,8	5,3	-8,2
PR	2,7	-10,7	2,7	-4,1
Restante Sul	1,8	-12,0	2,0	-3,2
MS	2,0	3,6	2,0	-10,2
MT	3,8	-5,2	3,8	-3,1
GO-DF	6,9	-7,3	6,9	-2,4

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, no que se refere ao consumo de alimentos, haveria uma redução apenas entre as classes mais pobres (POF1 e POF2) na região MA-TO, contudo, com em intensidade menor aos observados na Tabela 23.

Tabela 23. Resultados do modelo. Impacto regional no consumo real de alimento das famílias.

Variação % acumulada em relação à 2030

Regiões	(Var. em relação à linha base)									
	POF1	POF2	POF3	POF4	POF5	POF6	POF7	POF8	POF9	POF10
RO	1,3	1,4	1,3	1,3	1,1	1,2	1,3	1,3	1,3	1,4
AM-AC-RR	1,2	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,3
PA-AP	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6
PI-BA	1,6	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	1,0	0,8
MA-TO	-1,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2
Restante Nordeste	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5
MG	0,3	0,8	0,7	0,7	0,9	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9
SP	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,8	0,6	0,6
Restante Sudeste	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4
PR	1,2	1,3	1,1	1,2	1,1	1,0	1,0	1,1	1,0	1,2
Restante Sul	1,1	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2	1,7
MS	1,5	1,1	1,1	1,1	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9
MT	0,2	0,8	0,5	0,4	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4	0,5
GO-DF	0,0	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,4	0,5

Fonte: Elaboração própria.

4.3.2 Impactos ambientais

Os efeitos ambientais gerados pelo incremento de produtividade são também relevantes na análise de políticas ambientais. Embora não seja possível se analisar uma extensa gama impactos ambientais de políticas setoriais como o ABC+ por meio do modelo TERMBR, alguns efeitos mais relevantes podem ser observados. Neste item são apresentados os impactos do fechamento das lacunas de produtividade da pecuária de corte relacionados a mudança de uso da terra e às emissões de GEE.

4.3.2.1 Impactos sobre o uso da terra

Como visto anteriormente, a relação entre a produtividade agropecuária e a mudança no uso da terra é frequentemente debatido sobre o ponto de vista de Norman Borlaug e William Stanley Jevons. A visão de Bourlaug argumenta que o incremento de produtividade possibilita que um nível maior de produto (quantidade produzida) seja atingido com a mesma quantidade de insumos, reduzindo a quantidade de terra necessária para produção agropecuária, evitando, assim, a expansão sobre vegetação nativa – o chamado efeito “poupa-terra”. Em contrapartida, o “paradoxo de Jevons” expõe que o aumento de produtividade torna a atividade mais lucrativa e atrativa, estimulando os produtores a aumentarem a produção e usar mais terra - o chamado efeito “rebote”.

É mais provável que o efeito rebote ocorra em regiões onde a produtividade é relativamente baixa e a demanda pela produção é responsiva a preço (Lobell *et al.*, 2013; Hertel *et al.* (2014). O fato é que os resultados do aumento de produtividade sobre o uso da terra são controversos na literatura e de acordo com Hertel (2012), a maioria dos estudos trabalham com uma limitada escala espacial de dados, dificultando a compreensão desses efeitos.

A seguir são apresentados os resultados sobre a mudança de uso da terra obtidos nesta tese a partir da aplicação do modelo TERM-BR.

o Nível Nacional

De acordo com o apresentado nos itens 4.3.1.1 e 4.3.1.2, a rentabilidade da pecuária de corte seria impactada pelo aumento de produtividade do setor, uma vez que haveria aumento produção e, por consequência, queda de preço dos produtos. Esses efeitos implicam em mudanças de uso da terra (*Land Use Change*, LUC) no Brasil, que podem diferir entre regiões.

Nacionalmente, a elevação da produtividade reduziria a demanda por áreas de pastagem em -0,31% em relação à linha de base em 2030 (Tabela 24), o que representa uma redução de cerca de 0,54 Mha de pasto no país. Isso evitaria o desmatamento de 0,44 Mha da vegetação nativa, em relação ao que seria observado sem o incremento de produtividade. Isto significa que, com a intensificação da pecuária bovina de corte, ocorreria em escala nacional o efeito *Bourlaug* - com a preservação da vegetação nativa em cerca de 0,08% acima do observado na linha de base até 2030. Além disso, com a recuperação de pastagens a pecuária liberaria recursos produtivos para que as atividades agrícolas se expandissem mais facilmente, ou seja, haveria expansão de culturas agrícolas em 0,12Mha para (um aumento de 0,52% em relação à linha de base). As florestas plantadas, contudo, sofreriam uma redução 0,01Mha (0,1% a menos que a linha de base).

Tabela 24. Resultados do modelo. Impacto na mudança de uso da terra. Variação % e absoluta acumulada em relação a 2030

Uso da Terra	Percentual (var. em relação à linha de base)	Mha (var. em relação à linha de base)
Agricultura	0,12	0,11
Pastagens	-0,31	-0,54
Florestas Plantadas	-0,11	-0,01
Vegetação Nativa	0,08	0,44

Fonte: Elaboração própria.

Para melhor compreensão sobre os efeitos no uso da terra, a Tabela 25 apresenta as variações por setor de atividade econômica. A maior redução na área de pastagem ocorreria na pecuária de corte, a qual diminuiria 0,32Mha (0,2% a menos em relação à linha de base em 2030), ao passo que na pecuária de leite a redução seria de 0,22Mha (um decréscimo de 1,5%) (Tabela 25). Além do desmatamento evitado, as culturas de café, soja e cana-de-açúcar registrariam os maiores crescimentos de área, mesmo que em pequenas variações percentuais, resultantes das variações na rentabilidade das atividades econômicas. No caso da cana-de-açúcar, seu crescimento está também associado ao aumento no consumo de combustíveis, impulsionado pelo aumento da renda.

Tabela 25. Resultados do modelo. Impacto na mudança de uso da terra por setor de atividade.

Variação % acumulada em relação a 2030

Setores de Atividade	Uso da Terra	
	(var. Mha em relação à linha de base)	(var. % em relação à linha de base)
ArrozTrigOut	0,00	0,01
MilhoGrao	-0,01	-0,03
AlgodHerb	-0,01	-0,42
CanaDeAcucar	0,03	0,29
SojaGrao	0,11	0,29
OutPrLavTemp	-0,02	-0,28
Laranja	0,00	-0,34
CafeGrao	0,01	0,34
OutPrLavPerm	-0,01	-0,35
BovOutrAnim	-0,32	-0,2
LeitVacOuAni	-0,22	-1,5
ExplFlorSilv	-0,01	-0,11
Vegetação Nativa	0,44	0,08

Fonte: Elaboração própria.

