

TALITA PRISCILA PINTO

**PRODUTIVIDADE E MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO SETOR DE
PECUÁRIA BRASILEIRO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Dênis Antônio da Cunha

Coorientador: Angelo Costa Gurgel

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2019**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

P659p
2021 Pinto, Talita Priscila, 1988-
Produtividade e mitigação de gases de efeito estufa do setor
de pecuária brasileiro / Talita Priscila Pinto. – Viçosa, MG,
2021.

96 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Dênis Antônio da Cunha.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 76-82.

1. Pecuária. 2. Equilíbrio econômico. 3. Mudanças
climáticas. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Economia. Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada.
II. Título.

CDD 22. ed. 338.1762

TALITA PRISCILA PINTO

**PRODUTIVIDADE E MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO SETOR DE
PECUÁRIA BRASILEIRO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 16 de julho de 2019.

Assentimento:



Talita Priscila Pinto
Autora



Denis Antônio da Cunha
Orientador

AGRADECIMENTOS

Cada objetivo de vida, cada meta a ser alcançada, devem ser encarados como uma maratona. O caminho pode ser longo e árduo, mas a linha de chegada sempre terá sabor de vitória. Aqui, portanto, encerro uma das tantas maratonas que a vida me ofereceu. Encerro com paz no coração, serenidade no peito e sensação de dever cumprido.

A distância percorrida, por muitas vezes, foi suavizada pelos presentes que Deus nos envia constantemente. E é por isso que agradeço a Ele, em primeiro lugar. A forma como a jornada foi conduzida e as decisões tomadas, foram moldadas ao longo de toda a vida, antes mesmo daquele momento acontecer. Agradeço aos meus pais, pela vida e por toda a sabedoria que compartilharam comigo.

Por muitas vezes o trajeto se mostra desafiador e nos faz duvidar de nós mesmos, do nosso potencial, e até mesmo do caminho escolhido. E é por acreditar em mim mais do que eu mesma e me mostrar do que sou capaz, agradeço ao Cícero.

Os desafios são árdusos, mas o conhecimento e dedicação de quem já os superou, nos permitem encará-los com mais confiança. Obrigada aos meus mestres, Dênis Cunha e Angelo Gurgel.

Sempre foi importante olhar para o lado e perceber que não foi um caminho solitário. Agradeço aos meus amigos, a todos, eles sabem quem são.

À Universidade Federal de Viçosa, pela excelência em ensino. Ao Departamento de Economia Rural pela oportunidade de crescimento intelectual e profissional. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

É com muito carinho e com o coração cheio de gratidão que deixo aqui o meu muito obrigada.

“Agir, eis a inteligência verdadeira. Serei o que quiser. Mas tenho que querer o que for. O êxito está em ter êxito, e não em ter condições de êxito. Condições de palácio tem qualquer terra larga, mas onde estará o palácio se não o fizerem ali?”.

(Fernando Pessoa)

RESUMO

PINTO, Talita Priscila, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2019. **Produtividade e Mitigação de Gases de Efeito Estufa do Setor de Pecuária Brasileiro.** Orientador: Dênis Antônio da Cunha. Coorientador: Angelo Costa Gurgel.

O Brasil é considerado um dos principais *players* na produção e comércio global de carne bovina. Apesar da relevância econômica que a pecuária representa para o país, há importante contraponto: sua igual grandeza em contribuir com a emissão de gases de efeito estufa. O setor é responsável por 80% das emissões da agropecuária. Com isso, numerosas estratégias de mitigação têm sido propostas para reduzir os impactos ambientais da produção de gado. Nesse sentido, este estudo combina o modelo de equilíbrio geral computável (EGC) ENVISAGE com três tecnologias propostas pelo Plano de Agricultura de Baixo Carbono (ABC) para determinar o potencial de mitigação e produção de cada uma dessas tecnologias para o setor. Os resultados indicam que a integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) é a tecnologia com maior capacidade de mitigação, reduzindo diretamente as emissões em 172,5 Mt CO₂eq, além de elevar a produção do setor em 10,9%. Todas as tecnologias propostas possibilitam aumento da produção setorial aliado à mitigação de gases de efeito estufa, principalmente CH₄ e N₂O. A inserção das tecnologias do ABC aumenta a produção da pecuária o que implica em um aumento indireto da produção do setor de grãos e alimentos e bebidas. Há também uma maior demanda final pelos produtos agropecuários. A maior produção desses setores, juntamente com o maior consumo agregado, implica em um aumento indireto das emissões de gases de efeito estufa. Entretanto, esse acréscimo nas emissões não é capaz de neutralizar o potencial de mitigação da pecuária. Além disso, o modelo projeta que há um *trade-off* entre mitigação e produção que ocorre ao se atingir uma taxa de lotação entre 4,67-4,99 UA/ha (unidade animal por hectare). Isso quer dizer que dentro desse intervalo troca-se maior produção da pecuária por menor mitigação de gases do efeito estufa e vice-versa. Por outro lado, verifica-se que dado o atual nível de lotação das pastagens no Brasil ainda há um grande espaço para intensificação da pecuária até que o *trade-off* projetado seja de fato atingido.

Palavras-chave: Produtividade da Pecuária. Equilíbrio Geral. Mudanças Climáticas.

ABSTRACT

PINTO, Talita Priscila, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2019. **Brazilian livestock sector's productivity and greenhouse gas mitigation.** Adviser: Dênis Antônio da Cunha. Co-adviser: Angelo Costa Gurgel.

Brazil is one of the main players in global beef production and trade. Despite the economic importance of cattle raising for the country, there is an important counterpoint: its equal importance in contributing to the emission of greenhouse gases. The sector is responsible for 80% of agricultural emissions. With this, numerous mitigation strategies have been proposed to reduce the environmental impacts of livestock production. In this sense, this study combines the ENVISAGE Computable General Equilibrium (EGC) model with three technologies proposed by the Low Carbon Agriculture Plan (ABC) to determine the mitigation and production potential of each of these technologies for the sector. The results indicate that crop-livestock-forest integration (iLPF) is the technology with the greatest mitigation capacity, directly reducing emissions by 172.5 Mt CO₂eq, in addition to increasing the sector's production by 10.9%. All the technologies proposed allow an increase of the sectorial production combined with the mitigation of greenhouse gases, mainly CH₄ and N₂O. The insertion of the technologies of the ABC increases the production of the cattle raising which implies in an indirect increase of the production of the sector of grains and foods and drinks. There is also a greater final demand for agricultural products. The higher production of these sectors, together with the greater aggregate consumption, implies an indirect increase of the emissions of greenhouse gases. However, this increase in emissions is not capable of neutralizing the mitigation potential of livestock. In addition, the model projects that there is a trade-off between mitigation and production that occurs when a stocking rate is reached between 4.67-4.99 AU / ha (animal unit per hectare). This means that within this interval, more livestock production is exchanged for less mitigation of greenhouse gases and vice versa. On the other hand, it is verified that given the current level of pasture stocking in Brazil there is still a large space for cattle raising intensification until the projected trade-off is actually reached.

Keywords: Livestock productivity. General Equilibrium. Climate Change.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Setor de Pecuária	18
FIGURA 2. Representação Tecnológica da Pecuária	42
FIGURA 3. Estrutura de modelagem e análise integrada dos resultados.	47
FIGURA 4. Efeitos das tecnologias do Plano ABC sobre a produção setorial no Brasil.	53
FIGURA 5. Efeitos das tecnologias do Plano ABC sobre o Produto Interno Bruto do Brasil.	56
FIGURA 6. Efeitos das tecnologias do Plano ABC sobre o nível de Bem-Estar das famílias brasileiras.....	57
FIGURA 7. Efeitos das tecnologias do Plano ABC sobre as emissões de Gases e Efeito Estufa no Brasil (Mt CO ₂ eq).	59
FIGURA 8. Efeitos das tecnologias do Plano ABC sobre as emissões de Metano (CH ₄), Óxido Nitroso (N ₂ O), Dióxido de Carbono (CO ₂) e Gases Fluorados (Fgas) no Brasil (Mt CO ₂ eq).....	60
FIGURA 9. Efeitos das tecnologias do Plano ABC sobre as emissões de Metano (CH ₄), Óxido Nitroso (N ₂ O), Dióxido de Carbono (CO ₂) e Gases Fluorados (Fgas) nos setores da economia brasileira (Mt CO ₂ eq).	61
FIGURA 10. Evolução da produção pecuária (%) e redução de emissões de GEEs (MT CO ₂ e) em função da taxa de lotação (UA/ha)	63
FIGURA 11. Efeitos das tecnologias do Plano ABC sobre a produção setorial no Resto do Mundo.	66
FIGURA 12. Efeitos das tecnologias do Plano ABC sobre as emissões de Gases e Efeito Estufa no Resto do Mundo (Mt CO ₂ eq)	67

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1. Considerações iniciais.....	9
1.2. O problema e sua importância	10
1.3. Hipótese	15
1.4. Objetivo Geral	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
3. PLANO ABC E SUAS TECNOLOGIAS	20
3.1. Recuperação de pasto degradado	22
3.2. Melhoramento genético animal	24
3.3. Integração Lavoura Pecuária Floresta	26
4. METODOLOGIA	31
4.1. Modelo ENVISAGE	31
4.1.1. Apresentação do Modelo.....	32
4.1.2. Bloco de produção.....	34
4.1.3. Tecnologia de produção da pecuária.....	40
4.1.4. Emissões de gases de efeito estufa	44
4.1.5. Fechamento macroeconômico.....	46
4.1.6. Desenho do choque.....	46
4.1.7. Cenários implementados	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1. Produção pecuária	52
5.2. Impactos macroeconômicos.....	55
5.3. Impactos sobre a emissão de gases de efeito estufa.....	58
5.4. <i>Trade-off</i> entre produção e mitigação na pecuária.....	63
5.5. Impactos sobre o mercado internacional.....	65
5.6. Discussão.....	68
6. CONCLUSÕES.....	73
REFERÊNCIAS.....	76
ANEXO A	83
ANEXO B	94

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

As mudanças climáticas estão ocorrendo a nível global em ritmo sem precedentes na história da humanidade. Tais mudanças estão diretamente ligadas às emissões antropogênicas¹ de gases de efeito estufa (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2013b). Portanto, um dos grandes desafios do século 21 é desenvolver alternativas para a continuidade do crescimento e desenvolvimento das nações e que, ao mesmo tempo permitam a mitigação de Gases de Efeito Estufa (GEE).

Os setores econômicos contribuem de modo diferenciado com emissões de GEE. Especificamente o setor de Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra (AFOLU) é responsável por cerca de um quarto de todas as emissões antropogênicas de GEE, principalmente por desmatamento, emissões advindas da pecuária, solo e gestão de nutrientes. Anualmente, entre 2000 e 2010, estima-se que as emissões advindas da produção agrícola chegaram a 5.0-5.8 Gt CO₂eq yr⁻¹ (Gt CO₂eq yr⁻¹ refere-se a giga toneladas de CO₂ equivalente por ano), enquanto que das atividades de uso e mudança do uso da terra atingiram cerca de 4.3–5.5 Gt CO₂eq yr⁻¹ (IPCC, 2014). As emissões agrícolas, exceto CO₂, que são o metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e os gases fluorados (HFCs, PFCs, SF₆ e NF₃), representam cerca de metade do total de emissões do setor AFOLU, tendo a pecuária como responsável por cerca de 70% dessas emissões (HAVLÍK et al., 2015).

A pecuária é a fonte de 33% da proteína em dietas humanas e, especialmente em países em desenvolvimento, fornece muitos outros serviços, como adubo e tração animal. Ao mesmo tempo, 30% da área terrestre global é utilizada para a criação de gado, e a expansão do setor é um dos principais contribuintes para a mudança do uso da terra. Estima-se também que 83% da expansão das terras agrícolas dos trópicos, tendo a pecuária como o principal responsável, ocorreu às custas de florestas. Além disso, o setor é responsável por cerca de 80% de todas as emissões agrícolas de GEE (exceto CO₂) e por 12% de todas as emissões antropogênicas de GEE (HAVLÍK et al., 2014).

¹ Aquelas causadas pelo homem.

Um elemento complicador nessa problemática é o fato de o crescimento esperado da população mundial nas próximas décadas levar ao aumento da demanda da proteína animal. Estima-se que a população mundial aumentará em 34% até 2050, chegando a 10 bilhões de pessoas. Com isso, a demanda por proteína animal dobrará (HAVLÍK et al., 2014), o que poderá levar a um aumento das emissões mundiais de GEE.

1.2. O problema e sua importância

Paralelamente ao seu excelente desempenho econômico, a pecuária brasileira gera grande passivo ambiental. De acordo com o Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG, 2016), dos 164,9 milhões de hectares de pastagem brasileiros, 30 milhões apresentam níveis de degradação, com produtividade extremamente baixa por hectare (MAPA, 2015). Com o aumento da quantidade de bovinos no país, o setor é responsável por 57% das emissões totais de GEE da agropecuária brasileira (Sistema de Estimativa de Emissão de Gases - SEEG, 2014).

Ademais, entre 1970 e 2016 a evolução positiva das emissões de GEE na agricultura foi de 165% e acompanhou o crescimento do rebanho bovino e das principais culturas agrícolas (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2018). As emissões diretamente vinculadas à produção animal aumentaram anualmente, desde 2000, cerca de 1,1%, associadas ao crescimento constante da procura de produtos de origem animal (SAI, 2014). As projeções mostram que, em um cenário “*business as usual*”, as emissões irão acompanhar o crescimento da demanda global (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2015). Se essas tendências permanecerem no futuro, é possível que haja aumentos significativos nas emissões de GEE, desmatamento, perda de biodiversidade e outros impactos negativos sobre o meio ambiente (HERRERO et al., 2016).

O setor de pecuária tem grande potencial de mitigação, podendo atingir até 50% do potencial global do setor AFOLU (HERRERO et al., 2016). Essa capacidade é extremamente significativa, mas considerando os desafios científico, técnico, econômico e social, a maior parte desse potencial não foi atingindo. Assim, é importante compreender que as mudanças necessárias afetarão meios de

subsistência, empregos, economia, segurança alimentar e meio ambiente, portanto exige atenção urgente dada sua relevância política.

A expansão da pecuária tem sido um componente importante do crescimento do agronegócio brasileiro. No acumulado de 2018 o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro atingiu R\$ 6,83 trilhões e o PIB do agronegócio, que responde por 21% desse total, atingiu R\$ 1,43 trilhão, dos quais 27% é composto pelo complexo pecuário brasileiro² (MDIC, 2018). O Brasil ainda se enquadra como o segundo maior exportador mundial de carne bovina, responsável por 18% de todo o volume mundial embarcado em 2018 e por 15% de todo o volume produzido (USDA, 2019). Entre 1970 e 2017, o número de cabeças de gado no país aumentou de 82 milhões para 214,8 milhões (IBGE, 2017). Além disso, a pecuária representa 33% do valor bruto da produção (VBP) agropecuária, atingindo R\$ 176 bilhões em 2017. A pecuária de corte detém cerca de 40% desse total, fechando 2017 com VBP de aproximadamente R\$ 70 bilhões (MAPA, 2018a), permanecendo atrás apenas do complexo da soja. Deve-se ressaltar também que a pecuária registrou ganhos de produtividade que geraram crescimento de 89% na produção de carne bovina entre 1950 e 2017 (USDA, 2019), economizando 525 Mha de terra (HAVLÍK et al., 2014).

O desempenho brasileiro, tanto no que diz respeito à produção pecuária, quanto às suas emissões, é de fundamental importância ao se considerar os compromissos de mitigação assumidos pelo país. Segundo dados da *intended Nationally Determined Contribution* – iNDC (2015), o Brasil comprometeu-se a reduzir até 2025 a emissão de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis emitidos em 2005, e subsequentemente, reduzir até 2030 em 43% abaixo dos níveis de 2005.

As Ações Nacionalmente Apropriadas de Mitigação (NAMAs) para o setor AFOLU propõem a redução, até 2020, de 80% do desmatamento da Amazônia Legal e de 40% no Cerrado; a expansão da produção e do uso de biocombustíveis e práticas agropecuárias de baixo carbono. A NDC brasileira objetiva eliminar o desmatamento ilegal na Amazônia até 2030, implementar de maneira efetiva o Código Florestal e restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas até 2030 e ampliar a escala de sistemas de manejo sustentável de florestas nativas.

Além das ações que contribuem para redução das emissões de GEE do setor florestal brasileiro, há também ações voltadas para o setor agrícola e pecuário. A

² Considerando apenas carnes, tais quais bovina, suína e frango.

principal estratégia para o desenvolvimento sustentável agrícola é o fortalecimento do Plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono), inclusive por meio da restauração adicional de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas até 2030 e pelo incremento de cinco milhões de hectares de sistemas de integração lavoura-pecuária-florestas (iLPF) até 2030.

Dado o compromisso brasileiro para evitar o desmatamento e a emissão de GEE há novos investimentos em pesquisa e em tecnologias que objetivam ganhos de produtividade, concomitantemente a redução de emissões de GEE. O setor pecuário tem recebido atenção especial, já que há potencial para obter ganhos de produtividade (cerca de 20% do total da área do Brasil é dedicado a pastagens que suportam, em média, menos de um animal por hectare) (COHN et al., 2014; IBGE, 2009; STRASSBURG et al., 2014). O sistema *Land Sparing*, onde a agricultura de alta produtividade é praticada, exigindo uma área menor de terra para manter os mesmos níveis de produção, apresenta-se como alternativa viável para a intensificação sustentável da pecuária contribuindo com o aumento da produtividade e, ao mesmo tempo, permitindo reduções de emissões de GEE (GIL; GARRETT; BERGER, 2016).

Devido à ganhos de produtividade, a intensidade das emissões de GEE da produção animal, ou seja, as emissões geradas na produção de cada kg de carne ou por litro de leite produzido, diminuiu significativamente, cerca de 38% a 76% para vários produtos pecuários. Uma vez que se prevê que a demanda por proteína animal continue a aumentar nas próximas décadas, são necessárias novas reduções na intensidade das emissões para limitar a carga ambiental decorrente da produção alimentar, assegurando, simultaneamente, um fornecimento suficiente de alimentos ricos em proteínas e de elevada qualidade para uma população mundial em crescimento (SAI, 2014).

Nesse sentido, pode-se afirmar que a otimização dos sistemas já existentes é capaz de contribuir significativamente para a redução de emissões (HERRERO et al., 2013). O sistema iLPF é apresentado como estratégia promissora para melhorar a produtividade pecuária brasileira (GIL; GARRETT; BERGER, 2016), bem como de culturas e pastagens e, subsequentemente, com as melhorias de fertilidade do solo, auxiliando no crescimento animal (CARVALHO et al., 2014; LEMAIRE et al., 2014; SALTON et al., 2014). O sistema também é capaz de reduzir as emissões líquidas de GEE e o escoamento de nutrientes por unidade de produção agrícola, melhorando o

estruume animal, os resíduos de colheitas e diminuindo o tempo necessário para que o gado alcance seu peso de abate (BARBOSA ALVIM et al., 2015). Com o potencial de mitigação do sistema, aliado às tecnologias de recuperação de pastagens, seria possível evitar emissões totais de 0.67GtCO_{2e} em um período de 10 anos (OBSERVATÓRIO ABC, 2015).

Outra possibilidade para obter ganhos de produtividade se dá por meio de melhoramento genético, que está entre os mais eficazes para reduzir as emissões de GEE por unidade de produto. Dentre os benefícios há o melhoramento de animais para a produção, ganhos em desempenho reprodutivo, melhorias na saúde animal e nas taxas de ganho de peso vivo (GILL; SMITH; WILKINSON, 2010; HRISTOV et al., 2013). O aumento na taxa de reprodução diminui o tamanho do rebanho, aumenta o pasto disponível e a produtividade do rebanho, reduzindo as emissões diretas da pecuária. Os ganhos de peso vivo reduzem as emissões por unidade de produto nos sistemas de produção de carne. Melhorias na saúde animal ajudam a reduzir a mortalidade, aumentando a produtividade e reduzindo a intensidade das emissões, bem como a adoção de tecnologias de gestão reprodutiva que visam aumento da taxa de concepção, fecundidade e redução da perda de embriões. As práticas citadas poderiam reduzir as emissões no setor pecuário em 0.2GtCO_{2eyr}⁻¹ até 2050 (HERRERO et al., 2016).

Dado o exposto, considerando o crescimento da população mundial e de sua demanda por proteína animal, gerando crescentes exportações de carne bovina brasileira, há iminente necessidade de maior produção por parte do setor de pecuária, além de maior produtividade. Para que esse objetivo seja atingido serão necessários esforços a nível nacional, em termos de políticas governamentais, e a nível local, em termos de adoção de práticas que aumentem a produtividade do setor. Contudo, além do espaço para ganhos de produtividade, há a necessidade do cumprimento dos compromissos nacionais de redução de emissões. O acordo inclui redução das emissões diretas, utilizando medidas que visam alterar a dieta, genética e saúde do animal, além de redução das emissões indiretas, utilizando sistemas poupadores de terra, como iLPF, e recuperação de pastagens.

Portanto, o presente estudo pretende analisar qual é o efeito, em termos de redução de emissões de GEE, que ganhos de produtividade do setor de pecuária brasileiro poderiam gerar. Ademais, pretende-se responder, quais seriam os

encadeamentos setoriais e econômicos que tais ganhos poderiam proporcionar. E, finalmente, quais seriam os efeitos ambientais positivos em termos de redução de emissões de GEE resultantes do aumento de produtividade?

O foco do presente estudo será o setor de ruminantes, especificamente os bovinos. A escolha se justifica pois, no contexto da pecuária, os ruminantes representam mais de 80% do total de emissões de GEE no Brasil. Ademais, dadas as alterações esperadas na dieta dos países em desenvolvimento, estima-se que a demanda por carne bovina aumentará cerca de 44% a 55% (HAVLÍK et al., 2014).

Com o crescimento da população global e do consumo de proteína animal, será possível estimar a capacidade produtiva do setor de pecuária brasileiro, bem como sua capacidade de abastecimento interno de carne. Além disso, estimar também a capacidade de mitigação por parte do setor, analisando, portanto, a viabilidade produtiva e ambiental das medidas aplicadas. Adicionalmente, analisar como os esperados ganhos produtivos impactariam o consumo interno, e a economia como um todo.

No Brasil, grande proporção de terras agrícolas faz uso de práticas de pecuária extensiva, o que fornece oportunidade para ampla implementação de mecanismos de intensificação sustentável e potencial mitigação dos efeitos adversos das emissões diretas e indiretas advindas desse setor. Caso os agricultores sejam devidamente informados e recompensados pelos benefícios ambientais derivados da intensificação sustentável de pastagens, haverá motivação econômica para uma transição que não incentive sistemas tradicionais extensivos, de baixa produtividade e ecologicamente custosos que ainda predominam nos trópicos. O desafio é fazer com que as práticas sejam efetivamente adotadas para atenuar os *trade-offs* entre produtividade e mitigação, além de ajudar a garantir segurança alimentar.

Para o desenvolvimento da pesquisa, utiliza-se um modelo econômico desenvolvido para avaliar as interações entre o sistema econômico, meio ambiente e emissões antropogênicas de GEE associado à um módulo suplementar de pecuária para determinar o *trade-off* entre produção e mitigação, bem como os efeitos econômicos encadeados da inserção de diferentes tecnologias de baixo carbono no setor de pecuária. A definição desse *trade-off* é fundamental para determinação do potencial de crescimento da pecuária brasileira que dá base às políticas agroambientais implementadas frente aos desafios apresentados anteriormente. A

pesquisa indica que existe *trade-off* entre mitigação e produção somente em elevada produtividade (taxa de lotação), ou seja, próximo ao potencial máximo do setor.

1.3. Hipótese

Tecnologias do Plano ABC promovem ganhos de produtividade que tornam a pecuária grande mitigadora de GEE no setor agrícola. Além disso, geram impactos positivos no PIB e Bem-Estar do Brasil.

1.4. Objetivo Geral

Analisar cenários de ganhos de produtividade do setor de pecuária brasileiro, seu efeito sobre a redução de emissões de GEE e sobre a economia brasileira.

1.5. Objetivos Específicos

- i) Determinar qual é o efeito dos ganhos de produtividade do setor de pecuária brasileiro sobre a redução setorial das emissões diretas e indiretas de GEE;
- ii) Determinar quais serão os efeitos sobre o PIB, a produção setorial e o bem-estar do Brasil e qual é o efeito de transbordamento sobre os demais setores da economia.

2. REFERENCIAL TEÓRICO³

Alterações climáticas se referem a mudanças no estado do clima que podem ser identificadas por mecanismo estatísticos, por exemplo, através de mudanças na média ou variabilidade de suas propriedades e que persistem por um longo período. Diz respeito a qualquer mudança de clima ao longo do tempo, seja devido à variabilidade natural ou como resultado da atividade humana (IPCC, 2013a).

As evidências mostram que as concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa importantes como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) aumentaram nos últimos séculos. As atividades humanas afetam o fornecimento de energia da Terra, alterando emissões e concentrações atmosféricas resultantes de gases e aerossóis radiativamente importantes e também as propriedades da superfície terrestre. Avaliações anteriores mostram que o clima está mudando em todo o planeta e a influência humana sobre o sistema climático é clara. Isto é evidente pelas concentrações crescentes de gases com efeito de estufa na atmosfera, aquecimento observado e compreensão do sistema climático (IPCC, 2013a).

