



OPORTUNIDADES PARA A TRANSIÇÃO SUSTENTÁVEL DA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA

Gerd Brantes Angelkorte

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Planejamento Energético.

Orientador: Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Rio de Janeiro

Julho de 2023

OPORTUNIDADES PARA A TRANSIÇÃO SUSTENTÁVEL DA AGROPECUÁRIA
BRASILEIRA

Gerd Brantes Angelkorte

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Orientadores: Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Aprovada por: Prof. Pedro Rua Rodriguez Rochedo, D.Sc.

Prof^a. Joana Correia de Oliveira de Portugal Pereira, Ph.D.

Prof. Angelo Costa Gurgel, D.Sc.

Dr^a. Eveline Maria Vasques Arroyo, D.Sc.

Prof^a. Thayse Aparecida Dourado Hernandes, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JULHO DE 2023

Angelkorte, Gerd Brantes

Oportunidades para a Transição Sustentável da Agropecuária Brasileira / Gerd Brantes Angelkorte. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2023.

XXII, 251 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 195-244.

1. Transição Agropecuária. 2. Modelo de Análise Integrada. 3. Uso do Solo. 4. Mudanças Climáticas. I. Rochedo, Pedro Rua Rodriguez. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

A tese é dedicada à minha amada esposa Hannah,
por toda sua dedicação, apoio e compreensão ao
longo de toda a minha trajetória acadêmica, não
teria conseguido sem ela.
Também dedico a tese ao meu tio Cláudio e sua
recuperação do AVC que quase o retirou de nós.

“All our dreams can come true if we have the courage to pursue them.”

– Walt Disney

“We choose to go to the moon in this decade and do the other things not because they are easy, but because they are hard.”

– John F. Kennedy

“That there’s some good in this world, Mr. Frodo. And it’s worth fighting for.”

– Samwise Gamgee, Lord of the Rings

*“Você vai rir sem perceber
Felicidade é só questão de ser
Quando chover, deixar molhar
Pra receber o sol quando voltar”*

– Marcelo Jeneci e Francisco Gonçalves

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, Nossa Senhora, Jesus Cristo e São Judas Tadeu, pelas graças alcançadas ao longo da minha trajetória acadêmica, que desde a graduação, na UFF, têm intercedido por mim, e pela ajuda espiritual que me foi concedida ao longo de toda a minha vida. Nos momentos mais obscuros sempre estiveram presentes para me auxiliar e mostrar o caminho.

Aos meus pais, Maria Lúcia e Gunter, que sempre me apoiaram nas escolhas que eu ou a vida me fizeram seguir, mesmo sendo a pesquisa acadêmica e não a estabilidade de um emprego público (rs). Por toda a paciência, tolerância, compreensão e amor que me deram desde o momento do meu nascimento.

À toda a minha família, tanto a que já nasci, quanto a que ganhei ao me casar. Meus sogros, primos, primas, tias, tias, avôs e avós (inclusive os que devido a pandemia não estão mais conosco), meu muito obrigado por todo o suporte e carinho que vocês me dão.

Agradeço a Deus por ter me proporcionado a alegria e oportunidade por ter os meus três afilhados: Bento, Murilo e Nicolás. Amo muito vocês!

Aos queridos amigos CENERGÉTICOS: Ana, Alberto, Aline, Amanda, Bernardo, Bruno, Camila, Camilla, Camilo, Cindy, Clarissa, Eduardo, Eveline, Francielle, Fábio, Fabio, Gabriela, Huang, Isabela, Mariana, Marianne, Matheus, Paula, Rafael e Rebecca, Taísa, Talita e outros – que peço perdão por não citar – meu imenso obrigado por todo o maravilhoso convívio, trocas de experiência, crescimento pessoal e profissional, constantes risadas e as horas do cafezinho da manhã/pós-almoço/tarde e mais quantos fossem necessários.

Aos indescritíveis amigos modeleiros (Bernardo, Eduardo, Eveline, Fabio, Marina, Marianne, Pedro, Rebecca e Taísa), por todos os momentos indescritíveis de apoio, carinho, dedicação e troca. Vocês tornaram esse trabalho muito mais fácil e prazeroso.

Ao Bernardo, Eveline, Fábio, Eduardo e Ana pelo imenso apoio e incentivo nos momentos mais difíceis e por todos os momentos que estavam dispostos a conversar sobre todas as dúvidas, angústias e questionamentos que passam na cabeça de um doutorando. Muito obrigado por toda a ajuda e momentos de aprendizagem.

Aos incríveis amigos da vida: Luiz, Bia, Daniel, Carol, Tadeu, Gabi, Nick, Luca, Maira, Telles, Juliana, Gael, Lívia, Jonathan, Vitor, Clarissa, Marquinhos, Bob, Karlinha

e muitos outros – que peço desculpas por não citar – que me ajudam a superar as adversidades da vida.

Aos professores do PPE, que tenho que agradecer por todas as oportunidades e conhecimentos que me foram disponibilizados. Em especial ao Alexandre Szklo, André Lucena, Joana Portugal, Pedro Rochedo e Roberto Schaeffer, que nos primeiros dias de PPE, por ter vergonha, eu mal conseguia conversar ou questionar, devido serem profissionais tão renomados mundialmente, mas que hoje acompanham minha trajetória de perto e me estimulam diariamente a ser ainda melhor. Muitíssimo obrigado, pois vocês me fizeram crescer como profissional e pesquisador e me possibilitaram chegar no ponto em que cheguei. Sei que ainda estou no início, mas é muito mais alto do que eu havia sonhado por causa de vocês.

Ao professor, orientador e amigo Pedro Rochedo, que quando cheguei no PPE era quase uma entidade, o pós-doc que era tão bom em ensinar, que fazia os alunos milagrosamente passarem nas benditas matérias do primeiro trimestre, e que de sobra ainda havia desenvolvido o tão aclamado modelo COFFEE, que confrontava qualquer modelo IAM já desenvolvido – quase uma lenda urbana. Essa mesma entidade me ensinou tudo que sei sobre IAM, me encorajou a crescer e ganhar confiança como pesquisador do setor de agropecuário e mudanças climáticas, me fez acreditar que poderia acabar o mestrado e entrar no doutorado. Além de tudo já citado, ainda me aceitou como orientando e hoje é uma pessoa que posso chamar de amigo. Muito obrigado por tudo, Pedro! Não teria chegado aqui sem você.

Aos funcionários do PPE: Fernando, Irene, Josi, Paulo, Queila e Sandra, por toda a ajuda ao longo desses anos de mestrado e doutorado. Em especial à Sandrinha, pela pessoa incrível que é e que, apesar de eu ter importunado tanto com os problemas acadêmicos ou não, sempre esteve totalmente disponível para me ajudar.

Agradeço aos membros da banca, Angelo Gurgel, Eveline Vasques-Arroyo, Joana Portugal-Pereira e Thayse Hernandes, que gentilmente aceitaram participar da banca examinadora.

Ao governo brasileiro, juntamente ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro sem o qual este trabalho não seria possível. Também agradeço aos mais de 15 projetos que tive a oportunidade de participar, pelo Cenergia, ao longo do mestrado e doutorado, que possibilitaram o desenvolvimento dessa tese. Em especial aos projetos NAVIGATE e ENGAGE, que me propiciaram me

desenvolver como pesquisador no setor de modelagem de uso do solo e AFOLU, que é uma grande paixão, e o contato profissional com o time de modelagem do PIK, Alemanha.

Por fim, agradeço à minha maior paixão, à minha companheira e à pessoa que tanto me apoia e me compreende, que é a minha esposa, Hannah. Muito obrigado por todo o seu amor, por ser o meu porto seguro, por sempre estar presente em todos os momentos dessa longa jornada que é o doutorado. Sem você, isso não teria sido possível. Parte dessa tese também é sua! Muito obrigado por me aturar e me perdoar, mesmo nos momentos mais angustiantes e estressantes da vida de um doutorando, que como você sempre vive dizendo merece vestir a camisa “Sobrevivi ao doutorado do meu marido.” Na hora da defesa (rs). Muito obrigado por ter tido comigo a nossa filhotinha de 4 patinhas, a Marie Galette. Te amo muito! Assim como eu disse no altar, na hora do nosso casamento: *Je t’aime plus que ma vie, plus que le monde, plus que l’univers!* Muito obrigado por ser minha esposa!

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

OPORTUNIDADES PARA A TRANSIÇÃO SUSTENTÁVEL DA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA

Gerd Brantes Angelkorte

Julho/2023

Orientador: Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Programa: Planejamento Energético

A influência da atividade humana no equilíbrio climático do planeta é inequívoca. Medidas para a mitigação climática têm sido cada vez mais necessárias para diminuir/zerar as emissões de GEE. Portanto, diminuir o risco de, por exemplo, aumento da insegurança alimentar e perdas de biodiversidade e de safras decorrentes de eventos extremos cada vez mais frequentes. Contudo, debate-se sobre o papel da transição energética e suas medidas para a mitigação de carbono, mas pouco é discutido sobre o papel do setor agropecuário para a mitigação da crise climática. A transição agropecuária é algo ainda pouco discutido na literatura e se faz necessário o desenvolvimento de um arcabouço com medidas e pilares concretos para o seu desenvolvimento. Assim, o objetivo do presente trabalho é a investigação do papel brasileiro e as oportunidades para a transição da sustentabilidade na agropecuária nacional no contexto de estabilização climática global de longo prazo. Para isso, utilizou-se o modelo BLUES, um IAM brasileiro, para a introdução de novos elementos da transição agropecuária que permitissem avaliar suas oportunidades e potenciais em diferentes cenários climáticos. As implementações das tecnologias da transição agropecuária foram fundamentais para os cenários analisados (BAU, NDC e 1,5°C), ampliando as opções de CDR e mitigação de não-CO₂. Mostrou-se a possibilidade de desenvolvimento de metas mais ambiciosas para a NDC brasileira, principalmente aliando-se a metas de 1,5°C. Ademais, desenvolveu-se uma proposta de pilares para o desenvolvimento da transição agropecuária, bem como seus os desafios e barreiras, que, se superados, podem gerar oportunidades significantes para o país.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

OPPORTUNITIES FOR THE SUSTAINABLE TRANSITION OF BRAZILIAN AGRICULTURE

Gerd Brantes Angelkorte

July/2023

Advisor: Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Department: Energy Planning

Human activity's influence on the planet's climate balance is unequivocal. Measures for climate mitigation have been increasingly necessary to decrease/zero GHG emissions. Therefore, reducing the risk of, for example, increased food insecurity and loss of biodiversity and crops resulting from more frequent extreme events. However, there is much debate about the role of the energy transition and its measures for carbon mitigation, but few discussions about the role of the agricultural sector in mitigating the climate crisis. The agricultural transition is still almost not discussed in the literature, and it is necessary to develop a framework with concrete measures and pillars for its development. Thus, this work aims to investigate the Brazilian role and opportunities for the transition of sustainability in national agriculture in the context of long-term global climate stabilization. For that, the BLUES model, a Brazilian IAM, was used to introduce new elements of the agricultural transition that would allow evaluation of its opportunities and potential in different climate scenarios. Implementing agricultural transition technologies was fundamental for the analyzed scenarios (BAU, NDC and 1.5°C), expanding the options of CDR and non-CO₂ mitigation. The possibility of developing more ambitious targets for the Brazilian NDC was shown, mainly in addition to 1.5°C targets. Furthermore, a proposal of pillars for the development of the agricultural transition was developed, as well as its challenges and barriers, which, if overcome, can generate significant opportunities for the country.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização.....	1
1.2	Objetivos e Inovação	21
1.3	Estruturação da Tese	23
2	DEFINIÇÕES E CONTEXTUALIZAÇÃO PARA A TRANSIÇÃO AGROPECUÁRIA SUSTENTÁVEL.....	25
2.1	Setor de AFOLU no Brasil	26
2.2	A Transição Agropecuária	30
2.2.1	Descarbonização e mitigação de GEE.....	34
2.2.2	Descentralização da produção e distribuição de alimentos	58
2.2.3	Digitalização	60
2.2.4	Desenho de mercado.....	64
2.2.5	Democratização	66
3	METODOLOGIA.....	68
3.1	Modelo BLUES	68
3.2	Módulo de Solo.....	76
3.3	Módulo Agropecuário.....	83
3.3.1	Suínos	88
3.3.2	Sistemas integrados	90
3.3.3	Sistemas disruptivos	101
3.4	Módulo de Demanda.....	112
3.4.1	Demandas exógenas do modelo BLUES.....	113
3.4.2	Perdas e resíduos de alimentos agropecuários.....	116
3.5	Cenários	120
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	124
4.1	Comparações com o antigo BLUES 1.0	124
4.2	Cenários da Transição Agropecuária	130
4.3	Oportunidades, Desafios e Barreiras para a Transição Agropecuária Brasileira e suas Implicações Políticas	165

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	189
5.1	Contribuições da implementação da transição agropecuária no modelo BLUES e para o Brasil.....	189
5.2	Limitações do estudo e sugestões de desenvolvimento futuro	192
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	195
	ANEXO.....	245

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Integração dos ODSs.....	5
Figura 2: Emissões brasileiras de GEE, de acordo com a métrica do AR5.....	16
Figura 3: Componentes da transição agropecuária.....	33
Figura 4: Pilares fundamentais da transição agropecuária de acordo com a metodologia 5D's da transição agropecuária.....	34
Figura 5: Sistema integrado ILPF no Mato Grosso.....	35
Figura 6: Representação dos diferentes tipos de sistemas integrados existentes. Integração Lavoura-Pecuária (ILP); Integração Lavoura-Floresta (ILF); Integração Pecuária-Floresta (IPF); Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF).	36
Figura 7: Fazenda vertical.	39
Figura 8: Fazenda vertical com aquaponia.	40
Figura 9: Hortas urbanas do projeto Hortas Cariocas em Manguinhos - RJ.	42
Figura 10: Projeto da maior horta urbana <i>rooftop</i> da Europa.....	43
Figura 11: Tipos de carne alternativas: Cultivada (em inglês, <i>cultivated</i>); Plantada (em inglês, <i>plant-based</i>); Fermentada (em inglês, <i>fermentation</i>).....	45
Figura 12: Principais marcar e tipos de carnes plantadas.	46
Figura 13: Diagrama de como é feita a produção da carne cultivada.....	48
Figura 14: Carne fermentada, produzida a partir de micélio.	50
Figura 15: Sistema de produção bovina em sistema extensivo.	51
Figura 16: Sistema de produção bovina em sistema semi-intensivo.	52
Figura 17: Sistema de produção bovina em sistema intensivo.	53
Figura 18: Sistema de produção bovina em sistema superintensivo.	54
Figura 19: Agricultura de precisão.	62
Figura 20: Pecuária 4.0 – Colar de monitoramento.	63
Figura 21: Estrutura do módulo de AFOLU e do modelo BLUES.	70