Como apresentado no capítulo de revisão de literatura, a maior parte dos estudos que tratam dos efeitos do aumento da produtividade agropecuária brasileira sobre o uso da terra observam um efeito poupa-terra. A FGV (2017) observou, ao avaliar os efeitos do primeiro ciclo do Plano ABC (entre 2010 e 2020), que o aumento de produtividade pecuária por meio da RPD evitaria o desmatamento de cerca de 4,85 Mha. Mais recentemente Stocco *et al.* (2020) e Gianetti (2023) verificaram que, nacionalmente, haveria um desmatamento evitado de cerca de 0,88Mha e 0,97Mha, respectivamente, devido à ampliação da produtividade na pecuária bovina no Brasil (ambos acumulados até 2030).

No entanto, esses efeitos podem variar conforme a localização e abrangência do progresso tecnológico, como também encontrado por Barretto *et al.* (2013), Koch *et al.* (2019) e Gianetti (2023), evidenciado no item a seguir.

- Nível Regional

A simulação no modelo TERM-BR mostrou que a maioria das regiões brasileiras apresentariam reduções ou manutenção nas áreas de pastagens, com liberação de áreas para agricultura e ampliação do desmatamento evitado (aumento do estoque de vegetação nativa em relação à linha de base) (Tabela 26). No entanto, um efeito rebote seria observado nas regiões de fronteira agrícola, AM-AC-RR e PI-BA, e no MS – região onde foi dado o maior choque de produtividade na pecuária de corte. Isso significa que o progresso tecnológico ampliaria a rentabilidade dos produtores nestas regiões, os quais teriam maior incentivo para ampliar as áreas de pasto, por meio da conversão de áreas agrícolas para pastagens e do desmatamento.

Tabela 26. Resultados do modelo. Impacto regional na mudança de uso da terra. Variação % acumulada em relação à 2030

Regiões	Mudança de Uso da Terra			
	(var. em relação à linha de base)			
	Agricultura	Pastagem	Florestas Plantadas	Vegetação Nativa
RO	-0,23	-0,01	-0,04	0,02
AM-AC-RR	-1,22	0,70	-0,23	-0,03
PA-AP	0,08	-0,55	-0,16	0,12
PI-BA	-0,55	1,52	-1,78	-0,47
MA-TO	0,37	-1,59	0,52	0,55
Restante Nordeste	0,00	0,00	0,03	0,00
MG	0,52	-1,00	0,27	0,51
SP	0,01	0,00	-0,10	0,00
Restante Sudeste	0,03	0,00	-0,09	0,00
PR	0,02	0,00	-0,10	0,00
Restante Sul	0,02	0,00	-0,08	0,00
MS	-0,57	0,40	-0,82	-0,16
MT	0,40	-0,95	0,25	0,32
GO-DF	0,81	-1,17	0,72	0,71

Fonte: Elaboração própria.

Gianetti (2023) encontrou resultados semelhantes sobre o efeito rebote nas regiões de fronteira agrícola. O autor observou um aumento no desmatamento nas regiões do AM-AC-RR, assim como neste estudo, e do MA-TO-PI – nota-se que a agregação territorial utilizada pelo autor difere da considerada no presente estudo, a qual separa as regiões PI-BA e MA-TO.

Em relação aos setores de atividade econômica, nota-se que em diversas regiões a pecuária leiteira liberaria áreas de pastagens para a pecuária de corte ou para outras atividades, principalmente, em RO, AM-AC-RR, PI-BA, MS e Restante do Sudeste (Tabela 27). Além disso, no AM-AC-RR, PA-AP, PI-BA, MA-TO, MG, MT e GO-DF a área de pastagens para pecuária de corte também se reduziria, liberando, em termos absolutos, áreas que seriam convertidas para agricultura e gerariam desmatamento evitado.

Tabela 27. Resultados do modelo. Impacto regional na mudança de uso da terra por setor de atividade.

Variação % acumulada em relação à 2030. Setores selecionados

Regiões	Mudança de Uso da Terra (var. em relação à linha de base)			
	MilhoGrao	SojaGrao	BovOutrAnim	LeitVacOuAni
RO	0.03	-0.24	0.36	-4.06
AM-AC-RR	-1.42	-1.38	1.51	-7.67
PA-AP	0.08	0.30	-0.47	-1.45
PI-BA	-0.46	-0.41	2.35	-8.20
MA-TO	0.29	0.44	-1.93	2.89
Restante Nordeste	0.03	0.16	0.10	-1.04
MG	0.28	0.60	-1.18	0.94
SP	-0.22	0.02	-0.01	0.14
Restante Sudeste	-0.21	0.02	0.46	-6.84
PR	-0.18	0.22	-0.59	4.23
Restante Sul	-0.16	0.19	-0.72	5.77
MS	-0.75	-0.51	1.13	-8.05
MT	0.20	0.52	-1.07	0.45
GO-DF	0.55	0.86	-1.49	1.95

Fonte: Elaboração própria.

4.3.2.2 Impactos sobre as emissões de GEE

Tema central nos debates sobre políticas que visam a redução e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, a redução das emissões totais de GEE, bem como da intensidade de emissões (GEE por unidade de produto), no caso da pecuária, está associada, entre outros fatores, à qualidade das pastagens e ao desempenho animal. D’Aurea *et al.* (2021) destacam que melhorias no manejo animal que contribuam para o ganho de peso diário e redução da idade de abate, propiciados pelo incremento de produtividade do setor, podem contribuir para a redução das emissões de GEE.

Neste ponto, merece destacar que a maior parte das emissões geradas pelo setor pecuário acontece na forma de gás metano, correspondente ao processo de digestão animal⁵⁶. Portanto, é de se esperar que o incremento de produtividade na pecuária de corte, ao provocar em aumento da sua produção (como o rebanho), também resulte em aumento das emissões totais, mesmo que implique em redução de emissões por unidade de produto (e.g. intensidade). Por outro lado, como visto no capítulo de revisão de literatura, um aspecto relevante a ser levado em consideração sobre a melhoria de produtividade via recuperação de pastagens é o potencial desse processo no aumento da capacidade do estoque de carbono no solo – que podem compensar, total ou parcialmente, as emissões geradas pelo aumento do nível de atividade do setor (maior produção, bem como maior uso de insumos associados).

⁵⁶ Na base de dados do modelo utilizado neste trabalho, as emissões de metano, via digestão animal, correspondem a cerca de 90% das emissões totais da atividade pecuária.