Para analisar as incertezas que as atuais e futuras gerações irão enfrentar a ciência é solicitada a fornecer evidências para as alterações climáticas e também para ajudar na formulação de políticas, explorando opções de adaptação e mitigação. Análises quantitativas baseadas em diferentes tipos de modelos têm sido usadas na tomada de decisões sobre políticas climáticas. Por exemplo, modelos de economia de energia e clima foram desenvolvidos e aplicados na última década com o intuito de analisar segurança energética e mitigação de GEE por parte do setor (KAHOULI-BRAHMI, 2008). Progressos também foram feitos na modelagem de mudanças tecnológicas e como utilizá-las para reduzir as emissões de GEE sem comprometer a produtividade de diversos setores.

A mudança climática global é um dos principais problemas enfrentados pelos formuladores de políticas em todo o mundo. Isso acontece pois, em termos de análise econômica, as emissões de gases de efeito estufa, que causam mudanças climáticas globais, representam tanto uma externalidade ambiental, quanto o uso excessivo de um recurso de propriedade comum. As alterações climáticas podem ser

³ Essa seção foi baseada na teoria descrita por Tietenberg e Lewis (2016).

caracterizadas, portanto, como uma tragédia dos bens comuns. A "tragédia dos comuns" refere-se à situação em que os indivíduos, atuando racionalmente em seu próprio interesse, agem irracionalmente como um grupo coletivo, destruindo de forma irreparável um recurso comum.

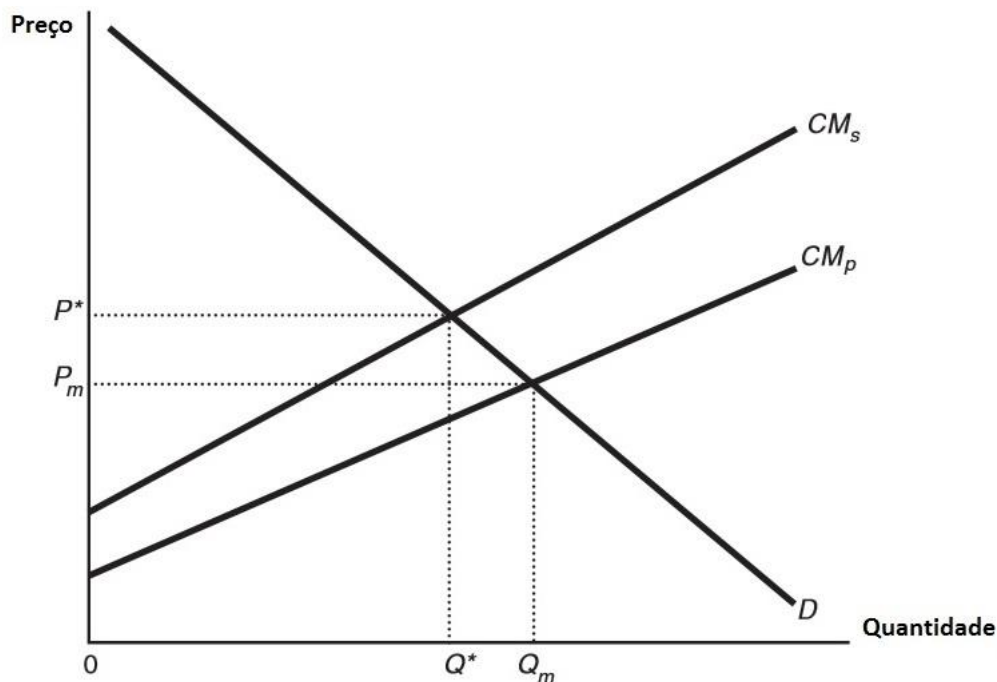
A atual crise das mudanças climáticas é um exemplo de "tragédia" em escala global. Da mesma forma que uma área de vegetação natural sem direito de propriedade definido é um recurso comum que pode ser usado pela comunidade local agrícola, a atmosfera é um recurso comum que é apreciado pela população do mundo. A "tragédia" surge porque o incentivo para cada pecuarista fazer sacrifícios em benefício do meio ambiente é significativamente menor do que seria para um recurso de propriedade privada. A "tragédia" acontece porque os esforços feitos para preservar o meio ambiente beneficiam todos os usuários na mesma medida. Da mesma forma, a destruição afeta negativamente cada usuário em igual medida. O dilema surge, portanto, devido à dificuldade de privatizar os benefícios obtidos através dos sacrifícios do pecuarista para preservar o meio ambiente. Esses benefícios são necessariamente compartilhados igualmente por todos os agentes, levando ao problema do "*free rider*". Esses obstáculos podem resultar em indivíduos mais relutantes em fazer sacrifícios gerando destruição ou esgotamento do meio ambiente (GORMAN, 2010).

O efeito das emissões de GEE do setor agrícola resulta em alterações climáticas, afetando diretamente o próprio setor, os demais agentes da economia e o meio ambiente. Caso o setor agrícola não considere os efeitos negativos que causa aos demais, esse custo social em não será considerado em suas tomadas de decisão. Como resultado, pode-se esperar que a quantidade emitida de GEE será mais alta do que o nível eficiente do ponto de vista econômico. A situação descrita é chamada de externalidade. A externalidade existe sempre que o bem-estar de algum agente, seja uma empresa ou uma família, não depende apenas de suas atividades, mas também das atividades de outro agente. O efeito desse custo externo, que no presente estudo é causado pelo setor de pecuária, pode ser ilustrado na Figura 1.

Emissões de GEE geram externalidades negativas, tendo como principal fator a mudança do clima, já que afeta diretamente agentes que não são causadores dessas alterações. Isso os força a se adaptarem, gerando custos sem prover nenhum tipo de reembolso pelos efeitos adversos sofridos. Ademais, quando os indivíduos

investem em ações de mitigação para conter as mudanças climáticas, o resultado é o fornecimento de bens públicos (redução de emissões de GEE), que também não são remunerados.

FIGURA 1. Setor de Pecuária



Fonte: Tietenberg e Lewis (2016).

Para a análise da Figura 1, deve-se considerar que a produção pecuária inevitavelmente envolve a produção de GEE. A demanda por carne é mostrada pela curva D , e o custo marginal privado de produzir a carne é descrito como CM_p . Como a sociedade considera tanto o custo da emissão quanto da produção de carne, a função de custo marginal social (CM_s) inclui ambos.

Se o setor pecuário não se depara com nenhum controle externo de emissões, produz a quantidade Q_m . Essa escolha, em um ambiente competitivo, maximizaria o excedente do produtor privado, mas não é eficiente, uma vez que o benefício social líquido é maximizado em Q^* e não em Q_m .

A partir da Figura 1 é possível inferir algumas conclusões sobre como o mercado pode gerar externalidades. A produção de *commodities* é muito grande; há, portanto, emissão excessiva de GEE; os preços de produtos responsáveis pela emissão são baixos; como os custos são externos, não há incentivos para diminuir a

emissão por unidade de produção; e tecnologias de mitigação e adaptação por parte do setor são desencorajados porque emitir GEE no meio ambiente tem custos baixos. Os efeitos dessa imperfeição do mercado acabam afetando a demanda por matérias-primas, mão de obra, e assim por diante. Os efeitos finais são sentidos por toda a economia.

Caso o setor passe a se preocupar com suas emissões e o efeito por elas gerado, e comece a investir em tecnologias mitigadoras, o benefício recairá sobre os demais agentes e o meio ambiente, configurando assim um bem público. Os bens públicos, definidos como aqueles que são não-rivais e não-excludentes, representam uma categoria particularmente complexa de recursos ambientais. A não-exclusividade refere-se a uma circunstância em que, uma vez que o recurso é fornecido, mesmo aqueles que não pagam por ele poderão desfrutar dos benefícios que ele confere. Já a não-rivalidade sugere que o consumo de um bem por um agente não diminui a quantidade disponível desse bem para os demais agentes. As reduções de emissões de GEE são, portanto, caracterizadas como bens públicos.

Ao contribuir para a mitigação de emissões de GEE, o setor pecuário pode trabalhar em duas frentes, reduzindo as emissões diretas e também as indiretas. As contribuições para a redução de emissões e do desmatamento geram bens públicos, nos quais se enquadram paisagem agrícola e florestal; biodiversidade das terras agrícolas e florestas; qualidade e disponibilidade da água; funcionalidade do solo, estabilidade climática (emissões de gases com efeito de estufa, armazenamento de carbono), qualidade do ar, resiliência a inundações e incêndios. Além dos citados, ainda há a segurança alimentar; vitalidade rural; bem-estar e saúde dos animais.

Os bens públicos fornecem uma função social direta. Há também uma série de benefícios sociais e econômicos secundários que dependem, parcial ou totalmente, da existência dos bens públicos fornecidos pela agricultura (COOPER; HART; BALDOCK, 2009). As preocupações relacionadas a provisão desses bens incluem questões ambientais, especialmente no que se refere à perda de biodiversidade, mitigação das alterações climáticas, poluição da água e do ar e, em particular, o esgotamento dos recursos naturais, incluindo a qualidade do solo. Portanto, os bens públicos considerados podem garantir crescimento econômico real, contínuo, de curto e longo prazo, baseado em sistemas ecológicos, sociais e economicamente sustentáveis.

3. PLANO ABC E SUAS TECNOLOGIAS

Modelos de Equilíbrio Geral Computável (EGC) vem sendo amplamente empregados para análises de impactos em diferentes setores da economia, inclusive o setor agrícola. Existem muitas vantagens importantes oferecidas por esse tipo de abordagem para a análise de políticas públicas (HERTEL et al., 1999).

Hertel et al., (1999) apresentam algumas dessas vantagens. A primeira delas é o foco nas famílias, sendo estas agentes que fornecem fatores de produção e consomem bens e serviços. Além disso, o nível de bem-estar desse tipo de abordagem é calculado em termos de utilidade doméstica já que a maioria das famílias incorpora uma combinação de geração de renda, gastos do consumidor e pagamento de impostos ou recebimento de subsídios. Outra vantagem é a condição de recursos finitos e consistência contábil, já que modelos de EGC utilizam matrizes de contabilidade social ou insumo produto em sua estrutura empírica, o que garante o equilíbrio da economia. Sendo assim, as famílias não podem gastar mais do que recebem ou a mesma unidade de fator de produção (terra, capital ou trabalho) não pode ser empregada simultaneamente em dois lugares diferentes.

Os autores também argumentam que uma das características distintivas da análise de políticas agrícolas é o alto grau de intervenção pública no setor agrícola e de alimentos. A possibilidade de diferentes intervenções políticas dificulta a antecipação da eficiência dos resultados de uma perturbação marginal ou da aplicação das mais variadas políticas aplicadas ao setor agrícola.

Principalmente em países em desenvolvimento, o setor de pecuária vem evoluindo ao longo dos últimos anos em resposta à crescente demanda por seus produtos.

Intervenções sustentáveis na cadeia produtiva do setor de pecuária, são cada vez mais comuns, mas as evidências quanto à eficácia das aplicações de tecnologias que tornam o setor sustentável ainda são relativamente escassas. Nesse sentido, focando o bioma cerrado, Oliveira Silva et al. (2017) analisam a relação custo-benefício do potencial de mitigação de GEEs da pecuária brasileira, considerando custos e benefícios privados e sociais. Os autores utilizam um modelo de otimização

para definir os custos de redução e projetam que as emissões do setor na região atingirão 2,6 Gt CO₂e entre 2010 e 2030, o que corresponde a 9% das emissões nacionais. Ao implementar medidas de custo negativo, identificadas em uma curva de custo de redução marginal (MACC) até 2030, o volume de emissões pode ser reduzido em cerca de 24%. A restauração de pastagens, envolvendo o desmatamento evitado, oferece a maior contribuição para esses resultados.

A intensificação agrícola é um componente essencial de oferta, permitindo que o país assuma compromissos de mitigação críveis, alinhados com uma estratégia nacional de desenvolvimento para deter o desmatamento na Amazônia e aumentar a produção pecuária. Esse resultado pode ser atingido com a compreensão da viabilidade técnica, econômica e política da intensificação pela restauração de pastagens. Utilizando modelagem em bioeconomia para demonstrar a extensão da mitigação custo-efetiva que poderia ser fornecida por essa medida e para mostrar um resultado que sustenta a meta de desmatamento do Brasil.

A produção de carne bovina tem um importante papel econômico, social e ambiental para o Brasil. O país é o segundo maior produtor mundial e o líder exportador. Além disso, o setor responde por 33% do VBP da pecuária (MAPA, 2018a), 31% do PIB do agronegócio e colabora ativamente com a manutenção do superávit da balança comercial brasileira. Nesse sentido, é possível concluir que o setor, além de se destacar no comércio internacional, ajuda a promover a economia nacional, inclusive com sua capacidade de geração de empregos (COSTA JR. et al., 2019).

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes (ABIEC, 2018), a circulação de valor na cadeia de produção pecuária brasileira movimentou cerca de R\$ 523 bilhões em 2017, contribuindo com a dinamização e movimentação de valores desde o campo, passando pela indústria até o comércio.

Apesar de toda a contribuição para a evolução e desenvolvimento econômico do país, o setor ainda gera um grande passivo ambiental, e a agropecuária responde por 22% das emissões brutas e 28% das emissões líquidas de gases de efeito estufa do país (SEEG, 2018). Além disso, 64,8% das emissões diretas da agropecuária são geradas por fermentação entérica, sendo esta a principal fonte, seguida pelo processo de degradação do solo. Portanto é premente a necessidade de promover a produção sustentável do setor, de modo que haja ganhos de produtividade com emissões de

GEE indo na direção oposta. Nesse sentido o Plano da Agricultura de Baixo Carbono (ABC) propõe tecnologias que além de mitigadoras, objetivam promover ganhos de produtividade e podem levar o setor de carne bovina a se tornar uma atividade com potencial de sequestrar carbono (BERNDT; TOMKINS, 2013; FRANZLUEBBERS; DE FACCIO CARVALHO; DEDIEU, 2014; HERRERO et al., 2016; SOUSSANA, 2014). Essas tecnologias podem reduzir emissões de GEE e melhorar a eficiência do sistema elevando a produtividade (COSTA JR. et al., 2019). Algumas das tecnologias propostas são abordadas neste estudo: melhoramento genético animal, integração lavoura pecuária floresta e recuperação de pastos degradados.

3.1. Recuperação de pasto degradado

Pastagens degradadas são aquelas que perderam progressivamente vigor, produtividade e capacidade de recuperação natural para manter os níveis de produtividade e qualidade para atender as exigências animais e superar efeitos nocivos de pragas e doenças (ASSAD, 2015). A degradação advém de manejo inadequado e gera deterioração de recursos naturais. Com a evolução desse processo há perda de cobertura vegetal e diminuição de matéria orgânica no solo, causando emissão de CO₂. Ao se recuperar as pastagens, o processo é invertido e o solo passa a acumular carbono (ASSAD, 2015).

O processo de degradação de pastagens tem como característica indicativa o suporte de animal ao longo do tempo. Se há monitoramento da exploração pecuária, observa-se inicialmente queda da capacidade de suporte para uma mesma oferta de forragem. Se ações de manejo não forem colocadas em prática, quantidade e qualidade da forragem começam a decair refletindo diretamente no desempenho animal. Nessa fase é possível que haja áreas descobertas com ausência de forragem e exposição do solo. Podem surgir invasoras e pragas já que há perda de recuperação natural por parte da pastagem cultivada que compete com espécies nativas (ZIMMER et al., 2012).

O processo de recuperação de pastagens degradadas está entre os compromissos voluntários brasileiros assumidos para a redução de emissão de GEE. Pastagens recuperadas reduzem pelo menos em 60% as emissões de CO₂ em um sistema de produção. A reposição de nutrientes na pastagem melhora a qualidade da

dieta animal, reduzindo o tempo de abate e com isso a emissão de gás metano (CH₄) pela fermentação entérica (KURIHARA et al., 1999), além de aliviar a pressão para converter novas áreas naturais em pastagem. Quando comparado a um pasto degradado, a recuperação de pastagem proporciona maior estoque de carbono ao sistema já que, com o acúmulo de matéria orgânica no solo, há menores perdas de CO₂ para a atmosfera.

Nesse sentido, ao se analisar a sustentabilidade da pecuária brasileira, é possível perceber que ela é baixa e um dos principais sinais é a degradação do solo, tendo o manejo inadequado do rebanho como a principal causa dessa degradação. (BALBINO et al., 2011). Além disso, a derrubada de florestas para a produção agrícola e pecuária impulsionou as taxas nacionais de desmatamento contribuindo para a perda de biodiversidade, mudança climática e aquecimento global.

Apesar de haver certa divergência em relação ao tamanho da área degradada no Brasil, há estudos que apresentam alguns indicativos. Em um diagnóstico das pastagens brasileiras realizado pela Embrapa, estima-se que cerca de 50% estejam fortemente degradadas (DIAS-FILHO, 2014). Em um trabalho coordenado entre a Embrapa e o GV Agro (2016), o mapeamento revela que cerca de 30% dos pastos encontram-se degradados. Já Heil Costa et al. (2017) estima que cerca de 35% estão em processo de degradação e apresentam potencial para serem recuperadas.

Em um estudo desenvolvido por Assad (2015), o autor aponta que a média da capacidade de suporte das pastagens é de 0,4 Unidade Animal por hectare (UA/ha), considerada baixa, mas em um cenário em que o pasto é recuperado essa taxa pode chegar a 1,0 UA/ha, criando um efeito poupa-terra onde, além de ser gerada mais renda para o produtor, haverá a diminuição da pressão por novas terras para a pecuária.

Em um mapeamento das pastagens apresentado pelo MapBiomass (PARENTE, 2017), baseado em dados do Censo Agropecuário 2016 e na pesquisa da Produção Pecuária Municipal (PPM) foi apresentado o cálculo de uma taxa média de lotação em torno de 0,89 UA/ha para o ano de 2015.

No trabalho coordenado por Alvim et al. (2015), os autores analisam o resultado de recuperação de pastagens degradadas com diferentes espécies de forrageiras sob diferentes correções e adubações do solo. Os resultados apresentam uma taxa de lotação de 0,5 UA/ha para pastos degradados, e, sob diferentes técnicas de manejo,

taxas de 1 UA/ha para uma pastagem extensiva melhorada e 1,5 UA/ha quando há adubação.

Considerando que as taxas médias de lotação do rebanho brasileiro já são consideradas baixas e quando há degradação do pasto essas taxas são ainda menores, existe um incentivo para que técnicas de recuperação sejam adotadas, já que possibilitam aumento de produtividade, tem efeito poupa-terra e ainda contribuem para a redução de GEEs.

3.2. Melhoramento genético animal

A pesquisa e a inovação tecnológica voltadas para a produtividade das culturas e animais permitem aos agricultores fazer face a várias condições climáticas e tem se mostrado fundamentais para o crescimento e desenvolvimento da agricultura e pecuária nos países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Embora a criação voltada para o aumento da produtividade já exista e tenha reduzido a intensidade das emissões, reduções mais rápidas nos níveis de emissão podem ser alcançadas selecionando traços que estão mais altamente correlacionados com os níveis de emissão de metano (CH₄) do que com a produção (HAYES; LEWIN; GODDARD, 2013). Nesse sentido, pesquisa e aplicações focadas no melhoramento genético do rebanho podem contribuir com sistemas mais sustentáveis e que se adaptam melhor às variações impostas pelas mudanças climáticas, diminuindo o estresse térmico sofrido pelo animal.

O estresse térmico é conhecido por alterar a fisiologia do gado, reduzir a reprodução e produção de machos e fêmeas e aumentar a mortalidade. O estresse por calor suprime o apetite e a ingestão de alimentos. As rações para animais de alto desempenho precisam, portanto, ser reformuladas para dar conta da necessidade de aumentar a densidade de nutrientes. As temperaturas do corpo além de 45-47 °C são letais na maioria das espécies (HOFFMANN, 2010). O estresse térmico é um fator importante na determinação de ambientes de produção específicos (ZWALD et al., 2003), já que se espera aumentos de temperatura a nível global, além da redução da precipitação em algumas áreas, particularmente em regiões já áridas.

A produção e a fertilidade de alguns animais são menos afetadas pelo estresse por calor do que por outros, e essa resposta é hereditária. Além de reprodução seletiva

para resistência ao calor, ganhos mais rápidos podem ser possíveis usando raças adaptadas e cruzamentos (AGUILAR; MISZTAL; TSURUTA, 2010; BLOEMHOF et al., 2008; BRÜGEMANN et al., 2011). Com isso, é possível introduzir genes desejáveis de uma raça ou subespécie em outra mais rapidamente do que no passado, utilizando a seleção de genes combinada com tecnologias mais avançadas de reprodução.

O melhoramento genético pode ser viabilizado através de ações técnicas que promovem melhoria em índices como: produtivos e reprodutivos e redução da idade de abate; melhoramento genético de rebanho; redução da idade do primeiro parto e do intervalo entre partos; e aumento da taxa de criação (COSTA JR. et al., 2019). Dentre as ações técnicas de melhoramento genético estão:

- Alterações na dieta animal: Existe uma forte correlação entre a ingestão de matéria seca e os níveis de emissão. Sendo assim, a ingestão reduzida de matéria seca contribui para a queda de emissão de metano (HAAS et al., 2011).
- Reprodução seletiva: As raças de bovinos utilizadas para a produção de carne diferem em capacidade de adaptação ao clima, resistência aos parasitas, taxas de crescimento, habilidade materna, eficiência reprodutiva, acabamento de carcaça, exigências nutricionais, entre outros aspectos. A escolha do cruzamento entre animais que tem características desejáveis pode contribuir com a sustentabilidade do rebanho (ALVIM et al., 2015).
- Aumento da eficiência da utilização de recursos animais: Elevar a eficiência da utilização de recursos animais e otimizar o suprimento de rações e aditivos para ração reduz a excreção de CH₄ dos ruminantes.
- Utilização de rebanhos multi-espécies e multi-raças: Muitos criadores de gado tradicionais usam essa técnica para manter a alta diversidade em nichos agrícolas e para compensar adversidades climáticas e econômicas (HOFFMANN, 2010). Tais práticas são úteis, já que o ambiente sob o qual a produção ocorre mudará no futuro.

Além de promover sustentabilidade do sistema de produção, a diversidade genética animal é fundamental para promover segurança alimentar e desenvolvimento rural. Isso se dá pela possibilidade de os agricultores selecionarem ações ou desenvolverem novas raças em resposta às mudanças climáticas, ameaças de doenças novas ou recorrentes, além de se adaptar a novos conhecimentos sobre as necessidades nutricionais humanas e mudanças nas condições do mercado ou nas necessidades da sociedade. O aumento esperado da demanda por alimentos terá

efeitos mais acentuados nos países em desenvolvimento, já que deverá ocorrer a uma taxa mais rápida do que o aumento da produção (HOFFMANN, 2010).

Cardoso et al. (2016a) apresentam 5 cenários de melhoramento genético, composto por diferentes cruzamentos de raças, aliado à técnicas e manejo do solo. No primeiro cenário, em que não há técnicas de manejo e o cruzamento da raça dos bovinos é indefinido a taxa de lotação encontrada é de 0,5 UA/ha. Já nos cenários 02 a 05, em que há algum tipo de manejo e especificação do cruzamento das espécies, as taxas encontradas são de 1,0 UA/ha, 1,7 UA/ha, 2,5 UA/ha e 2,75 UA/ha respectivamente, esta última se deu com cruzamento da raça Nelore.

Com base na extensa variação natural existente, há a oportunidade para o melhoramento do gado e potencial para reproduzir novas características genéticas necessárias para enfrentar os desafios nas próximas décadas. O aumento da produtividade é uma condição necessária para todos os sistemas de produção dada a necessidade de utilizar de forma eficiente os insumos disponíveis e de reduzir a pegada ambiental do setor pecuário. Além da seleção para o aumento da produção per si, qualquer seleção que reduza a mortalidade e aumente a maturidade precoce, fertilidade e longevidade tende a contribuir para a redução das emissões de GEE por unidade de produção.

3.3. Integração Lavoura Pecuária Floresta

O interesse pela sustentabilidade dos sistemas agrícolas e alimentares pode ser atribuído a preocupações ambientais que começaram a aparecer entre as décadas de 50 e 60 (PRETTY, 2008). As apreensões com a sustentabilidade se concentram na necessidade de desenvolver tecnologias e práticas agrícolas que não tenham efeitos adversos sobre o meio ambiente, sejam acessíveis aos agricultores, e conduzam a melhorias tanto produtivas quanto ambientais. A sustentabilidade em sistemas agrícolas incorpora conceitos de resiliência aliados a capacidade dos sistemas de perdurarem por longos períodos.

A utilização de monoculturas, principalmente de grande escala, e/ou sistemas contínuos de pastagens em detrimento de sistemas integrados contribui para os

desafios ambientais, gerando maiores emissões de gases de efeito estufa, poluição da água e do ar, salinização e perda de biodiversidade (LAPOLA et al., 2014).

Em contrapartida, tecnologias como a reintegração de sistemas agrícolas, pecuários e florestais tem capacidade de reduzir a poluição associada à produção agrícola moderna, além de promover ganhos de produtividade (GARRETT et al., 2017). A sinergia entre sistemas integrados tem papel fundamental para a produção global de alimentos e conservação do meio ambiente (GARRETT et al., 2017) e tem se revelado Pareto-eficiente, já que os elementos tornam-se parte de um único sistema que, devido à essa sinergia, apresenta a melhoria da produção de todas as partes.