Figura 22: Grupos tecnológicos de sistemas de produção agropecuária existentes no modelo BLUES, versão Angelkorte (2019).	72
Figura 23: Dados necessários para o desenvolvimento dos sistemas de produção do setor agropecuário do modelo BLUES.	75
Figura 24: Transições das coberturas do solo do BLUES.	76
Figura 25: Nova representação do módulo de coberturas do solo e suas transições no BLUES.	79
Figura 26: Comparativo das diferenças de estoque de carbono abaixo e acima do solo da antiga e das novas transições de cobertura do solo dos sistemas integrados proveniente da região Norte do modelo BLUES.	80
Figura 27: Cadeia de produção de alimentos.	119
Figura 28: Energia primária dos cenários BLUES 1.0 e BAU em 2050 (Mtep/ano).	125
Figura 29: Geração elétrica dos cenários BLUES 1.0 e BAU em 2050 (TWh/ano).	126
Figura 30: Produção de biocombustíveis dos cenários BLUES 1.0 e BAU em 2050 (EJ/ano).	127
Figura 31: Mudança de cobertura do solo dos cenários BLUES 1.0 e BAU acumulada entre 2010 e 2050 (Mha).	128
Figura 32: Emissões de GEE dos cenários BLUES 1.0 e BAU em 2050 (Mt CO _{2eq} /ano).	130
Figura 33: Geração elétrica. PV: Pannel fotovoltaico (do inglês – <i>Photovoltaic</i>); CSP: Energia solar de concentração (do inglês – <i>Concentrated Solar Power</i>); GD: Geração distribuída; CHP: Sistema combinado de geração de calor e energia (do inglês – <i>Combined Heat and Power</i>).	133
Figura 34: Produção de biocombustíveis em 2060. HVO: Óleo vegetal hidrotratado (do inglês – <i>Hydrotreated Vegetable Oil</i>); GLP: Gás liquefeito de petróleo; Diesel: Diesel verde; Bunker: Biobunker - Combustível marítimo.	136

Figura 35: Participação das fontes de energia primária e biometano (energia secundária) para a produção de biocombustíveis em 2060. Res.: Resíduos; Bagaço: Bagaço de cana-de-açúcar.	137
Figura 36: Acumulado das mudanças de cobertura do solo entre 2020 e 2060. ILP: Integração Lavoura-Pecuária; ILPFc: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta comercial (pinus/eucalipto); ILPFn: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta nativa.	138
Figura 37: Participação de tecnologias de remoção de CO ₂ em 2060. FCCS: CCS de fontes energéticas de origem fóssil; ICCS: CCS industrial; Materiais: CCS através de materiais; BCCS: CCS de fontes energéticas de origem renovável (BECCS); AFOLU Restauração: Captura de carbono através de restauração de ambientes nativos; AFOLU Pastagem: Captura de carbono através de restauração de pastagens; AFOLU ILP: Captura de carbono através da implementação de sistemas de Integração Lavoura-Pecuária; AFOLU ILPF: Captura de carbono através da implementação de sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta.....	140
Figura 38: Emissões acumuladas de CH ₄ e N ₂ O entre 2020 e 2060 para os diferentes cenários desenvolvidos. a) Emissões acumuladas de CH ₄ entre 2020 e 2060; b) Emissões acumuladas de N ₂ O entre 2020 e 2060.....	144
Figura 39: Produção de floresta plantada e a participação de sistemas integrados na produção de material lenhoso.	147
Figura 40: Emissões acumuladas de CO ₂ entre 2020 e 2060 para os diferentes cenários desenvolvidos.	148
Figura 41: Produção de carne bovina de acordo com os diferentes tipos de tecnologia de produção.	149
Figura 42: Participação das tecnologias de sistemas integrados e confinamento superintensivo na produção de carne bovina a nível regional. a) Carne bovina produzida através de sistemas integrados; b) Carne bovina produzida através de sistemas de confinamento superintensivo.	151
Figura 43: Participação das tecnologias disruptivas na produção de carne bovina a nível regional. a) Carne bovina produzida através de sistemas produção de carne cultivada; b) Carne bovina produzida através de sistemas de produção de carne plantada.	152

Figura 44: Produção de soja de acordo com os diferentes tipos de tecnologia de produção e a regionalização da participação dos sistemas integrados na produção de soja. a) Produção de soja em 2060; b) Participação da produção de soja em 2060 a partir de sistemas integrados à nível regional. 154

Figura 45: Produção de trigo de acordo com os diferentes tipos de tecnologia de produção e a regionalização da participação dos sistemas integrados na produção de trigo. a) Produção de trigo em 2060; b) Participação da produção de trigo em 2060 a partir de sistemas integrados à nível regional. 156

Figura 46: Produção de milho de acordo com os diferentes tipos de tecnologia de produção e a regionalização da participação dos sistemas integrados na produção de milho. a) Produção de milho em 2060; b) Participação da produção de milho em 2060 a partir de sistemas integrados à nível regional. 158

Figura 47: Produção de frutas de acordo com os diferentes tipos de tecnologia de produção e a regionalização da participação dos sistemas disruptivos na produção de frutas. a) Produção de frutas em 2060; b) Participação da produção de frutas em 2060 a partir de sistemas disruptivos à nível regional. 161

Figura 48: Perda de alimentos evitada em 2060 e no acumulado do período de análise. a) Quantidade de alimentos que deixaram de ser perdidos em 2060 através da produção em sistemas disruptivos; b) Acumulado da quantidade de alimentos que deixaram de ser perdidos entre 2020 e 2060 devido a implementação de sistemas disruptivos. 163

Figura 49: Produção de produtos agropecuários com a adição de enzimas para redução das emissões de CH₄ e sua participação nos cenários NDC. 164

Figura S1: Evolução da energia primária dos cenários analisados entre 2020 e 2060 em Mtoe/ano. a) Cenário BAU; b) Cenário BAU_Agri; c) Cenário BAU_Comp; d) Cenário NDC; e) Cenário NDC_Agri; f) Cenário NDC_Comp; g) Cenário 1.5; h) Cenário 1.5_Agri; i) Cenário 1.5_Comp. 245

Figura S2: Evolução da geração elétrica dos cenários analisados entre 2020 e 2060 em TWh/ano. a) Cenário BAU; b) Cenário BAU_Agri; c) Cenário BAU_Comp; d)

Cenário NDC; e) Cenário NDC_Agri; f) Cenário NDC_Comp; g) Cenário 1.5; h) Cenário 1.5_Agri; i) Cenário 1.5_Comp..... 246

Figura S3: Evolução da produção de biocombustíveis dos cenários analisados entre 2020 e 2060 em EJ/ano. a) Cenário BAU; b) Cenário BAU_Agri; c) Cenário BAU_Comp; d) Cenário NDC; e) Cenário NDC_Agri; f) Cenário NDC_Comp; g) Cenário 1.5; h) Cenário 1.5_Agri; i) Cenário 1.5_Comp. 247

Figura S4: Trajetória das emissões de CO₂ dos cenários analisados entre 2020 e 2060 em MtCO_{2eq}/ano. a) Cenário BAU; b) Cenário BAU_Agri; c) Cenário BAU_Comp; d) Cenário NDC; e) Cenário NDC_Agri; f) Cenário NDC_Comp; g) Cenário 1.5; h) Cenário 1.5_Agri; i) Cenário 1.5_Comp. 248

Figura S5: Trajetória das emissões de GEE dos cenários analisados entre 2020 e 2060 em MtCO_{2eq}/ano. a) Cenário BAU; b) Cenário BAU_Agri; c) Cenário BAU_Comp; d) Cenário NDC; e) Cenário NDC_Agri; f) Cenário NDC_Comp; g) Cenário 1.5; h) Cenário 1.5_Agri; i) Cenário 1.5_Comp. 249

Figura S6: Evolução das mudanças acumuladas de cobertura do solo dos cenários analisados entre 2020 e 2060 em Mha. a) Cenário BAU; b) Cenário BAU_Agri; c) Cenário BAU_Comp; d) Cenário NDC; e) Cenário NDC_Agri; f) Cenário NDC_Comp; g) Cenário 1.5; h) Cenário 1.5_Agri; i) Cenário 1.5_Comp..... 250

Figura S7: Emissões acumuladas de GEE até 2060 em GtCO_{2eq} dos cenários desenvolvidos. 251

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valor da exportação da produção pecuária brasileira em 2022.	13
Tabela 2: Quantidade exportada da produção pecuária brasileira em 2022.	14
Tabela 3: Produção agrícola das principais culturas brasileiras em 2022.	15
Tabela 4: Resumo modelos uso do solo.	18
Tabela 5: Desmatamento na Amazônia Legal.	28
Tabela 6: Emissões de metano por subsetor e suas respectivas fontes entre o ano de 1990 e 2020.	57
Tabela 7: Produtos agropecuários proveniente das demandas exógenas do modelo BLUES.	71
Tabela 8: Variação dos estoques de carbono das transições das coberturas do solo da região Norte brasileira do modelo BLUES.	82
Tabela 9: Culturas e criações existentes no BLUES.	84
Tabela 10: Variação das taxas de abate, antigas (BLUES 1.0) e novas, do modelo BLUES.	86
Tabela 11: Variação das taxas conversão em carne, antigas (BLUES 1.0) e novas, do modelo BLUES.	86
Tabela 12: Sistemas de produção agropecuária desenvolvidos.	93
Tabela 13: Dados de entrada para o desenvolvimento dos novos sistemas integrados do modelo BLUES.	97
Tabela 14: Áreas iniciais, potenciais de expansão e sinergias dos novos sistemas integrados do modelo BLUES.	100
Tabela 15: Tecnologias desenvolvidas para produção em fazendas verticais. .	103
Tabela 16: Dieta padrão do gado confinado superintensivo.	107
Tabela 17: Investimentos e custos para a implementação de sistemas confinados superintensivos.	109
Tabela 18: Nova divisão de commodities agropecuárias do modelo BLUES. .	114

Tabela 19: Categorização regional das culturas e criações.....	115
Tabela 20: Níveis de premiação das cadeias de produção de alimentos.	120
Tabela 21: Cenários desenvolvidos.	123
Tabela 22: Barreiras, grau de dificuldade de superação das barreiras e sugestões para a superação das barreiras por sistema de produção das barreiras econômicas.	172
Tabela 23: Barreiras, grau de dificuldade de superação das barreiras e sugestões para a superação das barreiras por sistema de produção das barreiras socioculturais..	175
Tabela 24: Barreiras, grau de dificuldade de superação das barreiras e sugestões para a superação das barreiras por sistema de produção das barreiras científico-tecnológicas.	178
Tabela 25: Barreiras, grau de dificuldade de superação das barreiras e sugestões para a superação das barreiras por sistema de produção das barreiras de mercado.	181

Lista de Siglas e Acrônimos

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
a.a.	Ao ano
AFOLU	Agriculture, Forestry and Other Land-Use
ATJ	Alcohol-To-Jet
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
BLOEM	Bioenergy and Land Optimization Spatially Explicit Model
BLUES	Brazilian Land-Use and Energy System model
BLUM	Brazilian Land Use Model
BTL	Biomass-To-Liquids
CBI	Climate Bonds Initiative
CCS	Carbon Capture and Storage
CDR	Carbon Dioxide Removal
CGE	Computable General Equilibrium
CH ₄	Metano
CHP	Combined Heat and Power
CO ₂	Dióxido de carbono
CO _{2eq}	Dióxido de carbono equivalente
COFFEE	Computable Framework For Energy and the Environment
CONAB	Compania Nacional de Abastecimento
CSP	Concentrated Solar Power
CSR	Centro de Sensoriamento Remoto
EFES	Economic Forecasting Equilibrium System
EJ	Exajoule
EMATER	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Esalq	Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FCCS	Fossil Carbon Capture and Storage
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FIPE	Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas
GD	Geração distribuída
GEE	Gases de efeito estufa
GFI	The Good Food Institute
GIS	Geographic Information System

GLOBIOM	Global BIOSphere Management
GLP	Gás liquefeito de petróleo
Gt	Giga tonelada
GWP	Global Warming Potential
ha	Hectare
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil
IAM	Integrated Assessment Model
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICCS	Industrial Carbon Capture and Storage
ILF	Integração lavoura-floresta
ILP	Integração lavoura-pecuária-floresta
ILPF	Integração lavoura-pecuária-floresta
ILPFc	Integração lavoura-pecuária-floresta comercial
ILPFn	Integração lavoura-pecuária-floresta nativa
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IoT	Internet of Things
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPF	Integração pecuária-floresta
kg	Quilograma
kg vivo	Quilograma de animal vivo
LAPIG	Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento
LED	Light-Emitting Diode
m ³	Metro cúbico
MAGNET	Modular Applied GeNeral Equilibrium Tool
MAgPIE	Model of Agricultural Production and its Impact on the Environment
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MCTI	Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação
MDIC	Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
MESSAGE	Model for Energy Supply System Alternatives and their General Environmental impacts
Mha	Mega hectare
Mt	Milhões de toneladas
Mtep	Mega tonelada equivalente de petróleo
N ₂ O	Óxido nitroso
não-CO ₂	Gases que não são CO ₂
NBS	Nature Based Solutions
NDC	Contribuições Nacionalmente Determinadas (Nationally determined contributions)
NPK	Nitrogênio, fósforo e potássio
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável

OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
ONU	Organização das Nações Unidas
P&DI	Pesquisa, desenvolvimento e inovação
PIB	Produto interno bruto
PJ	Petajoule
ppm	Partículas por milhão
PROAGRO	Programa de Garantia de Atividade Agropecuária
PRONAF	Programa de Agricultura Familiar
PV	Photovoltaic
R\$	Real brasileiro
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
t	Tonelada
TEA	Total Economy Assessment model
TEEB	The Economics of Ecosystem and Biodiversity
TERM-BR	The Enormous Regional model for Brazilian Economy
TWh	Terawatt-hora
UA	Unidade animal
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UNEP	United Nations Environment Programme
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
US\$	Dólar americano
USP	Universidade de São Paulo
ZARC	Zoneamento agrícola de risco climático

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A influência da atividade humana no equilíbrio climático do planeta é inequívoca, com mais de 99% de consenso entre os cientistas climáticos de que essa atividade tem causado aumentos constantes da temperatura terrestre desde a era pré-industrial (DORAN e ZIMMERMAN, 2009; LYNAS *et al.*, 2021; ORESKES, 2004; VAN BAAL *et al.*, 2023). Conforme IPCC (2022b), os níveis de emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE) entre 1850 e 2020 causaram o mesmo aumento de temperatura que o ocorrido nos últimos 1400 anos (cerca de 1,09°C).

Entre 1850 e 2019 foram emitidas 2400 ± 240 Gt de dióxido de carbono (CO₂) antropogênico, sendo 42% deste montante emitido apenas durante os últimos 30 anos (IPCC, 2022b). Aproximadamente 60% do CO₂ emitido nesse período foi removido da atmosfera e estocado no solo ou nos oceanos, gerando o processo de acidificação da água e, o restante, permaneceu na atmosfera (IPCC, 2014, 2022b). Esse aumento de concentração de CO₂ na atmosfera altera a sua composição química, o que auxilia no processo de aprisionamento da radiação de baixa frequência no globo e eleva a temperatura média do planeta (GOUDIE, 2018).

Ademais, outros gases de efeito estufa como metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) também possuem participações significativas nos níveis de aquecimento global. Nesse sentido, o setor de Agropecuária, Florestas e Outros Usos do Solo (sigla em inglês AFOLU – *Agriculture, Forests and Other Land Use*) possui uma grande relevância nas emissões desses dois gases (IPCC, 2022). Conforme IPCC (2022), nos últimos 10 anos, o setor de AFOLU representou em média cerca de 21% de todas as emissões de GEE globais, porém contribuiu com apenas cerca de 14% das emissões de CO₂, mas com 41% das emissões totais de CH₄ e 69% das de N₂O, fazendo com que o setor seja o maior emissor de gases do tipo não-CO₂.

Os danos causados por essa constante elevação da temperatura dos oceanos e da atmosfera terrestre são preocupantes, visto a possibilidade de haver elevação do nível dos oceanos, perda de biodiversidade e conseqüente risco à segurança alimentar advindo da perda de terras produtivas, além das condições climáticas inapropriadas para a produção agropecuária (FAO, 2016; MBOW, *et al.*, 2019).