Deste modo, assim como observado pelos autores Stocco *et al.* (2020); Ferreira Filho (2023) e Gianetti (2023), os resultados obtidos pelo modelo TERM-BR, apresentados a seguir, mostram dois tipos de mensuração dos efeitos sobre as emissões: um que não leva em conta a elevação do estoque de carbono no solo (identificado como “método original”), e outro que leva em conta o acúmulo de carbono no solo (identificado como “método alternativo”). A elasticidade de produtividade-emissões de GEE na pecuária bovina, utilizada neste trabalho, advém de Gianetti (2023), que por sua vez, apresenta melhorias em relação ao utilizado por Stocco *et al.* (2020) e Ferreira Filho (2023).

○ Nível Nacional

Neste item são apresentados os impactos em nível nacional sobre as emissões de GEE associadas às mudanças de uso da terra e ao nível de atividade dos setores produtivos, incluindo a ampliação do rebanho, o uso de insumos e consumo de combustíveis necessários. Pelo método original de contabilidade das emissões de GEE⁵⁷, haveria redução de 0,14% das emissões associadas à mudança de uso da terra (em relação à linha de base em 2030) (Tabela 28), especialmente devido ao desmatamento evitado (visto no item 2.2.1). O crescimento da atividade econômica, por outro lado, causaria o aumento das emissões em cerca de 5%, elevando as emissões totais em 4,9% em relação à linha de base.

Tabela 28. Resultados do modelo. Impacto em emissões. Variação na contribuição de cada fonte de emissões para a variação total. Métodos original e alternativo de contabilidade de emissões. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030

Método de contabilidade de emissões	Fonte de emissões	Emissões (var. em relação à linha de base)
Original	Mudança de uso da terra	-0,14
	Produção	5,03
	Total	4,89
Alternativo	Mudança de uso da terra	-0,12
	Produção	-0,13
	Total	-0,25

Fonte: Elaboração própria. *Produção: emissões no consumo intermediário + nível de atividade.

Se utilizado o método alternativo de contabilidade das emissões de GEE, ou seja, considerando os benefícios da fixação de Carbono Orgânico no Solo (*Soil Organic Carbon - SOC*), haveria, de acordo com a simulação do modelo TERM-BR, uma redução de 0,12% das emissões associadas ao consumo intermediário e ao nível de atividade (em relação a linha de base) (Tabela 28). A mitigação total das

⁵⁷ O método original de contabilidade de emissões de GEE considera apenas os dados fornecidos pelo inventário nacional de emissões de GEE. O método alternativo de emissões incorpora a fixação de carbono orgânico no solo como benefício da mudança do sistema de manejo e recuperação de pastagens, com parâmetros apresentados em Gianetti (2023).

emissões, estimada pelo método alternativo, seria de 0,25% em relação à linha de base. Assim como encontrado em Stocco *et al.* (2020), Ferreira Filho (2023) e Gianetti (2023), os resultados encontrados neste trabalho demonstram que o aumento de carbono no solo, via recuperação de pastagens, apresenta potencial de mais que compensar a elevação das emissões geradas pelo aumento da atividade econômica da pecuária decorrente do preenchimento da lacuna de produtividade das pastagens.

Analisando em maior detalhe a pecuária de corte e de leite, é possível observar que, com o método original de contabilidade das emissões, os setores ampliariam suas emissões em 17,98% e 1,15%, respectivamente, em relação à linha de base em 2030 (Tabela 29). Este é um resultado esperado, como mencionado anteriormente, uma vez que com o aumento de produtividade há um crescimento do setor pecuário, resultando em elevação do rebanho bovino, o que gera maiores emissões de metano por meio da fermentação entérica. Entretanto, mesmo com o aumento das emissões totais de GEE, o crescimento da produtividade na pecuária de corte permitiria uma redução na intensidade de emissões (GEE por unidade de produto) desse setor, de 0,14%. Na pecuária leiteira, contudo, haveria um aumento de 0,02% intensidade de emissões, devido ao fato de não terem sido considerados choques de produtividade nesta atividade.

Tabela 29. Resultados do modelo. Impacto em emissões da pecuária bovina. Métodos original e alternativo de contabilidade de emissões. Variação % acumulada em relação à linha de base de 2030

	GEE	BovOutrAnim	LeitVacOuAni
Original	Emissões	17,98	1,15
	Intensidade	-0,14	0,02
Alternativo	Emissões	-0,96	-0,08
	Intensidade	-16,17	-1,21

Fonte: Elaboração própria.

Por sua vez, seriam observadas reduções das emissões nas atividades da pecuária ao considerar o efeito da fixação de SOC, de 0,96% e 0,08% em relação à linha de base em 2030, para corte e leite, respectivamente (Tabela 29). Isso acarretaria queda na intensidade de emissões de GEE no corte e leite na ordem de 16,17% e 1,21%, respectivamente. Esse impacto poderia ser mais expressivo, dado que no presente estudo considerou-se exclusivamente o impacto da melhoria da qualidade de pastagens na fixação de SOC. Outras melhorias no setor, como na alimentação animal, genética, tempo para abate, entre outros fatores, apresentam potencial de contribuir para a maior efetividade na redução da intensidade de emissões de GEE na pecuária bovina. Estes fatores podem ser objeto de estudos futuros.

Nos demais setores de atividade da agropecuária e agroindústria, os impactos da RPD nas emissões seriam principalmente relacionados ao volume produzido. Haveria, por exemplo, aumento das emissões de GEE relacionada à produção de suínos, aves e ovos, e carnes (Tabela 30), setores relativamente mais impactados pelo incremento de produtividade na pecuária de corte.

De modo geral, a pecuária, ao liberar recursos produtivos e, por consequência, impactar os demais setores de atividade, também diminuiria a intensidade de emissões desses setores (Tabela 30). Os efeitos são mais elevados naqueles setores que tiveram maior crescimento estimado, como o de carnes.

Tabela 30. Resultados do modelo. Impacto em emissões e intensidade de emissões nos setores selecionados. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030

Setores de Atividade	Emissões (var. em relação à linha de base)	Intensidade de Emissões (var. em relação à linha de base)
ArrozTrigOut	0,02	-0,07
MilhoGrao	-0,42	-0,42
AlgodHerb	-0,89	-0,57
CanaDeAcucar	0,03	-0,32
SojaGrao	-0,29	-0,60
OutPrLavTemp	-1,12	-0,81
Laranja	-0,84	-0,53
CafeGrao	-0,24	-0,59
OutPrLavPerm	-0,73	-0,58
Suinos	4,83	-0,38
AvesOvos	3,26	-0,25
ExplFlorSilv	-0,95	-0,80
PescaAcq	0,00	0,02
Mineracao	-0,89	-0,04
Carnes	6,93	-2,04
OutAliment	-0,58	0,01
OutAgrindus	-2,53	0,03

Fonte: Elaboração própria. OBS: resultado independente do método de contabilidade de emissões, que afeta apenas a pecuária bovina.

o Nível Regional

Regionalmente, observa-se que a mitigação de emissões geradas pelo desmatamento evitado não seria suficiente para superar a ampliação de emissões devido ao aumento do nível de atividade econômica e do consumo intermediário, considerando o método original de contabilidade de emissões (Tabela 31). Pelo contrário, o efeito rebote (aumento do desmatamento), observado nas regiões do AM-AC-RR, PI-BA e no MS (ver Tabela 26), contribuiria para que as emissões nessas regiões aumentassem significativamente. Isto mostra que a contribuição do sequestro de carbono pela vegetação nativa do bioma Amazônia não seria suficiente para mitigar as emissões geradas pela intensificação da pecuária.