A busca por esses novos sistemas tem como objetivo principal a mudança na estrutura de uso da terra, integrando componentes produtivos que maximizem os efeitos positivos sobre o meio ambiente, fornecendo benefícios substanciais à conservação do solo, qualidade da água (POFFENBARGER et al., 2017), aumentando a produtividade e recuperando recursos naturais em áreas degradadas.

A integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) apresenta-se como opção viável para alcançar maior sustentabilidade agrícola além de melhorar a produtividade pecuária brasileira. O sistema incorpora vários modelos (GIL; SIEBOLD; BERGER, 2015) que se relacionam e podem variar de acordo com o tempo ou espaço que estão inseridos.

A iLPF, portanto, consiste em implementar rotação periódica de culturas, pastagens e gado na mesma área com plantio consorciado, sequencial ou rotacionado. Alterna-se de tempos em tempos o uso da terra entre lavoura e pecuária. A combinação de agricultura e pastagem dentro da mesma área leva a sinergias entre os componentes do sistema que podem gerar ganhos de produção, redução de custos e melhoria dos serviços ecossistêmicos. (VILELA et al., 2008).

O estudo de Reis et al (2012) mostra como o manejo do pasto possibilita incrementos da produção de carne bovina em pastagens de forma sustentável. A intensidade de pastejo influencia diretamente a produtividade de acordo com o acúmulo de forragem e a estrutura do dossel. No período das águas é função do manejo do pastejo adequar a frequência e intensidade de desfolhação para que o animal possa colher forragem com idade fisiológica e valor nutritivo adequados. No período seco, o manejo do pasto e a estratégia de diferimento, ao final do período das

águas, são determinantes na obtenção de forragem de melhor valor nutritivo. Nesse sentido, a implementação da iLPF permitiu diferentes taxas de lotação que variam entre 3,4 UA/ha, 4,5 UA/ha e 5,8 UA/ha, de acordo com a altura do dossel (REIS et al., 2012).

Gamarra et al. (2017) avaliaram sistemas integrados, com diferentes densidades de eucalipto por hectare, considerando três estações do ano: verão, outono e inverno. Os autores encontraram taxas de lotação de 1,25 UA/ha no inverno e 2,13 UA/ha no verão no sistema mais denso, com 357 árvores por hectare. Já para o sistema menos denso, com 227 árvores por hectare, as taxas encontradas para inverno e verão foram 1,17 UA/ha e 2,96 UA/ha, respectivamente (GAMARRA et al., 2017).

Com o objetivo de avaliar o desempenho agrícola, pecuário e florestal sob diferentes sistemas de produção no norte do Mato Grosso, o trabalho de Magalhães et al (2018), avaliou dez métodos no período de 2011 a 2015, incluindo produção agrícola (soja/milho), pecuária (pastagem de capim-braquiária com novilhos Nelore) e silvicultura, em um sistema iLPF. Foram realizadas avaliações anuais dos componentes de produção nas culturas, forragem, gado e árvores. A disponibilidade de forragem e o ganho de peso dos animais aumentou com a iLPF, atingindo a taxa de lotação de 2,7 UA/ha (MAGALHÃES et al., 2018).

Mesmo com os benefícios apresentados pela iLPF, o sistema iLP, em particular, demonstrou melhorar os rendimentos das culturas e pastagens e subsequente crescimento animal através da fertilidade do solo melhorada (CARVALHO et al., 2014; LEMAIRE et al., 2014; SALTON et al., 2014). O sistema iLP também se apresenta como uma possibilidade para reduzir as emissões líquidas de GEE e o escoamento de nutrientes por unidade de produção agrícola, melhorando o estrume animal e os resíduos de colheitas e diminuindo o tempo necessário para que o gado alcance o peso de abate (BARBOSA ALVIM et al., 2015). Sendo assim, o sistema pode oferecer maior resiliência ao meio ambiente.

Devido às suas vantagens econômicas e ecológicas, a iLP tem sido proposta como uma estratégia para conter a expansão agrícola, a degradação das pastagens e a redução do desmatamento. Cada tipo de sistema iLP traz sua combinação de benefícios para a agricultura. A cobertura do solo durante todo o ano, proporcionada pelo cultivo de pastagens, apresenta múltiplos benefícios ao solo e ao ambiente ao

redor com o melhoramento da utilização de recursos como radiação solar, nutrientes e água, além de redução da erosão, controle de pragas e doenças (TRENATH, 1993). A integração do cultivo com o gado aumenta a diversidade dentro dos sistemas agrícolas e pode ser uma maneira eficaz de melhorar a produtividade agrícola reduzindo impactos ambientais negativos (LEMAIRE et al., 2014).

Dentre os benefícios é possível destacar: (i) melhoramento das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo; (ii) rompimento de ciclo de pragas, doenças e plantas daninhas; (iii) diminuição de riscos econômicos pelas atividades diversificadas; (iv) redução de custo para recuperar/renovar pastagens em processo de degradação (VILELA et al., 2008) além de (v) mitigação de gases de efeito estufa (MORAES et al., 2014).

Em estudo desenvolvido pela Embrapa (2012), se observou por três anos a implementação de um sistema iLP com capim-marandu, com objetivo de oferecer maior disponibilidade de forragem com mais qualidade ao solo. No primeiro ano a taxa de lotação observada foi de 2,84 UA/ha, no ano seguinte 1,62 UA/ha e finalmente no último ano o resultado foi de 2,10 UA/ha (ZIMMER et al., 2012).

O trabalho do Senar (2013) analisou a viabilidade econômica das tecnologias do Plano ABC no bioma Cerrado. A pesquisa analisou duas variações do sistema iLP: iLP 3 áreas (em três áreas, sendo duas com pastagem e uma com lavoura e a pastagem é reformada a cada três anos) e iLP 4 áreas (em quatro áreas, sendo duas com soja, uma com milho e uma de pastagem; as áreas ficam com pastagens durante um ano, e em seguida voltam para agricultura com ciclo de quatro anos). A taxa de lotação encontrada no iLP 4 áreas foi de 4 UA/ha e no iLP 3 áreas de 3 UA/ha (SENAR, 2013).

Em seu estudo no Mato Grosso do Sul, Gamarra et al. (2017) analisou a implementação do sistema iLP durante três estações do ano, e observou que as maiores taxas de lotação foram percebidas durante o outono, com 3,54 UA/ha. As taxas de lotação do verão e inverno foram, respectivamente, 3,35 UA/ha e 1,37 UA/ha.

Há ainda trabalhos como o de Santos et al (2018), que analisam o desempenho animal, em um sistema iPF, associado às características do capim Piatã em pastagem aberta com arranjos silvipastoris no Cerrado brasileiro. O estudo usou como grupo de controle forragem cultivada em área sem arado; e os grupos de tratamento foram forragem cultivada em sub-bosque de eucalipto com 22m de espaçamento entre

fileiras (SSP22); e forragem cultivada em sub-bosque de eucalipto com espaçamento de 12m entre fileiras (SSP12). A taxa de lotação foi maior no cenário sem árvores com 2,4 UA/ha. No SSP22 a taxa atingiu 1,4 UA/ha e no SSP12 1,3 UA/há, concluindo que se a produção pecuária é o único objetivo, o espaçamento entre as filas de árvores não inferior a 22m deve ser priorizado nesse sistema silvipastoril (SANTOS et al., 2018).

4. METODOLOGIA

A metodologia proposta na pesquisa baseia-se na análise de equilíbrio geral computável, cuja a estratégia consiste na construção de cenários para o estudo do problema de pesquisa, utilizando o modelo ENVISAGE - *Environmental Impact And Sustainability Applied General Equilibrium* (VAN DER MENSBRUGGHE, 2008).

Para a formulação dos cenários aplicados no modelo de equilíbrio geral, seis passos são necessários: especificação do modelo, a escolha das funções de produção e de utilidade (e suas restrições), a implementação das bases de dados, a calibração do modelo, a replicação a fim de validar o modelo e, finalmente, as simulações seguidas dos testes de sensibilidade (SHOVEN; WHALLEY, 1994). Como o modelo ENVISAGE já está consolidado, os dois primeiros passos não são necessários.

A definição e simulação da política em questão altera parâmetros e variáveis endógenas e exógenas no modelo e, portanto, um novo equilíbrio é determinado. É também determinado um cenário de referência chamado de “*baseline*” onde não há implementação da política e, portanto os resultados dos demais cenários são sempre analisados em relação ao cenário de referência (*baseline*).. Os resultados são interpretados à luz da teoria econômica e, dessa forma, análises teórica e numérica são complementares (BÖHRINGER; LÖSCHEL, 2006). A fim de se elucidar a metodologia aplicada, bem como o modelo utilizado, a subseção a seguir apresenta o ENVISAGE.

4.1. Modelo ENVISAGE

O modelo ENVISAGE⁴ foi desenvolvido para avaliar as interações entre economias globais e o meio ambiente e a forma como são afetados por emissões antropogênicas de GEE. É um modelo de Equilíbrio-Geral, multirregional e multissetorial (com 140 regiões e 57 setores)⁵ utilizado em sua forma estática, complementado por um módulo de emissões e clima que liga diretamente as atividades econômicas às variações na temperatura média global, vinculando essas

⁴ O Modelo ENVISAGE está documentado em Van der Mensbrugge (2008).

⁵ Ver anexo A.

variações à impactos em variáveis econômicas. Para essa pesquisa utiliza-se uma agregação⁶ com 5 regiões⁷ e 11 setores⁸.

Pela ótica da demanda a dimensão chave é o número de agentes de Armington (aa) que incluem todas as atividades de produção (a) e agentes de demanda final (fd) que são divididos em famílias (h), governo (gov) e investimentos (inv). As atividades (setores de produção), indexadas por a são separadas por *commodities* indexadas por i . A demanda intermediária $XA_{i,a}$ representa, portanto, a demanda da *commoditie* i pela atividade a .

O ENVISAGE utiliza o banco de dados do *Global Trade Analysis Project* (GTAP) em sua nona versão, calibrada para o ano de 2014 (AGUIAR; NARAYANAN; MCDUGALL, 2016). Na versão “clássica” há um mapeamento de um para um entre atividades e mercadorias. O novo banco de dados do GTAP diferencia atividades e *commodities*.

O modelo incorpora três estruturas de produção diferentes – agricultura (acr), pecuária (alv) e outros (ax). As atividades também são subdivididas em duas zonas geográficas, rural e urbana. As atividades agrícolas são designadas para a zona rural e todas as outras atividades para a zona urbana. O modelo permite mercados de trabalho segmentados por zona geográfica com uma função de migração do tipo Harris-Todaro (HARRIS; TODARO, 1970).

4.1.1. Apresentação do Modelo

O modelo segue a representação do tradicional fluxo circular da renda da economia. Firms compram insumos e fatores de produção como capital e trabalho, a fim de produzir bens e serviços. Famílias recebem a dotação da renda e demandam bens e serviços produzidos pelas firms. A igualdade estabelecida entre oferta e demanda determina os preços de equilíbrio para fatores, bens e serviços. Uma sequência de equilíbrios estáticos comparativos, em que os fatores de produção são exógenos, resolve o modelo.

A produção é implementada por uma estrutura aninhada formada por funções de elasticidade de substituição constante (CES), com o objetivo de capturar a

⁶ Ver anexo A.

⁷ Brazil (Brasil), China (China), EU_28 (União Europeia), RofW (Resto do Mundo), USA (Estados Unidos).

⁸ Cattle (Pecuária), Extraction (Extração), GrainCrops (Agricultura), HeavyMnfc (Manufatura Pesada), LightMnfc (Manufatura Leve), OthLstk (Resto da Pecuária), OthServices (Outros Serviços), ProcFood (Alimentos Processados), TextWapp (Têxteis), TransComm (Transporte e Comunicação), Util_Cons (Construção Civil).

substitutibilidade entre os insumos. São implementadas no modelo três estruturas de produção. A primeira delas é a estrutura padrão, onde existe substituição entre capital e mão-de-obra. A segunda é para as culturas agrícolas, onde reflete a intensificação dos insumos *versus* extensificação do uso da terra. A última é para a pecuária e reflete a produção de pecuária extensiva *versus* pecuária intensiva (confinamento). Na versão utilizada, as atividades de produção produzem apenas um tipo de *commoditie* e as *commodities* podem ser formadas por insumos de uma ou mais atividades.

A receita vem dos pagamentos aos fatores de produção e é alocada para as famílias, deduzidos os impostos. O Governo recebe pagamentos líquidos de impostos e demanda bens e serviços. Funções de utilidade determinam a demanda doméstica. A função de demanda utilizada é a *constant differences in elasticity* (CDE), uma generalização da função CES, que permite mais flexibilidade em termos de efeitos de substituição entre bens e serviços das famílias e não-homoteticidade⁹. A função de utilidade do consumidor (agente representativo) é determinada pelas cestas de consumo que subseqüentemente são convertidas em produtos através de uma matriz de transformação de demanda ou matriz de transição. O investimento é determinado pelo nível de poupança doméstica ajustado pelo fluxo líquido de capital.

O comércio é modelado usando uma especificação de Armington em que a demanda por bens é diferenciada por região de origem. O modelo permite que no nível de agregação, ou no nível dos agentes, as compras de cada setor venham de fontes domésticas ou importadas. Na especificação padrão, uma segunda estrutura de Armington aloca a demanda agregada por importados entre todas as regiões exportadoras usando a especificação de um agente representativo. As exportações são modeladas de maneira análoga utilizando uma estrutura com funções de elasticidade de transformação constante (CET). A oferta doméstica de cada *commoditie* é dada por uma combinação entre o mercado doméstico e uma cesta agregada de exportação por meio de uma função CET. Essa última é alocada entre regiões de destino por uma função CET.

O modelo incorpora 5 tipos de fatores primários de produção: capital; trabalho; terra; recursos naturais, específicos ao setor; e água. O modelo permite a segmentação do mercado de trabalho com regime de flexibilidade salarial, podendo ser

⁹ Ver Van der Mensbrugge (2008) para uma maior discussão dos diferentes tipos de função de demanda disponíveis no modelo.

total ou parcial. O capital é alocado em todos os setores, de modo que a remuneração do capital seja igual em todos os setores¹⁰. As ofertas agregadas de terra e água são especificadas por curvas de oferta. A demanda por água também inclui componentes exógenos para usos ambientais. Terra e água são alocadas entre as atividades por uma CET aninhada. Recursos naturais são estáticos e considerados fatores-específicos de cada setor. A oferta dos recursos naturais é determinada por uma função de oferta iso-elástica, com a possibilidade de elasticidades diferenciadas, de acordo com as condições de mercado.

É importante ressaltar que o fator terra não está representado por suas diferentes categorias (culturas, pastagens e florestas). A dotação de terra associada às lavouras, pastagens e florestas estão compreendidas dentro dos setores *GrainCrops*, *Livestock* e *Extraction*, respectivamente. Entretanto não é possível identificar, em unidades físicas, as mudanças ocorridas no uso da terra após a aplicação dos choques.

O modelo incorpora os principais gases de efeito estufa¹¹ - carbono, metano, óxido nitroso e gases fluorados. As emissões são geradas pelo consumo das *commodities*, uso dos fatores e por processos específicos, como o metano gerado pela pecuária, neste último caso estão associadas ao uso do fator capital pelo setor de pecuária. Além disso, há regimes de controle de emissões de carbono, com a possibilidade de impostos definidos de maneira exógena e diferenciados entre regiões. A incidência do imposto sobre o carbono permite isenção parcial ou total por mercadoria e usuário final. Por exemplo, as famílias podem ser isentas do imposto de carbono sobre o consumo de gás natural. O modelo permite limites de emissão de maneira flexível - onde as regiões podem ser segmentadas em coalizões em uma base multirregional ou global. Além do sistema de limite padrão, um sistema de limite e comércio pode ser definido, onde cada região dentro de uma coalizão recebe uma cota inicial de emissões.

4.1.2. Bloco de produção

A produção é implementada usando um aninhamento de funções CES. Três estruturas de produção são introduzidas – uma para a agricultura (*Crops*), outra para

¹⁰ Ver Van der Mensbrugge (2008) para maiores informações sobre mobilidade do capital entre diferentes setores.

¹¹ A versão atual do modelo não inclui as emissões de carbono do desmatamento - uma importante fonte de emissões globais de carbono.

a pecuária (*Livestock*) e todas as outras que são compreendidas pela estrutura de produção padrão (*Default*). A demanda derivada pelos insumos de produção, bens intermediários e fatores de produção, é sempre representada no ramo mais baixo de cada estrutura.

A produção é associada a um custo de produção unitário (ou marginal), representado por uc . A equação (4.1) mostra que o custo unitário final de produção, PXv , é igual ao custo unitário de produção, $UC_{r,a}$, mais impostos τ^{uc} .

$$PXv_{r,a,v} = UC_{r,a,v}(1 + \tau_{r,a,v}^{uc}) \quad (4.1)$$

Cada uma das estruturas CES de produção tem o objetivo de representar a substituição e complementariedade entre insumos. O topo da estrutura representa a combinação do produto, XPX , com uma cesta, GHG , de emissões de gases não-CO2. Esta é uma cesta especial, que simula o custo marginal da redução de GEEs não-CO2. À medida que o preço dessa cesta aumenta (por exemplo através de uma tarifa sobre emissões) os produtores têm incentivo a substituir esse insumo à medida que ele se torna relativamente mais caro.

As equações (4.2) e (4.3) representam as demandas derivadas para as cestas de produção e GEE, respectivamente. Essas são as funções padrão de demanda CES em que PXP e $PXGHG$ representam o preço das cestas de componentes e UC é o preço da cesta agregada. Nesse caso, UC é o custo unitário de produção incluindo o preço associado às emissões de GEE. Os parâmetros α^{xp} e α^{ghg} são parâmetros CES padrão, A^{xpv} é uma variação tecnológica neutra na cesta de produção e σ^{xp} é a elasticidade de substituição entre produção e emissões de GEE. A cesta de produção também permite uma mudança tecnológica, tipicamente exógena, em um insumo específico representada pelos parâmetros λ^{xp} e λ^{ghg} . A equação (4.4) define o componente de preços da cesta CES, UC e pode ser substituída pela condição de lucro zero¹².

$$XPX_{r,a,v} = \alpha_{r,a,v}^{xp} (A_{r,a,v}^{xpv} \lambda_{r,a,v}^{xp})^{\sigma_{r,a,v}^{xp}-1} \left(\frac{UC_{r,a,v}}{PXP_{r,a,v}} \right)^{\sigma_{r,a,v}^{xp}} PXv_{r,a,v} \quad (4.2)$$

$$XGHG_{r,a,v} = \alpha_{r,a,v}^{ghg} (a_{r,a,v}^{xpv} \lambda_{r,a,v}^{ghg})^{\sigma_{r,a,v}^{xp}-1} \left(\frac{UC_{r,a,v}}{PXGHG_{r,a,v}} \right)^{\sigma_{r,a,v}^{xp}} PXv_{r,a,v} \quad (4.3)$$

¹² A condição de lucro zero (sem índices) é dada por $UC \cdot XP_v = PXP \cdot XPX + PXGHG \cdot XGHG$.

$$UC_{r,a,v} = \frac{1}{A_{r,a,v}^{xpv}} \left[\alpha_{r,a,v}^{xp} \left(\frac{PXP_{r,a,v}}{\lambda_{r,a,v}^{xp}} \right)^{1-\sigma_{r,a,v}^{xp}} \alpha_{r,a,v}^{ghg} \left(\frac{PXGHG_{r,a,v}}{\lambda_{r,a,v}^{ghg}} \right)^{1-\sigma_{r,a,v}^{xp}} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_{r,a,v}^{xp}}} \quad (4.4)$$

O ramo do segundo nível decompõe a produção agregada líquida da cesta GEE em duas, ND^1 e VA . A primeira cesta inclui todos os bens intermediários, exceto energia e outros bens intermediários que são tratados especialmente como atividade-específicos, em que são incluídos fertilizantes para atividades agrícolas e alimentação para atividades pecuárias.¹³ O VA inclui todos os fatores de produção, bens energéticos e bens atividade-específicos quando aplicável. A equação (4.5) define a demanda pela cesta de demanda intermediária no topo da estrutura, ND^1 . A equação (4.6) define a demanda pela cesta VA . As cestas de preços são, respectivamente, PND^1 e PVA e a elasticidade de substituição é dada por σ^p . A equação (4.7) determina o preço de XPX, PXP .

$$ND_{r,a}^1 = \sum_v \alpha_{r,a,v}^{nd1} \left(\frac{PXP_{r,a,v}}{PND_{r,a}^1} \right)^{\sigma_{r,a,v}^p} XPX_{r,a,v} \quad (4.5)$$

$$VA_{r,a,v} = \alpha_{r,a,v}^{va} \left(\frac{PXP_{r,a,v}}{PVA_{r,a,v}} \right)^{\sigma_{r,a,v}^p} XPX_{r,a,v} \quad (4.6)$$

$$PXP_{r,a,v} = \left[\alpha_{r,a,v}^{nd1} (PND_{r,a}^1)^{1-\sigma_{r,a,v}^p} + \alpha_{r,a,v}^{va} (PVA_{r,a,v})^{1-\sigma_{r,a,v}^p} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_{r,a,v}^p}} \quad (4.7)$$

Os ramos intermediários dos aninhamentos CES são atividade-específicos e representam as três estruturas de produção do modelo, agricultura, pecuária e demais setores. A estrutura da agricultura captura a escolha entre intensificação e extensificação, ou seja, onde há maior oferta de terras a preços mais baixos a produção se expandirá utilizando mais terra. A produção pecuária é caracterizada pela escolha entre alimentação e substituição de terras. Finalmente, na estrutura dos demais setores a principal característica da produção é a substituição entre mão de obra e capital.

As diferentes estruturas são capturadas por um conjunto de cestas intermediárias, representadas por VA^1 e VA^2 , que representam uma composição diferente de fatores e bens intermediários atividade-específicos, quando apropriado.

¹³ O banco de dados padrão do GTAP não inclui fertilizantes. Eles estão associados à bens 'crp', ou seja, produtos químicos, borracha e plásticos. Os produtos alimentícios padrão são trigo, outros cereais e sementes oleaginosas, respectivamente 'wht', 'gro' e 'osd' no banco de dados do GTAP.

O topo da estrutura é representado pela cesta VA^1 . A parte inferior são as cestas LAB^1 , XF_{lnd} , KEF e ND^2 , quando apropriado. A cesta LAB^1 representa a demanda por mão-de-obra não qualificada. A variável XF_{lnd} representa a demanda da atividade pelo fator terra. O composto KEF representa a combinação aninhada de capital, mão-de-obra qualificada, energia e o fator de recursos naturais, quando apropriado. A cesta ND^2 representa a demanda atividade-específica por intermediários, fertilizantes no caso de culturas e rações, no caso de atividades pecuárias. A decomposição dessas três cestas é a mesma para todas as atividades. A Tabela 1 descreve de forma resumida a composição das estruturas centrais para as três cestas de produção.