Conforme exposto por Hasegawa *et al.* (2018), as mudanças climáticas têm uma relação direta com os níveis de insegurança alimentar devido às condições de escassez hídrica em regiões importantes para a agricultura e aos impactos causados pelo aquecimento atmosférico, como mudança da flora e fauna local e aumento no consumo de água de cultivares chaves (arroz, milho, soja e trigo). Isso acontece devido a uma maior demanda proveniente de elevadas taxas de evapotranspiração (URBAN, SHEFFIELD e LOBELL, 2017). Além disso, apresentam relação indireta, proveniente dos impactos nos preços dos alimentos e *commodities* agrícolas, o que influencia nos níveis de desnutrição e fome em países situados nas regiões mais vulneráveis como África, Ásia, América Latina e Caribe (FAO *et al.*, 2018a, HASEGAWA *et al.*, 2018). Contudo, outros estudos apontam que dependendo do tipo de bioma analisado, os altos índices de evapotranspiração poder ser benéficos ao balanço hidrológico e atmosférico, assim, não levando ao aumento da indisponibilidade hídrica, pelo contrário, auxiliando a manter o perfil de evapotranspiração potencial da vegetação natural, o que levaria a um ponto de equilíbrio no balanço hidrológico e a manutenção das entradas e saídas de água de uma bacia hidrográfica (LOARIE *et al.*, 2011; SPERA *et al.*, 2016; STONESTROM *et al.*, 2009).

Dados da FAO *et al.* (2018a) evidenciam que nas últimas décadas houve regressões significativas nos níveis de fome no mundo, contudo, nos últimos anos ocorreu uma reversão dessa tendência, mostrando um aumento na quantidade de famílias em estado de fome no mundo. Isso ocorrendo principalmente por causa de fatores socioeconômicos, geopolítico e nos últimos anos, a pandemia (FAO *et al.*, 2018a; BURLINGAME *et al.*, 2021). Estima-se que o total de pessoas que vivam em estado de insegurança alimentar moderada ou severa tenha aumentado de 1.544 milhões em 2014 para cerca de 2.309 milhões em 2021, totalizando cerca de 29% da população mundial (FAO, 2022). É importante destacar que em países em desenvolvimento esse percentual é ainda mais elevado, com cerca de 58% de todo o continente africano em estado de insegurança alimentar moderada ou severa (FAO, 2022b). Desse total, cerca de 194 milhões de indivíduos são crianças entre 0 e 5 anos de idade (FAO, 2022b). Essa situação vem piorando em países mais vulneráveis economicamente, como os países da América do Sul e de grande parte da África.

Conforme FAO (2021), não é possível afirmar que a fome no mundo se deve à falta de produção agropecuária adequada para o suprimento da demanda mundial de

alimentos. Segundo FAO *et al.* (2018a) e FAO (2021), a fome no mundo se deve a má distribuição de alimentos dentre as populações mundiais e a heterogeneidade do acesso, visto que o mundo possui cerca de 2,3 bilhões de indivíduos com sobrepeso ou obesos, o que supera em mais de 280% o número de pessoas com fome. Além disso, a redução dos níveis de desperdício¹ e perda² de alimentos no mundo por si só já seria capaz de retirar esses indivíduos dessa condição de falta de alimentos, visto que, no mundo, estima-se que 31% de toda a produção de alimentos é perdida (14%) ou desperdiçada (17%) (FAO, 2019; UNEP, 2021).

De acordo com Fujimori *et al.* (2018, 2022) e Hasegawa *et al.* (2020), em cenários de controle de mudanças climáticas até 2100, os níveis de insegurança alimentar da população global devem aumentar, principalmente em países em desenvolvimento, como os da América Latina, África e alguns da Ásia e Oceania. Sendo a elevação dos custos de produção e conseqüentemente, dos preços dos alimentos, os principais vetores da insegurança alimentar, visto que reduzem o poder de compra da população de baixa renda. Ademais, o aumento da necessidade da produção de bioenergéticos em substituição aos combustíveis fósseis, é o principal fator para o aumento dos custos da produção dos alimentos e conseqüentemente, dos seus preços ao consumidor final. Isso podendo acontecer devido a disputa para a abertura de novas áreas para a produção de bioinsumos destinados para essa indústria que pressiona as áreas anteriormente destinadas para a produção alimentar.

A insegurança alimentar pode contribuir tanto para a inanição quanto para a obesidade e a desnutrição. Isso se deve principalmente aos altos custos dos alimentos com alto valor nutricional, que faz com que famílias de baixa renda possam apresentar altos riscos de obter alimentação com baixa qualidade nutricional e grande quantidade de gorduras, causando desnutrição e sobrepeso (FAO *et al.*, 2018a).

De acordo com Smith e Myers (2018), a falta de nutrientes adequados entre a população mais pobre pode se tornar ainda mais preocupante com o aumento das emissões antropogênicas de CO₂, visto que essas emissões são capazes de interferir no sistema

¹ O desperdício de alimentos é a diminuição da quantidade ou qualidade dos alimentos resultante de decisões e ações de varejistas, serviços de alimentação e consumidores (FAO, 2019).

² A perda alimentar é a diminuição da quantidade ou qualidade dos alimentos resultante de decisões e ações dos fornecedores de alimentos da cadeia, excluindo varejistas, fornecedores de serviços alimentares e consumidores (FAO, 2019).

climático global causando impactos diretos na produção de alimentos e alterar a densidade nutricional presentes nas culturas alimentares básicas (MYERS *et al.*, 2017). Conforme Myers *et al.* (2014) e Medek, Schwartz e Myers (2017), em cenários com elevação da concentração atmosférica de dióxido de carbono de carbono equivalente (CO_{2eq}) à níveis de 550 partículas por milhão (ppm) (ultimamente a concentração está em torno de 418,5 ppm [Lan, Tans e Thoning, 2023]) essa redução das quantidades de nutrientes nos alimentos pode variar entre 3-17% na concentração total de proteínas, ferro e zinco.

Esse efeito é preocupante visto que cerca de 63% das proteínas, 81% do ferro e 68% do zinco presentes nas dietas da população mundial são referentes aos produtos de origem vegetal (IFPRI, 2015). Com isso, há uma grande probabilidade que o número de pessoas vulneráveis às deficiências nutricionais aumente no mundo (SMITH e MYERS, 2018).

Em 2015, com o objetivo de desenvolver proposições de políticas para a redução das emissões de GEE antropogênico, assim como discutir medidas para o seu financiamento, capacitação de pessoas e meios de adaptação às mudanças climáticas, ocorreu em Paris a 21^a Conferência das Partes das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas – UNFCCC (COP21 ou Acordo de Paris). O acordo teve como uma das múltiplas metas o desenvolvimento de medidas para a redução das emissões de GEE e para isso, cada país desenvolveu e apresentou suas próprias contribuições nacionais (sigla em inglês NDCs – *Nationally Determined Contributions*) de longo prazo para mitigação de emissões de carbono e manter o aquecimento global bem abaixo de 2°C e idealmente 1,5°C até o final desse século, em relação à era pré-industrial (KÖBERLE, 2018; KRIEGLER *et al.*, 2018).

Ademais, foi desenvolvida a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, que é um plano de ação com 17 objetivos para o desenvolvimento sustentável (ODSs) e 169 metas a serem desenvolvidas até 2030 com o intuito de melhorar as condições de vida da humanidade e o futuro do planeta (UNITED NATIONS, 2015). Dentre os quais, estão inseridos objetivos sociais, como a erradicação da pobreza (ODS 1) e da fome (ODS 2), ambientais, como diminuição das emissões de GEE (ODS 13), redução de áreas de degradação do solo e aumento da biodiversidade (ODS 15), e universais, como direito a saneamento básico, água de qualidade (ODS 6) e acesso a fontes renováveis e modernas

de energia (ODS 7). Dessa maneira, a integração entre os ODSs nos seus três níveis de desagregação (biosfera, sociedade e economia) é uma premissa de suma importância para a segurança alimentar, a sustentabilidade de sistemas agrícolas, a estabilidade ecológica à longo prazo e diversidade cultural (Figura 1) (KÖBERLE, 2018; TEEB, 2018; UNITED NATIONS, 2015).

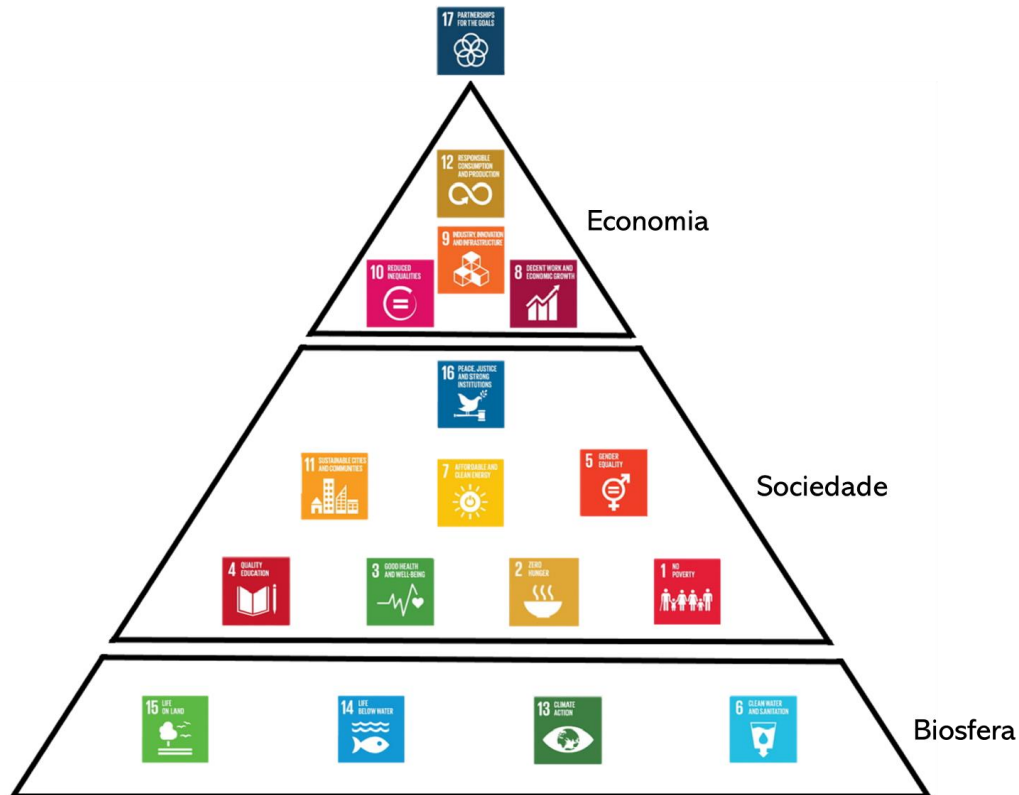


Figura 1: Integração dos ODSs.

Fonte: Adaptado de Stockholm Resilience Centre (2016)

Contudo, é importante haver um entendimento adequado sobre o significado da palavra “sustentabilidade”. De acordo com Dalmago (2021), Elkington (2000), Flint e Danner (2001), Okereke (2011), Pope *et al.* (2004) e Sneddon *et al.* (2006), a sustentabilidade pode ser entendida através de três pilares fundamentais: econômico, ambiental e social. Ou então, conforme demonstrado pela FIGURA 1, para os ODS: economia, sociedade – que envolve tanto a parte social quanto a humana da sustentabilidade – e biosfera – envolvendo todos os sistemas da natureza, incluindo a redução das emissões de gases de efeito estufa para mitigação climática (FISCHER *et al.*, 2012; FISCHER *et al.*, 2007; STOCKHOLM RESILIENCE CENTRE, 2016). Dessa

forma, é possível analisar a sustentabilidade e os objetivos de desenvolvimento sustentável através da visão de uma única dimensão ou da junção das múltiplas dimensões que compõem os ODS. No caso deste trabalho, o foco é o estudo quantitativo do papel da mitigação climática proveniente do setor de AFOLU, bem como o qualitativo das demais dimensões da sustentabilidade.

As metas mundiais de desenvolvimento sustentável e de combate às mudanças climáticas, que tem como um dos objetivos, o desmatamento zero até 2030, contudo, sendo necessário fazê-lo de forma adequada, visto que atualmente o setor agropecuário tem como premissa a necessidade de expansão de novas terras aráveis para aumentar a produção de *commodities* agropecuárias e a manutenção de seus preços. Assim, diversos autores têm destacado a intensificação de lavouras e pastagens como uma tendência do setor nos próximos anos como forma de mitigar esses problemas (BYERLEE *et al.*, 2014; SMITH *et al.*, 2010; UNEP, 2014). Contudo, essa intensificação traz consigo grandes custos ambientais, como o aumento do uso de fertilizantes e defensivos químicos que são danosos ao equilíbrio dos ecossistemas naturais (CUNNINGHAM *et al.*, 2013) e expansão da fronteira agropecuária (HAUGHEY *et al.*, 2023)

Conforme Stevenson *et al.* (2013), a intensificação das lavouras no mundo foi responsável por preservar entre 18 e 27 milhões de hectares que seriam necessários para produzir a mesma quantidade de cereais com rendimentos equivalentes aos de meados da década de 1960. Porém, Jobbágy e Sala (2014) destacam que a intensificação depende de grandes quantidades de insumos energéticos, fertilizantes, defensivos e água. O que leva à degradação ambiental decorrente do aumento do consumo de insumos agropecuários necessários para a intensificação. Dentre esses prejuízos ambientais, pode-se destacar a degradação de corpos hídricos, decorrente da lixiviação de nutrientes e defensivos químicos utilizados de forma inadequada nas lavouras, a diminuição da biodiversidade do ecossistema local, advinda da utilização exacerbada de defensivos químicos, a eutrofização de corpos hídricos e as emissões de GEE. Consequentemente, é importante haver a intensificação dos cultivos associados à implementação de tecnificação e melhoramentos do manejo agrícola, adotando sistemas rotacionados e/ou consorciados, mecanização, agricultura de precisão e outros sistemas de produção agrícola com capacidade de aumentar a produtividade do campo, visto que a própria intensificação poder ser considerada como um vetor de expansão agrícola (IAASTD, 2009; PINGALI, 2012, SMITH *et al.*, 2013; STEFFEN *et al.*, 2015).

Além disso, conforme IPCC (2019) e FAO (2017a), a melhoria das práticas de criação da pecuária possui importância para o aumento da produtividade do setor, assim como a expansão da oferta de áreas com aptidão agropecuária. A recuperação de pastagens degradadas e a intensificação da criação é capaz de aumentar a segurança alimentar mundial visto que, com o aumento da produtividade local, é possível produzir mais ou em menores espaços. Com isso, possibilita a produção de outras criações e cultivos na área anteriormente ocupada pelo setor pecuário e diminui as pressões existentes sobre áreas de mata nativa e de preservação ambiental.

Como forma de evitar esses problemas, a busca por novos métodos de produção agropecuária mais sustentáveis, que busquem minimizar os danos ambientais, bem como dietas e perdas na cadeia de produção que reduzam a demanda por alimentos intensivos em recursos, são desejáveis (GARNETT *et al.*, 2013; TILMAN e CLARK, 2014).