As emissões totais de GEE cresceriam em todas as regiões brasileiras, contudo, em magnitudes distintas (Tabela 31). Por exemplo, apesar de SP registrar aumento de mais de 15% na produção regional

de bovinos de corte em relação à linha de base acumulada em 2030 (Tabela 13), nesta região as emissões aumentariam pouco mais de 1% (Tabela 31); por outro lado, no MT para o aumento de quase 13% na produção de bovinos de corte, ocorreriam emissões 4,7% superiores à linha de base. Essas diferenças ocorrem devido à representatividade da pecuária regional. Em SP a produção de bovinos representava em 2015 menos de 0,1% da produção nacional, enquanto a do MT representava 4,7% (Tabela 10), fazendo com que o aumento da produção em SP contribua menos para o crescimento de emissões do que em MT. Ademais, o PIB real de SP cresceria 0,2% e no MT 2,09%, em relação à linha de base em 2030 (Tabela 22), isto é, o aumento do nível de atividade econômica impactaria mais as emissões no MT do que em SP.

Tabela 31. Resultados do modelo. Impacto em emissões de todos os setores. Métodos original e alternativo de contabilidade de emissões. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030

Regiões	Original (sem SOC)*	Alternativo (com SOC)
RO	10,05	0,93
AM-AC-RR	15,83	6,74
PA-AP	4,10	-0,85
PI-BA	16,52	1,10
MA-TO	0,73	-2,93
Restante Nordeste	5,74	-0,62
MG	3,43	-1,15
SP	1,06	-0,04
Restante Sudeste	1,77	-0,44
PR	1,77	0,42
Restante Sul	1,64	0,40
MS	20,73	0,36
MT	4,63	-1,83
GO-DF	3,88	-0,56

* Fixação de Carbono Orgânico no Solo (*Soil Organic Carbon - SOC*).

Fonte: Elaboração própria.

Com o método alternativo de contabilidade das emissões (considerando o carbono no solo - SOC) ocorreria redução das emissões no nível de atividade em 12 das 14 regiões do modelo. Em RO e AM-AC-RR, onde ainda ocorreriam incrementos nas emissões, os valores seriam reduzidos para menos de 0,5% em relação à linha de base (Tabela 31). A permanência na quantidade de emissões geradas estaria relacionada tanto ao tamanho do choque de produtividade e do crescimento econômico, quanto às elasticidades de produtividade-mitigação e à intensidade de emissões de GEE originalmente observada nas regiões.

Na pecuária bovina de corte, observa-se que no método original de contabilidade ocorrem variações das emissões proporcionais aos aumentos de produtividade (Tabela 32), pois os ganhos de eficiência, geram alterações desprezíveis na intensidade de emissões, que crescem proporcionalmente à produção. Isso sem considerar a fixação de carbono no solo.

Quando considerada a fixação de SOC, as pecuárias de corte e leite passam a reduzir emissões de GEE em quase todas as regiões do Brasil, exceto em RO e AM-AC-RR. De forma agregada, a intensidade de emissões na pecuária de corte se reduziria em 16,17%, e na de leite em 1,21%, em relação à linha de base em 2030.

Tabela 32. Resultados do modelo. Impacto em emissões da pecuária bovina. Métodos original e alternativo de contabilidade de emissões. Variação % acumulada em relação à linha de base em 2030

Regiões	Emissões				Intensidade de Emissões			
	BovOutrAnim		LeitVacOuAni		BovOutrAnim		LeitVacOuAni	
	Original	Altern.	Original	Altern.	Original	Altern.	Original	Altern.
RO	19,5	0,1	-4,3	-0,2	-0,1	-16,3	-0,02	4,3
AM-AC-RR	30,9	0,2	-8,2	-0,3	-0,2	-23,6	0,02	8,6
PA-AP	15,4	-0,1	-1,6	-0,1	-0,1	-13,5	-0,03	1,5
PI-BA	47,1	-1,3	-8,6	-0,2	-0,3	-33,1	0,01	9,2
MA-TO	6,4	-1,4	3,0	-0,01	-0,1	-7,5	-0,1	-3,0
Restante Nordeste	18,5	-2,4	-1,0	-0,1	-0,2	-17,8	-0,04	0,9
MG	17,8	-2,0	0,5	-0,1	-0,2	-17,0	-0,1	-0,6
SP	15,4	-0,3	0,1	-0,1	-0,2	-13,8	-0,1	-0,2
Restante Sudeste	30,5	-3,6	-6,5	-0,2	-0,2	-26,3	0,0	6,8
PR	6,0	-0,4	3,5	-0,1	-0,1	-6,2	-0,1	-3,6
Restante Sul	3,7	-0,7	5,1	-0,1	-0,1	-4,3	-0,1	-5,0
MS	35,3	-0,7	-8,7	-0,2	-0,3	-26,8	-0,03	9,2
MT	12,5	-0,9	0,5	-0,1	-0,1	-12,1	-0,1	-0,6
GO-DF	10,1	-0,5	1,8	-0,1	-0,1	-9,7	-0,1	-1,9

Fonte: Elaboração própria.

4.4 Considerações Finais

O fechamento da lacuna de produtividade da pecuária a pasto no Brasil, entre 2020 e 2030, apresenta impactos positivos sobre a economia brasileira, promovendo aumento de 0,54% no Produto Interno Bruto (PIB) e 0,74% no consumo agregado das famílias (em relação à linha de base em 2030). Os investimentos para a RPD teriam elevada taxa de retorno social, onde cada real investido retornaria cerca de quatro reais para a economia em 2030. Esse benefício estende-se às diversas regiões do país, evidenciando que regiões com economias menos desenvolvidas e com maior importância da atividade pecuária teriam maior crescimento no PIB real, contribuindo para maior equidade no PIB regional.