TABELA 1. Cestas CES intermediárias de produção

Atividade	Composição da Cesta
Agricultura	
VA	$CES(LAB^1, VA^1)$
VA^1	$CES(ND^2, VA^2)$
VA^2	$CES(XF_{lnd}, KEF)$
Pecuária	
VA	$CES(VA^1, VA^2)$
VA^1	$CES(LAB^1, KEF)$
VA^2	$CES(XF_{lnd}, ND^2)$
Padrão	
VA	$CES(LAB^1, VA^1)$
VA^1	$CES(XF_{lnd}, KEF)$

Fonte: Van der Mensbrugghe, 2008

O primeiro conjunto de equações, 4.8 e 4.9, determina as cestas VA^1 e VA^2 . O primeiro é uma parcela de VA para todas as atividades. O último é uma parcela de VA^1 para o caso da agricultura e de VA para pecuária. A estrutura padrão não requer a cesta VA^2 .

$$VA_{r,a,v}^1 = \alpha_{r,a,v}^{va1} \left(\frac{PVA_{r,a,v}}{PVA_{r,a,v}^1} \right)^{\sigma_{r,a,v}} VA_{r,a,v} \quad (4.8)$$

$$VA_{r,a,v}^2 = \begin{cases} \alpha_{r,a,v}^{va2} \left(\frac{PVA_{r,a,v}^1}{PVA_{r,a,v}^2} \right)^{\sigma_{r,a,v}^1} VA_{r,a,v}^1 & \text{if } a \in \{Crops\} \\ \alpha_{r,a,v}^{va2} \left(\frac{PVA_{r,a,v}^1}{PVA_{r,a,v}^2} \right)^{\sigma_{r,a,v}^1} VA_{r,a,v} & \text{if } a \in \{Livestock\} \end{cases} \quad (4.9)$$

O próximo conjunto de equações, 4.10, 4.11 e 4.12, define as cestas LAB^1 , KEF e ND^2 . A decomposição dessas cestas será idêntica para todas as atividades. A cesta LAB^1 é uma parcela de VA^1 para *Livestock* e VA para todas as outras atividades. A cesta KEF é uma parcela de VA^2 para *Crops* e VA^1 para todas as outras atividades. A cesta ND^2 é uma parcela de VA^1 para *Crops* e VA^2 para *Livestock*. A cesta ND^2 não é utilizada na estrutura de produção *Default*.

$$LAB_{r,a}^1 = \begin{cases} \sum_v \alpha_{r,a,v}^{l1} \left(\frac{PVA_{r,a,v}^1}{PLAB_{r,a}^1} \right)^{\sigma_{r,a,v}^v} VA_{r,a,v} & \text{if } a \in \{Default\} \\ \sum_v \alpha_{r,a,v}^{l1} \left(\frac{PVA_{r,a,v}^1}{PLAB_{r,a}^1} \right)^{\sigma_{r,a,v}^v} VA_{r,a,v}^1 & \text{if } a \in \{Livestock\} \end{cases} \quad (4.10)$$

$$KEF_{r,a,v} = \begin{cases} \alpha_{r,a,v}^{kef} \left(\frac{PVA_{r,a,v}^2}{PKEF_{r,a,v}} \right)^{\sigma_{r,a,v}^v} VA_{r,a,v}^2 & \text{if } a \in \{Crops\} \\ \alpha_{r,a,v}^{kef} \left(\frac{PVA_{r,a,v}^1}{PKEF_{r,a,v}} \right)^{\sigma_{r,a,v}^v} VA_{r,a,v}^1 & \text{if } a \in \{Default\} \end{cases} \quad (4.11)$$

$$ND_{r,a}^2 = \begin{cases} \sum_v \alpha_{r,a,v}^{nd2} \left(\frac{PVA_{r,a,v}^1}{PND_{r,a}^2} \right)^{\sigma_{r,a,v}^v} VA_{r,a,v}^1 & \text{if } a \in \{Crops\} \\ \sum_v \alpha_{r,a,v}^{nd2} \left(\frac{PVA_{r,a,v}^2}{PND_{r,a}^2} \right)^{\sigma_{r,a,v}^v} VA_{r,a,v}^2 & \text{if } a \in \{Livestock\} \end{cases} \quad (4.12)$$

A equação de demanda final nesse conjunto de cestas intermediárias define a demanda pelo fator terra, XF_{lnd} . Há também um parcela de VA^2 para *Crops* e *Livestock* e uma parcela de VA^1 para atividades *Default*. O parâmetro λ_{lnd}^f permite que haja ganhos de eficiência no uso da terra. O preço representativo para a terra é XF_{lnd}^p que representa o preço do uso da terra. Esse preço é igual ao preço de mercado de terra ajustado por um imposto ou subsídio atividade-específico.

$$XF_{r,lnd,a} = \begin{cases} \sum_v \alpha_{r,a,v}^{land} \left(\frac{\lambda_{r,lnd,a}^f PVA_{r,a,v}^2}{PF_{r,lnd,a}^p} \right)^{\sigma_{r,a,v}^2} \frac{VA_{r,a,v}^2}{\lambda_{r,lnd,a}^f} & \text{if } a \in \{Crops\} \\ \sum_v \alpha_{r,a,v}^{land} \left(\frac{\lambda_{r,lnd,a}^f PVA_{r,a,v}^2}{PF_{r,lnd,a}^p} \right)^{\sigma_{r,a,v}^2} \frac{VA_{r,a,v}^2}{\lambda_{r,lnd,a}^f} & \text{if } a \in \{Livestock\} \\ \sum_v \alpha_{r,a,v}^{land} \left(\frac{\lambda_{r,lnd,a}^f PVA_{r,a,v}^1}{PF_{r,lnd,a}^p} \right)^{\sigma_{r,a,v}^1} \frac{VA_{r,a,v}^1}{\lambda_{r,lnd,a}^f} & \text{if } a \in \{Default\} \end{cases} \quad (4.13)$$

A descrição das estruturas intermediárias é concluída com a definição dos preços das cestas intermediárias VA , VA^1 e VA^2 . A equação (4.14) define o preço PVA da cesta VA . A equação (4.15) define o preço PVA^1 da cesta VA^1 . Finalmente, a equação (4.16) define o preço PVA^2 da cesta VA^2 .

$$PVA_{r,a,v} = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} \alpha_{r,a,v}^{l1} (PLAB_{r,a}^1)^{1-\sigma_{r,a,v}^v} \\ + \alpha_{r,a,v}^{va1} (PVA_{r,a,v}^1)^{1-\sigma_{r,a,v}^v} \end{array} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_{r,a,v}^v}} & \text{if } a \in \{Default\} \\ \left[\begin{array}{l} \alpha_{r,a,v}^{va1} (PVA_{r,a,v}^1)^{1-\sigma_{r,a,v}^v} \\ + \alpha_{r,a,v}^{va2} (PVA_{r,a,v}^2)^{1-\sigma_{r,a,v}^v} \end{array} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_{r,a,v}^v}} & \text{if } a \in \{Livestock\} \end{cases} \quad (4.14)$$

$$PVA_{r,a,v}^1 = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} \alpha_{r,a,v}^{nd2} (PND_{r,a}^2)^{1-\sigma_{r,a,v}^{v1}} \\ + \alpha_{r,a,v}^{va2} (PVA_{r,a,v}^2)^{1-\sigma_{r,a,v}^{v1}} \end{array} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_{r,a,v}^{v1}}} & \text{if } a \in \{Crops\} \\ \left[\begin{array}{l} \alpha_{r,a,v}^{l1} (PLAB_{r,a}^1)^{1-\sigma_{r,a,v}^{v1}} \\ + \alpha_{r,a,v}^{kef} (PKEF_{r,a,v})^{1-\sigma_{r,a,v}^{v1}} \end{array} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_{r,a,v}^{v1}}} & \text{if } a \in \{Livestock\} \\ \left[\begin{array}{l} \alpha_{r,a,v}^{land} \left(\frac{PF_{r,lnd,a}^p}{\lambda_{r,lnd,a}^f} \right)^{1-\sigma_{r,a,v}^{v1}} \\ + \alpha_{r,a,v}^{kef} (PKEF_{r,a,v})^{1-\sigma_{r,a,v}^{v1}} \end{array} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_{r,a,v}^{v1}}} & \text{if } a \in \{Default\} \end{cases} \quad (4.15)$$

$$PVA_{r,a,v}^2 = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} \alpha_{r,a,v}^{land} \left(\frac{PF_{r,lnd,a}^p}{\lambda_{r,lnd,a}^f} \right)^{1-\sigma_{r,a,v}^{v2}} \\ + \alpha_{r,a,v}^{kef} (PKEF_{r,a,v})^{1-\sigma_{r,a,v}^{v2}} \end{array} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_{r,a,v}^{v2}}} & \text{if } a \in \{Crops\} \\ \left[\begin{array}{l} \alpha_{r,a,v}^{land} \left(\frac{PF_{r,lnd,a}^p}{\lambda_{r,lnd,a}^f} \right)^{1-\sigma_{r,a,v}^{v2}} \\ + \alpha_{r,a,v}^{nd2} (PND_{r,a}^2)^{1-\sigma_{r,a,v}^{v2}} \end{array} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_{r,a,v}^{v2}}} & \text{if } a \in \{Livestock\} \end{cases} \quad (4.16)$$

4.1.3. Tecnologia de produção da pecuária

A forma como o setor de pecuária é representado no modelo pode ser vista na Figura 2. Em grande parte, a tecnologia de produção da pecuária foi descrita na subseção anterior. Nessa subseção são apresentadas características peculiares à tecnologia do setor que permitem a implementação das práticas de baixo carbono. A forma funcional apresentada na Figura 2 permite a representação de uma gama de possibilidades de substituição entre os diversos tipos de insumos. A estrutura mostra como o setor combina esses insumos a fim de determinar como será a produção da pecuária: de forma intensiva ou extensiva.

No ramo mais baixo da árvore há a representação da cesta de Capital e Trabalho Qualificado (KS) composto pela substituição entre os fatores Capital (Kv)¹⁴ e Trabalho Qualificado ($LAB2$). Ainda no ramo mais baixo há a composição da cesta de Água ($XWAT$) representada por uma combinação entre a Demanda pelo Fator Água (XF_{wat}) e a Demanda de Armington desse setor dada por serviços de produção e fornecimento (XA_i).

As equações 4.17 e 4.18 representam as demandas derivadas da cesta de capital, Kv , e da cesta de trabalho qualificado $LAB2$ (que juntas formam a cesta KS), respectivamente. Os respectivos preços são representados por PK^p e $PLAB^2$. A principal elasticidade de substituição é σ^k . O fator capital tem um fator de eficiência λ_{cap}^f , que é tipicamente exógeno. A equação 4.19 é uma CES que representa os preços PKS de cesta KS .

$$Kv_{r,a,v} = \alpha_{r,a,v}^k \left(\frac{\lambda_{r,cap,a}^f PKS_{r,a,v}}{PK_{r,a,v}^p} \right)^{\sigma_{r,a,v}^k} \frac{KS_{r,a,v}}{\lambda_{r,cap,a}^f} \quad (4.17)$$

$$LAB_{r,a}^2 = \sum_v \alpha_{r,a,v}^{l2} \left(\frac{PKS_{r,a,v}}{PLAB_{r,a}^2} \right)^{\sigma_{r,a,v}^k} KS_{r,a,v} \quad (4.18)$$

$$PKS_{r,a,v} = \left[\alpha_{r,a,v}^k \left(\frac{PK_{r,a,v}^p}{\lambda_{r,cap,a}^f} \right)^{1-\sigma_{r,a,v}^k} + \alpha_{r,a,v}^{l2} (PLAB_{r,a}^2)^{1-\sigma_{r,a,v}^k} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_{r,a,v}^k}} \quad (4.19)$$

¹⁴ Na versão dinâmica do modelo o Capital é dividido em *New Capital* e *Old Capital*, já na versão estática existe apenas um capital, que é agregado entre os setores por meio de uma função CET.

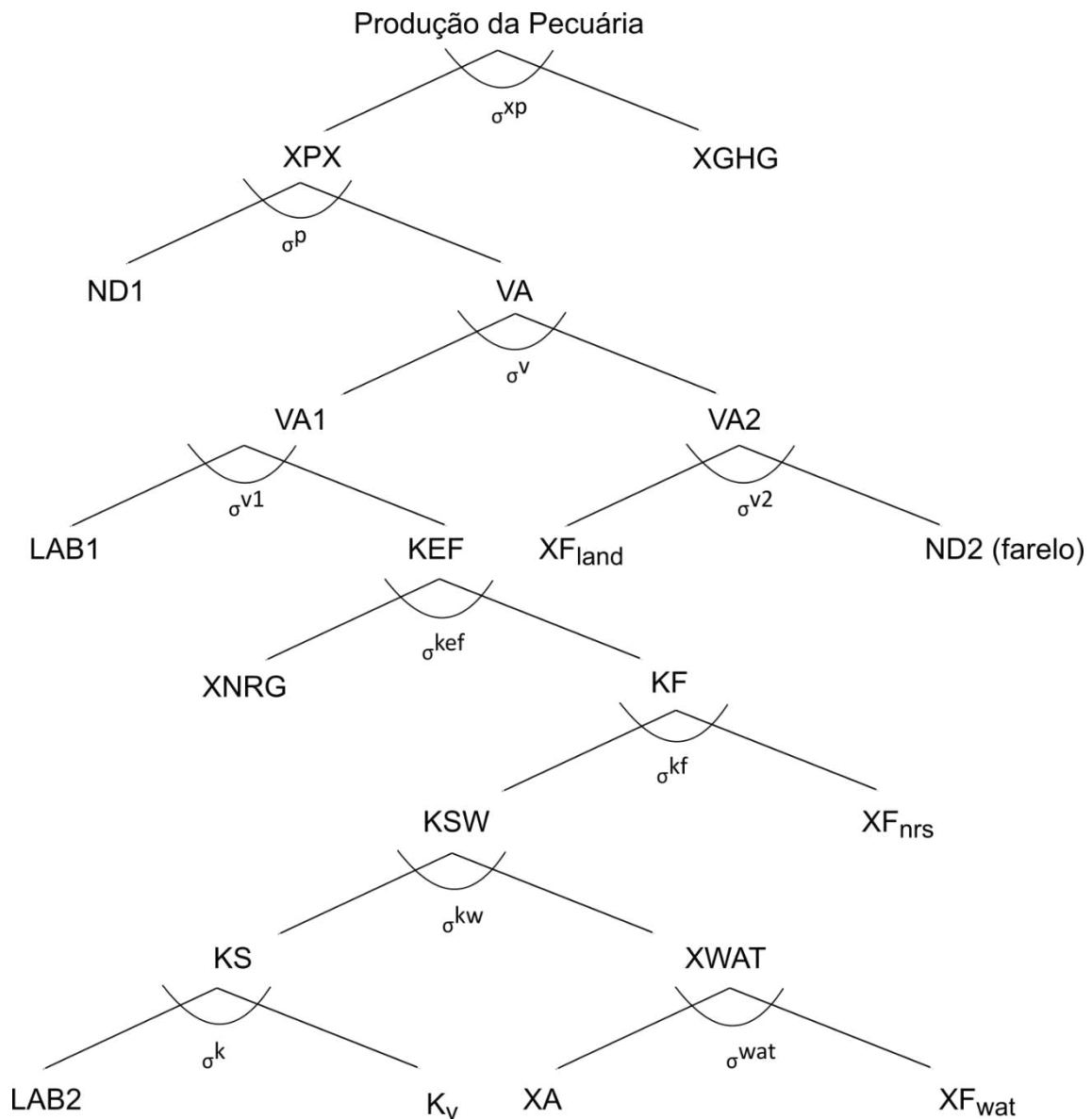
A combinação entre Água ($XWAT$)¹⁵ e Capital e Trabalho qualificado (KS) forma a cesta de Capital, Trabalho qualificado e Água (KSW). A cesta KSW é combinada com a demanda por recursos naturais (XF_{nrs}) e forma um composto por Capital, trabalho qualificado, água e recursos naturais (KF). Finalmente para compor a estrutura de capital mais agregada do modelo há uma combinação entre KF e a Demanda por Energia ($XNRG$).

A medida em que se avança nos ramos da árvore de produção há a combinação entre Trabalho não Qualificado ($LAB1$) e a agregação de Capital (KEF) formando uma parcela do Valor Adicionado ($VA1$). A outra parcela ($VA2$) é formada pela combinação entre Pecuária Intensiva ($ND2$) e Extensiva (XF_{ind}). Nesse caso a elasticidade σ^{V2} controla a possibilidade de substituição da pastagem por confinamento com maior uso de ração e farelo. Juntos $VA1$ e $VA2$ formam cesta de Valor Adicionado (VA) nessa estrutura.

Finalmente uma combinação entre VA e a Demanda por Insumos Intermediários ($ND1$), exceto a Demanda por Ração Animal ($ND2$) e a Demanda Por Energia (NRG), formam a Produção da Pecuária no Modelo (XPX), exceto GEEs. A combinação entre a cesta de Gases de Efeito Estufa ($XGHG$) e XPX forma a representação tecnológica da pecuária no modelo.

¹⁵ O modelo implementado não utiliza o módulo de água.

FIGURA 2. Representação Tecnológica da Pecuária



Legenda: Em cada ramo da árvore há uma elasticidade de substituição σ cujos valores são os seguintes para todas as regiões do modelo: $\sigma^{xp} = 0$; $\sigma^p = 0$; $\sigma^v = 0,298$; $\sigma^{v1} = 0,298$; $\sigma^{v2} = 0,298$; $\sigma^{kef} = 0,16$; $\sigma^{kf} = 0,25$; $\sigma^{kw} = 0,1$; $\sigma^k = 0,298$; $\sigma^{wat} = 0$.

XPX = Produção da Pecuária, exceto emissões; XGHG = Emissões de Gases de Efeito Estufa; ND1 = Demanda por insumos intermediários; VA = Valor Adicionado; VA1 = Parcela 1 do Valor Adicionado; VA2 = Parcela 2 do Valor Adicionado; LAB1 = Trabalho Não-Qualificado; KEF = Capital; XF_{land} = Demanda por Terra (Pecuária Extensiva); ND2 = Demanda por Ração Animal (Pecuária Intensiva); XNRG = Demanda por energia; KF = Capital, Trabalho Qualificado e Recursos Naturais; KSW = Capital, Trabalho Qualificado e Água; XF_{nrs} = Demanda por Recursos Naturais; KS = Capital e Trabalho

Qualificado; $XWAT$ = Demanda por Água; $LAB2$ = Trabalho Qualificado; K_v = Capital; XA = Demanda de Armington; XF_{wat} = Demanda pelo Fator Água.

4.1.4. Emissões de gases de efeito estufa

O Brasil possuía um rebanho bovino com 214,9 milhões de cabeças (IBGE, 2017) e a produção ocorre predominantemente em pastagens com baixa disponibilidade de insumos, fazendo com que o tempo para abate seja mais longo, elevando as emissões de metano (CH_4) por quilograma produzido (CARDOSO et al., 2016). Além disso 46,8 milhões de hectares do território nacional são destinados a pastagens naturais, e 111,8 milhões às pastagens plantadas, correspondendo a 18,6% do território nacional. Desse total, estima-se que pelo menos 30% a 35% estejam em processo de degradação (HEIL COSTA et al., 2017). Com esse processo, verifica-se perda de cobertura vegetal e redução no teor de matéria orgânica do solo, causando perda de CO_2 para a atmosfera.

A calibração utilizada para representar as emissões do setor de pecuária incorpora gases de efeito estufa (GEEs) e não- CO_2 , indexados por carbono, metano, óxido nitroso e gases fluorados. As emissões são geradas pelo consumo de *commodities* e uso dos fatores. O banco de dados do modelo inclui dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e uma cesta de emissões agregadas de gases fluorados (Gases F).

As emissões são geradas pelo consumo direto de produtos pecuários na demanda final, assim como no consumo final dos demais bens, pelo uso do rebanho na pecuária e demais fatores de produção e há aquelas associadas ao processo de produção, como o metano derivado de aterros sanitários. As emissões de CH_4 e N_2O são provenientes da fermentação entérica dos ruminantes, manejo da pastagem e manejo dos dejetos animais, portanto estão diretamente associadas à taxa de lotação das pastagens definida em termos de unidade animal por hectare (UA/ha). Na representação do modelo a taxa de lotação é inferida a partir do nível de capital do setor de pecuária, dessa forma as emissões de CH_4 e N_2O estão ligadas ao nível de utilização do fator capital pelo setor¹⁶.

A equação 4.20 mostra as emissões derivadas do consumo de todos os agentes (*aa*) e para todas as *commodities* (*i*). São baseadas no nível de consumo multiplicado pela taxa de emissão por unidade de consumo (ρ^{Emi}). Essa especificação

¹⁶ As emissões de CH_4 e N_2O estão associadas ao nível de capital (K_v) na Figura 4.1.

permite rastrear as importações tanto a nível regional ou a nível de consumo do agente representativo. Para o nível regional o volume de consumo é dado por XA , já para o agente representativo é dado por XD e XM e permite-se variar as taxas de emissão entre as cestas de consumo. A equação (4.21) reflete as emissões derivadas dos fatores de produção (trabalho, capital, terra e recursos naturais) e a equação (4.22) representa as emissões advindas da produção.

$$\begin{cases} \chi_{em}^{Emi} \rho_{r,em,i,aa}^{Emi} XA_{r,i,aa} & \text{if } ArmFlag = 0 \\ \chi_{em}^{Emi} \rho_{r,em,i,aa}^{Emi,d} XD_{r,i,aa} + \chi_{em}^{Emi} \rho_{r,em,i,aa}^{Emi,m} XM_{r,i,aa} & \text{if } ArmFlag \neq 0 \end{cases} \quad (4.20)$$

$$Emi_{r,em,f,a} = \chi_{en}^{Emi} \rho_{r,em,f,a}^{Emi} XF_{r,f,a} \quad (4.21)$$

$$Emi_{r,em,tot,a} = \chi_{en}^{Emi} \rho_{r,em,tot,a}^{Emi} XP_{r,a} \quad (4.22)$$

A equação (4.23) representa o nível agregado de emissões para uma determina região (r), por exemplo, o Brasil. O total de emissões é dado pela soma entre todas as possíveis fontes de emissões representadas pelos índices is e aa . A equação permite um nível específico de emissões advindas de fontes exógenas para o Brasil. A equação (4.24) define o nível global de emissões, dado pela soma das emissões totais do Brasil e do resto do mundo, e permite um nível de emissões exógenas que não é região-específico.

$$EmiTot_{r,em} = \sum_{is} \sum_{aa} Emi_{r,em,is,aa} + EmiOth_{r,em} \quad (4.23)$$

$$EmiGbl_{em} = \sum_{aa} EmiTot_{r,em} + EmiOthGbl_{em} \quad (4.24)$$

Nos cenários propostos quaisquer tecnologias de redução das emissões no setor de pecuária irão refletir nas equações 4.20-4.22. Assim, diversos cenários de descarbonização da pecuária podem ser propostos, por exemplo, mudanças na estrutura de produção, mudanças no uso dos insumos intermediários ou aumento da eficiência na utilização de fatores de produção, mudanças nas emissões por unidade de produto ou fatores de poluição.

4.1.5. Fechamento macroeconômico

O modelo ENVISAGE está calibrado para o ano de 2011 e é resolvido na sua versão estática. Para cada cenário o modelo é resolvido de forma independente quatro vezes, ou seja, uma para cada nível (*baseline, lower, average, upper*), sendo que o fechamento macroeconômico é importante para entender o comportamento do modelo e a interpretação dos resultados. O modelo ENVISAGE apresenta diferentes tipos de fechamento macroeconômico, o utilizado nessa pesquisa considera a oferta dos fatores de produção – capital e trabalho – como fixa; terra e recursos naturais são fatores específicos; não há desemprego e, portanto, os preços dos fatores de produção são flexíveis. O nível de investimento é fixo, assim como o balanço de pagamentos. Assim, a taxa de câmbio real é endógena para acomodar os ajustes entre exportação e importação. No fechamento utilizado a poupança das famílias é incorporada à função utilidade e é fixa. O Governo apresenta fechamento macroeconômico padrão em que o déficit público é mantido constante em termos reais (a fim de preservar a homogeneidade de preços), portanto este agente é neutro. O numerário do modelo é o índice de preços de exportação de bens de maior valor agregado.

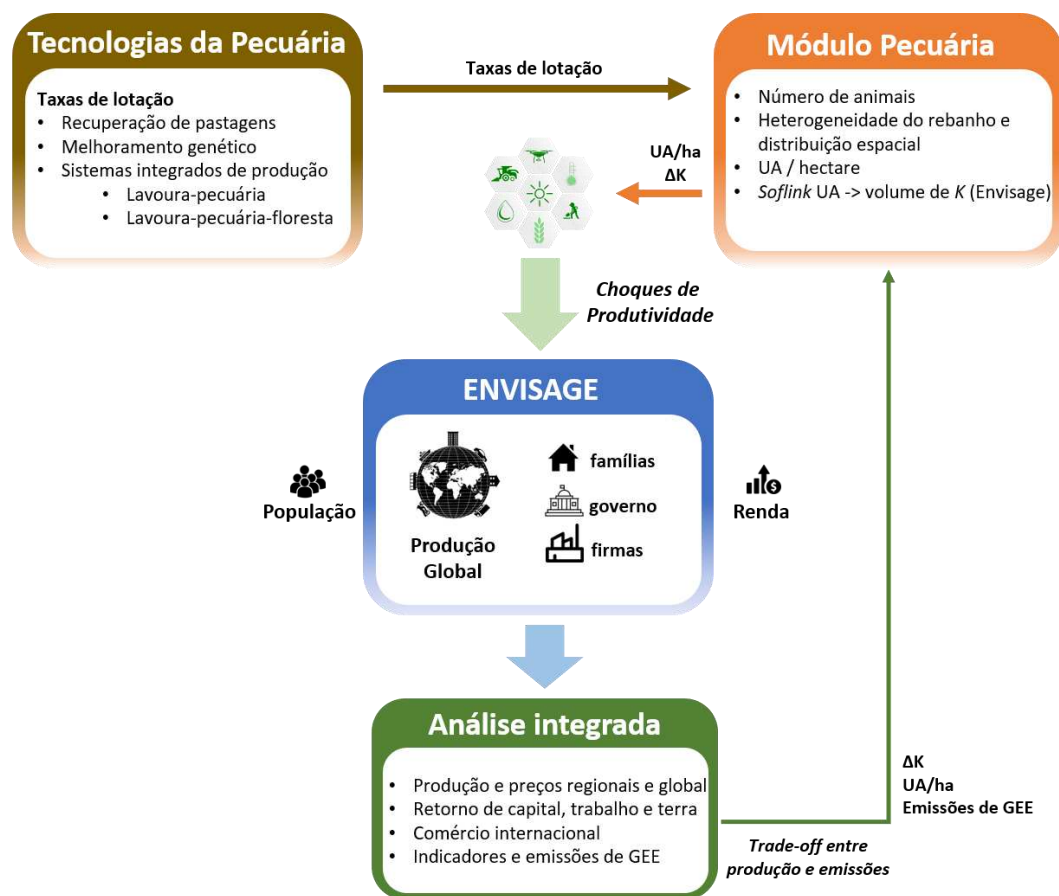
Todas essas características, juntamente com as tecnologias implementadas no modelo permitem afirmar que o fechamento econômico utilizado é de médio prazo.

4.1.6. Desenho do choque

A Figura 3 a seguir sintetiza o desenvolvimento da pesquisa para elaboração dos cenários, choques e análise dos resultados. Um módulo suplementar de especificação do setor de pecuária no Brasil foi adicionado ao modelo ENVISAGE. Esse módulo auxilia na determinação das unidades físicas da produção do setor, como a evolução do rebanho e a produção de carne. Esse módulo é necessário, uma vez que modelos de EGC apresentam uma série de restrições para a inserção e determinação de variáveis físicas, como por exemplo, rebanho e terra (FUJIMORI et al., 2014; GOLUB; HERTEL, 2012; GURGEL et al., 2017).