A agricultura orgânica é vista como uma abordagem promissora para alcançar sistemas alimentares sustentáveis, visto que ela elimina a necessidade de utilização de fertilizantes e defensivos químicos (MULLER *et al.*, 2017b). Além disso, tem crescido o número de consumidores que preferem consumir produtos produzidos através de sistemas orgânicos devido a fatores de saúde e ambientais. Isso acontece devido ao fato deles serem produzidos sem insumos químicos que possuem a capacidade de gerar problemas a saúde humana no longo prazo, além de reduzirem os impactos da produção agrícola na biodiversidade terrestre e aquática das regiões de produção e ainda recompor parte da biodiversidade local através da adição de controle biológico nas lavouras (BAKER *et al.*, 2020; FEIL *et al.*, 2020; HURTADO-BARROSO *et al.*, 2017). Contudo, esse tipo de produção ainda é muito contestada principalmente devido a menor produtividade e custos elevados, o que poderia aumentar o valor da cesta de alimentos das famílias, ocasionar uma menor segurança alimentar e promover a expansão da área agrícola.

O aumento da sustentabilidade agropecuária advinda de sistemas de produção integrados e agroflorestais apresenta grande importância tanto no viés econômico, quanto ambiental. IPCC (2022) projeta um potencial econômico de mitigação do setor de AFOLU, no período de 2020 a 2050, de 8-14 GtCO_{2eq}.ano⁻¹ através de opções de mitigação com custos inferiores a 100 US\$/tCO_{2eq}.

Por exemplo, o sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) se destaca como uma alternativa de integração entre diferentes tipos de sistemas produtivos

com alta produtividade, cultivo consorciado, em sucessão e rotação, com o intuito de propiciar benefícios mútuos entre as culturas e criações, além de possuir grande preocupação com a recuperação de áreas degradadas. O sistema ILPF tem como viés o desenvolvimento de uma agropecuária mais sustentável visando a simbiose entre as criações e cultivos de modo a melhorar a estrutura físico-química de solos degradados, aumento da biodiversidade local e auxiliar na captura de carbono através do plantio de florestas plantadas ou nativas (CORDEIRO *et al.*, 2015).

Além disso, a adoção de sistemas disruptivos de produção de alimentos, que sejam capazes de encurtar a cadeia produtiva, aproximar o produtor ao consumidor final, diminuir assim os preços finais da cesta de alimentos e as emissões de GEE da cadeia de produção, tem ganhado força na comunidade científica (IPCC, 2019).

Nesse caso, a produção de alimentos em fazendas verticais com produtividades até 1000% superiores (valor em termos de área [hectares]) às encontradas no campo, além de possuírem vantagens locais (próximas ou dentro de cidades) e propiciarem um perfeito controle de umidade, iluminação, fertilização e outros fatores adequados para o desenvolvimento celular das culturas, podem se tornar grandes aliados ao combate às mudanças climáticas e na garantia da segurança alimentar. Isso ocorre devido a esses sistemas produtivos possuírem grande produtividade, utilizarem quantidades ideais de insumos agropecuários, descartarem a utilização de qualquer tipo de defensivo e não necessitarem percorrer grandes distâncias desde o produtor até o consumidor (AVGOUSTAKI e XYDIS, 2020; DANIEL, 2014; HARRIS e KOUNTOURIS, 2020; KOZAI *et al.*, 2019).

Com uma abordagem menos tecnológica e potencialmente mais sustentável, a adoção de fazendas e hortas urbanas também tem se destacado visto à sua proximidade aos consumidores e o baixo custo de investimento, devido às pequenas proporções de implementação (IPCC, 2019). Esse sistema de produção aproxima o consumidor do alimento, fazendo com que não seja necessária qualquer cadeia de distribuição desses alimentos, já que o consumidor tem a possibilidade de ser o próprio produtor (em hortas comunitárias) ou então, morar perto desse centro de produção (HARRIS e KOUNTOURIS, 2020).

Nesse contexto de aumento da sustentabilidade, as carnes artificiais tem ganhado espaço no mercado consumidor. Com pegada de carbono e hídrica inferior a da carne

bovina proveniente do gado de corte, as carnes plantadas (origem vegetal) e as carnes cultivadas ou sintéticas (origem laboratorial) têm ganhado espaço no mercado consumidor atual, além de contarem com perspectivas de expansão ao longo prazo (FEDDERN *et al.*, 2020; FERNANDES *et al.*, 2018; TUNES, 2019).

De acordo com Vergeer, Sinke e Odegard (2021) e Sinke e Odegard (2021), a carne cultivada possui pegada de carbono de 88% até 98% inferior a da carne bovina convencional. Essa variação é proveniente principalmente da fonte de geração de energia elétrica (matriz elétrica nacional ou usinas com fontes renováveis dedicadas) necessária para o processo de produção celular e da métrica utilizada. Assim, devido a carne cultivada ser energointensiva, a sua pegada de carbono estará diretamente ligada a pegada de carbono da geração elétrica, sendo menor ao se utilizar fontes renováveis e maior quando utilizado fontes fósseis. Ademais, a redução de consumo de água por quilograma de carne produzida pode chegar a ser 95% inferior, contudo apresenta custos de produção extremamente superiores.

Contudo, conforme Fardet (2018), Forde e Decker (2022), Hadi e Brightwell (2021) e Treich (2021), as carnes alternativas têm recebido críticas em questão à sua qualidade como alimento alternativo devido a serem consideradas alimentos ultra-processados, principalmente ao se tratar das carnes plantadas. Em geral, com o intuito de fornecer às carnes plantadas atributos sensoriais da carne animal e assim ganhar aceitação por parte do consumidor, são adicionados corantes, saborizantes, intensificadores de umidade e outros componentes à carne vegetal, o que às tornam alimentos ultra-processados (FARDET, 2018; FORDE e DECKER, 2022; HADI e BRIGHTWELL, 2021; TREICH, 2021). No caso das carnes cultivadas ou fermentadas, esse nível de processamento não é geralmente introduzido (FORDE e DECKER, 2022; TREICH, 2021). Assim, não é possível afirmar que as carnes cultivadas e fermentadas possam ser consideradas como carnes ultra-processadas.

Assim, a vontade do consumidor em ter à sua disposição alimentos mais sustentáveis, que durante a sua produção adotem sistemas menos agressivos ao meio ambiente e que pensem no bem-estar animal têm se tornado cada vez mais importante. No entanto, essa mudança de hábitos alimentares para uma dieta mais saudável e de menor impacto não é observada no mundo inteiro, visto que apenas uma pequena parte da população possui poder econômico adequado para isso. Os alimentos ultimamente

considerados sustentáveis, como os orgânicos e as carnes sintéticas e plantadas, possuem um alto valor agregado (HANSMANN *et al.*, 2020; MARQUES *et al.*, 2018; REISCH *et al.*, 2013; RIZZO *et al.*, 2020)

O efeito que tem sido observado no mundo é que, devido ao crescimento econômico de países em desenvolvimento e a elevação do poder aquisitivo da população mais pobre, o consumo dos alimentos ricos em açúcares, os ultraprocessados e a carne bovina tem aumentado (OECD e FAO, 2022; REARDON *et al.*, 2021; ZHAI *et al.*, 2014). Assim, esse incremento econômico tem um lado positivo que é a diminuição dos níveis de fome nesses países, porém também tem um lado negativo que é o aumento ou estabilidade da insegurança alimentar dessa população mais carente (FAO *et al.*, 2018, 2022).

Um fator importante associado às mudanças no padrão de consumo é a contribuição para a conservação de recursos (SCANLON *et al.*, 2017), evitando ou diminuindo a perda e desperdício de alimentos no cultivo, processamento, transporte/distribuição e no consumo, pois são medidas importantes que impactam na redução das emissões de GEE provenientes da perda e descarte desses alimentos (RENZAHO *et al.*, 2017). Estima-se que um terço dos alimentos produzidos no mundo não são consumidos e acabam indo para o lixo, o que corresponde a 1,3 Gt.ano⁻¹, sendo esse montante responsável pela emissão de aproximadamente 3,3 GtCO_{2eq}.ano⁻¹ (7% de todas as emissões globais de GEE) (FAO, 2011; FAO, 2019). No Brasil, as perdas e desperdício alcançam de 15 a 26 Mt.ano⁻¹, com 10% desse montante acontecendo na etapa de produção/cultivo, 50% no transporte, 30% nas centrais de abastecimento e outros 10% nos mercados e consumidores (FAO, 2017b).

Nesse contexto, para se lidar com as mudanças climáticas, muito se discute sobre o papel da transição energética, com delimitações claras e bem demarcadas do arcabouço de tecnologias, premissas e mudanças de hábitos necessários para migrar para uma sociedade mais sustentável a fim de limitar os efeitos das mudanças climáticas. Contudo, um arcabouço semelhante para a implementação de uma “transição agropecuária” não possui o destaque e relevância na literatura, ao menos sob o contexto conceitual em que a transição energética é empregado.

Nesse sentido, nota-se que em 2019, o setor agropecuário foi responsável por cerca de 12% das emissões de GEE globais (CLIMATE WATCH, 2022). Dessa forma,

não é suficiente detalhar minuciosamente as trajetórias para o aumento da sustentabilidade e diminuição da pegada de carbono do setor energético e não fazer o mesmo para o setor agropecuário que representou globalmente, em 2019, 6% de todas as emissões de CO₂, 41% das emissões de metano e 74% das emissões globais de óxido nitroso (CLIMATE WATCH, 2022).

Assim, do mesmo modo que existem metodologias básicas para a caracterização da transição energética, como a metodologia 3 D's ou 5 D's, que identificam como essencial para a transição energética haver a: Descarbonização da matriz energética; Descentralização da produção e distribuição da energia; Digitalização, para utilização de inovação e tecnologias digitais para otimização e aceleração da transição energética; Desenho de mercado, para a avaliação da regulamentação, incentivos e vantagens socioambientais da transição energética; e, Democratização, para redução da desigualdade no acesso a fontes de energia limpa (CASTRO *et al.*, 2019; DELGADO e CUNHA, 2020; E+ TRANSIÇÃO ENERGÉTICA, 2022; EPE, 2020; NEOENERGIA, 2022; RAÍZEN, 2022). É necessário haver o desenvolvimento de uma metodologia inicial, adequada e moldada para a o setor agropecuário. Assim, sendo uma das propostas deste trabalho, o desenvolvimento de uma metodologia inicial, utilizando-se das mesmas premissas da transição energética, pautada nos cinco pilares supracitados, para a transição agropecuária à nível nacional.

A transição agropecuária pode auxiliar a transição energética à medida que, com a implementação de medidas adequadas e estruturadas, pode garantir mais tempo para que a transição energética aconteça. Logo, permitindo que medidas mais custosas e disruptivas da transição energética aconteçam mais tardiamente, visto que a transição agropecuária pode gerar emissões negativas que, sem ela, teriam que ser supridas mais rapidamente pelo setor energético. Algumas das medidas importantes para essa transição agropecuária foram brevemente descritas anteriormente, tanto na parte tecnológica (novos sistemas de produção agropecuária, mais tecnológicos) quanto na parte comportamental (diminuição das perdas oriundas do processo de produção e processamento dos alimentos e *commodities* agropecuárias). Ademias, a maior parte dos GEE provenientes do setor de AFOLU são do tipo não-CO₂, logo a dedução prematura desses gases permitiria a estabilizar no curto-prazo o nível de aquecimento global (do inglês: *Global Warming Levels – GWL*) (PATHAK *et al.*, 2023).

Ademais, a transição agropecuária possui uma ligação direta com a sustentabilidade, os ODSs e a mitigação de emissões remanescentes, que, sem ela, países fortes no setor agropecuário, como o Brasil, podem não possuir a capacidade de alcançar as metas estabelecidas no Acordo de Paris ou então, o mundo não alcançar o objetivo de manter o aquecimento global em níveis máximos de 1,5°C em 2100.

Tanto o Brasil, quanto o mundo, possuem grande dependência do setor agropecuário brasileiro devido o país possuir condições edafoclimáticas únicas, que permitem a produção de volumes de produtos agropecuários relevantes no contexto mundial – para a produção de bioinsumos e alimentos – e econômico para a economia brasileira. Em 2022 o setor do agronegócio foi responsável por cerca de 32% do PIB nacional (IBGE, 2023b) e foi a atividade que apresentou melhor relação exportação vs. Importação da balança comercial brasileira, com superávit de US\$ 69 bilhões (MDIC, 2023). Segundo (BRASIL, 2023), no ano de 2022 a balança comercial brasileira de agronegócio registrou superávit de US\$144,6 bilhões, entretanto, no mesmo ano o país apresentou superávit de apenas US\$62,3 bilhões (MDIC, 2023). Conforme dados do MDIC (2023), a agropecuária brasileira representou cerca de 22,4% das exportações nacionais, gerando um saldo positivo de US\$75,1 bilhões.

No setor pecuário, em 2022 o Brasil produziu cerca de 28,2 Mt de carne, sendo aproximadamente 31% dessa produção destinada à exportação (CONAB, 2023c). Atualmente a China é o maior parceiro comercial brasileiro do setor pecuário, com cerca de 26,2% de toda a exportação de carne brasileira sendo exportada para o país, representando aproximadamente 40,5% do faturamento da exportação de carnes do país. Em 2022, a China importou aproximadamente 10,4 bilhões de dólares, US\$ 8,0 bilhões em carne bovina, US\$ 1,3 bilhões em carne de frango e US\$ 1,1 bilhões em carne suína. No quesito de valor de exportação, os demais países que mais importaram carnes do Brasil foram: Emirados Árabes Unidos, em segundo lugar com US\$ 1,2 bilhões, Japão, em terceiro lugar com US\$ 1,1 bilhões, e Arábia Saudita, em quarto lugar com US\$ 1,0 bilhão. Sendo esses três últimos países (Emirados Árabes Unidos, Japão e Arábia Saudita) responsável pela importação de grandes valores monetários de carne de frango, acima de US\$ 800 milhões em carne de frango (Tabela 1) (CONAB, 2023d).

Tabela 1: Valor da exportação da produção pecuária brasileira em 2022.

PAÍS	VALOR PRODUÇÃO PECUÁRIA (milhões US\$)			
	BOVINA	FRANGO	SUÍNA	TOTAL
China	7.952	1.343	1.118	10.414
Emirados Árabes Unidos	267	950	29	1.247
Japão	2	961	104	1.066
Arábia Saudita	186	844	0,1	1.030
Estados Unidos	899	0,5	45	944
Chile	396	224	137	758
Filipinas	275	286	181	742
Países Baixos (Holanda)	202	464	0,1	666
Hong Kong	329	114	201	644
Singapura	108	351	133	592

Fonte: Adaptado de CONAB (2023d)

Já em relação a quantidade de carne brasileira exportada, a China novamente se mostrou em 2022 como o maior importador de carne brasileira, contudo, diferentemente de quando comparado ao valor exportado – que a China apresentou resultados 8,4 vezes superior ao segundo maior importador brasileiro (Tabela 2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), os Emirados Árabes Unidos – na quantidade exportada de carne, a China importou 4,3 vezes mais quantidade de carne do que os Emirados Árabes Unidos (Tabela 2). Sendo essa discrepância entre o valor e a quantidade da exportação referente a carne bovina, que possui valor agregado superior ao das demais carnes, principalmente se comparada com a de frango (CONAB, 2023d). Ademais, tanto em relação ao montante exportado, quando ao valor recebido por essa exportação, em 2022, os países da Ásia e do Oriente Médio foram os que apresentaram a maior importância na parceria comercial com o Brasil (CONAB, 2023d).

Tabela 2: Quantidade exportada da produção pecuária brasileira em 2022.