Todas as famílias se beneficiariam do fechamento dos gaps, contudo, os ganhos para as mais pobres seriam menos expressivos, em termos de salários, consumo e emprego para trabalhadores menos qualificados. No Maranhão-Tocantins, o consumo decairia (0,46%), e nas regiões Centro-Oeste e Nordeste, haveria um aumento modesto no consumo. Isso ocorre porque o consumo é influenciado pelos preços da cesta e pela variação na renda familiar, e em regiões com maior dependência de trabalho menos qualificado, o crescimento do salário seria menor.

No âmbito dos impactos ambientais, a RPD geraria, em nível nacional, um aumento da produção pecuária de corte (18,14%) e na indústria de abate e processamento de carnes (9,15%), com menor uso de área de pastagem (-0,31%). Isso geraria um efeito de "poupa-terra" de 0,44 Mha no país até 2030. Entretanto, efeito contrário seria observado em regiões de fronteira agrícola (Amazonas-Acre-Roraima e Piauí-Bahia) e no Mato Grosso do Sul. Nestes locais, ocorreria um "efeito-rebote" – onde o aumento de produtividade da pecuária ao tornar a atividade mais lucrativa e atrativa, estimularia os produtores a aumentarem a produção e usar mais terra, elevando o desmatamento.

As emissões totais de GEE diminuiriam, considerando a fixação do carbono no solo pela RPD. Isso compensaria o aumento das emissões de metano causado pelo crescimento do rebanho bovino. Além disso, a intensidade de emissões (por unidade de produto) também reduziria. O acúmulo de carbono no solo, essencial para compensar as emissões de GEE, destaca-se mais uma vez como uma oportunidade para que seja monitorado e contabilizado pelos inventários nacionais de emissões.

Por fim, vale destacar que o processo de intensificação é um fenômeno dinâmico e complexo, o que demanda desenvolvimento contínuo de estudos e adequado planejamento territorial. Apesar dos impactos, no geral positivos, recuperar cerca de 30Mha de pastagens é um enorme desafio (físico, econômico e político). A abordagem integrada entre perspectivas biofísicas e implicações econômicas, como adotado nesta tese, se mostrou como potencial orientador de transformações no setor pecuário.

Referências

- ALLEN, V.G., BATELLO, C., BERRETTA, E.J., HODGSON, J., KOTHMANN, M., LI, X., MCIVOR, J., MILNE, J., MORRIS, C., PEETERS, A., SANDERSON, M., 2011. An international terminology for grazing lands and grazing animals. *Grass Forage Sci.* 66, 2–28. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2010.00780.x>.
- ASSUNÇÃO, J; SOUZA, P. The impact of rural credit on Brazilian agriculture and the environment. Policy Brief. Climate Policy Initiative. Rio de Janeiro, 2019.
- BARRETTO, Alberto G. O. P. et al. Agricultural intensification in Brazil and its effects on land-use patterns: an analysis of the 1975–2006 period. *Global change biology*, v. 19, n. 6, p. 1804-1815, 2013.
- BORGES, M.J; PARRÉ, J.L. O impacto do crédito rural no produto agropecuário brasileiro. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 60(2), 2022. e230521. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.230521>.
- BORLAUG, N. E. Feeding a world of 10 billion people: The miracle ahead. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 38(2), 221–228, 2002. <https://doi.org/10.1079/IVP2001279>

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária 2020-2030: Plano Operacional / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação. – Brasília: Mapa/DEPROS, 2021. 133p. ISBN: 978-65-86803-63-1.

BRASIL. Brazil's Nationally Determined Contribution (NDC). 2022. Disponível em: <[https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/Brazil%20First%20NDC%20\(Udated%20submission\).pdf](https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/Brazil%20First%20NDC%20(Udated%20submission).pdf)>.

BRAZ, S. P., URQUIAGA, S., ALVES, B. J. R., JANTALIA, C. P., GUIMARÃES, A. Paula., dos Santos, C. A., dos Santos, S. C., Machado Pinheiro, É. F., & Boddey, R. M. (2013). Soil Carbon Stocks under Productive and Degraded Brachiaria Pastures in the Brazilian Cerrado. *Soil Science Society of America Journal*, 77(3), 914–928. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0269>.

CERRI, C. E. P., EASTER, M., PAUSTIAN, K., KILLIAN, K., COLEMAN, K., BERNOUX, M., FALLOON, P., POWLSON, D. S., BATJES, N., MILNE, E., & CERRI, C. C. (2007). Simulating SOC changes in 11 land use change chronosequences from the Brazilian Amazon with RothC and Century models. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 122(1), 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.01.007>

COHN, Avery S. et al. Cattle ranching intensification in Brazil can reduce global greenhouse gas emissions by sparing land from deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, n. 20, p. 7236-7241, 2014.

D'AUREA, A. P. et al. Mitigating Greenhouse Gas Emissions from Beef Cattle Production in Brazil through Animal Management. *Sustainability*, 13, 7207, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13137207>.<https://doi.org/10.3390/su13137207>.

DINIZ, Tiago Barbosa. Impactos econômicos e regionais dos investimentos em geração de energia elétrica no Brasil. 2019. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019. doi:10.11606/T.11.2019.tde-22072019-100002.

FERREIRA FILHO, J. B. S.; HORRIDGE, M. J. Ethanol expansion and indirect land use change in Brazil. *Land Use Policy*, 36, 595–604, 2014. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2013.10.015>.

FERREIRA FILHO, J. B. DE S., & MORAES, G. I. de. Climate change, agriculture and economic effects on different regions of Brazil. *Environment and Development Economics*, 20(1), 37–56, 2015. <https://doi.org/10.1017/S1355770X14000126>

FERREIRA FILHO, J. B. S.; HORRIDGE, M. J. Reductions in land use change and agriculture GHG emissions in Brazil: the Brazilian commitment to COP21. **19th Annual Conference on Global Economic Analysis**, 2016. https://www.gtapecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=4971

FERREIRA FILHO, J. B. DE S., & HORRIDGE, M. Biome composition in deforestation deterrence and GHG emissions in Brazil 1 Mark Horrridge 3. 20th Annual Conference on Global Economic Analysis, 1–16, 2017. <https://www.gtapecon.purdue.edu/resources/download/8739.pdf>

FERREIRA-FILHO, J. AN ECONOMIC EVALUATION OF THE LOW CARBON AGRICULTURE CREDIT PROGRAM IN BRAZIL (Presented during the 26th Annual Conference on Global Economic Analysis (Bordeaux, France)). Purdue University, West Lafayette, IN: Global Trade Analysis Project (GTAP), 2023. Retrieved from https://www.gtapecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=6851

FGV – FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS. Observatório ABC: impactos econômicos e ambientais do Plano ABC. São Paulo: FGV, 2017.