O conjunto de choques é determinado no módulo de pecuária e aplicado ao modelo ENVISAGE com o objetivo de reproduzir ganhos de produtividade derivados de cada uma das tecnologias do Plano ABC estudadas nesta pesquisa. Portanto, os choques para os sistemas integrados de produção, recuperação de pasto degradado e melhoramento genético animal são aplicados de maneira exógena, representando assim a mudança tecnológica de cada um dos sistemas.

FIGURA 3. Estrutura de modelagem e análise integrada dos resultados.



Nota: As diferentes tecnologias da pecuária fornecem informações de intensificação em termos de taxa de lotação que alimentam o módulo de pecuária. O módulo de pecuária é ligado ao modelo ENVISAGE via softlink onde as novas produtividades em termos de UA/ha e variação do capital da pecuária são introduzidas no modelo como choques exógenos no setor de pecuária. A análise integrada associa os resultados do modelo, como produção e emissões de GEE, com o módulo de pecuária determinando assim as novas taxas de lotação da pecuária e o trade-off entre produção e emissões de GEE.

O ponto de partida se dá no Módulo de Pecuária (Figura 3) onde é definido a taxa de Unidade Animal por hectare (UA/ha) no *baseline* do modelo ENVISAGE. Os dados referentes ao rebanho nacional foram obtidos na Pesquisa Pecuária Municipal (PPM) (IBGE, 2017). A PPM disponibiliza os dados em cabeças de animais para o rebanho de corte (produção de carne) e para o rebanho de vacas ordenhadas. A definição de unidade animal é diferente de cabeça animal, ou seja, uma cabeça animal não implica, necessariamente, em uma unidade animal.

A partir dos dados do Centro de Sensoriamento Remoto (ALVIM et al., 2015) é possível dividir o rebanho de gado de corte em 6 diferentes categorias: touro, vaca e animais de três a quatro anos, animais com menos de um ano, animais de um a dois anos, animais de mais de dois até três anos e animais com mais de quatro anos, sendo que cada uma dessas categorias apresenta um peso diferente para a equivalência de 1 UA/ha. Foi utilizada a Tabela B.1 para a conversão de cabeças de animais para unidade animal (MAPA, 2018b). A Tabela 2 apresenta o resultado do rebanho brasileiro por categoria e unidade animal para o ano de 2011. O número total de cabeças, distribuída em seis categorias, é de 213,7 milhões. A partir do levantamento e distribuição do rebanho em diferentes categorias foi possível atribuir o peso médio para cada categoria, baseado em dados do Ministério da agricultura (MAPA, 2018b).

TABELA 2. Total de cabeças (mil unidades), taxa de conversão e total de Unidades animais (mil unidades) no baseline do modelo

Categoria	Número de cabeças ^(a)	Taxa de conversão ^(b)	UA total (a x b)
Touros	2.564	1,25	3.205
Vacas	71.703	1,00	71.703
Novilhas 2 a 3 anos	15.289	0,75	11.467
Novilhas 1 a 2 anos	25.215	0,50	12.608
Bezerras	30.034	0,25	7.508
Bezerros	29.703	0,25	7.426
Novilhos 1 a 2 anos	21.700	0,50	10.850
Novilhos 2 a 3 anos	12.234	0,75	9.175
Bois 3 a 4 anos	4.060	1,00	4.060

Bois acima de 4 anos	1.186	1,50	1.779
Brasil	213.687	0,71*	139.781

Fonte: Barbosa Alvim et al., (2015), adaptado pelo autora.

(*) Esse valor representa a taxa de lotação (UA/ha) no *baseline* do modelo.

Com a distribuição do rebanho em categorias e o peso de cada categoria definido, foi possível transformar o total de cabeças do modelo em total de unidades animal para o ano de calibração (2011). O valor obtido foi de 139,8 milhões de UA. Esse valor equivale à taxa de lotação de 0,71 UA/ha no *baseline* do modelo, conforme a Tabela 3.

TABELA 3. Taxas de lotação (UA/ha) por tecnologia implementada no modelo

	<i>Lower</i>	<i>Average</i>	<i>Upper</i>
<i>Baseline</i>		0,71	
Integração	2,05	3,75	5,46
Recuperação 3	1,12	1,67	1,72
Recuperação 4	1,17	1,76	1,91
Recuperação 5	1,21	1,85	2,10
Melhoramento Genético	1,67	2,79	3,90

Fonte: Elaborado pela autora. A coluna *average* representa a média das taxas de lotação determinada pela revisão de literatura para cada uma das tecnologias da pecuária. As colunas *lower* e *upper* representam o desvio padrão da média em cada uma das tecnologias determinando assim um intervalo limite de análise.

O valor estabelecido no *baseline* do modelo para a taxa de lotação média está em consonância com o estudo de Vilela (2017). O autor aponta que 11,7% das pastagens brasileiras têm taxa de lotação de 0,35 UA/ha, 35,5% têm taxa de 0,70 UA/ha e 23,4% apresentam taxa de 0,88 UA/ha. Juntos, esses três resultados respondem por 70,6% das pastagens brasileiras.

O segundo passo é a determinação das taxas de lotação de cada uma das tecnologias abordadas nesse estudo. O Módulo de Tecnologias da Pecuária (Figura

3) é alimentado com dados empíricos reportados pela literatura que abrange esse tema e descritos ao longo do estudo¹⁷. Portanto, com base na revisão de literatura, é determinado para cada uma das tecnologias um valor médio (*Average*) da taxa de lotação e um desvio padrão composto por dois valores adicionais, um abaixo (*Lower*) e outro acima (*Upper*) da média (Tabela 3). Essas informações alimentam o Módulo de Pecuária para a definição dos choques aplicados no modelo ENVISAGE em termos de UA/ha mantendo assim a consistência dos diferentes módulos.

Na terceira etapa, o Módulo de Pecuária (Figura 3) traduz as informações das taxas de lotação em choques a serem implementados no modelo ENVISAGE, mantendo assim a consistência entre as unidades físicas de produção (UA/ha) e o valor da produção (\$) do setor de pecuária. A implementação dos choques no modelo se dá no nível de capital, Kv , a partir da diferença percentual entre a taxa de lotação observada na tecnologia e a taxa de lotação no *baseline* do modelo. O parâmetro de eficiência $\lambda_{r, cap, a}^f$, apresentado na equação 4.17, é utilizado para a introdução dos choques no modelo, representando aumento na eficiência da utilização do capital. Em termos práticos, a maior eficiência do capital, medido em unidade animal por hectare, se traduz em um aumento do fluxo de animais no rebanho associado à maior taxa de ganho de peso vivo, o que implica em redução do tempo de abate. O resultado é um maior volume de produção com redução do tamanho do rebanho. Esse resultado impacta diretamente as emissões de CH₄ e N₂O do sistema de produção da pecuária.

Para compreender os efeitos das tecnologias propostas pelo Plano ABC, foram implementados cinco choques diferentes descritos na Tabela 3, como Integração, Recuperação 3, 4, e 5, e Melhoramento Genético, associados aos seus respectivos limites (*lower* e *upper*), a fim de construir cinco intervalos com limites pré-estabelecidos para representar as três diferentes tecnologias. Por exemplo, a taxa de lotação da tecnologia de integração (iLPF, iLP e iPF) é representada pelo intervalo de 2,05 UA/ha a 5,46 UA/ha. Da mesma forma, a tecnologia de melhoramento genético animal compreende 1,67 UA/ha a 3,90 UA/ha. Para representar a recuperação do pasto degradado foi empreendido um esforço adicional, dada a incerteza em relação à área de pastagem com essas características no Brasil. Foram estimados três níveis de recuperação a partir de dados da literatura, um mais otimista (Recuperação 3) que considera que 33% (64 Mha da área total de 196 Mha do modelo) da pastagem está

¹⁷ Ver anexo B.

degradada, um intermediário (Recuperação 4) que considera 41%, 80,4 Mha, e um mais pessimista, em que esse nível é de 49%, ou seja, 96 Mha (Recuperação 5).

Por fim, após a solução do modelo ENVISAGE, os dados reportados pelo modelo são analisados em conjunto com as informações do Módulo de Pecuária para a determinação do *trade-off* entre produção e emissões de gases de efeito estufa considerando o conjunto de tecnologias disponíveis.

4.1.7. Cenários implementados

Foram adotados os seguintes cenários estratégicos:

Cenário I (***Integração***): Considera-se que o Brasil implementa a integração de diferentes sistemas (lavoura, floresta ou ambos) com a pecuária em toda a área de pastagem do país. Com isso uma nova taxa de produtividade para o setor de pecuária é estimada com base nos incrementos produtivos gerados por sistemas integrados. É adotada nova taxa de lotação do pasto, que varia entre 2,05 UA/ha e 5,46 UA/ha e é superior à taxa média de 0,71 UA/ha utilizada no *baseline* do modelo, onde nenhuma tecnologia é adotada. Permite-se que a redução das emissões de GEEs, diretamente associadas ao nível de capital do setor de pecuária, seja endógena, os resultados são analisados em comparação aos resultados do *baseline*.

Cenário II (***Melhoramento genético***): Considera-se que o Brasil adota a tecnologia de melhoramento genético animal abrangendo o rebanho em sua totalidade. É adotada uma nova taxa de lotação do pasto que varia entre 1,67 UA/ha e 3,90 UA/ha que é superior à taxa média de 0,71 UA/ha. Permite-se que a redução das emissões de GEEs, diretamente associadas ao nível de capital do setor de pecuária seja endógena e os resultados do setor de pecuária são analisados em comparação aos resultados do *baseline*.

Cenário III (***Recuperação 5, 4, 3***): Considera-se que o Brasil adota a tecnologia de recuperação ao longo de toda a área de pastagem degradada. Dada a incerteza do tamanho dessa área no Brasil, considera-se três parcelas de degradação em relação ao pasto total: 33%, 41% e 49%. Além disso, considera-se que a taxa de lotação na *baseline* do pasto degradado é 0,50 UA/ha, menor, portanto, do que a média nacional de 0,71 UA/ha. São considerados diferentes intervalos de confiança

para cada um dos níveis de recuperação conforme Tabela 3. Permite-se que a redução das emissões de GEEs, diretamente associadas ao nível de capital do setor de pecuária, seja endógena e os resultados do setor de pecuária são analisados em comparação aos resultados do *baseline*.

Além disso, a adoção desses cenários ocorre em um ambiente de fechamento macroeconômico que considera que não há déficit de governo, assim como não há acumulação de capital e mão de obra e a balança de pagamentos é fixa.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados nesta seção descrevem o comportamento de variáveis de interesse após o choque de inserção de novas tecnologias no setor de pecuária brasileiro. Eles têm como foco três tecnologias propostas pelo plano ABC: sistemas integrados de produção, recuperação de pastagem degradada e melhoramento genético animal, empregadas nos rebanhos de gado de corte. São apresentados os impactos macroeconômicos, setoriais e em termos de consumo das famílias, além disso as variações das emissões de GEEs após a inserção das tecnologias. A última seção do capítulo apresenta a discussão dos resultados.

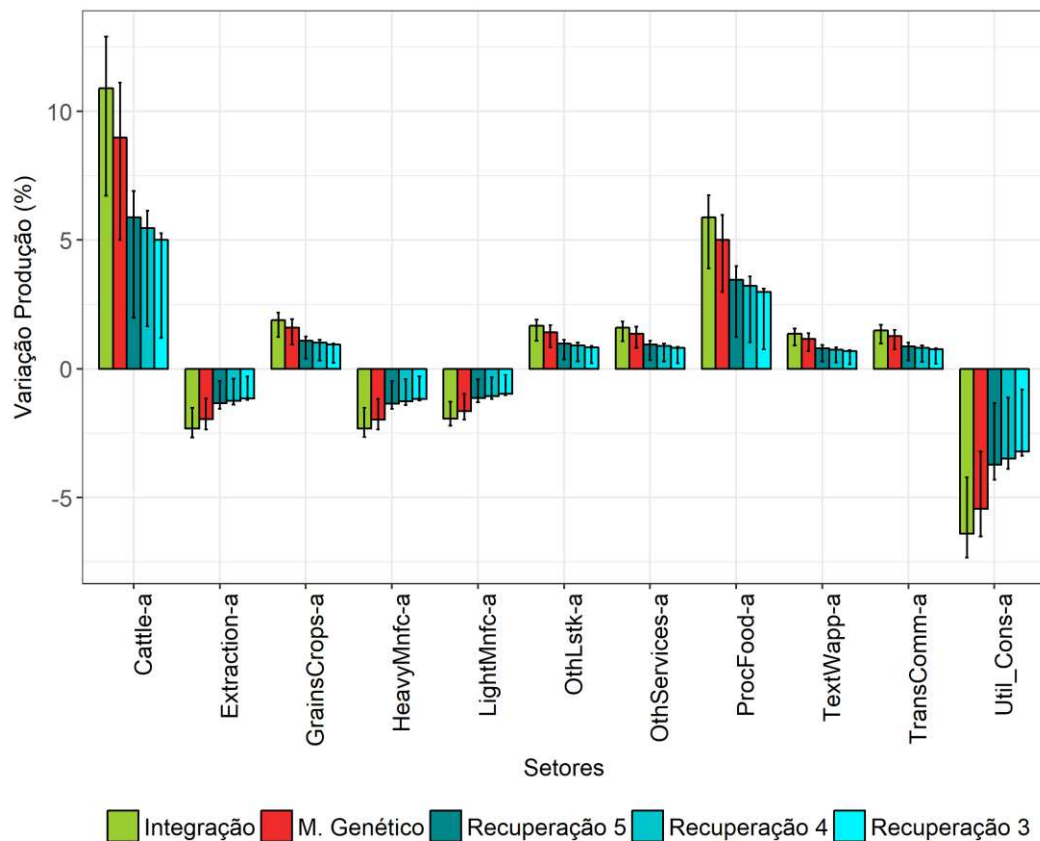
5.1. Produção pecuária

Como esperado, a produção pecuária (*Cattle_a*) é afetada diretamente pela inserção das novas tecnologias no modelo, respondendo pelas maiores mudanças entre os setores da economia, com crescimento em todos os cenários analisados. Entretanto, a variação dessa produção se dá de acordo com o efeito de cada tecnologia adotada (Figura 4).

A tecnologia que mais impacta o nível de produção na pecuária é a de iLPF; em média, há crescimento de cerca de 10,9%. Dadas as heterogeneidades de pasto e rebanho no Brasil, esse incremento pode variar entre 6,7% e 12,9%. Dentre todas as tecnologias simuladas, os sistemas integrados revelam-se como os mais eficientes para contribuir com os ganhos de produtividade da pecuária. Esse resultado é

exógeno, consequência do choque mais intenso nesse cenário. Costa Jr. et al. (2019) também encontram relação positiva entre a implementação do Programa ABC em fazendas de gado de corte em Santa Catarina e os níveis de produção observados. Os autores constataram aumento de 21% no número de animais, 44% no número de fêmeas e redução de 12 meses no tempo de abate.

FIGURA 4. Efeitos das tecnologias do Plano ABC sobre a produção setorial no Brasil.



Nota: Variação da produção (%) em cada setor dado a utilização de diferentes tecnologias. As barras representam os limites superior e inferior considerando o desvio-padrão observado.

Os impactos gerados pelo melhoramento genético animal também apresentam grande potencial, sendo capazes de gerar aumentos entre 5,0% e 11,1% na produção do setor. Dado à incerteza quanto ao total de pastagem degradada no Brasil, o

intervalo de confiança dessa tecnologia é maior do que o das demais, e fica entre 1,2% e 6,9%.

Os diferentes cenários de recuperação tentam captar a incerteza tanto em relação à área degradada, quanto ao uso da tecnologia. Nesse sentido, é possível observar que quanto maior o nível de degradação, maior também é a produção alcançada. Quando se considera que cerca de 33% das pastagens nacionais estão degradadas (Recuperação 3), os incrementos na produção giram em torno de 1,2% a 5,3%. Quando a degradação atinge 49% da área de pastagem (Recuperação 5), o aumento da produção gira entre 2,0% e 6,9%. Como no cenário em que há mais área degradada há também maior ineficiência do uso dos fatores, faz sentido que a taxa de crescimento da produção seja superior aos demais (Recuperação 3 e Recuperação 4).

A eficiência do setor de pecuária, via implementação das tecnologias previstas no Plano ABC, e traduzida em uma relação unidade animal por hectare, reduz o estoque efetivo de animais, dado que o fluxo aumenta. As tecnologias aumentam o ganho de peso vivo e reduzem o tempo de abate, também promovendo melhorias nas taxas de natalidade e mortalidade do rebanho. Essas alterações se refletem diretamente na produção do setor, e com isso dois efeitos são percebidos: distributivo e alocativo.

O efeito distributivo é percebido quando a produção da pecuária se intensifica através da eficiência do uso do rebanho, representado pelas tecnologias incluídas no modelo. O impacto de primeira ordem é a queda no preço dos bens produzidos pela pecuária; já como efeito indireto, o menor preço implica em redução de custos para os setores que demandam produtos da pecuária como insumos intermediários. Esse é o caso dos setores de alimentos (*ProcFood_a*) e agricultura (*GrainsCrops_a*).

Essa relação pode ser vista na Figura 4, onde a produção dos setores de Produção de alimentos (*ProcFood_a*) e da Agricultura (*GrainsCrops_a*) cresce mais do que a produção dos demais setores da economia, principalmente no cenário de integração. Esse resultado é impulsionado pelo efeito distributivo. O impacto do aumento da produção pecuária para os setores citados se dá de duas maneiras. Aumento da oferta de insumos intermediários para a Produção de Alimentos e aumento da demanda por insumos intermediários vindos da Agricultura. Portanto, na medida em que há o aumento da produção pecuária, tanto os setores que demandam

quanto ofertam para esse setor sentem esses efeitos e respondem com maiores níveis de produção.

O segundo efeito é o alocativo. A pecuária, ao se tornar mais produtiva, reduz o uso de capital, aumentando a disponibilidade desse fator na economia e, com isso, permite sua alocação entre os demais setores. Os setores mais intensivos em capital deveriam demandar a parcela do fator que foi liberada pela pecuária. O uso mais intensivo de capital ocorre nos setores Outros Serviços (*OthServices_a*), Transporte e Comunicação (*TransComm_a*) e Construção (*Util_Cons_a*). Apesar disso, o que se observa é que esses não são os que mais aumentam seu nível de produção, inclusive um deles, o de Construção, apresenta queda. Esse resultado revela que os efeitos distributivos se sobrepõem aos alocativos entre os setores. Isso ocorre porque os bens intermediários ofertados pela pecuária tornam-se mais atrativos e os setores que demandam esses bens apresentam vantagem competitiva em relação aos demais. Afim de aumentar a produção, as empresas que demandam e ofertam para a pecuária acabam absorvendo o capital disponível na economia.

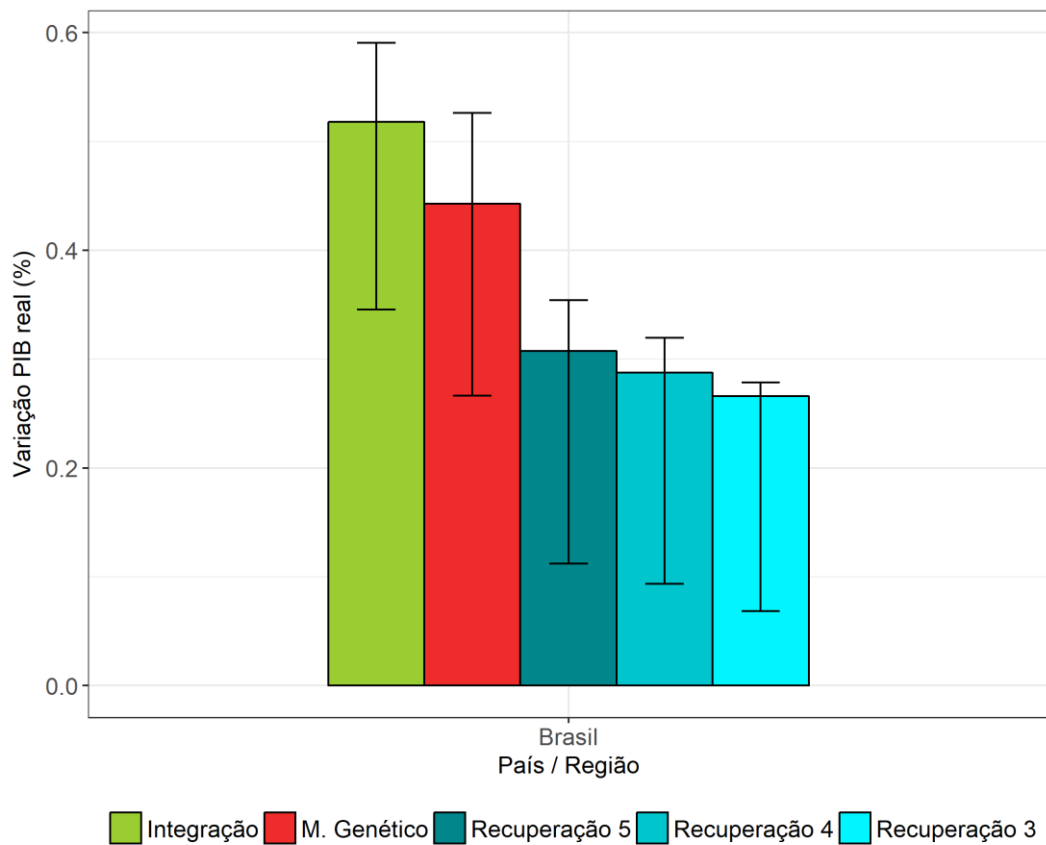
Há estudos como o de Costa Jr. et al., (2019) que ressaltam outros benefícios gerados pela implementação de tecnologias e recursos do Plano ABC, como melhora no conhecimento sobre manejo de pastagens, nos índices zootécnicos, em conhecimento técnico e gerenciamento da atividade por parte dos agricultores, gerando impacto positivo na produção de bovinos de corte.

5.2. Impactos macroeconômicos

Os resultados setoriais mostram que um incremento de produtividade no setor de pecuária é capaz de gerar efeitos distributivos e alocativos aos demais setores da economia. Esses efeitos, de forma geral e, principalmente, na pecuária, geram aumento do nível de produção. A variação da produção setorial revela que os setores respondem por um efeito distributivo líquido. Isso ocorre porque há maior oferta de bens na economia, via aumento da produção. A maior disponibilidade de bens impacta diversas variáveis econômicas, como por exemplo, o preço e o nível de consumo agregado.

Por essa ótica, o aumento da oferta de bens vindos dos diversos setores gera queda nos preços desses bens, o que se reflete no aumento do consumo. Esse resultado pode ser visto tanto em termos de PIB quanto de bem-estar (Figura 5).

FIGURA 5. Efeitos das tecnologias do Plano ABC sobre o Produto Interno Bruto do Brasil.



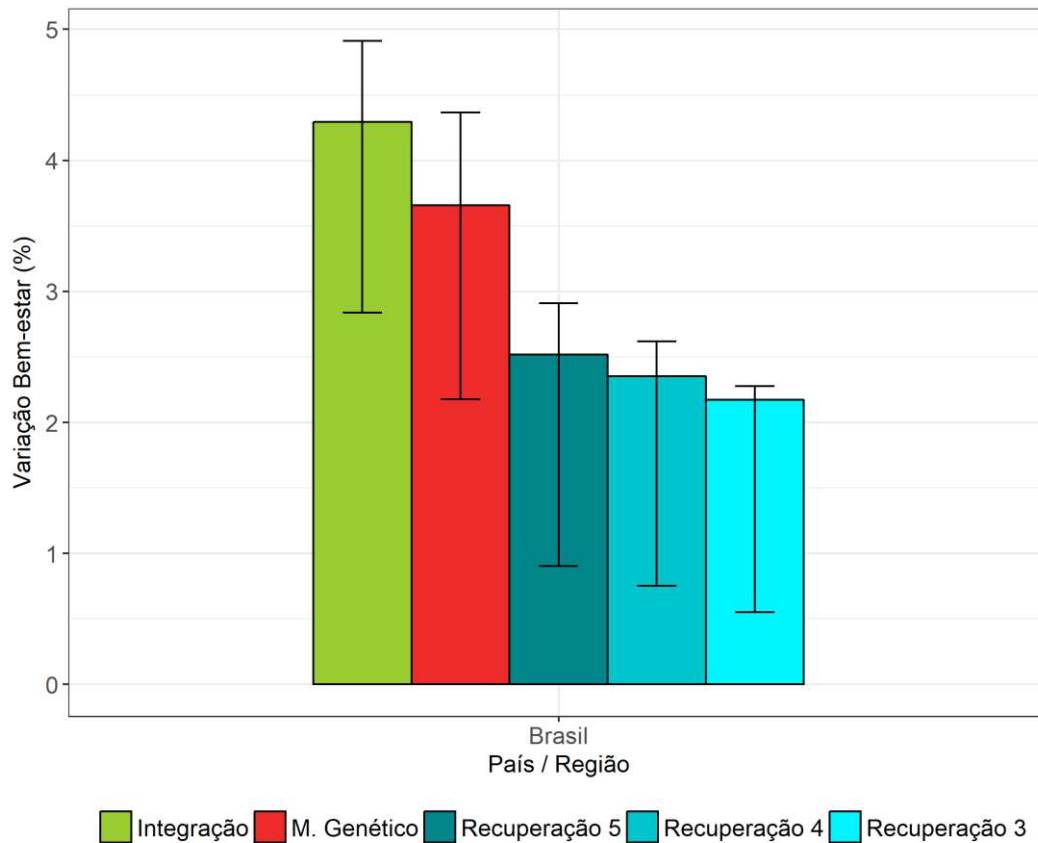
Nota: Variação da produção (%) em cada setor dado a utilização de diferentes tecnologias. As barras representam os limites superior e inferior considerando o desvio-padrão observado.