PAÍS	QUANTIDADE PRODUÇÃO PECUÁRIA (1.000t)			
	BOVINA	FRANGO	SUÍNA	TOTAL
China	1.238	540	460	2.238
Emirados Árabes Unidos	59	444	13	515
Japão	0,4	420	27	448
Filipinas	61	246	79	386
Arábia Saudita	36	340	0,1	376
África do Sul	1	284	6	290
Hong Kong	95	50	98	243
Chile	79	102	61	242
Singapura	24	151	55	231
Coreia do Sul	1	185	10	196

Fonte: Adaptado de CONAB (2023d)

O Brasil é um dos maiores produtores agrícolas do mundo e a previsão para safra brasileira 2022/2023 é de atingir uma produção de grãos de aproximadamente 312 Mt (CONAB, 2023a), fornecendo insumos para mais de 150 países (EMBRAPA, 2018a). Conforme CONAB (2023d), no ano de 2022, o setor agrícola brasileiro apresentou safras recordes de culturas agrícolas importantes, como soja, cerca de 155 Mt, milho, aproximadamente 126 Mt, e trigo, com 9,6 Mt (Tabela 3). Ademais, o país atingiu um novo recorde na produção de grãos, produzindo cerca de 263 Mt em 2022, crescimento de cerca de 4% em relação à 2021. Contudo, sendo necessário expandir a área agrícola, totalizando cerca de 74,4 milhões de hectares que foram utilizados para a produção de grãos, com a soja como a principal contribuindo para essa expansão, que passou de 39,5 Mha em 2021 para 41,5 Mha em 2022, um crescimento de cerca de 5% na quantidade de área plantada com soja no Brasil. Desse total de 155 Mt de soja que foram produzidos em 2022, cerca de 51%, 78,7 Mt, foram produzidos para a exportação. A China é o principal mercado de importação da soja brasileira, importando cerca de 68% da soja exportada ou 35% de toda a produção de soja do país (CONAB, 2023d).

Tabela 3: Produção agrícola das principais culturas brasileiras em 2022.

CULTURA	PRODUÇÃO AGRÍCOLA (1.000 t)																	
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Algodão	1.038	1.524	1.602	1.214	1.194	1.960	1.877	1.310	1.734	1.563	1.289	1.530	2.006	2.779	3.002	2.359	2.550	2.901
Amendoim	267	225	303	301	226	227	295	325	316	346	412	465	522	433	556	596	747	893
Arroz	11.724	11.317	12.075	12.601	11.662	13.612	11.599	11.822	12.122	12.438	10.469	12.327	12.070	10.446	11.181	11.745	10.781	9.948
Aveia	516	379	222	232	244	379	354	398	398	308	352	687	634	950	879	1.096	1.143	1.081
Café	32.944	42.512	36.068	45.993	39.470	48.095	43.485	50.826	49.153	45.343	43.236	51.368	44.978	61.656	49.310	63.079	47.716	50.920
Cana-de-Açúcar	431.413	474.800	571.371	571.434	604.514	623.905	560.955	588.916	658.822	634.767	665.586	657.184	633.262	620.435	642.718	652.326	585.209	610.131
Canola	0	0	0	0	42	69	52	60	60	36	55	69	41	48	49	43	76	82
Caroço de Algodão	1.686	2.384	2.505	1.891	1.843	3.229	3.019	2.019	2.671	2.349	1.937	2.298	3.062	4.166	4.371	3.439	3.708	4.141
Centeio	6	6	5	6	5	3	3	3	3	4	3	3	7	8	10	12	14	11
Cevada	399	206	263	237	201	284	306	287	362	305	246	304	282	394	429	403	495	438
Feijão	3.471	3.338	3.523	3.489	3.325	3.732	2.921	2.808	3.455	3.210	2.700	3.396	3.116	3.015	3.230	2.856	2.997	3.079
Gergelim	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Girassol	94	105	146	111	82	83	116	111	233	152	68	104	142	105	75	37	41	71
Mamona	105	93	123	93	101	141	26	15	44	46	33	12	19	30	43	28	44	92
Milho	42.514	51.370	58.648	51.004	56.021	57.408	72.977	81.505	80.051	84.670	69.142	97.842	81.360	100.043	102.501	87.020	113.272	125.536
Soja	55.027	58.391	60.018	57.164	68.688	75.323	66.385	81.499	86.173	97.094	95.698	114.074	123.259	119.718	124.845	139.385	125.552	154.811
Sorgo	1.541	1.495	1.985	1.934	1.625	2.315	2.221	2.102	1.891	2.057	1.377	1.865	2.136	2.177	2.497	2.097	2.854	3.904
Trigo	4.873	2.233	4.098	5.886	5.027	5.881	5.789	4.381	5.529	5.969	5.535	6.286	4.264	5.238	5.154	6.814	9.366	9.560
Triticale	306	203	212	184	172	115	112	117	104	97	58	60	53	53	45	45	52	51

Fonte: Adaptado de CONAB (2023d)

Além disso, o setor de AFOLU brasileiro é o setor que mais contribui para as emissões de GEE, sendo responsável pela emissão de 74% de todo o GEE emitido nacionalmente (SEEG, 2023). Em 2021, o país emitiu um total de 2.423 MtCO_{2eq}³ (Figura 2), sendo 49% decorrentes da mudança de cobertura do solo, que inclui principalmente desmatamento de áreas legais e ilegais, e 25% decorrente da agropecuária, com destaque para as emissões provenientes da fermentação entérica e manejo de dejetos animais, principalmente de gado de corte e de leite, e solos agrícolas (SEEG, 2023). Do total de emissões do setor agropecuário, 68% são decorrentes da pecuária (fermentação entérica e manejo de dejetos animais) e 32% oriundas de emissões provenientes da agricultura (cultivo de arroz, queima de resíduos agrícolas e solos manejados) (SEEG, 2023). Esse montante emitido pelo setor de AFOLU brasileiro, representa cerca de 5% das emissões globais de CO_{2eq}, o que torna o país o terceiro maior emissor do setor de mudança de uso do solo e florestas do mundo, apenas emitindo menos do que Indonésia e República Democrática do Congo, e o terceiro ao considerar apenas o setor agropecuário, atrás apenas da Índia e da China, ambos em 2019 (CLIMATE WATCH, 2022).

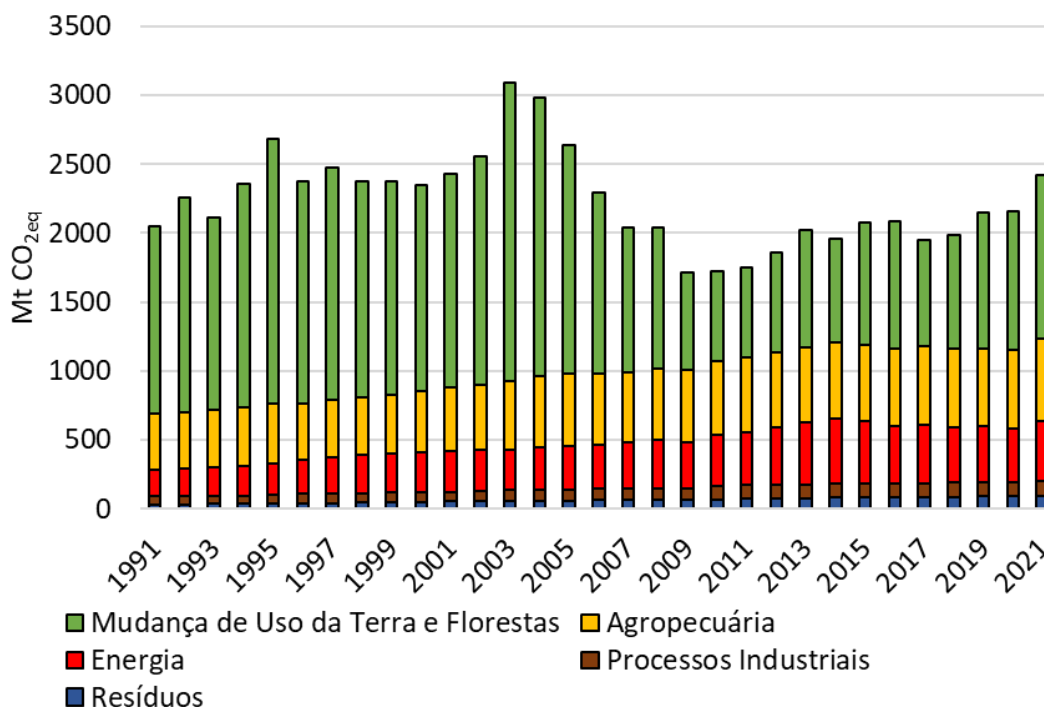


Figura 2: Emissões brasileiras de GEE, de acordo com a métrica do AR5.

Fonte: Adaptado de SEEG (2023)

³ Emissões brutas.

Segundo Potenza *et al.* (2021), entre 1990 e 2020, as emissões do setor agropecuário aumentaram cerca de 48%. Contudo, devido ao aumento da adoção de práticas mais sustentáveis do setor agropecuário, a partir de 2005, como a adoção de sistemas agroflorestais e melhoramento de pastagens para a criação de ruminantes, essas emissões ficaram restritas principalmente ao período entre 1990-2005, com aumento relativo de 33% das emissões (com taxa de crescimento de emissões de aproximadamente 2.2% a.a.), enquanto entre 2005-2020 esse crescimento foi de apenas 15% (com taxa de crescimento de emissões de 1% a.a.) (BRASIL, 2020a, b; POTENZA *et al.*, 2021).

Ademais, o Brasil possui a oportunidade de liderar a migração para a transição agropecuária, modificando a parte tecnológica de produção e do comportamento da cadeia produtiva. Uma grande vantagem ao fazê-lo seria a possibilidade de desassociar o setor de questões controversas, como a relação com o desmatamento e grilagem de terras públicas (RAJÃO *et al.*, 2020; ROCHEDO *et al.*, 2018; DE LIMA *et al.*, 2018; SILVA JUNIOR *et al.*, 2020). Esses processos geram degradação do solo e estimulam meios produtivos nocivos como a mineração ilegal em terras indígenas, que tem ocasionado um elevado número de mortes por conflitos armados, aumento de doenças, como malária e intoxicação por mercúrio, através do consumo de água proveniente de corpos hídricos afetados, conforme visto em 2022 e início de 2023 no caso do povo Yanomami (BRASIL, 2023; DE SOUSA, 2022; HAY e AWY, 2022).

Uma melhor estruturação e adoção de medidas advindas da transição agropecuária pode trazer oportunidades para o Brasil por meio do aumento do protagonismo climático e socioambiental. Por exemplo, ao permitir a redução das emissões de gases de efeito estufa e aumentar a sustentabilidade e confiança na cadeia produtiva da agropecuária brasileira, existe a possibilidade de diminuir potenciais embargos contra as commodities brasileiras. Com isso, há o aumento da geração de empregos e de renda da população, melhorando a qualidade de vida das famílias brasileiras.

A utilização de modelos computacionais para avaliar a dinâmica dos diferentes usos do solo, como agropecuária e desmatamento, tanto à nível nacional quanto global tem sido cada vez mais importante (HUPPMANN *et al.*, 2018; KRIEGLER *et al.*, 2018). Principalmente no Brasil, que possui uma vasta tradição na produção agropecuária e que possui a maior parte de suas emissões de GEE provenientes desse setor. Dessa forma, o uso desse tipo de modelos para avaliar o setor em diferentes tipos de cenários climáticos se difundiu de forma que o país tem se tornado um dos protagonistas nessa área

(HASEGAWA *et al.*, 2018; KÖBERLE, 2018; WEYANT, 2017). Atualmente, no Brasil, existem diversos tipos de modelos para o detalhamento e projeção tanto para as coberturas do solo quanto para os seus usos. Esses modelos de uso do solo se diferenciam de acordo com tipos de políticas e cenários climáticos utilizados e, da forma na qual esses modelos trabalham, seguindo tanto uma ótica econométrica quanto tecnológica do setor.

A respeito de modelos de usos do solo desenvolvidos no Brasil, pode-se dividi-los inicialmente em duas categorias, os setoriais, que observam apenas o setor de uso do solo e que podem ser tanto econométricos quanto tecnológicos, e os que englobam mais de um setor nas análises, como os modelos de análise integrada.

No contexto de modelos setoriais brasileiros de uso do solo, destacam-se: TERM-BR, SimBrasil/OTIMIZAGRO, DINAMICA, BLUM, BLOEM, EFES e o BLUES. A Tabela 4 apresenta um resumo dos principais modelos brasileiros de uso do solo, destacando o tipo de modelo e instituto de origem.

Tabela 4: Resumo modelos uso do solo.

MODELO	INSTITUTO	TIPO DE MODELO	CLASSIFICAÇÃO	ALGORÍTMO
BLOEM	Cenergia-UFRJ/PBL	Setorial	Equilíbrio parcial	Intertemporal Otimização
BLUES	Cenergia-UFRJ	Análise integrada	Equilíbrio geral	Intertemporal Otimização
BLUM	AGROICONE	Setorial	Equilíbrio parcial	Intertemporal Simulação
DINAMICA	CSR-UFGM	Setorial	Equilíbrio parcial	Intertemporal Simulação
EFES	FIPE-USP	Setorial	Equilíbrio geral	Intertemporal Simulação
SimBrasiL/OTIMIZAGRO	CSR-UFGM	Setorial	Equilíbrio parcial	Intertemporal Simulação
TERM-BR	ESALQ-USP	Setorial	Equilíbrio geral	Intertemporal Simulação

Fonte: Elaboração própria

O BLUM (*Brazilian Land Use Model*) é um modelo econômico dinâmico, de equilíbrio parcial com múltiplas regiões e mercados que foi desenvolvido para o setor agropecuário brasileiro, sendo composto por dois módulos, o de oferta e demanda e o de uso do solo, cujo intuito é a estimativa da demanda por terras sobre a concorrência entre

as principais culturas. Esse modelo é utilizado principalmente com o propósito de calcular a alocação do uso da terra e para a medição das mudanças de uso do solo através de resultados de oferta e demanda da economia agropecuária. O BLUM já foi utilizado por exemplo para a elaboração do estudo desenvolvido para o Banco Mundial denominado “Estudo de Baixo Carbono para o Brasil – Uso da terra, mudanças do uso da terra e florestas” com o propósito de fornecer suporte para o Banco Mundial para a identificação das oportunidades para redução de GEE aliado ao desenvolvimento econômico. (HARFUCH, 2012).

O DINAMICA é um modelo de mudança de uso o solo que considera a evolução das mudanças a nível de biomas, regiões brasileiras e seus municípios (BRASIL e ONU, 2017), enquanto o SimBrasil/OTIMIZAGRO (CSR/UFMG, 2023b), desenvolvido pelo mesmo grupo do DINAMICA (UFMG), é um modelo nacional espacialmente explícito, que simula o uso do solo, mudanças no uso do solo, florestas, desmatamento e emissões associadas de CO₂. Nesse modelo, isso é feito sob vários cenários de demanda de terra agrícola e desmatamento/políticas de restauração florestal para o Brasil e foi desenvolvido em plataforma DINAMICA EGO (CSR/UFMG, 2023a; SOARES-FILHO *et al.*, 2002). Essa plataforma já sendo utilizada para a realização de diversos estudos envolvendo tanto o setor de mudança de uso e cobertura do solo, quanto para a determinação dos impactos de políticas públicas sobre o setor agropecuário e o meio ambiente (COSTA *et al.*, 2022; GAUR *et al.*, 2023; OLIVEIRA *et al.*, 2023; SIQUEIRA-GAY *et al.*, 2022).