FREITAS, F. L. M.; GUIDOTTI, V.; SPAROVEK, G.; HAMAMURA, C. Nota técnica: Malha fundiária do Brasil, v.1812. In: *Atlas - A Geografia da Agropecuária Brasileira*, 2018. Disponível em: www.imaflora.org/atlasagropecuario.

GIANETTI, Giovanni William. Impactos socioeconômicos e ambientais da recuperação de pastagens degradadas no Brasil. 2023. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2023. doi:10.11606/T.11.2023.tde-03102023-150206.

GODFRAY, H. C. J.; BEDDINGTON, J. R.; CRUTE, I. R.; HADDAD, L.; LAWRENCE, D.; MUIR, J. F.; PRETTY, J.; ROBINSON, S.; THOMAS, S. M.; TOULMIN, C. Food Security: The Challenge of feeding 9 billion people. *Science*, v. 327, n. February, p. 812–818, 2010.

GOLUB, A.; HERTEL, T.; LEE, H. L.; ROSE, S.; SOHNGEN, B. (2009). The opportunity cost of land use and the global potential for greenhouse gas mitigation in agriculture and forestry. *Resource and Energy Economics*, 31(4), 299-319, 2009.

GURGEL, A. C., & LAURENZANA, R. D. (2016). DESAFIOS E OPORTUNIDADES DA AGRICULTURA BRASILEIRA DE BAIXO CARBONO. In J. E. R. Vieira Filho, J. G. Gasques, & A. X. Y. de Carvalho (Eds.), *Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade* (pp. 343–366). IPEA. Disponível em: repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9262/1/Desafios%20e%20oportunnides.pdf

HANUSCH, M.; ZAOURAK, G.; FERREIRA FILHO, J. B. S.; BARDAL, D. Economic Growth and Land Use. **A Balancing Act for Brazil's Amazonian States: an Economic Memorandum**. 1ed. Washington DC: The World Bank, v. 1, p. 87-136, 2023.

HERTEL, T. W. Implications of Agricultural Productivity for Global Cropland Use and GHG Emissions: Borlaug vs. Jevons. *GTAP Working Paper*, 69, 1–36, 2012. <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/6110.pdf>.

HERTEL, T. W., RAMANKUTTY, N. & BALDOS, U. L. C. Global market integration increases likelihood that a future African Green Revolution could increase crop land use and CO2 emissions. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 111, 13799–13804 (2014). <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1403543111>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (D. Gómez & W. Irving, Eds.; IPCC). IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/12/19R_V0_01_Overview.pdf

KOCH, N., ZU ERMGASSEN, E.K.H.J., WEHKAMP, J., OLIVEIRA FILHO, F.J.B. AND SCHWERHOFF, G. (2019), Agricultural Productivity and Forest Conservation: Evidence from the Brazilian Amazon. *American Journal of Agricultural Economics*, 101: 919-940. <https://doi.org/10.1093/ajae/aay110>

KREIDENWEIS, U.; HUMPENÖDER, F.; KEHOE, L. et al. Pasture intensification is insufficient to relieve pressure on conservation priority areas in open agricultural markets. *Glob Change Biol*. 24: 3199– 3213, 2018. <https://doi.org/10.1111/gcb.14272>

LABORATÓRIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E GEOPROCESSAMENTO - LAPIG. **Atlas das Pastagens**. <https://atlasdaspastagens.ufg.br/>.

LOBELL, DB, BALDOS, ULC, HERTEL, TW, 2013. Climate adaptation as mitigation: the case of agricultural investments. *Ambiente. Res. Deix* 8, 015012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015012>

MORAN, D., BLAIR, K. J. Review: Sustainable livestock systems: anticipating demand-side challenges. *Animal* 15, 100288, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100288>.

OTSUKI, T. Nonparametric measurement of the overall shift in the technology frontier: an application to multiple-output agricultural production data in the Brazilian Amazon. *Empir Econ* 44, 1455–1475 (2013). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00181-012-0582-4>

- PARENTE, Leandro; MESQUITA, Vinícius; MIZIARA, Fausto; BAUMANN, Luis; FERREIRA, Laerte. Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. **Remote Sensing of Environment**. 2019.
- QUEIROZ, P., SILVA, F., & FULGINITI, L. E. 2018, June. How did technical change affect land use in Brazilian agriculture? In 2018 Annual Meeting, August 5-7, Washington, DC (No. 274437). Agricultural and Applied Economics Association.
- REISINGER, Andy; CLARK, Harry. How much do direct livestock emissions actually contribute to global warming?. *Global change biology*, v. 24, n. 4, p. 1749-1761, 2018.
- SANTOS, J. A. DOS, & FERREIRA FILHO, J. B. DE S. Substituição de combustíveis fósseis por etanol e biodiesel no Brasil e seus impactos econômicos: uma avaliação do Plano Nacional de Energia 2030. *Pesquisa e Planejamento Econômico*, 47(3), 185–224, 2017. <https://repositorio.usp.br/item/002886380>.
- SILVA, D. I; FERREIRA FILHO, J. B. S. Impactos dos programas de transferência de renda Benefício de Prestação Continuada e Bolsa Família sobre a economia brasileira: uma análise de equilíbrio geral. **Pesquisa e Planejamento Econômico**. V.48, no.1, 2018.
- SILVA, J. G; RUVIARO, C. F; FERREIRA FILHO, J. B. S. Livestock intensification as a climate policy: Lessons from the Brazilian case *Land Use Policy*, 62 (2017), pp. 232-245, 10.1016/j.landusepol.2016.12.025
- SOUZA, G. C. P., DOMINGUES, E. P., & MAGALHÃES, A. (2020). Regional economic impacts of greenhouse gas emission mitigation policies in Brazilian agriculture: the role of the degraded pasture recovery program. 23rd Annual Conference on Global Economic Analysis.
- SPAROVEK, G; BARRETTO, A.G.O.P.; MATSUMOTO, M; BERNDDES, G (2015). Effects of governance on availability of land for agriculture and conservation in Brazil. *Environ Sci Technol* 49:10285–10293
- SPAROVEK, G., GUIDOTTI, V., PINTO, L. F. G., BERNDDES, G., BARRETTO, A., & CERIGNONI, F. (2018). Asymmetries of cattle and crop productivity and efficiency during Brazil's agricultural expansion from 1975 to 2006. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6. <https://doi.org/10.1525/elementa.187>
- SPOLADOR, H., & ROE, T. 2018. The agriculture TFP growth and labor allocation in the Brazilian economy (No. 277483). International Association of Agricultural Economists.
- STOCCO, Leandro; DE SOUZA FERREIRA FILHO, Joaquim Bento; HORRIDGE, Mark. Closing the Yield Gap in Livestock Production in Brazil: New Results and Emissions Insights. In: *Environmental Economics and Computable General Equilibrium Analysis*. Springer, Singapore, p. 153-170, 2020.
- STRASSBURG, B. B. N.; LATAWIEC, A. E.; BARIONI, L. G.; NOBRE, C. A.; DA SILVA, V. P.; VALENTIM, J. F.; VIANNA, M.; ASSAD, E. D. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. *Global Environmental Change*, v. 28, n. 1, p. 84–97, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.001>>.
- TANURE, T. M. DO P., PORSSE, A. A., & DOMINGUES, E. P. Política industrial verde no Brasil: impactos econômicos de opções de mitigação de gases de efeito estufa-uma análise através de Equilíbrio Geral Computável (EGC) 1. 49º Encontro Nacional de Economia (ANPEC), 2021.
- WOOLF, D; SANDERMAN, J; LEHMANN, J; RIVARD, C. Soils Revealed: Soil Carbon Futures. Harvard Dataverse, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.7910/DVN/HA17D3>>.
- ZIMMER, A. H. *et al*. Degradação, recuperação e renovação de pastagens. **Embrapa Gado de Corte**, p. 42, 2012.