Dentre as tecnologias propostas, a iLPF apresenta-se como a de maior potencial para impactar positivamente o PIB nacional, com aumento médio de 0,52%.

Esse resultado é reflexo do aumento do consumo proporcionado pela implementação dessa tecnologia. Considerando que o maior aumento da produção setorial se dá com a iLPF, desencadeando maior oferta de bens de diversos setores na economia e consequente redução de preços, o impacto no consumo agregado também é maior.

Assim como o resultado sobre o PIB, a elevação do consumo também melhora o bem-estar das famílias, que percebem a queda dos preços dos bens, como mostra a Figura 6.

FIGURA 6. Efeitos das tecnologias do Plano ABC sobre o nível de Bem-Estar das famílias brasileiras.



Nota: Variação do bem-estar (%) dado a utilização de diferentes tecnologias. As barras representam os limites superior e inferior considerando o desvio-padrão observado.

Com a implementação da tecnologia iLPF há queda de 28,1% nos preços da pecuária e, com isso, a demanda cresce em 17,8%, se mostrando, nesse ponto, inelástica ao preço. Há também redução de 0,5% nos preços do restante da pecuária, que inclui o rebanho de leite e outros animais vivos do setor, elevando o consumo em 3,6%. Esse comportamento de preços da pecuária gera diminuição de 3,1% no preço

dos bens do setor de alimentos, onde a carne bovina é processada, gerando um aumento de 4,2% no consumo de alimentos das famílias.

Os resultados de variação de preços da indústria de alimentos como um todo impactam positivamente o consumo do resto da economia. Mesmo nos setores em que há aumento no preço dos bens há também aumento na demanda das famílias, o qual é resultante do efeito renda gerado pela queda nos preços dos demais setores. Em outras palavras, setores que tiveram aumento no nível de produção passaram a ofertar bens a preços mais baixos e os ganhos obtidos com a redução desses gastos permitiu que as famílias elevassem de modo geral seu nível de consumo.

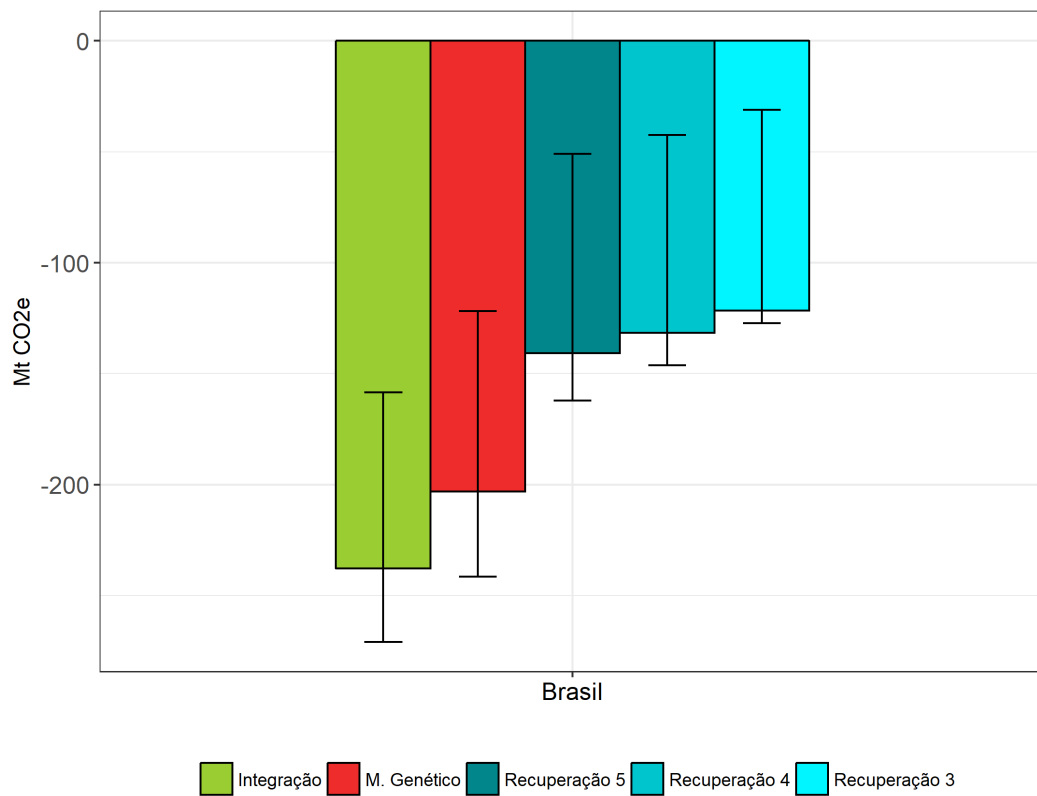
5.3. Impactos sobre a emissão de gases de efeito estufa

As tecnologias analisadas geram impactos econômicos e ambientais, tornam a pecuária mais eficiente e contribuem para a redução da emissão de GEEs por parte desse setor. O modelo considera em seu *baseline* que o volume total de emissões¹⁸ no Brasil para o ano de 2011 é de 985 Mt CO₂eq. Os resultados mostram que em todos os cenários propostos há redução desse nível.

A recuperação das pastagens devolve ao solo a capacidade de sequestro de carbono, gerando aumento de estoque de matéria orgânica, resultando em pastagem de maior qualidade. Além disso, a disponibilidade de pastagem cresce e o gado consegue se alimentar melhor, ganha mais peso e seu tempo de abate é reduzido. A maior eficiência do manejo do solo e do rebanho impacta diretamente na fermentação entérica dos ruminantes. O aumento do fluxo dos animais associado à redução de tempo do abate e estoque do rebanho impactam diretamente na emissão de GEEs do sistema. Esse comportamento se traduz, principalmente, na redução das emissões de metano e óxido nitroso. O saldo total líquido é de redução de emissões na economia, como mostra a Figura 7.

¹⁸ O modelo, calibrado para o ano de 2011, não considera as emissões geradas pelo desmatamento.

FIGURA 7. Efeitos das tecnologias do Plano ABC sobre as emissões de Gases e Efeito Estufa no Brasil (Mt CO₂eq).

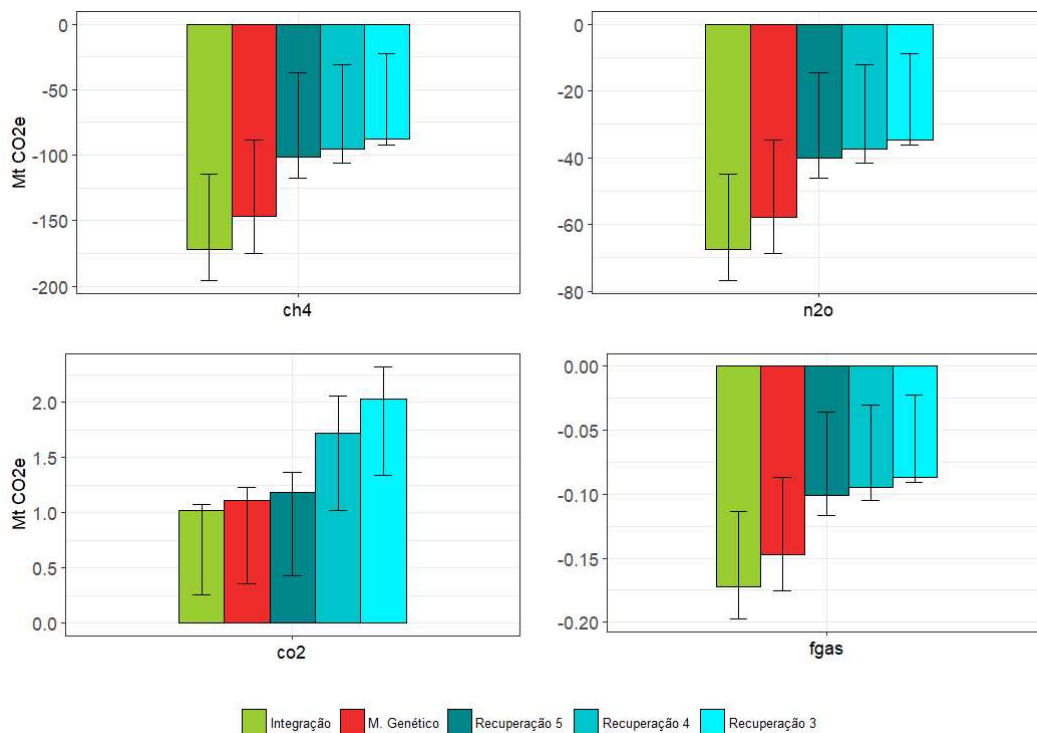


A tecnologia de integração é capaz de reduzir em 24% as emissões, o que equivale a 237,7 Mt CO₂eq. Em sequência vem o melhoramento genético animal, com redução de 21%, cerca de 203,2 Mt CO₂eq. A recuperação da pastagem degradada contribui com a redução de 13% do volume total de emissões do Brasil, cerca de 131,6 Mt CO₂eq. Concomitantemente, em todos os cenários propostos há aumento das

emissões relacionado ao consumo das famílias, mas esse efeito é neutralizado pela redução associada ao manejo eficiente da pecuária.

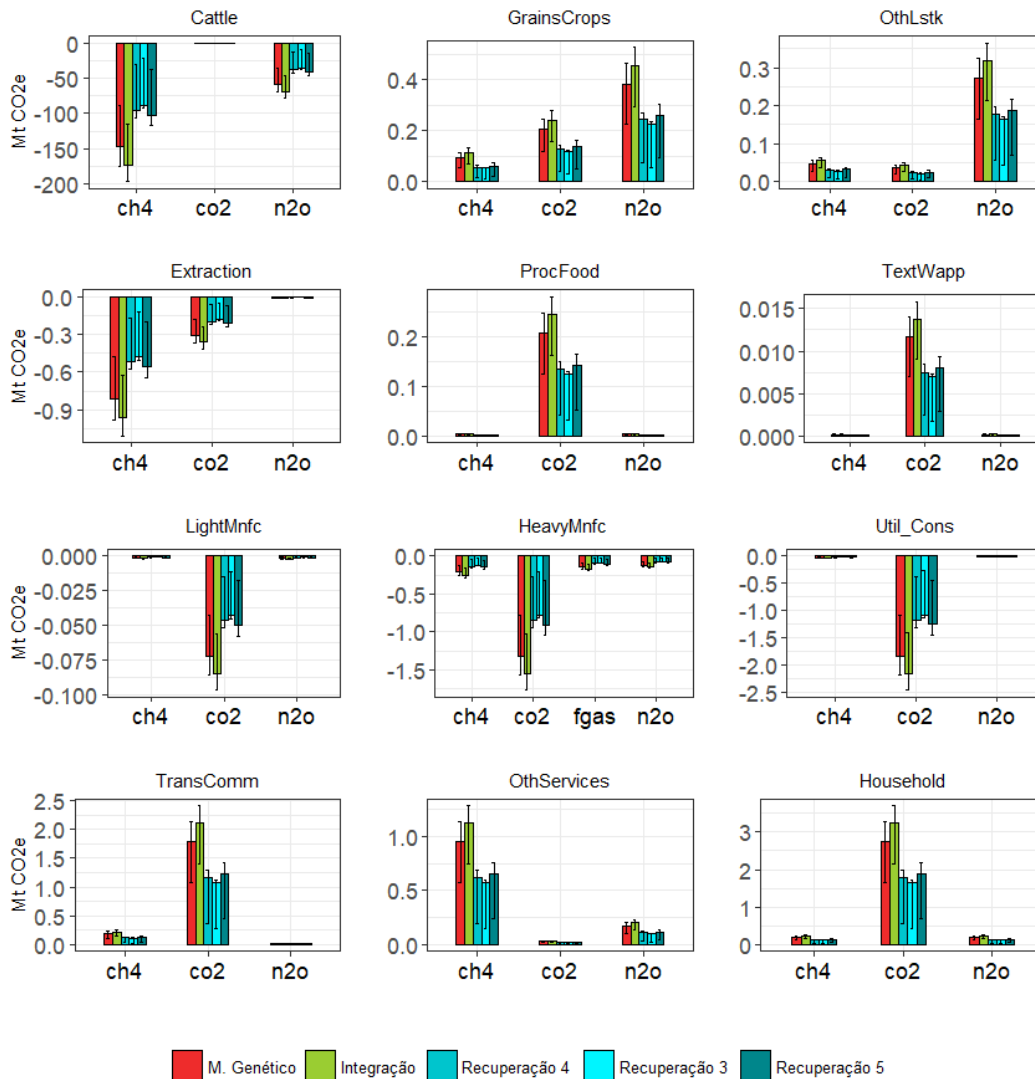
O resultado total pode ser dividido entre os diferentes gases considerados, como mostra a Figura 8. As emissões de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), principais gases emitidos pela pecuária, conforme o esperado, respondem mais intensamente ao uso das tecnologias. Quando o sistema de integração é implementado, há a maior redução das emissões de metano, gás gerado pelo processo digestivo dos ruminantes. A redução fica entre 172 Mt CO_2eq e 196 Mt CO_2eq , o que corresponde a 27% e 46% do volume total de metano produzido pelo Brasil. As emissões de óxido nitroso, provenientes da aplicação de adubos e fertilizantes sintéticos, respondem por reduções que variam entre 26% e 44%, 45 Mt CO_2eq e 77 Mt CO_2eq respectivamente, no cenário mais eficiente, em que a tecnologia utilizada é o sistema integrado.

FIGURA 8. Efeitos das tecnologias do Plano ABC sobre as emissões de Metano (CH_4), Óxido Nitroso (N_2O), Dióxido de Carbono (CO_2) e Gases Fluorados (Fgas) no Brasil (Mt CO_2eq).



No sentido oposto dos demais gases, as emissões de dióxido de carbono, apresentam leve movimento de alta, crescendo entre 0,3% e 0,5%, de acordo com a tecnologia empreendida. Como o CO₂ está ligado à queima de combustíveis fósseis, esse resultado reflete os aumentos do nível e intensificação da produção de alguns setores, principalmente o de transportes, conforme a Figura 9. Finalmente, os gases fluorados, gerados pelos processos de industrialização e refrigeração dos bens ofertados pela pecuária, apresentam queda de 1% a 3% em suas emissões.

FIGURA 9. Efeitos das tecnologias do Plano ABC sobre as emissões de Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O), Dióxido de Carbono (CO₂) e Gases Fluorados (Fgas) nos setores da economia brasileira (Mt CO₂eq).



A aplicação das tecnologias propostas no setor de pecuária gera efeito rebote, que faz com que outros setores aumentem suas emissões de GEEs. O perfil do aumento das emissões é determinado pelo tipo de produção setorial e pela composição do consumo energético do setor. Por exemplo, os setores de alimentos e bebidas (*ProcFood*), Transporte e Comunicações (*TransComm*) aumentam as emissões de CO₂ em cerca de 2,2 Mt CO₂eq (Cenário Integração). Ambos os setores estão conectados à jusante do setor de pecuária, ou seja, o maior volume de produção da pecuária demanda mais serviços de transportes ao mesmo tempo que aumenta a produção de alimentos relacionados à proteína animal.

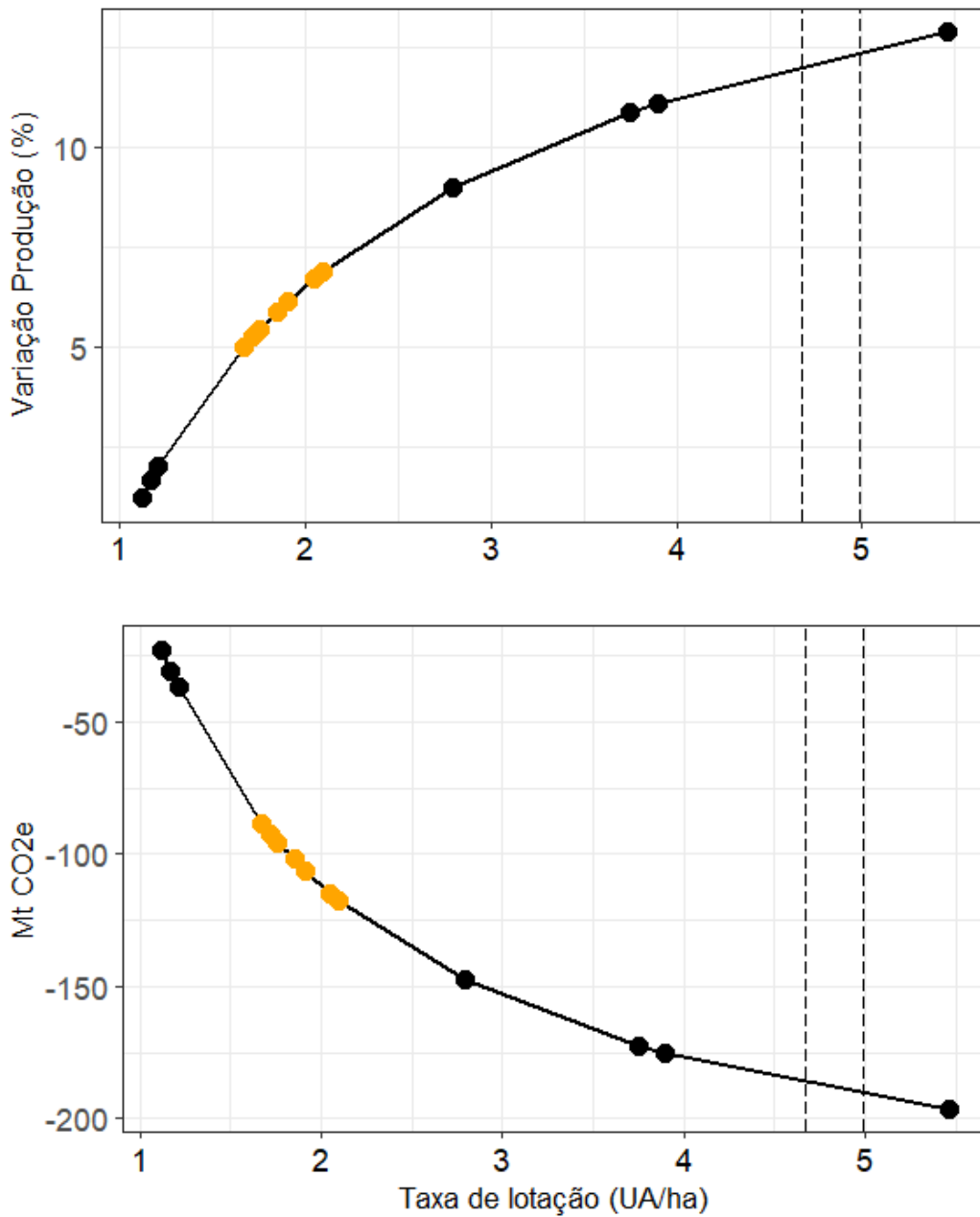
Já na cadeia à montante da pecuária o setor de agricultura (*GrainsCrops*) e outros animais da pecuária (*OthLstk*) também aumentam suas emissões de GEEs. Enquanto aumentam as emissões de todos os gases na agricultura, seja pelo maior volume de grãos para atender à pecuária ou pela mudança no uso da terra. O restante

da pecuária aumenta as emissões concentradas em N₂O provenientes da mudança do uso do solo e no manejo do dejetos dos animais. Vale destacar também o aumento nas emissões de CH₄ do setor de serviços (*OthServices*) ligadas ao processamento de resíduos urbanos, como também o aumento de CO₂ no consumo final – 3,5 Mt CO₂eq (Cenário Integração). Entretanto, somente o setor de pecuária responde pela redução de cerca de 172,5 Mt CO₂eq das emissões de CH₄ e 68,5 Mt CO₂eq de N₂O, e sua capacidade mitigadora é tão expressiva que supera todo o efeito rebote gerado e colabora com a eficácia da redução líquida das emissões de GEEs no Brasil.

5.4. Trade-off entre produção e mitigação na pecuária

Ao se comparar as taxas de crescimento da produção e das emissões de gases de efeito estufa, conforme a Figura 10, é possível observar que a produção apresenta trajetória crescente e o oposto ocorre com as emissões, mas ambas evoluem a taxas decrescentes e, conseqüentemente, possuem um ponto ótimo.

FIGURA 10. Evolução da produção pecuária (%) e redução de emissões de GEEs (MT CO₂e) em função da taxa de lotação (UA/ha)



Nota: A função de variação da produção é definida por: $\Delta XPX = f(\text{taxa de lotação})$; enquanto a função de variação das emissões é definida por: $\Delta XGHG = f(\text{taxa de lotação})$. Portanto, considera-se $f'(x) = 0$, em que $\text{taxa de lotação} = x$, para a determinação do ponto ótimo para ambas funções. Os pontos amarelos representam as taxas de lotação média adotadas.

A taxa de lotação ótima para a redução de GEEs é de 4,67 UA/ha e para a produção pecuária é de 4,99 UA/ha. O intervalo entre a taxa 4,67 UA/ha e 4,99 UA/ha representa o *trade-off* entre mitigação e produção. Qualquer taxa de lotação que se encontre dentro desse intervalo pode ser tratada como um limite máximo em termos de aplicação de políticas públicas que utilizam como ferramenta a implementação das

tecnologias apresentadas. A decisão de buscar taxas de lotação superiores a 4,67 UA/ha deve considerar a disposição dos tomadores de decisão de abrir mão de mitigar para atingir um ótimo em termos de produção.

Dado que o Brasil possui taxa média de 0,71 UA/ha e a taxa média das tecnologias¹⁹ apresentadas está entre 1,7 UA/ha e 2,1 UA/ha, ainda há espaço muito grande a ser explorado a fim de se atingir todo o potencial produtivo da pecuária. As taxas ótimas estão muito próximas entre si e ocorrem próximo ao limite máximo das curvas. Portanto, esse pequeno *trade-off* associado à baixa taxa de lotação das pastagens brasileiras representa forte indicativo de que existe grande espaço para a intensificação sustentável. Esse espaço pode ser explorado via recuperação de pastos degradados, diferentes integrações de sistemas produtivos, tratamento de dejetos animais, alteração e suplementação das dietas animais, cruzamento de raças etc.

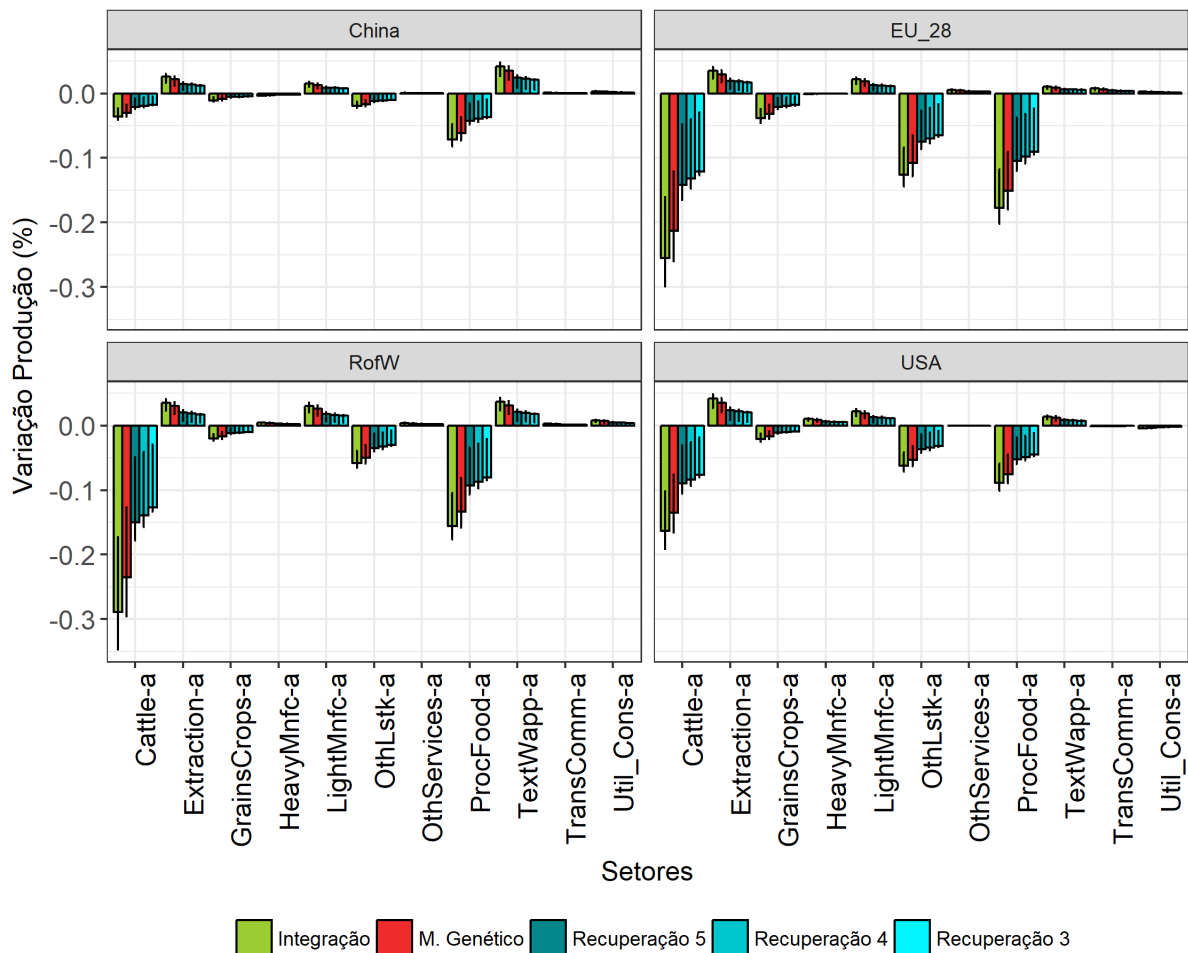
5.5. Impactos sobre o mercado internacional

Dados apresentados pela Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes (ABIEC, 2019) mostram que o Brasil exportou cerca de 20,12% de todo o volume de carne bovina produzido em 2018. A inserção das tecnologias previstas no Plano ABC gera redução dos preços da pecuária brasileira (*Cattle_a*) dado o maior volume de produção. O maior volume de produção é mais do que suficiente para atender a demanda doméstica sendo que o excedente é destinado às exportações. Essa nova dinâmica amplia a competitividade do setor de pecuária brasileiro em relação as demais regiões do mundo, como Estados Unidos, União Europeia e Austrália (Resto do Mundo) aumentando a parcela do Brasil no mercado internacional. De fato, os resultados da pesquisa mostram que há uma contração dos setores de pecuária e alimentos e bebidas nos Estados Unidos, União Europeia, e Resto do Mundo. Pode-se afirmar que a implementação das tecnologias propostas pelo Plano ABC causa uma realocação mundial da produção de pecuária e alimentos derivados de proteína animal, em favor do Brasil, ou seja, a intensificação da produção de

¹⁹ Destacadas em amarelo na Figura 7.

pecuária aumenta o grau de concentração das exportações brasileiras em carne bovina e alimentos processados (Figura 11).