Por sua vez, o TERM-BR (*The Enourmous Regional model for Brazilian Economy*) é um modelo do tipo equilíbrio geral computável (sigla em inglês CGE – *Computable General Equilibrium*) estático e inter-regional do tipo *bottom-up* e permite a modelagem de choques de políticas públicas no nível estadual e nacional (DINIZ e FERREIRA-FILHO, 2015; SANTOS 2006). Esse modelo é composto por 136 setores industriais, com 136 commodities e 27 regiões e já foi utilizado para determinar diferentes impactos econômicos no setor agropecuário decorrentes de diferentes cenários de mudanças climáticas, assim como o impacto políticas econômicas e fiscais nos diferentes setores brasileiros, incluindo o agropecuário (NUNES, 2015; RIBEIRO *et al.*, 2023; SANTOS *et al.*, 2022; SANTOS 2006).

Já o BLOEM é um modelo espacialmente explícito especializado na avaliação da alocação de culturas bioenergéticas para a produção de biocombustíveis e estocagem de carbono através de mudanças de coberturas do solo. Ademais, o modelo BLOEM possui ligação direta com os dados de saída do módulo de uso do solo e bioenergia do modelo BLUES e já foi utilizado para especializar e analisar o potencial de expansão estadual das culturas energéticas brasileiras para a produção de biocombustíveis e determinar a alocação ótima de biorrefinarias no Brasil (TAGOMORI *et al.*, 2023).

O modelo EFES (*Economic Forecasting Equilibrium System*), é um modelo CGE nacional baseado em matrizes insumo-produto e foi desenvolvido pela FIPE-USP. Esse tem como objetivo geral a especificação e implementação de sistemas integrados de informações macroeconômicas, setoriais, projeção e análise de políticas econômicas. O EFES permite a geração de resultados desagregados para 67 setores nacionais, consistentes com cenários macroeconômicos e produz resultados a nível municipal, regional e nacional (HADDAD e DOMINGUES 2001).

Além dos modelos setoriais para avaliação do uso do solo, no Brasil existe um único modelo de avaliação integrada (IAM), que é o modelo BLUES, cujo detalhamento será feito na próxima sessão. Para contextualizar os IAMs, pode-se dizer que são modelos que foram inicialmente desenvolvidos para analisar cenários de mudanças socioambientais de longo prazo e com isso têm se tornado ferramentas de grande importância para a avaliação de riscos e impactos das mudanças climáticas mundiais (HUPPMANN *et al.*, 2019; WILSON *et al.*, 2021). Segundo van Vuuren *et al.* (2017), os IAMs funcionam como instrumentos importantes para o entendimento dos impactos mundiais causados pela adoção de novas políticas climáticas e para determinação da competição do uso do solo no mundo de baixo carbono. Consequentemente, indicam as regiões mais adequadas para a penetração de culturas energéticas e alimentícias ou então aquelas que serão afetadas pelo desmatamento, dependendo do cenário climático adotado; assim, permitem analisar os potenciais de mitigação e impactos sociais, econômicos e ambientais em cada região.

Dessa forma, os IAMs, como o BLUES, permitem avaliar a interação entre diferentes sistemas produtivos, determinando a influência que medidas agropecuárias podem ter sobre o setor energético ou restrições hídricas podem ter sobre a demanda de biocombustíveis em cenários climáticos. Assim, são importantes para a avaliação do nexo

água-energia-alimentos-clima que os modelos setoriais não conseguem acessar. Logo, é possível determinar, por exemplo, a influência de uma redução das emissões de GEE do setor agropecuário sobre o setor energético, possibilitando abrir espaço para emissões maiores na geração elétrica, bem como os seus efeitos sobre diferentes setores como o de recursos hídricos (KÖBERLE, 2018; VAN VUUREN *et al.*, 2015).

Contudo, devido à grande complexidade dos modelos do tipo IAM, esses não possuem a capacidade de abranger tão detalhadamente os setores como os modelos setoriais, que foram supracitados. Entretanto, os IAMs são os únicos que conseguem observar as relevâncias de emissões entre setores, mudanças climáticas, interações entre os setores e outras análises de forma integrada (KÖBERLE, 2018).

Assim, apesar do modelo BLUES não ter sido desenvolvido inicialmente com o propósito de avaliar as nuances da transição agropecuária, ele se mostra como o modelo mais adequado para realizar essa análise devido ele ser o único modelo nacional do tipo IAM. Isso porque, os demais modelos possuem uma visão com maior enfoque no setor agropecuário, mas sem observar os impactos dele sobre os demais setores, como o energético, que são avaliados pelo BLUES. Portanto, possibilitando ampliar o entendimento dos impactos e oportunidades de mudanças tecnológicas e de comportamento ligados ao setor agropecuário, sobre os demais setores brasileiros e principalmente, sobre as mudanças climáticas e tecnologias decorrentes da transição energética.

Logo, a utilização do modelo BLUES possibilita uma maior compreensão das relações entre a transição energética e a mitigação climática com os sistemas alimentares e de produção de bioinsumos, que possuem um elevado grau de complexidade. Dessa forma, tornando possível observar sob uma ótica de um panorama comum, assim, analisando o motivo o qual cada tipo de mudanças é importante e quais são as interações entre os setores. Portanto, sendo o modelo BLUES o escolhido para o desenvolvimento das análises de transição agropecuária desenvolvidas na tese.

1.2 Objetivos e Inovação

Esse trabalho tem como objetivo principal a investigação do papel brasileiro e as oportunidades para a transição da sustentabilidade na agropecuária nacional no contexto

de estabilização de aquecimento global de longo prazo. Para isso, serão analisados cenários climáticos e avaliada a importância de diferentes medidas da transição agropecuária para a abertura de novos mercados e opções de mitigação do setor agropecuário do Brasil. Ademais, foi criado um arcabouço inicial de medidas agropecuárias necessárias para a implementação da transição agropecuária no Brasil.

O enfoque da tese, sob a ótica quantitativa, foi o desenvolvimento de sistemas de produção relacionados aos sistemas integrados e agroflorestais, fazendas verticais, hortas urbanas, carnes cultivadas e plantadas, confinamento animal, a utilização de enzimas na agricultura e pecuária, bem como alternativas para a redução dos níveis de perdas de alimento ao longo da cadeia produtiva. Os demais sistemas de produção sustentável, que serão discutidos ao longo do trabalho servirão como base para avaliações em estudos futuros.

Com esse intuito, o setor de AFOLU do modelo BLUES (*Brazilian Land-Use and Energy System model*) foi atualizado para introduzir novos elementos que permitiram a avaliação da sustentabilidade no setor agropecuário. Isso foi feito por meio da modelagem de novas tecnologias e práticas de produção agropecuária, de novas coberturas do solo, e da revisão das demandas alimentares, como será apresentado adiante.

Desta forma, o desenvolvimento de um novo módulo de cobertura do solo para o modelo BLUES foi necessário para melhorar a representação da dinâmica de conversão do solo. Além disso, a criação de um módulo agropecuário mais amplo, com novos sistemas produtivos para o setor, com enfoque no aumento da sustentabilidade do setor, contendo: tecnologias já existentes (reavaliadas e atualizadas); sistemas de produção sustentáveis e orgânicos; sistemas com alta demanda de insumos químicos; sistemas produtivos com alto nível tecnológico; e, sistemas de produção agropecuária disruptiva.

Ademais, foi implementado um módulo de demandas agropecuárias, que foi responsável por fornecer ao modelo BLUES diferentes demandas alimentares, além de incluir novos sistemas de produção responsáveis por alterar a nova cadeia de perdas de alimentos.

O aprimoramento do modelo BLUES permite expandir análises do potencial nacional da produção e da demanda sustentáveis, bem como de suas interlocuções com

diferentes fatores de sustentabilidade como por exemplo, mitigação de gases de efeito estufa.

Neste trabalho, também foram feitas análises qualitativas dos cinco pilares da transição agropecuária, além da determinação dos principais desafios e oportunidades brasileiras para a implementação da transição agropecuária.

O estudo apresenta sua importância e inovação ao lidar com problemas e assuntos ainda incipientes no ramo da modelagem integrada. Os *Integrated Assessment Models* – IAMs (sigla em inglês para Modelos de Análise Integrada) nacionais e globais já desenvolvidos geralmente possuem um grau de detalhamento agropecuário simplificado. Assim, o presente trabalho inova ao propor o aumento do detalhamento tecnológico do setor agropecuário e, ao objetivar a individualização dos dados, desenvolvendo cada tecnologia de acordo com as condições edafoclimáticas, níveis de tecnificação e mecanização regional, disponibilidade e preferência regional de cada insumo agropecuário utilizados condizentes a cada uma das cinco regiões existentes no BLUES. Os insumos agropecuários e o consumo/retirada de água para cada um dos meios de cultivo e criação foram detalhados e quantificados. Além disso, foram desenvolvidos diferentes tipos de produção agropecuária sustentável e disruptiva, assim como suas respectivas cadeias de insumo.

Além disso, inova ao se tornar o primeiro estudo do tipo ao desenvolver premissas claras e as definições para a transição agropecuária e sua importância para o Brasil. Por meio das definições e do arcabouço tecnológico desenvolvido nesse trabalho, é possível viabilizar a implementação da transição agropecuária em outros modelos de análise integrada, assim como o desenvolvimento de estudos relacionados ao tema sob óticas qualitativas ou quantitativas.

1.3 Estruturação da Tese

Quanto à sua estrutura, esta tese é dividida em cinco capítulos principais. Esse, inicial, contextualiza o setor AFOLU atualmente no Brasil, alguns desafios para que esse se torne mais sustentável e introduz a necessidade de se implementar políticas adequadas para a criação de um conjunto de ações claras e bem estruturadas para garantir a transição agropecuária. Também destaca alguns pontos importantes da agropecuária brasileira e

sua participação no mundo, assim como, apresenta uma diferenciação entre modelos setoriais de uso do solo e os de análise integrada, que contemplam essa modelagem em conjunto com outros setores. Além disso, apresenta os principais objetivos da tese e a sua diferenciação para os demais trabalhos já desenvolvidos.

O segundo capítulo realiza uma revisão da literatura, fornecendo informações sobre os setores de AFOLU no Brasil, destacando os principais desafios para a migração da agropecuária brasileira para um caminho mais sustentável. Além disso, apresenta os principais pontos para a transição agropecuária, os modelos de uso do solo desenvolvidos no Brasil. Consta também a descrição do único modelo de análise integrada existente no Brasil, o modelo BLUES.

O terceiro capítulo apresenta as etapas metodológicas, de análise e síntese de dados e da implementação da modelagem integrada. Nele, o detalhamento e modificações necessárias para que o modelo BLUES possa realizar as análises sobre a importância da transição agropecuária no Brasil serão apresentados. Dessa forma, o Capítulo 3 apresenta as modificações feitas nos módulos de cobertura do solo, de tecnologias agropecuárias e de demandas do modelo BLUES, além de apresentar os cenários propostos.

O quarto capítulo fornece os resultados obtidos nos cenários desenvolvidos na tese. Também indica a importância de cada modificação implementada, comparando inicialmente o comportamento do modelo BLUES sob a ótica das alterações desenvolvidas. Nesse capítulo são feitas as discussões da importância de cada grupo de tecnologias agropecuárias desenvolvidas no modelo em comparação a cenários de linha de base, NDC e com limitações de aquecimento global limitados a 1,5°C. Por fim, serão discutidas as oportunidades e desafios para implementação da transição agropecuária.

O último capítulo resume a conclusão e as considerações finais do presente estudo, incluindo limitações e implicações de algumas das conquistas da tese para trabalhos futuros.

2 DEFINIÇÕES E CONTEXTUALIZAÇÃO PARA A TRANSIÇÃO AGROPECUÁRIA SUSTENTÁVEL

O setor de AFOLU é considerado como uma das principais fontes emissoras de gases de efeito estufa no mundo. Em 2019, gerou cerca de 19% de todas as emissões globais de CO_{2eq}, totalizando mais de 9,8 GtCO_{2eq} (CLIMATE WATCH, 2022). Contudo, o setor também é um dos que apresentam um grande potencial de mitigação de carbono atmosférico por meio da implementação de novos meios produtivos, com maiores produtividades e mais sustentáveis (BRASIL, 2021; NABUURS *et al.*, 2022; ROE *et al.*, 2019, 2021). O IPCC (2019; 2022) aponta, como fonte importante de mitigação e adaptação em cenários de mudanças climáticas, o combate à desertificação e degradação do solo e o aumento da segurança alimentar mundial através do desenvolvimento agropecuário e produção de recursos de forma sustentável. Ademais, destaca a importância da promoção do melhoramento e sustentabilidade da produção silvícola, com uma gestão adequada de carbono orgânico no solo, bem como a redução do desmatamento e da degradação do solo, uma vez que esses já atingem cerca de 25% das terras sem gelo do mundo.

Conforme Nabuurs *et al.* (2022), o potencial técnico estimado de mitigação oriundo da agropecuária varia entre 1,6 e 28,5 GtCO_{2eq}.ano⁻¹. Esse efeito pode ser obtido por meio da diversificação de sistemas de produção agropecuária, como os sistemas integrados, e de produção pecuária, como a intensificação de pastagens. Essa possibilidade surge a partir da adoção de medidas diretas nos sistemas de produção agropecuária, como a implementação de sistemas do tipo agrossilvipastoril ou o melhoramento de medidas para redução de fermentação entérica, manejo de nutrientes no solo e cultivo de arroz. Além disso, a recuperação de solos degradados e sequestro de carbono através de reflorestamento e florestas manejadas ainda fornece um potencial técnico extra de mitigação entre 5,0 e 29,5 GtCO_{2eq}.ano⁻¹ (NABUURS *et al.*, 2022).

Nesse contexto, esse capítulo discutirá o papel do setor de AFOLU no Brasil, os principais mecanismos para a promoção nacional da transição agropecuária rumo à sustentabilidade, bem como a importância da participação de modelos de análise integrada, a nível nacional, no desenvolvimento de trajetórias representativas de mudanças climáticas de longo prazo.

2.1 Setor de AFOLU no Brasil

A importância do Brasil como um dos principais produtores agropecuários é indiscutível. Contudo, ainda é necessário haver um maior aproveitamento nacional do seu potencial de produtos com baixa pegada de carbono, visando uma transição agropecuária rumo à sustentabilidade. Atualmente, o país possui uma grande capacidade, ainda inexplorada, do aproveitamento de suas pastagens com algum grau de degradação e com baixos níveis de taxa de lotação, que, se bem aproveitadas e recuperadas, poderiam aumentar a disponibilidade de terras agricultáveis para suprir a necessidade crescente de biocombustíveis e bioinsumos para a produção de biomateriais (BRAGANÇA *et al.*, 2022; FELTRAN-BARBIERI e FÉRES, 2021; STRASSBURG *et al.*, 2014).

Nesse contexto, em 2021, o Brasil apresentava cerca de 159 milhões de hectares de pastagens, o que representa aproximadamente 18,7% de todo o território brasileiro. Desse montante, em torno de 63% possuem sinais de degradação, severa ou intermediária, o que representa cerca de 101 milhões de hectares ou 11,9% do território brasileiro sendo constituído de pastagens com algum grau de degradação (LAPIG, 2023). Conforme LAPIG (2023), nessa mesma época, o rebanho bovino brasileiro atingia a marca de 165 milhões de unidades animal (UA)⁴, o que representa uma taxa de lotação de aproximadamente 1 UA/ha, que é um valor aquém ao que poderia ser alcançado com a adoção de premissas básicas de melhoramento da qualidade de pastagens e processos de recomposição da qualidade desse solo.