APÊNDICE

Quadro 2. Classificações dos tipos de famílias (POF) e de trabalho (OCC) no modelo EGC.

	Classes dos Trabalhos	Faixa de Remuneração em R\$ de 2015	Faixa de Remuneração em Salários-Mínimos
POF1	OCC1	[0-788)	[0-1)
POF2	OCC2	[788-1.576)	[1-2)
POF3	OCC3	[1.576-2.364)	[2-3)
POF4	OCC4	[2.364-3.152)	[3-4)
POF5	OCC5	[3.152-3.940)	[4-5)
POF6	OCC6	[3.940-4.728)	[5-6)
POF7	OCC7	[4.728-5.516)	[6-7)
POF8	OCC8	[5.516-6.304)	[7-8)
POF9	OCC9	[6.304-7.880)	[8-10)
POF10	OCC10	≥7.880	≥10

Fonte: Adaptado de Gianetti (2023).

Quadro 3. Regiões agregadas no modelo EGC

Região TERM-BR15	Unidades da Federação
RO	Rondônia
AM-AC-RR	Acre, Amazonas e Roraima
PA-AP	Pará e Amapá
MA- TO	Maranhão, Tocantins
PI-BA	Piauí e Bahia
Restante Nordeste	Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe
MG	Minas Gerais
SP	São Paulo
PR	Paraná
Restante Sudeste	Espírito Santo e Rio de Janeiro
Rsul	Santa Catarina e Rio Grande do Sul
MtGrSul	Mato Grosso do Sul
MtGrosso	Mato Grosso
GoiásDF	Goiás e Distrito Federal

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 4. Produtos agregados no modelo EGC

Produtos TERM-BR15	PRODUTOS ORIGINAIS DA MIP2015
ArrozTrigOut	Arroz, trigo e outros cereais
MilhoGrao	Milho em grão
AlgodHerb	Algodão herbáceo, outras fibras da lavoura temporária
CanaDeAcucar	Cana-de-açúcar
SojaGrao	Soja em grão
OutPrLavTemp	Outros produtos e serviços da lavoura temporária
Laranja	Laranja
CafeGrao	Café em grão
OutPrLavPerm	Outros produtos da lavoura permanente
BovOutrAnim	Bovinos e outros animais vivos, produtos animais, caça e serviços
LeitVacOuAni	Leite de vaca e de outros animais
Suinos	Suíños
AvesOvos	Aves e ovos
ExplFlorSilv	Produtos da exploração florestal e da silvicultura
PescaAcq	Pesca e aquicultura (peixe, crustáceos e moluscos)
Mineracao	Carvão mineral, Minerais não metálicos, Petróleo, gás natural e serviços de apoio, Minério de ferro e Minerais metálicos não ferrosos
Carnes	Carne de bovinos e outros produtos de carne, Carne de suíno, Carne de aves e Pescado industrializado
OutAliment	Leite resfriado, esterilizado e pasteurizado, outros produtos do laticínio, Açúcar, Conservas de frutas, legumes, outros vegetais e sucos de frutas, Óleos e gorduras vegetais e animais, Café beneficiado, Arroz beneficiado e produtos derivados do arroz, Produtos derivados do trigo, mandioca ou milho, Outros produtos alimentares e bebidas.
OutAgrindus	Rações balanceadas para animais, Produtos do fumo, Fios e fibras têxteis beneficiadas, Tecidos, Artigos têxteis de uso doméstico e outros têxteis, Artigos do vestuário e acessórios, Calçados e artefatos de couro, Produtos de madeira, exclusive móveis Celulose
OutrManuf	Papel, papelão, embalagens e artefatos de papel, Serviços de impressão e reprodução, Artigos de borracha, Artigos de plástico, Cimento, Artefatos de cimento, gesso e semelhantes, Vidros, cerâmicos e outros produtos de minerais não metálicos, Móveis, Produtos de indústrias diversas e Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos
OutCombust	Combustíveis para aviação, Naftas para petroquímica, Óleo combustível, Diesel - biodiesel e outros produtos do refino do petróleo
Gasoalcool	Gasoálcool
Etanol	Etanol e outros biocombustíveis
IndQuimica	Produtos químicos inorgânicos, Adubos e fertilizantes, Produtos químicos orgânicos, Resinas, elastômeros e fibras artificiais e sintéticas, Defensivos agrícolas e desinfetantes domissanitários, Produtos químicos diversos, Tintas, vernizes, esmaltes e lacas, Perfumaria, sabões e artigos de limpeza e Produtos farmacêuticos
IndMetalurg	Ferro-gusa e ferroligas, semiacabados, laminados planos, longos e tubos de aço, Produtos da metalurgia de metais não ferrosos, Peças fundidas de aço e de metais não ferrosos e Produtos de metal, exclusive máquinas e equipamentos