FIGURA 11. Efeitos das tecnologias do Plano ABC sobre a produção setorial no Resto do Mundo.

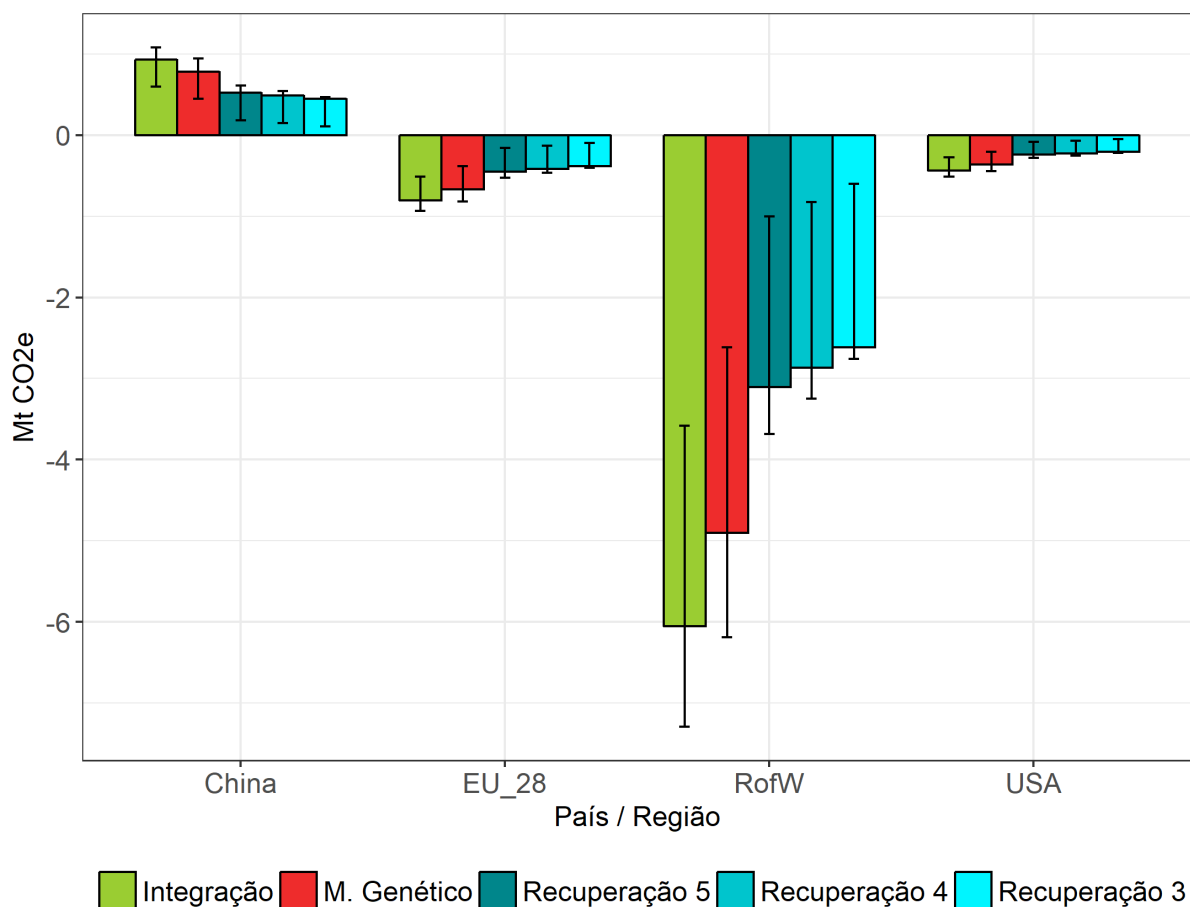


Por outro lado, os mesmos setores na China apresentam uma retração menor do que 0,1%. Não há um aprofundamento de comércio entre Brasil e China nesses setores. Esse resultado está mais associado ao custo de produção desses setores na China do que com o nível de comércio com o Brasil. Assim, o aprofundamento do comércio internacional ocorre nas regiões em que o custo de produção é relativamente mais alto ao novo custo de produção do Brasil, neste caso, Estados Unidos e União Europeia.

O efeito sobre emissões de GEEs a nível global é positivo, com redução líquida de cerca de 6,5 Mt CO₂e, conforme mostra a Figura 12. O impacto indireto nas

emissões de GEEs nas demais regiões é ambíguo e determinado pela composição energética e padrão de emissões dos setores afetados. Por exemplo, as emissões de GEE por produto da pecuária nos Estados Unidos e União Europeia é diferente do padrão brasileiro, uma vez que a produção é mais intensiva nessas regiões. Por outro lado, a China, aumenta ligeiramente as emissões de GEE em cerca de 1 Mt CO₂e (Cenário Integração).

FIGURA 12. Efeitos das tecnologias do Plano ABC sobre as emissões de Gases e Efeito Estufa no Resto do Mundo (Mt CO₂eq)



Um importante resultado é a redução de 6 Mt CO₂e no Resto do Mundo. Por se tratar de uma agregação regional é difícil rastrear quais regiões/países apresentam maiores reduções na emissão de GEEs. Contudo, conforme apresentado acima além do deslocamento da produção de pecuária em favor do Brasil, a intensificação da produção brasileira induz, de modo indireto, em maior mitigação nas regiões/países com produção pecuária. Esse efeito indireto sobre as emissões de GEEs via comércio internacional é um importante *spillover* do Plano ABC que precisa ser considerado.

5.6. Discussão

Essa pesquisa foca no potencial de mitigação de diferentes tecnologias de intensificação da produção aplicadas ao setor de pecuária no Brasil. Os resultados demonstram que há um grande potencial de mitigação, uma vez que a taxa de lotação média das pastagens no Brasil é baixa. Esse resultado é evidenciado pelo *trade-off* entre produção e mitigação que ocorre somente em elevadas taxas de lotação o que indica, mais uma vez, o potencial para intensificação sustentável da pecuária brasileira.

A intensificação sustentável da pecuária está associada a um maior volume de produção por hectare e, indiretamente, a um nível menor de desmatamento (GIL; SIEBOLD; BERGER, 2015). A quantidade de área de pastagens em diferentes níveis de degradação permite a conversão dessas áreas em lavouras ou florestas plantadas, especialmente áreas com baixa produtividade (DE OLIVEIRA SILVA et al., 2017). Essa dinâmica reduz a pressão sobre a abertura de novas áreas, tanto para pastagem quanto para lavouras implicando em redução do desmatamento.

Entretanto, o sucesso dessa dinâmica de conversão depende de diversos fatores, como uma escala mínima de produção (BRAGANÇA; ASSUNÇÃO, 2019); e a valorização das terras principalmente na fronteira agrícola (BRAGANÇA; ASSUNÇÃO, 2019). Nesse contexto, o novo código florestal, a definição de direitos de propriedade, o cadastro ambiental rural (CAR), e a concessão de crédito ligado às tecnologias de baixo carbono – Programa ABC – possuem papel fundamental para aumentar o valor de mercado das terras destinadas à pecuária.

Esse trabalho é pioneiro na investigação do possível *trade-off* entre mitigação de GEE e aumento da produção pecuária no Brasil. Os ganhos de produtividade vêm das mudanças no manejo do rebanho e das pastagens, bem como da introdução de novas técnicas integradas de produção, como o caso dos sistemas iLPF. Em concordância com grande parte da literatura, encontra-se que a intensificação da pecuária reduz as emissões de CH₄ e N₂O, evidenciando todo potencial de mitigação do setor e suas tecnologias (CARDOSO et al., 2016; COHN et al., 2014; COSTA et al., 2018; DE FIGUEIREDO et al., 2016; HAVLÍK et al., 2014; HERRERO et al., 2015; HERRERO; THORNTON, 2013; HRISTOV et al., 2013; MAGALHÃES et al., 2018;

SILVA; RUVIARO; FERREIRA FILHO, 2017). O *trade-off* entre mitigação e produção acontece em um intervalo curto e com alta taxa de lotação (4,67-4,99 UA/ha). Dada as taxas de lotação dos diferentes tipos de pastagens no Brasil, os resultados mostram que o setor possui longo caminho e potencial para crescer de modo sustentável com maior eficiência na utilização dos recursos e com preservação do meio ambiente.

Isso implica que acima de 4,67 UA/ha o acréscimo de animais à produção aumenta a produtividade do sistema, entretanto há um aumento das emissões de GEE por unidade produzida além do ponto mais eficiente em termos de mitigação. Dada as taxas de lotação dos diferentes tipos de pastagens no Brasil, os resultados mostram que o setor possui um longo caminho e potencial para crescer de modo sustentável com maior eficiência na utilização dos recursos e com preservação do meio ambiente até que o *trade-off* entre mitigação e produção ocorra.

Para que isso aconteça os esforços designados devem ser implementados a nível local. Nesse sentido, a identificação de *clusters* produtivos e investimentos em originação sustentável conectada com uma carne bovina “carbono neutro” são necessários para que os resultados se sustentem no longo do tempo e tenham amplitude nacional. O setor é capaz de contribuir com o crescimento econômico, sendo importante elo de ligação entre o setor agropecuário e a indústria de alimentos. Além disso, a pecuária brasileira pode se consolidar como o principal *player* do comércio internacional de carne bovina “carbono neutro” contribuindo com a segurança alimentar global.

Em relação ao comércio internacional é possível identificar dois importantes *spillovers* das tecnologias do Plano ABC. Primeiro, o deslocamento da produção de pecuária em favor do Brasil, devido à mudança dos preços relativos e custos de produção, projeta o setor brasileiro como um dos principais fornecedores de proteína animal do mundo. Segundo, o deslocamento da produção mundial afeta indiretamente o nível das emissões de GEE em diferentes regiões do mundo, principalmente naquelas em que a produção de pecuária é mais intensa em emissões. O efeito total desse *spillover* de mitigação poderia fomentar às discussões internacionais no tema ampliando o entendimento de como o comércio internacional fomenta o potencial de mitigação do setor agropecuário.

Em termos de mitigação de GEEs os resultados indicam que as tecnologias estudadas são capazes de reduzir a concentração total de gases, em especial CH₄ e

N₂O. O aumento da eficiência e produtividade da produção se dá pelo ganho de nutrientes e aproveitamento de energia e da maior matéria orgânica no solo (GARRETT et al., 2017). Desse modo, as tecnologias são capazes de reduzir os impactos da produção pecuária sobre as mudanças climáticas, seja pela maior produção – redução do tempo de abate e redução total do rebanho –, melhor manejo dos dejetos dos animais devido a melhor alimentação e pela menor perda de carbono no solo, uma vez que ao se aumentar a taxa de recuperação de pastagens se reduz a mudança de uso do solo entre lavouras, pastagens e florestas.

Em contraste, mostra-se que a maior produção da pecuária está associada ao aumento das emissões de outros setores – produção de grãos e alimentos – (SILVA; RUVIARO; FERREIRA FILHO, 2017). Os resultados de PIB e bem-estar positivos estão relacionados ao aumento da demanda final das famílias, o que implica em maior emissão de GEE por consumo. Esse fenômeno, conhecido como *rebound effect*, é a resposta dos agentes econômicos a uma nova tecnologia que reduz custos de produção e preço dos produtos (SILVA; RUVIARO; FERREIRA FILHO, 2017). Na verdade, destaca-se que esse efeito indireto nas emissões não é capaz de neutralizar o potencial de mitigação do setor.

Existem significantes limitações e simplificações nas análises feitas até aqui. Primeiro, o modelo ENVISAGE (VAN DER MENSBRUGGHE, 2008) não apresenta explicitamente diferentes categorias de uso da terra como em outros modelos de EGC (HERTEL; TSIGAS, 1997; LIMA, 2017; PALTSEV et al., 2005). Por um lado, essa simplificação evita uma série de pressuposições que deveriam ser feitas sobre as transições de uso da terra entre diferentes categorias, por outro lado, não permite a confirmação do efeito poupa-terra dessas tecnologias. Segundo, uma das consequências do processo de recuperação das pastagens é o aumento do carbono armazenado no solo (BRANDÃO et al., 2013; LUCENA et al., 2016; OLIVEIRA SILVA et al., 2016). As pastagens em diferentes biomas apresentam diferentes potenciais de mitigação e armazenamento de carbono (OLIVEIRA SILVA et al., 2016). O modelo ENVISAGE não considera o armazenamento de carbono no solo ao recuperar pastagens – essa ainda é uma das limitações em modelos dessa natureza.

Nesse sentido, pode-se dizer que os resultados obtidos até aqui são conservadores em relação ao potencial total de mitigação do setor. Há sinergias entre o processo de recuperação de pastagens e redução das emissões do rebanho que

não são captadas pelo modelo e que podem aumentar o potencial de mitigação (OLIVEIRA SILVA et al., 2016; SILVA et al., 2018).

Deve-se ressaltar que as condições de contorno definidas e apresentadas nesta pesquisa ocorrem a nível nacional, mas a decisão de aplicar as tecnologias é local e ocorre a nível do pecuarista. Portanto, determinar as taxas de lotação ótimas serve como um panorama a nível de país, mas não reflete quais são as taxas ótimas localmente. Isso acontece porque muitos fatores, como características econômicas, genética do rebanho e biogeofísicas do solo precisam ser consideradas para a definição da taxa ótima de lotação a nível local. Nesse sentido, é importante considerar políticas públicas que entendam e se adaptem a essas especificidades regionais, buscando o máximo de eficiência produtiva e mitigadora de cada uma delas.

Por último e não menos importante, é o modo de inserção das tecnologias no modelo. A aplicação exógena de choques ao rebanho não permite captar todos os custos envolvidos na aplicação das diferentes técnicas de manejo, uso do solo e melhoramento das unidades de produção. Mesmo que Lima (2017) mostre que os custos de penetração dessas tecnologias sejam menores do que os previstos, ainda existem limitações para a incorporação dos custos de novas tecnologias em modelos EGC e o isolamento dos efeitos combinados desses choques.

A dificuldade em mensurar sinergias e *trade-offs* entre medidas de mitigação – recuperação de pastagens e sistemas integrados de produção – com medidas de adaptação – melhoramento genético animal – em políticas públicas agroambientais é conhecido na literatura do tema (ROJAS-DOWNING et al., 2017). Os resultados apresentados na seção anterior mostram apenas os efeitos isolados de cada uma delas e, para o caso específico da recuperação das pastagens, considera-se a incerteza quanto ao nível de degradação no Brasil. Os modelos utilizados para essas análises ainda não conseguem captar a interação entre essas tecnologias aumentando assim a incerteza quanto aos resultados.

Por fim, medidas de mitigação necessitam de bom desenho de política pública para serem efetivas e com ampla adesão dos produtores rurais (LATAWIEC et al., 2014). Nesse sentido, o Programa ABC mostra-se como um dos principais instrumentos dessa política para a consolidação da pecuária sustentável no Brasil (COSTA JR. et al., 2019; DE OLIVEIRA SILVA et al., 2017; LATAWIEC et al., 2017; SÁ et al., 2017). Associado ao Programa ABC, outras medidas institucionais como

treinamento, gestão e modelos de aplicação dessas tecnologias em menor escala podem ajudar a difundir os benefícios de produção agropecuária sustentável. Diferentemente das medidas de mitigação, as medidas de adaptação são adotadas em escalas locais com menores custos de implementação (ROJAS-DOWNING et al., 2017).

6. CONCLUSÕES

Este estudo teve o objetivo de analisar os impactos de tecnologias do Plano de Agricultura de Baixo Carbono - ABC sobre a produção e as emissões de GEEs do setor de pecuária brasileira e identificar os transbordamentos gerados para os demais setores da economia. Além disso objetivou-se determinar a existência de um possível trade-off entre produção e mitigação, e a taxa de lotação onde ele ocorre. Foram combinadas tecnologias capazes de mitigar emissões de GEEs e, ao mesmo tempo, elevar a produtividade da produção do setor de pecuária no Brasil (Integração Lavoura Pecuária Floresta – iLPF, melhoramento genético animal e recuperação de pastagens degradadas).

Os resultados mostram que, diretamente, as tecnologias são capazes de aumentar a produtividade da pecuária e, ao mesmo tempo, mitigar as emissões de GEEs. Além disso, indiretamente também afetam de maneira positiva os setores da cadeia produtiva da pecuária, geram incrementos no PIB e aumentam o bem-estar das famílias. Finalmente, identificou-se a existência de trade-off entre produção e mitigação, o qual ainda está distante de ser alcançado, pois ocorre muito próximo aos potenciais máximos de mitigação e produção do setor. A diferença entre as taxas de lotação projetadas para as diferentes tecnologias e a que é observada na prática no Brasil revela o grande potencial de crescimento da pecuária na direção de uma produção sustentável.

Dado os resultados apresentados a hipótese inicial de que o setor de pecuária pode conciliar aumento de produção com potencial de mitigação de GEE é confirmada. Além disso, os resultados mostraram um efeito rebote de aumento das emissões de CO₂ vindo de outros setores e do consumo final das famílias, entretanto, esse efeito não é capaz de anular o total de mitigação atingido pela pecuária. O efeito rebote é anulado pela maior redução das emissões do setor de pecuária, o que gera saldo líquido de redução de emissões na economia. Portanto, as tecnologias propostas no Plano ABC têm resultados *ganha-ganha*, já que se mostram capazes de intensificar a produção pecuária, diminuir a pressão por novas terras agrícolas e também gerar desdobramentos econômicos positivos para a sociedade.

Evidentemente que os resultados determinados na pesquisa projetam as consequências de uma ampla adesão às tecnologias de baixo carbono no Brasil. Esse processo envolve questões econômicas, políticas e de mudança de paradigma dos

agropecuáristas. A implementação de novas técnicas ainda se apresenta como um alto custo de entrada na direção de um crescimento da produção sustentável. A adoção de tecnologias e práticas mais eficientes depende de fatores, como acesso ao conhecimento e tecnologia, cadeias de suprimento estáveis, acesso a mão-de-obra especializada e, sobretudo, financiamento para custeio e investimentos.

A superação desses desafios pode variar significativamente entre as regiões brasileiras dada suas heterogeneidades econômica, política e agropecuária. A associação entre governo e iniciativa privada na promoção da transferência de conhecimento e tecnologia pode ser determinante para a superação das especificidades regionais. A avaliação e identificação de cadeias produtivas a nível regional – clusters da pecuária – pode maximizar os ganhos da aplicação dessas tecnologias, gerar escala de produção sustentável, ganhos de eficiência e superação dos gargalos regionais. A concessão de crédito para custeio de investimentos se tornaria mais eficiente e, o apoio de instituições como a Embrapa e as agências estaduais públicas de extensão rural ampliariam as práticas e tecnologias locais cada vez mais relevantes.

Todos esses esforços se traduzem em uma produção sustentável – carbono neutro – com maior valor agregado e maior potencial de inserção em um mercado internacional cada vez mais exigente em termos de qualidade e preservação ambiental. Ao mesmo tempo, o setor se torna mais resiliente às mudanças climáticas diminuindo as emissões de GEE por unidade produzida. Os efeitos indiretos como à agregação de valor ao longo de toda a cadeia produtiva e contribuição para o crescimento econômico também precisam ser contabilizados.

Finalmente, é relevante ressaltar que o modelo ENVISAGE foi utilizado como ferramenta de construção de cenários multissetoriais e multirregionais, e desenvolvido com base na teoria econômica e na disponibilidade de dados. Houve a utilização de parâmetros calibrados para o ano de 2011, estimados e com base em observações da realidade, a fim de representar a reação de agentes, setores e economias à aplicação das tecnologias, bem como a variação das emissões de GEEs - CO₂, CH₄, N₂O e gases florados - conectando-os diretamente às atividades econômicas. Portanto, é uma representação simplificada da realidade e assume comportamentos racionais e acertados.

Nesse sentido, destaca-se a importância de modelos de equilíbrio geral computável e suas extensões para a captação de todos os efeitos mencionados anteriormente. A ampliação da representação do uso da terra e suas características biogeofísicas associados aos *drivers* econômicos desses modelos pode encaminhar novos resultados para a elaboração de políticas agroambientais nos próximos anos. Do mesmo modo, a representação e utilização de dados com alta resolução espacial será um avanço sem precedentes para a projeção e análises de políticas dessa natureza, em especial para um país continental e heterogêneo como o Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIEC. **Beef Report Perfil da Pecuária no Brasil**. São Paulo: [s.n.].
- AGUIAR, A.; NARAYANAN, B.; MCDOUGALL, R. An Overview of the GTAP 9 Data Base. **Journal of Global Economic Analysis; Vol 1, No 1 (2016)DO - 10.21642/JGEA.010103AF** , 3 jun. 2016.
- AGUILAR, I.; MISZTAL, I.; TSURUTA, S. **Short communication: Genetic trends of milk yield under heat stress for US Holsteins***Journal of Dairy Science*. [s.l: s.n.].
- ALVIM, F. B. et al. **Cenários para a pecuária de corte amazônica Autores**. Belo Horizonte - MG: [s.n.].
- ASSAD, E. D. **Agricultura de Baixa Emissão de Carbono: A Evolução de um Novo Paradigma***Observatório ABC*. [s.l: s.n.].
- BALBINO, L. C. et al. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1–12, 2011.
- BARBOSA ALVIM, F. et al. **Cenários para a Pecuária de Corte Amazônica** (IGC/UFMG, Ed.). Belo Horizonte - MG: [s.n.].
- BERNDT, A.; TOMKINS, N. W. Measurement and mitigation of methane emissions from beef cattle in tropical grazing systems: a perspective from Australia and Brazil. **animal**, v. 7, n. s2, p. 363–372, jun. 2013.
- BLOEMHOF, S. et al. Sow line differences in heat stress tolerance expressed in reproductive performance traits. **Journal of Animal Science**, v. 86, n. 12, p. 3330–3337, 2008.
- BÖHRINGER, C.; LÖSCHEL, A. Computable general equilibrium models for sustainability impact assessment: Status quo and prospects. **Ecological Economics**, v. 60, n. 1, p. 49–64, 2006.
- BRAGANÇA, A.; ASSUNÇÃO, J. **Pathways for Sustainable Agricultural Production in Brazil: Necessary Investments and Potential Gains of Increasing Efficiency**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- BRANDÃO, M. et al. Key issues and options in accounting for carbon sequestration and temporary storage in life cycle assessment and carbon footprinting. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 1, p. 230–240, jan. 2013.
- BRÜGEMANN, K. et al. Genetic analyses of protein yield in dairy cows applying random regression models with time-dependent and temperature x humidity-dependent covariates. **Journal of Dairy Science**, v. 94, n. 8, p. 4129–4139, 2011.
- CARDOSO, A. S. et al. Impact of the intensification of beef production in Brazil

on greenhouse gas emissions and land use. **Agricultural Systems**, v. 143, p. 86–96, 2016.

CARVALHO, J. L. N. et al. Crop-pasture rotation: A strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. v. 183, p. 167–175, 2014.

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 of the United States of America**, v. 111, n. 20, p. 7236–7241, 2014.

COOPER, T.; HART, K.; BALDOCK, D. **Provision of Public Goods through Agriculture in the European Union (December 2009)**. [s.l: s.n.].

COSTA JR., N. B. DA et al. Public policies for low carbon emission agriculture foster beef cattle production in southern Brazil. **Land Use Policy**, v. 80, p. 269–273, jan. 2019.

COSTA, M. P. et al. A socio-eco-efficiency analysis of integrated and non-integrated crop-livestock-forestry systems in the Brazilian Cerrado based on LCA. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 1460–1471, jan. 2018.

DE FIGUEIREDO, E. B. et al. Greenhouse gas balance and carbon footprint of beef cattle in three contrasting pasture-management systems in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 420–431, jan. 2016.