Além disso, o setor agropecuário também é um dos maiores responsáveis pelo aumento de pressões sobre as fronteiras de vegetação nativa com o pretexto de expansão de áreas para a produção agropecuária. Assim, apesar do Brasil possuir uma das maiores áreas de vegetação nativa preservadas no mundo, com cerca de 50% do território do país representando esse montante (IBGE, 2018; 2020), ainda há um volume crescente de áreas de desmatamento ilegal, principalmente em territórios pertencentes à Amazônia Legal (ALBUQUERQUE *et al.*, 2020; RAJÃO *et al.*, 2020; ROCHEDO *et al.*, 2018; SEEG, 2023). De acordo com Rajão *et al.* (2020), apesar de grande parte da produção agropecuária brasileira ser feita em áreas livres de desmatamento, nos biomas Amazônia e Cerrado, cerca de 2% dos produtores rurais são responsáveis por 62% de todo o desmatamento ilegal desses biomas. O estudo ainda indica que esses mesmos produtores

⁴ Uma unidade animal (UA) equivale a um animal médio de 450 kg vivo (LAPIG, 2023).

são responsáveis pela produção e exportação de 20% da soja e 17% da carne bovina para a União Europeia. Dessa forma, essas exportações estão diretamente associadas ao desmatamento ilegal de áreas nativas. Além disso, o estudo aponta que o número pode ser ainda maior, visto que no caso da soja, cerca de 80% das propriedades produtoras são cadastradas no Ministério de Agricultura e Pecuária. No caso, da pecuária, entre 38-58% de toda a carne exportada para a Europa, proveniente dessa região, pode estar “contaminada” com desmatamento potencialmente ilegal devido à mudança de uma propriedade para outras ao longo da cadeia de produção do gado até o abate, o que dificulta a rastreabilidade desse animal (RAJÃO *et al.*, 2020).

O enfraquecimento de políticas governamentais no período de 2018-2022 no país, que enfraqueceram e dificultaram o combate à posse ilegal de terra no território nacional, assim como a não aplicação dos instrumentos de políticas públicas existentes de governos anteriores, é um ponto sensível, resultando no aumento do desmatamento ilegal em unidades de conservação ou em áreas demarcadas como território indígena (AZEVEDO *et al.*, 2022; FELLOWS *et al.*, 2021; FELLOWS *et al.*, 2023). No ano de 2021, cerca de 1,3 milhões de hectares de florestas nativas foram desmatadas na região Amazônia Legal (Tabela 5), sendo 36,5 mil de hectares estavam dentro de territórios indígenas (ASSIS *et al.*, 2019).

Tabela 5: Desmatamento na Amazônia Legal.

ANO	DESMATAMENTO REGIONAL (Mha)									AMAZÔNIA LEGAL
	AC	AM	AP	MA	MT	PA	RO	RR	TO	
1988	0,06	0,15	0,01	0,25	0,51	0,70	0,23	0,03	0,17	2,11
1989	0,05	0,12	0,01	0,14	0,60	0,58	0,14	0,06	0,07	1,78
1990	0,06	0,05	0,03	0,11	0,40	0,49	0,17	0,02	0,06	1,37
1991	0,04	0,10	0,04	0,07	0,28	0,38	0,11	0,04	0,04	1,10
1992	0,04	0,08	0,00	0,11	0,47	0,38	0,23	0,03	0,04	1,38
1993	0,05	0,04	0,00	0,04	0,62	0,43	0,26	0,02	0,03	1,49
1994	0,05	0,04	0,00	0,04	0,62	0,43	0,26	0,02	0,03	1,49
1995	0,12	0,21	0,00	0,17	1,04	0,78	0,47	0,02	0,08	2,91
1996	0,04	0,10	0,00	0,11	0,65	0,61	0,24	0,02	0,03	1,82
1997	0,04	0,06	0,00	0,04	0,53	0,41	0,20	0,02	0,03	1,32
1998	0,05	0,07	0,00	0,10	0,65	0,58	0,20	0,02	0,06	1,74
1999	0,04	0,07	0,00	0,12	0,70	0,51	0,24	0,02	0,02	1,73
2000	0,05	0,06	0,00	0,11	0,64	0,67	0,25	0,03	0,02	1,82
2001	0,04	0,06	0,00	0,10	0,77	0,52	0,27	0,03	0,02	1,82
2002	0,09	0,09	0,00	0,11	0,79	0,75	0,31	0,01	0,02	2,17
2003	0,11	0,16	0,00	0,10	1,04	0,71	0,36	0,04	0,02	2,54
2004	0,07	0,12	0,00	0,08	1,18	0,89	0,39	0,03	0,02	2,78
2005	0,06	0,08	0,00	0,09	0,71	0,59	0,32	0,01	0,03	1,90
2006	0,04	0,08	0,00	0,07	0,43	0,57	0,20	0,02	0,01	1,43
2007	0,02	0,06	0,00	0,06	0,27	0,55	0,16	0,03	0,01	1,17
2008	0,03	0,06	0,01	0,13	0,33	0,56	0,11	0,06	0,01	1,29
2009	0,02	0,04	0,01	0,08	0,10	0,43	0,05	0,01	0,01	0,75
2010	0,03	0,06	0,01	0,07	0,09	0,38	0,04	0,03	0,00	0,70
2011	0,03	0,05	0,01	0,04	0,11	0,30	0,09	0,01	0,00	0,64
2012	0,03	0,05	0,00	0,03	0,08	0,17	0,08	0,01	0,01	0,46
2013	0,02	0,06	0,00	0,04	0,11	0,23	0,09	0,02	0,01	0,59
2014	0,03	0,05	0,00	0,03	0,11	0,19	0,07	0,02	0,01	0,50
2015	0,03	0,07	0,00	0,02	0,16	0,22	0,10	0,02	0,01	0,62
2016	0,04	0,11	0,00	0,03	0,15	0,30	0,14	0,02	0,01	0,79
2017	0,03	0,10	0,00	0,03	0,16	0,24	0,12	0,01	0,00	0,69
2018	0,04	0,10	0,00	0,03	0,15	0,27	0,13	0,02	0,00	0,75
2019	0,07	0,14	0,00	0,02	0,17	0,42	0,13	0,06	0,00	1,01
2020	0,07	0,15	0,00	0,03	0,18	0,49	0,13	0,03	0,00	1,09
2021	0,09	0,23	0,00	0,04	0,22	0,52	0,17	0,03	0,00	1,30

Fonte: Adaptado de INPE (2023)

O desmatamento, além de diminuir a quantidade de estoque de carbono acima e abaixo do solo e, conseqüentemente, prejudicar as ações contra a mitigação das mudanças

climáticas, também tem um efeito nocivo para as comunidades tradicionais locais, tirando as fontes de subsistência e contaminando o solo e a água utilizados por esses povos. Nesse contexto, pode-se observar os embates mais recentes, entre os anos de 2019 e 2022, dos grileiros com as populações indígenas na região Norte brasileira, em que o primeiro grupo, à procura de minerais ou, então, de apropriação indébita de terras indígenas, geraram volumes elevados de supressão de áreas de mata nativa para o processo de mineração, contaminando os corpos hídricos com mercúrio, e para a agropecuária, contaminando os corpos hídricos com fertilizantes e defensivos químicos com elevado grau de toxicidade. Esses conflitos, além de gerarem perdas importantes de florestas nativas, também ocasionaram mortes advindas de conflitos armados, perda de áreas para subsistência (agricultura e caça dos povos tradicionais), intoxicação de povos nativos por meio de água contaminada e o aumento de doenças acarretadas pelo desequilíbrio da fauna local (HEINRICH BOLL STIFTUNG *et al.*, 2022).

Outro ponto a ser observado nesse setor diz respeito aos defensivos químicos, que são insumos amplamente difundidos no Brasil e que a cada ano batem recordes de demandas, chegando à marca de cerca de 720 mil toneladas de ingrediente ativo utilizado nas lavouras brasileiras no ano de 2021, o que representa um aumento de aproximadamente 350% do consumo de princípio ativo em comparação à 2000, que é o primeiro ano da série histórica disponibilizada pelo IBAMA (IBAMA, 2022; 2023). Além disso, o país é o maior consumidor de defensivos químicos do mundo, sendo que, na sua maioria, não são produzidos no país (HEINRICH BOLL STIFTUNG *et al.*, 2022). Por exemplo, o Glifosato, um defensivo químico altamente cancerígeno e banido da maioria dos países devido à sua toxicidade, é o defensivo mais utilizado no Brasil, assumindo cerca de 40% do mercado de defensivos químicos no território nacional (BOMBARDI, 2017). Apesar do país ser um grande exportador de produtos agrícolas, ele continua produzindo alimentos, principalmente cereais, frutas e vegetais com uma elevada concentração de ingredientes ativos banidos de países da União Europeia e dos Estados Unidos. Essa produção exacerbada de alimentos contaminados com defensivos químicos com alto grau de toxicidade é prejudicial tanto para a biodiversidade local, visto que mata indiscriminadamente pragas agrícolas e insetos polinizadores, gerando um desequilíbrio da fauna e flora local, quanto para os povos indígenas que são contaminados por esses ingredientes ativos através dos corpos hídricos, além de também não contribuir para a

economia brasileira, visto que há embargos dos produtos nacionais por conta do excesso de defensivos químicos utilizados (HEINRICH BOLL STIFTUNG *et al.*, 2022).

Nesse contexto, IPCC (2019, 2022a) destaca a importância de haver o aumento da sustentabilidade agropecuária, visando sistemas de produção mais modernos e tecnológicos, que conciliem o aumento da produtividade do campo com a diminuição da utilização de insumos químicos, hídricos e terra. Dessa maneira, é necessário haver uma mudança estrutural da forma de produção do setor agropecuário brasileiro com o intuito de reduzir seus impactos socioambientais. Aumentando, assim, a resiliência do setor às mudanças climáticas, de forma a diminuir as emissões de GEE, para auxiliar na redução dos impactos globais das mudanças climáticas, e, ao mesmo tempo, aumentar sua adaptação ao utilizar novas formas de produção agropecuária que tenham um viés mais sustentável. Logo, visando reduzir as demandas por insumos químicos e as emissões de GEE, além de aumentar a produtividade e a tecnificação agropecuária de forma a diminuir pressões infundadas sobre áreas de mata nativa e seus impactos socioambientais do setor, bem como promover auxílio no combate às mudanças climáticas globais.

2.2 A Transição Agropecuária

Nos últimos anos, o setor agropecuário brasileiro vem sofrendo graves críticas sobre o seu processo de produção, com o uso exacerbado de defensivos químicos com alto nível de toxicidade tanto para os seres humanos quanto para a flora e fauna local, com o nível de desmatamento ilegal, prejudicial para o meio ambiente e ao combate às mudanças climáticas, além de problemas de conflitos com povos originários (BRASIL, 2023; DE SOUSA, 2022; HAY e AWY, 2022; HEINRICH-BÖLL-STIFTUNG, 2022). Tanto a carne, quanto os produtos agrícolas nacionais têm sofrido embargos constantemente e têm perdido valor de mercado por serem produtos que não respeitam os ODS (FUCHS *et al.*, 2020; GREENPEACE, 2023; RAJÃO *et al.*, 2020; REGAN, 2020; SOENDERGAARD *et al.*, 2021).

Desse modo, uma transição dos meios produtivos do setor agropecuário nacional seria extremamente oportuna, a fim de que não sejam mais permitidos sistemas de produção que não respeitem condições socioambientais básicas e os ODS. Assim, há a necessidade de migração do setor agropecuário para o viés da sustentabilidade, por meio

de estratégias que englobem: Sistemas de produção sustentáveis e que descarbonizem o setor; Modificações na cadeia de produção para evitar perdas desnecessárias; Descentralização da produção agropecuária, aproximando o produtor rural ao consumidor final, de forma a reduzir as perdas nas cadeias produtivas; Mudanças comportamentais do consumidor, com um consumo mais adequado dos produtos, evitando o desperdício e preferindo alimentos mais sustentáveis e saudáveis; e, Democratização dos produtos sustentáveis, de forma a possibilitar e baratear o preço dos produtos mais sustentáveis e saudáveis para populações que não teriam acesso.

Assim, é proposto um paralelo com metodologias já consagradas para a transição energética, como a metodologia 5 D's (Descarbonização, Descentralização, Digitalização, Desenho de mercado e Democratização), só que para o setor agropecuário. Consequentemente, desenvolvendo pilares adequados para a transição agropecuária, rumo à sustentabilidade.

IPCC (2019, 2022b) enfatiza o papel do setor agropecuário em processos de captura de carbono através da adoção de medidas de melhoramento de pastagens e mudanças de cobertura do solo para restauração de vegetação nativa ou processos de produção que aumentem o estoque de carbono no solo, como é o caso dos sistemas integrados, agroflorestais e o *biochar*⁵. Além disso, mostra-se relevante a adoção de diferentes tipos de sistemas de produção disruptivos que tanto busquem aproximar o produtor ao consumidor final, de modo a reduzir perdas ao longo da cadeia de produção, quanto aumentem a disponibilidade de alimentos com baixos fatores de emissões (IPCC, 2022b).

Dessa forma, é possível perceber o papel importante do setor agropecuário e da transição agropecuária (Figura 3) no contexto da minimização das mudanças climáticas, tanto no papel ambiental, quanto social. Para essa transição consciente, adaptando o conceito de transição energética para a realidade do setor agropecuário com as devidas modificações, é necessário haver:

⁵ *Biochar*, ou biocarvão, é o termo utilizado cientificamente para diferenciar o carvão de uso não energético do carvão de uso energético. Ele é produzido pela pirólise de biomassa e pode ser assim chamado quando seu propósito é o uso agropecuário ou florestal (MAIA *et al.*, 2021).

- Descarbonização e a mitigação dos gases de efeito estufa provenientes do setor agropecuário, para que ele possa fornecer insumos adequados para os demais setores;
- Descentralização da produção e distribuição de alimentos, com o intuito de reduzir as pressões sobre áreas de vegetação nativa e reduzir as perdas da cadeia de produção e distribuição;
- Digitalização, tanto para a utilização de sistemas de produção inovadores, disruptivos e sustentáveis – em uma ótica de oferta de produtos agropecuários – quanto para auxiliar na rastreabilidade do produto, com o consumidor sabendo de onde vem e quem produziu o produto – em uma ótica de demanda dos produtos agropecuários;
- Desenho de mercado, para a avaliação da regulamentação, incentivos e vantagens socioambientais da transição agropecuária, identificando quais são os sistemas de produção que estão mais ligados com os objetivos de mitigação, adaptação e neutralização climática. Além de auxiliar na redução de perda e desperdício de alimentos e insumos agropecuários; e,
- Democratização, para redução da desigualdade no acesso a fontes limpas de insumos agropecuários e alimentos saudáveis, sustentáveis e com baixa pegada de carbono.



Figura 3: Componentes da transição agropecuária.

Fonte: Elaboração própria

Atualmente, na literatura não existe uma definição adequada da transição agropecuária. Desse modo, utilizando-se os pilares da transição energética e fazendo as devidas alterações para o setor agropecuário, define-se que:

A transição agropecuária pode ser entendida como uma ampla mudança tecnológica e comportamental de todo o setor agroindustrial e consumidor, desde a produção agropecuária até o consumidor final, de forma a gerar menores impactos ambientais, sociais e climáticos ao longo de toda a cadeia de produção de alimentos e insumos agropecuários. Dessa forma, é necessária uma substituição de sistemas de produção tradicionais e carbonointensivos, assim como de níveis elevados de perdas e desperdícios ao longo da cadeia agropecuária.