Produtos TERM-BR15	PRODUTOS ORIGINAIS DA MIP2015
IndEIEletron	Componentes eletrônicos, Máquinas para escritório e equipamentos de informática, Material eletrônico e equipamentos de comunicações, Equipamentos de medida, teste e controle, ópticos e eletromédicos, Máquinas, aparelhos e materiais elétricos e Eletrodomésticos
VeicAutom	Tratores e outras máquinas agrícolas, Máquinas para a extração mineral e a construção, outras máquinas e equipamentos mecânicos, Automóveis, camionetas e utilitários, Automóveis, camionetas e utilitários, Peças e acessórios para veículos automotores e Aeronaves, embarcações e outros equipamentos de transporte
EletridGas	Eletricidade, gás e outras utilidades
AguaEsgRes	Água, esgoto, reciclagem e gestão de resíduos
Construcao	Edificações, Obras de infraestrutura e Serviços especializados para construção
Comercio	Comércio por atacado e a varejo
Transporte	Transporte terrestre de carga, Transporte terrestre de passageiros, Transporte aquaviário, Transporte aéreo, Armazenamento e serviços auxiliares aos transportes e Correio e outros serviços de entrega
AlojAliment	Serviços de alojamento em hotéis e similares e Serviços de alimentação
InforComFin	Livros, jornais e revistas, Serviços cinematográficos, música, rádio e televisão, Telecomunicações, TV por assinatura e outros serviços, Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação e Intermediação financeira, seguros e previdência complementar
Servicos	Aluguel efetivo e serviços imobiliários, Aluguel imputado, Serviços jurídicos, contabilidade e consultoria, Pesquisa e desenvolvimento, Serviços de arquitetura e engenharia, Publicidade e outros serviços técnicos, Aluguéis não imobiliários e gestão de ativos de propriedade intelectual, Condomínios e serviços para edifícios, Outros serviços administrativos, Serviços de vigilância, segurança e investigação, Serviços de previdência e assistência social, Serviços de artes, cultura, esporte e recreação, Organizações patronais, sindicais e outros serviços associativos, Manutenção de computadores, telefones e objetos domésticos e Serviços pessoais
AdmPublic	Serviços coletivos da administração pública
EducSaudSoc	Educação pública, Educação privada, Saúde pública e Saúde privada
ServDomest	Serviços domésticos

Fonte: Elaboração própria.

Setores Econômicos	Rondonia	AmazACRR	ParaAP	PiBa	MaTo	RNordeste	MinasG	SaoPaulo	RSudeste	Parana	RSul	MtGrSul	MtGrosso	GoiasDF
29 AguaEsgRes	-8,01	-5,73	-5,6	-6,66	-3,94	-5,27	-5,98	-5,4	-5,37	-8,01	-7,89	-6,44	-5,14	-5,17
30 Construcão	-8,36	-5,84	-5,48	-6,58	-3,3	-5,12	-5,84	-5,5	-5,61	-7,84	-7,37	-6,56	-5,19	-4,85
31 Comercio	-9,12	-6,12	-5,74	-6,91	-3,05	-5	-6,05	-5,71	-5,29	-8,31	-7,56	-7,07	-5,71	-4,66
32 Transporte	-7,48	-5,12	-5,07	-5,77	-3,34	-4,62	-5,17	-4,88	-4,73	-6,81	-6,61	-5,77	-4,53	-4,25
33 AlojAliment	-6,67	-4,35	-3,94	-5,27	-1,59	-3,42	-4,15	-3,99	-3,75	-6,24	-5,33	-5,37	-3,66	-3,04
34 InforComFin	-8,31	-5,94	-6,12	-6,85	-4,75	-5,69	-6,42	-5,76	-5,71	-7,86	-8,21	-6,65	-5,9	-5,92
35 AdmPublic	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36 EducSaudSoc	-10,7	-6,4	-6,75	-7,99	-3,52	-5,95	-6,95	-6,21	-5,96	-9,29	-10,02	-7,6	-5,6	-5,52
37 ServDomest	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38 Servicos	-8,66	-6,59	-6,29	-6,82	-4,32	-5,75	-6,3	-5,87	-5,92	-7,97	-7,8	-6,92	-6,45	-5,55

Tabela 34. Resultados do modelo. Impacto no uso do trabalho entre os setores de atividades. Variação % acumulada em 2030

Classes de Atividade	Setores de Atividade	(var, em relação à linha base)
Agrícola	ArrozTrigOut	-1,68
	MilhoGrao	-1,6
	AlgodHerb	-1,85
	CanaDeAcucar	-0,95
	SojaGrao	-1,15
	OutPrLavTemp	-2,05
	Laranja	-1,87
	CafeGrao	-1,05
	OutPrLavPerm	-1,64
Pecuária	BovOutrAnim	-3,24
	LeitVacOuAni	-3,64
	Suinos	5,33
	AvesOvos	3,58
	PescaAcq	-0,19
Extrativa	ExplFlorSilv	-1,81
	Mineracao	-1,95
Indústria	Carnes	9,74
	OutAliment	-0,91
	OutAgrindus	-2,85

Tabela 35. Resultados do modelo. Impacto no trabalho e no salário real nos setores agrícolas.

Variação % acumulada em 2030

Agricultura	Trabalho (var. em relação à linha base)	Salário Real (var. em relação à linha base)
OCC1	-1,34	0,53
OCC2	-1,51	0,78
OCC3	-1,28	0,60
OCC4	-1,24	0,67
OCC5	-1,35	0,98
OCC6	-1,48	1,18
OCC7	-1,56	1,28
OCC8	-1,63	1,42
OCC9	-1,61	1,36
OCC10	-1,71	1,46

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 36. Resultados do modelo. Impacto no trabalho e no salário real nos setores da pecuária bovina. Variação % acumulada em 2030

Pecuária Bovina	Trabalho (var. em relação à linha base)	Salário Real (var. em relação à linha base)
OCC1	-1,60	0,42
OCC2	-3,34	0,74
OCC3	-3,84	0,59
OCC4	-3,61	0,79
OCC5	-3,79	1,08
OCC6	-3,32	1,32
OCC7	-3,36	1,35
OCC8	-3,20	1,53
OCC9	-3,88	1,40
OCC10	-3,78	1,38

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 37. Resultados do modelo. Impacto no trabalho e no salário real do setor de carnes. Variação % acumulada em 2030

Carnes	Trabalho (var. em relação à linha base)	Salário Real (var. em relação à linha base)
OCC1	8,07	0,82
OCC2	9,51	1,00
OCC3	10,21	0,88
OCC4	10,14	1,06
OCC5	10,03	1,44
OCC6	9,95	1,64
OCC7	9,81	1,69
OCC8	9,60	1,81
OCC9	9,56	1,79
OCC10	9,97	1,90

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 38. Resultados do modelo. Impacto no trabalho e no salário real em outras agroindústrias.

Variação % acumulada em 2030

Outras Agroindústrias	Trabalho (var. em relação à linha base)	Salário Real (var. em relação à linha base)
OCC1	-1,83	0,47
OCC2	-2,17	0,67
OCC3	-2,11	0,77
OCC4	-2,04	0,91
OCC5	-2,11	1,15
OCC6	-2,15	1,30
OCC7	-2,15	1,30
OCC8	-2,11	1,33
OCC9	-2,10	1,31
OCC10	-2,01	1,15

Fonte: Elaboração própria.