DE OLIVEIRA SILVA, R. et al. Sustainable intensification of Brazilian livestock production through optimized pasture restoration. **Agricultural Systems**, v. 153, p. 201–211, maio 2017.

DIAS-FILHO, M. B. **Diagnóstico das Pastagens no Brasil**. Belém - Pa: [s.n.].

FRANZLUEBBERS, A. J.; DE FACCIO CARVALHO, P. C.; DEDIEU, B. Toward agricultural sustainability through integrated crop-livestock systems: Environmental outcomes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 1–3, jun. 2014.

FUJIMORI, S. et al. Land use representation in a global CGE model for long-term simulation: CET vs. logit functions. **Food Security**, v. 6, n. 5, p. 685–699, 2014.

GAMARRA, E. L. et al. Beef cattle production in established integrated systems. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 5, p. 3241–3252, 2017.

GARRETT, R. D. et al. Social and ecological analysis of commercial integrated crop livestock systems: Current knowledge and remaining uncertainty. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 136–146, jul. 2017.

GIL, J. D. B.; GARRETT, R.; BERGER, T. Determinants of crop-livestock integration in Brazil: Evidence from the household and regional levels. **Land Use Policy**, v. 59, p. 557–568, 2016.

GIL, J. D. B.; SIEBOLD, M.; BERGER, T. Adoption and development of

integrated crop-livestock-forestry systems in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 199, p. 394–406, 2015.

GILL, M.; SMITH, P.; WILKINSON, J. M. Mitigating climate change: the role of domestic livestock. **Animal**, v. 4, n. 3, p. 323–333, 2010.

GOLUB, A. A.; HERTEL, T. W. MODELING LAND-USE CHANGE IMPACTS OF BIOFUELS IN THE GTAP-BIO FRAMEWORK. **Climate Change Economics**, v. 03, n. 03, p. 1250015, ago. 2012.

GORMAN, M. O. **Global Warming : A Tragedy of the Commons**. [s.l: s.n.].

GURGEL, A. . et al. CGE models: Linking natural resources to the cge framework. In: **WORLD SCIENTIFIC REFERENCE ON NATURAL RESOURCES AND ENVIRONMENTAL POLICY IN THE ERA OF GLOBAL CHANGE: Volume 3: Computable General Equilibrium Models**. [s.l: s.n.]. p. 57–98.

GV AGRO; EMBRAPA. **INTENSIFICAÇÃO DA PECUÁRIA BRASILEIRA: SEUS IMPACTOS NO DESMATAMENTO EVITADO, NA PRODUÇÃO DE CARNE E NA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA RELATÓRIO COMPLETO**. São Paulo - SP: [s.n.].

HAAS, Y. DE et al. Genetic parameters for predicted methane production and potential for reducing enteric emissions through genomic selection. **Journal of Dairy Science**, v. 94, n. 12, p. 6122–6134, 2011.

HARRIS, J. R.; TODARO, M. P. **Migration, Unemployment and Development: A Two-Sector Analysis**Source: **The American Economic Review**. [s.l: s.n.].

HAVLÍK, P. et al. Climate change mitigation through livestock system transitions. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 111, n. 10, p. 3709–14, 2014.

HAVLÍK, P. et al. Climate Change Impacts and Mitigation in the Developing World - An Integrated Assessment of the Agriculture and Forestry Sectors. n. November 2015, p. 54, 2015.

HAYES, B. J.; LEWIN, H. A.; GODDARD, M. E. The future of livestock breeding: Genomic selection for efficiency, reduced emissions intensity, and adaptation. **Trends in Genetics**, v. 29, n. 4, p. 206–214, 2013.

HEIL COSTA, M. et al. **Quanto gado as pastagens brasileiras podem suportar?** Brasília: [s.n.].

HERRERO, M. et al. Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 110, n. 52, p. 20888–93, 2013.

HERRERO, M. et al. **Livestock and the Environment: What Have We Learned**

in the Past Decade? **Annual Review of Environment and Resources**, v. 40, n. 1, p. 177–202, 2015.

HERRERO, M. et al. Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 5, p. 452–461, maio 2016.

HERRERO, M.; THORNTON, P. K. Livestock and global change: Emerging issues for sustainable food systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 52, p. 20876–20881, 2013.

HERTEL, T. W. et al. **APPLIED GENERAL EQUILIBRIUM ANALYSIS OF AGRICULTURAL AND RESOURCE POLICIES***. [s.l: s.n.].

HERTEL, T. W.; TSIGAS, ET AL. Structure of GTAP. **Global Trade Analysis: modeling and applications**, p. 13–73, 1997.

HOFFMANN, I. Climate change and the characterization , breeding and conservation of animal genetic resources. **Animal Genetics**, v. 41, n. 1, p. 32–46, 2010.

HRISTOV, A. N. et al. Mitigation of greenhouse gas emissions in livestock production: A review of technical options for non-CO2 emissions. **FAO Animal Production and Health Paper No**, v. 177, p. 1–206, 2013.

IBGE. **Censo Agropecuário 2006**lbge. [s.l: s.n.].

IBGE. **Pesquisa da Pecuária Municipal**.

IPCC. **CLIMATE CHANGE 2013**. [s.l: s.n.].

IPCC. **AR5 WGIII Chapter 11 - Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)Ar5, Wg3**. [s.l: s.n.].

IPCC, C. C. **The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**USA: Cambridge University Press, , 2013b.

KAHOULI-BRAHMI, S. Technological learning in energy–environment–economy modelling: A survey. **Energy Policy**, v. 36, p. 138–162, 2008.

KURIHARA, M. et al. Methane production and energy partition of cattle in the tropics. **British Journal of Nutrition**, v. 81, n. 1, p. 227–234, 1999.

LAPIG. **Mapa Síntese da Área de Pastagem Para o Território Brasileiro**.

LAPOLA, D. M. et al. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 1, p. 27–35, 2014.

LATAWIEC, A. 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, ago. 2014.

LATAWIEC, A. E. et al. Improving land management in Brazil: A perspective from producers. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 240, p. 276–

286, 2017.

LEMAIRE, G. et al. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **“Agriculture, Ecosystems and Environment”**, v. 190, p. 4–8, 2014.

LIMA, C. Z. DE. **Impacts of low carbon agriculture in Brazil: a CGE application**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, ago. 2017.

LUCENA, A. F. P. et al. Climate policy scenarios in Brazil: A multi-model comparison for energy. **Energy Economics**, v. 56, p. 564–574, 2016.

MAGALHÃES, C. A. S. et al. Crop, livestock and forestry performance assessment under different production systems in the north of Mato Grosso, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 92, n. 278, p. 1–12, 2018.

MAPA. **Projeções do Agronegócio: Brasil 2014/2015 a 2024/2025**. Brasília: [s.n.].

MAPA, M. DA A. P. E A. **Valor Bruto da Produção Brasileira em 2017**.

MAPA, M. DA A. P. E A. **Ceplac - Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira**.

MDIC. **Balança comercial brasileira: Acumulado do ano**.

MORAES, A. DE et al. Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 4–9, 2014.

OBSERVATÓRIO ABC. Invertendo o sinal de carbono da agropecuária brasileira. p. 114, 2015.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Evolução das Emissões de Gases De Efeito Estufa No Brasil (1970-2013) Setor Agropecuária**. 2015.

OLIVEIRA SILVA, R. DE et al. Increasing beef production could lower greenhouse gas emissions in Brazil if decoupled from deforestation. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 5, p. 493–497, maio 2016.

PALTSEV, S. et al. **The MIT, Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) model version 4MIT joint program on the science and policy of global change**. Cambridge, MA: [s.n.].

PARENTE, L. L. **Mapeamento das Pastagens Brasileiras no Âmbito do Mapbiomas**. Goiânia - GO: [s.n.].

POFFENBARGER, H. et al. An economic analysis of integrated crop-livestock systems in Iowa, U.S.A. **Agricultural Systems**, v. 157, p. 51–69, out. 2017.

PRETTY, J. **Agricultural Sustainability: Concepts, Principles and Evidence**. **Philosophical Transaction Royal Society**, v. 1, n. 363, p. 447–465, 2008.

REIS, R. A. et al. Suplementação como Estratégia de Produção de Carne de Qualidade em Pastagens Tropicais. **Revista Brasileira Saúde Produção**

Animal, v. 13, n. 3, p. 642–655, 2012.

ROJAS-DOWNING, M. M. et al. Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. **Climate Risk Management**, v. 16, p. 145–163, 2017.

SÁ, J. C. DE M. et al. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, v. 98, p. 102–112, jan. 2017.

SAI. Reducing greenhouse gas emissions from livestock : Best practice and emerging options. [s.l: s.n.].

SALTON, J. C. et al. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, p. 70–79, 2014.

SANTOS, D. DE C. et al. Implementation of silvopastoral systems in Brazil with *Eucalyptus urograndis* and *Brachiaria brizantha*: Productivity of forage and an exploratory test of the animal response. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 266, p. 174–180, nov. 2018.

SEEG. Análise das Emissões de GEE do Brasil (1990-2012): Setor Agropecuário. **Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola; Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa**, p. 1–31, 2014.

SEEG, S. DE E. DE E. DE G. DE E. E. **Emissões de GEE no Brasil de 1970 a 2016.** [s.l: s.n.].

SENAR. **PROJETO FIP-ABC Produção sustentável em áreas já convertidas para o uso agropecuário (com base no Plano ABC).** Brasília, DF: [s.n.].

SHOVEN, J. B.; WHALLEY, J. Applying General Equilibrium. **Economica**, v. 61, n. 242, p. 255, 1994.

SILVA, J. G. DA; RUVIARO, C. F.; FERREIRA FILHO, J. B. D. S. Livestock intensification as a climate policy: Lessons from the Brazilian case. **Land Use Policy**, v. 62, p. 232–245, mar. 2017.

SILVA, R. D. O. et al. The role of agricultural intensification in Brazil's Nationally Determined Contribution on emissions mitigation. **Agricultural Systems**, v. 161, p. 102–112, mar. 2018.

SOUSSANA, J.-F. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 9–17, jun. 2014.

STRASSBURG, B. B. N. et al. 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.

TIETENBERG, T.; LEWIS, L. **Environmental & Natural Resource Economics**. 9th. ed. [s.l: s.n.].

TRENBATH, B. R. Intercropping for the management of pests and diseases. **Field Crops Research Elsevier Science Publishers B.V**, v. 34, p. 381–405, 1993.

USDA. **United States Department of Agriculture**.

VAN DER MENSBRUGGHE, D. **The environmental impact and sustainability applied general equilibrium (ENVISAGE) model**. [s.l: s.n.].

VILELA, L. et al. Integração Lavoura-pecuária. **Embrapa Cerrados**, v. 1, n. 1, p. 933–962, 2008.

VILELA, L. **IMPACTOS DE PASTAGENS DEGRADADAS NA PRODUTIVIDADE ANIMAL**. N.D.: [s.n.].

ZIMMER, A. H. et al. **Degradação, recuperação e renovação de pastagens** Embrapa Gado de Corte. Documento 189. Brasília, DF: [s.n.].

ZWALD, N. R. et al. Identification of Factors That Cause Genotype by Environment Interaction Between Herds of Holstein Cattle in Seventeen Countries. **Journal of Dairy Science**, v. 86, p. 1009–1018, 2003.

ANEXO A
DIMENSÕES DA BASE DE DADOS DO GTAP

TABELA A.1: Dimensão regional da base de dados do GTAP v9

SIGLA	REGIÃO NO MODELO
1 AUS	Australia
2 NZL	New Zealand
3 XOC	Rest of Oceania: American Samoa (asm), Cook Islands (cok), Fiji (fji), French Polynesia (pyf), Guam (gum), Kiribati (kir), Marshall Islands (mhl), Federated States of Micronesia (fsm), Nauru (nau), New Caledonia (ncl), Norfolk Island (nfk), Northern Mariana Islands (mnp), Niue (niu), Palau (plw), Papua New Guinea (png), Samoa (wsm), Solomon Islands (slb), Tokelau (tkl), Tonga (ton), Tuvalu (tuv), Van-uatu (vut), Wallis and Futura Islands (wlf)
4 CHN	China
5 HKG	Hong Kong (China)
6 JPN	Japan
7 KOR	Republic of Korea
8 MNG	Mongolia
9 TWN	Taiwan (China)
10 XEA	Rest of East Asia: Macao (mac), North Korea (prk)
11 KHM	Cambodia
12 IDN	Indonesia
13 LAO	Lao, PDR
14 MYS	Malaysia
15 PHL	Philippines
16 SGP	Singapore
17 THA	Thailand
18 VNM	Vietnam
19 XSE	Rest of Southeast Asia: Myanmar (mmr), Timor-Leste (tmp)
20 BGD	Bangladesh
21 IND	India
22 LKA	Sri Lanka

23	NPL	Nepal
24	PAK	Pakistan
25	XSA	Rest of South Asia: Afghanistan (afg), Bhutan (btn), Maldives (mdv)
26	CAN	Canada
27	USA	United States
28	MEX	Mexico
29	XNA	Rest of North America: Bermuda (bmu), Greenland (grl), Saint Pierre & Miquelon (spm)
30	ARG	Argentina
31	BOL	Bolivia
32	BRA	Brazil
33	CHL	Chile
34	COL	Colombia
35	ECU	Ecuador
36	PRY	Paraguay
37	PER	Peru
38	URY	Uruguay
39	VEN	Venezuela, Republica Bolivariana de
40	XSM	Rest of South America: Falkland Islands (flk), French Guiana (guf), Guyana (guy), Suriname (sur)
41	CRI	Costa Rica
42	GTM	Guatemala
43	HND	Honduras
44	NIC	Nicaragua
45	PAN	Panama
46	SLV	El Salvador
47	XCA	Rest of Central America: Belize (blz)
48	DOM	Dominican Republic
49	JAM	Jamaica
50	PRI	Puerto Rico
51	TTO	Trinidad & Tobago

52	XCB	Caribbean Anguilla (aia), Antigua & Barbuda (atg), Aruba (abw), Bahamas (bhs), Barbados (brb), Cayman Islands (cym), Cuba (cub), Dominica (dma), Grenada (grd), Guadeloupe (glp), Haiti (hti), Martinique (mtq), Montserrat (msr), Netherlands Antilles (ant), Saint Kitts & Nevis (kna), Saint Lucia (lca), Saint Vincent & the Grenadines (vct), Turks and Caicos Islands (tca), British Virgin Islands (vgb), United States Virgin Islands (vir)
53	AUT	Austria
54	BEL	Belgium
55	BGR	Bulgaria
56	CYP	Cyprus
57	CZE	Czech Republic
58	DNK	Denmark
59	EST	Estonia
60	FIN	Finland
61	FRA	France
62	DEU	Germany
63	GRC	Greece
64	HUN	Hungary
65	IRL	Ireland
66	ITA	Italy
67	LVA	Latvia
68	LTU	Lithuania
69	LUX	Luxembourg
70	MLT	Malta
71	NLD	Netherlands
72	POL	Poland
73	PRT	Portugal
74	ROU	Romania
75	SVK	Slovakia
76	SVN	Slovenia
77	ESP	Spain

78	SWE	Sweden
79	GBR	United Kingdom
80	NOR	Norway
81	CHE	Switzerland
82	XEF	Rest of European Free Trade Area (EFTA): Iceland (isl), Liechtenstein (lie)
83	ALB	Albania
84	BLR	Belarus
85	HRV	Croatia
86	RUS	Russian Federation
87	UKR	Ukraine
88	XEE	Rest of Eastern Europe: Moldova (mda)
89	XER	Rest of Europe :Andorra (and), Bosnia and Herzegovina (bih), Faroe Islands (fro), Gibraltar (gib), Macedonia (mkd), former Yugoslav Republic of), Monaco (mco), San Marino (smr), Serbia and Montenegro (scg)
90	KAZ	Kazakhstan
91	KGZ	Kyrgyz Republic
92	TJK	Tajikistan
93	XSU	Rest of Former Soviet Union: Turkmenistan (tkm), Uzbekistan (uzb)
94	ARM	Armenia
95	AZE	Azerbaijan
96	GEO	Georgia
97	BHR	Bahrain
98	IRN	Iran
99	ISR	Israel
100	JOR	Jordan
101	KWT	Kuwait
102	OMN	Oman
103	QAT	Qatar
104	SAU	Saudi Arabia
105	TUR	Turkey

106	ARE	United Arab Emirates
107	XWS	Rest of Western Asia: Iraq (irq), Lebanon (lbn), West Bank and Gaza (pse), Syrian Arab Republic (syr), Republic of Yemen (yem)
108	EGY	Egypt
109	MAR	Morocco
110	TUN	Tunisia
111	XNF	Rest of North Africa: Algeria (dza), Libya (lby)
112	BEN	Benin
113	BFA	Burkina Faso
114	CMR	Cameroon
115	CIV	Côte d'Ivoire
116	GHA	Ghana
117	GIN	Guinea
118	NGA	Nigeria
119	SEN	Senegal
120	TGO	Togo
121	XWF	Rest of Western Africa: Cape Verde (cpv), Gambia, The (gmb), Guinea-Bissau (gnb), Liberia (lbr), Mali (mli), Mauritania (mrt), Niger (ner), Saint Helena (shn), Sierra Leone (sle)
122	XCF	Central Africa: Central African Republic (caf), Chad (tcd), Congo (cog), Equatorial Guinea (gnq), Gabon (gab), Sao Tome & Principe (stp)
123	XAC	South-Central Africa: Angola (ago), Democratic Republic of the Congo (cod)
124	ETH	Ethiopia
125	KEN	Kenya
126	MDG	Madagascar
127	MWI	Malawi
128	MUS	Mauritius
129	MOZ	Mozambique
130	RWA	Rwanda
131	TZA	Tanzania
132	UGA	Uganda

133	ZMB	Zambia
134	ZWE	Zimbabwe
135	XEC	Rest of Eastern Africa: Burundi (bdi), Comoros (com), Djibouti (dji), Eritrea (eri), Mayotte (myt), Reunion (reu), Seychelles Islands (syc), Somalia (som), Sudan (sdn)
136	BWA	Botswana
137	NAM	Namibia
138	ZAF	South Africa
139	XSS	Rest of South African Customs Union: Lesotho (lso), Swaziland (swz)
140	XTW	Rest of the World: Antarctica (ata), Bouvet Island (bvt), British Indian Ocean Territory (iot), French Southern Territories (atf)

TABELA A.2: Dimensão dos setores no banco de dados do GTAP v9

	SIGLA	SETOR
1	PDR	Paddy rice
2	WHT	Wheat
3	GRO	Cereal grains, n.e.s.
4	V F	Vegetables and fruits
5	OSD	Oil seeds
6	C B	Sugar cane and sugar beet
7	PFB	Plant-based fibers
8	OCR	Crops, n.e.s.
9	CTL	Bovine cattle, sheep and goats, horses
10	OAP	Animal products n.e.s.
11	RMK	Raw milk
12	WOL	Wool, silk-worm cocoons
13	FRS	Forestry
14	FSH	Fishing
15	COA	Coal
16	OIL	Oil
17	GAS	Gas
18	OMN	Minerals n.e.s.
19	CMT	Bovine cattle, sheep and goat, horse meat products
20	OMT	Wood products
21	VOL	Vegetable oils and fats
22	MIL	Dairy products
23	PCR	Processed rice
24	SGR	Sugar
25	OFD	Food products n.e.s.
26	B T	Beverages and tobacco products
27	TEX	Textiles
28	WAP	Wearing apparel
29	LEA	Leather products
30	LUM	Wood products

31	PPP	Paper products, publishing
32	P C	Petroleum, coal products
33	CRP	Chemical, rubber, plastic products
34	NMM	Mineral products n.e.s.
35	I_S	Ferrous metals
36	NFM	Metals n.e.s.
37	FMP	Metal products
38	MVH	Motor vehicles and parts
39	OTN	Transport equipment n.e.s.
40	ELE	Electronic equipment
41	OME	Machinery and equipment n.e.s.
42	OMF	Manufactures n.e.s.
43	ELY	Electricity
44	GDT	Gas manufacture, distribution
45	WTR	Water
46	CNS	Construction
47	TRD	Trade
48	OTP	Transport n.e.s.
49	WTP	Sea transport
50	ATP	Air transport
51	CMN	Communication
52	OFI	Financial services n.e.s.
53	ISR	Insurance
54	OBS	Business services n.e.s.
55	ROS	Recreation and other services
56	OSG	Public administration and defense, education, health services
57	DWE	Dwellings

TABELA A.3: Mapa da Agregação Regional

REGIÃO	AGREGAÇÃO
Brazil	BRA
China	CHN
EU_28	AUT, BEL, BGR, CYP, CZE, DNK, EST, FIN, FRA, DEU, GRC, HUN, IRL, ITA, LVA, LTU, LUX, MLT, NLD, POL, PRT, ROU, SVK, SVN, ESP, SWE, GBR, HVR
RofW	AUS, NZL, XOC, HKG, JPN, KOR, MNG, TWN, XEA, KHM, IDN, LAO, MYS, PHL, SGP, THA, VNM, XSE, BGD, IND, LKA, NPL, PAK, XSA, CAN, MEX, XNA, ARG, BOL, CHL, COL, ECU, PRY, PER, URY, VEN, XSM, CRI, GTM, HND, NIC, PAN, SLV, XCA, DOM, JAM, PRI, TTO, XCB, NOR, CHE, XEF, ALB, BLR, RUS, UKR, XEE, XER, KAZ, KGZ, TJK, XSU, ARM, AZE, GEO, BHR, IRN, ISR, JOR, KWT, OMN, QAT, SAL, TUR, ARE, XWS, EGY, MAR, TUN, XNF, BEN, BFA, CMR, CIV, GHA, GIN, NGA, SEN, TGO, XWF, XCF, XAC, ETH, KEN, MDG, MWI, MUS, MOZ, RWA, TZA, UGA, ZMB, ZWE, XEC, BWA, NAM, ZAF, XSS, XTW
USA	USA

TABELA A.4: Mapa da Agregação Setorial

Setor	Agregação
Cattle	CTL, RMK
Extraction	FRS, FSH, COA, OIL, GAS, OMN
GrainsCrops	PDR, WHT, GRO, V_F, OSD, C_B, PFB, OCR, PCR
HeavyMnfc	P C, CRP, NMM, I_S, NFM, ELE, OME
LightMnfc	LEA, LUM , PPP, FMP, MVH, OTN, OMF
OthLstk	OAP, WOL
OthServices	OFI, ISR, OBS, ROS, OSG, DWE
ProcFood	CMT, OMT, VOL, MIL, SGR, OFD, B_T
TextWapp	TEX, WAP
TransComm	TRD, OTP, WTP, ATP, CMN
Util_Cons	ELY, GDT, WTR, CNS

TABELA A.5: Dimensões utilizadas do modelo ENVISAGE

Regiões	Setores	Fatores
BRAZIL	CATTLE	CAPITAL
CHINA	EXTRACTION	LABOR
EU_28	GRAINSCROPS	- SKILLED
ROFW	HEAVYMNFC	- UNSKILLED
USA	LIGHTMNFC	NATURAL RESOURCES
	OTHLSTK	
	OTHSERVICES	
	PROCFOOD	
	TEXTWAPP	
	TRANSCOMM	
	UTIL_CONS	

ANEXO B
VALORES UTILIZADOS PARA A ELABORAÇÃO DO CHOQUE

TABELA B.1 Categoria animal e sua respectiva equivalência em Unidade Animal (UA)

CATEGORIA ANIMAL	EQUIVALÊNCIA UNIDADE ANIMAL (UA)
Touro	1.25
Vacas e animais de 3 a 4 anos	1.00
Animais de mais de 2 até 3 anos	0.75
Animais de 1 a 2 anos	0.50
Animais com menos de 1 ano	0.25
Bovinos	1.50

Fonte: MAPA (2018b)

TABELA B.2 Taxas de lotação (UA/ha) adotadas para estimação dos choques de produtividade

REFERÊNCIA	TECNOLOGIA	UA/ha
REIS et al., 2012		3,40
REIS et al., 2012		4,50
REIS et al., 2012		5,80
GAMARRA et al., 2017	ILPF	1,25
GAMARRA et al., 2017		2,13
GAMARRA et al., 2017		1,17
GAMARRA et al., 2017		2,96
MAGALHÃES et al., 2018		2,70
ZIMMER et al., 2012		2,84
ZIMMER et al., 2012		1,62
ZIMMER et al., 2012		2,10
SENAR, 2013	ILP	3,00
SENAR, 2013		4,00
GAMARRA et al., 2017		3,54
GAMARRA et al., 2017		3,35
GAMARRA et al., 2017		1,37
SANTOS et al., 2018		2,40
SANTOS et al., 2018	IPF	1,40
SANTOS et al., 2018		1,30
BARBOSA ALVIM et al., 2015		1
BARBOSA ALVIM et al., 2015		1,5
ZIMMER et al., 2012		0,8
ZIMMER et al., 2012		1,8
ZIMMER et al., 2012	RECUPERAÇÃO	1,5
ZIMMER et al., 2012		2,6
ZIMMER et al., 2012		1,5
ZIMMER et al., 2012		2,6
ZIMMER et al., 2012		2,2
ZIMMER et al., 2012		

CARDOSO et al., 2016		1,00
CARDOSO et al., 2016	MELHORAMENTO	1,70
CARDOSO et al., 2016	GENÉTICO	2,50
CARDOSO et al., 2016	ANIMAL	2,75