A seguir são expostos exemplos de sistemas de produção agropecuária e outros meios que auxiliem no atingimento dos 5 D's da transição agropecuária para a sustentabilidade (Figura 4).



Figura 4: Pilares fundamentais da transição agropecuária de acordo com a metodologia 5D's da transição agropecuária.

Fonte: Elaboração própria

2.2.1 Descarbonização e mitigação de GEE

2.2.1.1 Sistemas integrados

Os sistemas integrados e agroflorestais (sistemas integrados com a participação de florestas nativas ou plantadas) se destacam como uma alternativa de integração entre diferentes tipos de sistemas produtivos com alta produtividade, cultivo consorciado, em

sucessão e/ou rotação, com o intuito de propiciar um benefício mútuo entre as culturas e criações, além de possuir grande preocupação com a recuperação de áreas degradadas (Figura 5). Esses sistemas têm como viés o desenvolvimento de uma agropecuária mais sustentável visando a simbiose entre as criações e cultivos, de modo a melhorar a estrutura físico-química de solos degradados, auxiliando na captura de carbono através do plantio de florestas plantadas e/ou nativas e diminuindo as emissões de GEE devido a menor utilização de insumos químicos como fertilizantes e pesticidas (CORDEIRO *et al.*, 2015).

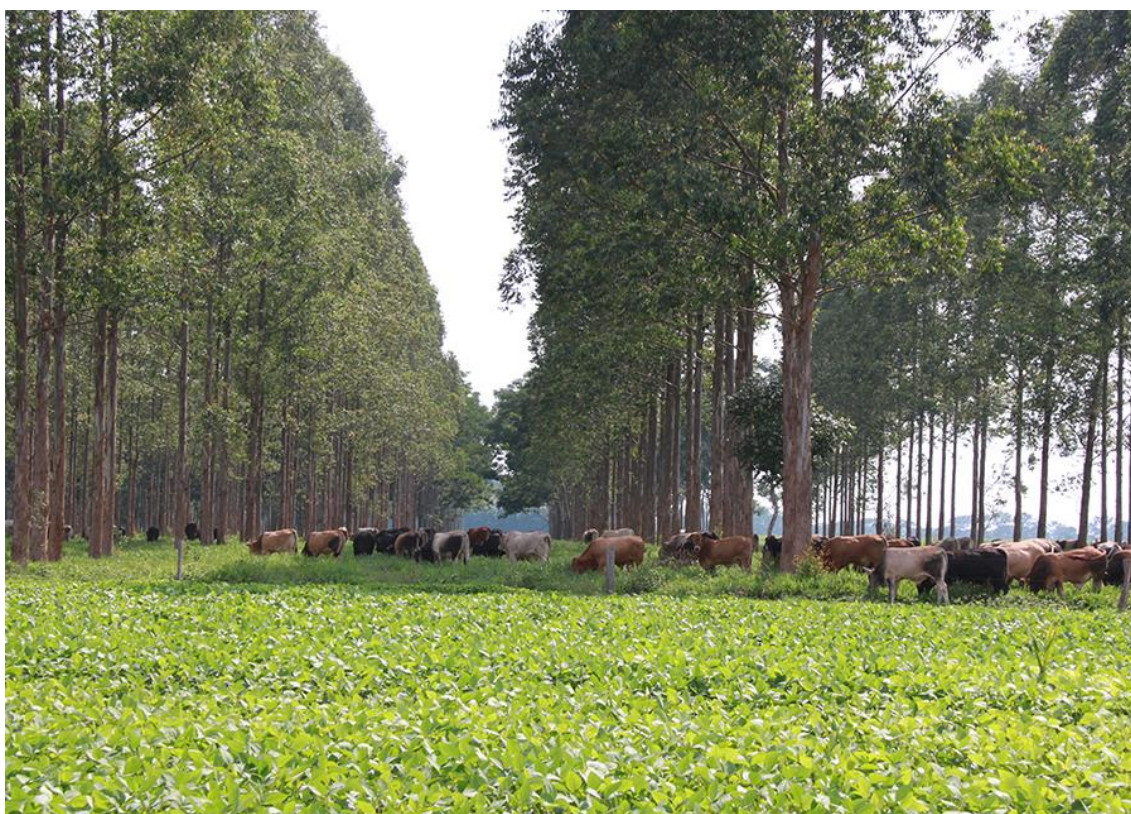


Figura 5: Sistema integrado ILPF no Mato Grosso.

Fonte: Gregio e Faria (2022)

Existem quatro tipos de sistemas integrados (Figura 6): Integração Lavoura-Floresta (ILF), que é um tipo de sistema agroflorestal em que a produção agrícola é feita na mesma área com florestas (nativas/plantadas); Integração Pecuária-Floresta (IPF), que é outro tipo de sistema agroflorestal que produz gado com florestas (nativas/plantadas); Integração Lavoura-Pecuária (ILP), produção de gado com lavouras; e Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), que é o tipo mais completo de sistema agroflorestal,

em que se busca colocar a agricultura, as florestas (nativas/plantadas) e a produção em uma mesma área (NOBRE *et al.*, 2018).

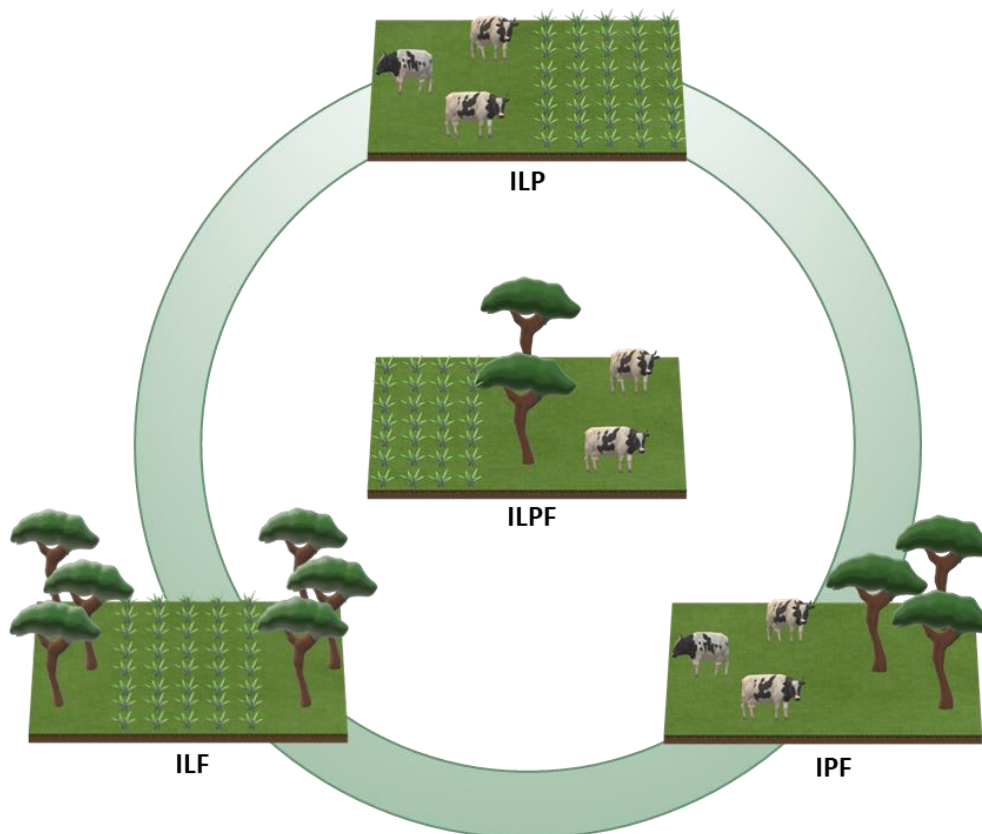


Figura 6: Representação dos diferentes tipos de sistemas integrados existentes. Integração Lavoura-Pecuária (ILP); Integração Lavoura-Floresta (ILF); Integração Pecuária-Floresta (IPF); Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF).

Fonte: Elaboração própria

Os sistemas integrados e agroflorestais já são amplamente utilizados no Brasil e conforme dados da Rede ILPF (2022) e Polidoro *et al.* (2020), em 2020, o Brasil possuía cerca de 8,4% (aproximadamente 17,4 milhões de hectares) da sua área sob uso da agropecuária ocupada por sistemas integrados ou agroflorestais. Desse montante, apenas 17% compreendem algum tipo de sistemas agroflorestais, sendo 9% ILPF, 7% IPF e 1% ILF e na sua grande maioria, 83%, sendo de sistema integrados do tipo ILP (Rede ILPF, 2021).

Segundo Nobre *et al.* (2018), esse tipo de sistema produtivo possui grandes vantagens em relação aos sistemas de monoculturas, principalmente no que se trata de melhoramento físico, químico e biológico do solo. Isso acontece devido ao aumento do

teor de matéria orgânica no solo e preparo adequado através de fertilização e correção do pH do solo. Ademais, a adoção desse tipo de sistema auxilia na promoção da ciclagem dos nutrientes no solo oriundo da rotação de culturas, que melhora a fertilidade, sobretudo quando aplicada por meio da rotação entre leguminosas e gramíneas, com ampliação da biodiversidade abaixo e acima do solo, auxiliando na expansão da fixação de carbono no solo por aporte de resíduos vegetais no solo e diversificação de sistemas radiculares capazes de atingir diferentes níveis de profundidade no perfil do solo.

Contudo, um dos maiores benefícios da implementação de sistemas integrados e agroflorestais no Brasil é a possibilidade de recuperação de áreas agrícolas e de pastagens já degradadas. Esse tipo de recuperação é extremamente benéfico tanto para o produtor rural, que passa a ter uma maior produtividade e maior diversificação de fonte de renda, quanto para o meio ambiente, visto que esse sistema aumenta a capacidade de estocagem de carbono atmosférico abaixo e acima do solo, principalmente ao adotar sistemas associados ao plantio de florestas nativas ou comerciais (eucalipto e pinus). Assim, em sistemas agroflorestais, a parcela florestal contribui na remoção de CO₂ da atmosfera e o armazena abaixo do solo - em camadas que outros tipos de culturas agrícolas ou gramíneas não são capazes de atingir - e acima do solo, durante o crescimento vegetativo da árvore em forma de material lenhoso. É importante destacar que esse carbono acima do solo contribui para a mitigação climática apenas se associado à produção de florestas nativas ou, então, se a floresta comercial (eucalipto e pinus) não for destinada para uso energético, uma vez que nesse processo, durante a sua queima, o CO₂ anteriormente armazenado no material lenhoso é emitido novamente para a atmosfera (POLIDORO *et al.*, 2021; REDE ILPF, 2022).

Desse modo, pode-se considerar que a implementação de sistemas integrados, principalmente do tipo agroflorestas, é benéfica para o produtor rural, que aumenta a possibilidade de geração de recursos financeiros e gera uma maior segurança econômica no setor rural, principalmente se associado à venda de crédito de carbono de sistemas agroflorestais com florestas nativas. Consequentemente, gera valor para a manutenção e implementação de áreas florestais com espécies nativas (PEREIRA, 2019; WRI, 2020).

Além disso, ao associar a produção florestal - comercial ou nativa - com a produção bovina, existem ganhos importantes para a mitigação climática, que são a redução das emissões de gases do tipo não-CO₂ da parcela bovina da produção, devido ao gado possuir nesse tipo de meio produtivo uma alimentação de melhor qualidade,

facilitando o processo digestivo e nutrição animal, além da diminuição da demanda hídrica da produção animal, que pode chegar a ser 30% inferior, por conta do melhoramento do conforto térmico do gado em função de níveis de sombreamento mais adequados, bem como do melhoramento do microclima local advindo da presença de árvores. Ademais, há uma redução nos níveis de estresse dos animais que melhoram as taxas de engorda e procriação. Assim, há uma diminuição do tempo de abate de aproximadamente 60 meses, em áreas degradadas, para 30-36 meses, gerando mais renda ao produtor rural e menores emissões de metano ao longo de toda vida do animal (CORDEIRO *et al.*, 2015; OLIVEIRA, *et al.*, 2017; SALTON *et al.*, 2013; SATO *et al.*, 2019).

2.2.1.2 Sistemas disruptivos

O IPCC (2019) destaca a importância da adoção de sistemas disruptivos de produção de alimentos que permitam encurtar a cadeia produtiva, aproximando o produtor ao consumidor final, diminuir as perdas de alimentos e as emissões de GEE da cadeia de produção. A seguir, serão expostos alguns dos sistemas disruptivos de produção agropecuária que têm ganhado destaque para a produção de alimentos na atualidade.

2.2.1.2.1 Fazendas verticais

Um dos sistemas de produção de alimentos que se destaca é feito através de fazendas verticais (Figura 7), que tem como viés a produção em larga escala de alimentos em sistemas controlados, o que propicia elevados níveis de produtividade, superiores às encontradas no campo. Assim, ganha relevância como um aliado ao combate às mudanças climáticas (AVGOUSTAKI e XYDIS, 2020; DANIEL, 2014; HARRIS e KOUNTOURIS, 2020; KOZAI *et al.*, 2019). Essas fazendas têm como princípio a produção de alimentos, principalmente agrícolas, em ambientes controlados e com condições edafoclimáticas ideais para que a cultura possa expressar todo o seu potencial genético (BANERJEE e ADENAEUER, 2014; BENIS *et al.*, 2018). Dessa forma, são utilizados ambientes climatizados, prédios ou galpões, com quantidades ideais de água e fertilizantes e com diferentes tipos de iluminação para que a planta possa se desenvolver adequadamente (DESPOMMIER, 2013). Um ponto de destaque desse tipo de produção

é a baixa demanda por defensivos químicos ou orgânicos, visto o ambiente ser geralmente fechado, sem permitir a entrada de pragas (AL-KODMANY, 2018).



Figura 7: Fazenda vertical.

Fonte: Aerofarm (2023)

Assim, as fazendas verticais são consideradas áreas de produção agropecuária que envolvem alto grau de tecnificação e investimento, a fim de gerar grandes níveis de produtividade. Esse tipo de produção agropecuária pode ser desenvolvido em prédios de múltiplos andares ou em galpões, sendo mais usual a instalação em prédios por serem habitualmente inseridos em grandes centros urbanos, o que, por sua vez, torna caro e inviável suas instalações em locais com grandes dimensões. Contudo, apesar de onerar ainda mais a produção agropecuária, a presença dessa produção em perímetros urbanos ou periurbanos, auxilia na redução de taxas de perdas ao longo da cadeia produtiva, visto que aproxima o consumidor final ao produtor (DESPOMMIER, 2013).

Ademais, as fazendas verticais geralmente possuem uma grande densidade de produção, justamente para haver uma maior produtividade por metro quadrado. Para o seu desenvolvimento, são necessários altos níveis de investimento, para a construção dos prédios e infraestrutura para o cultivo ou criação. Ainda há custos variáveis elevados, em função dos gastos com energia elétrica, sobretudo iluminação - geralmente em LED - com diferentes espectros para se adaptar às necessidades das culturas, o que representa cerca

de 90% de todos os custos com energia elétrica desse sistema de produção. Contudo, esses sistemas possuem a grande vantagem de não necessitarem de defensivos químicos, visto que são instalados em ambientes controlados e isolados. Além disso, há uma menor demanda de água e fertilizantes químicos no sistema, face à constante recirculação de água e nutrientes, sem haver perdas para a atmosfera em forma de vapor d'água e percolação, e volatilização de macronutrientes (AL-KODMANY, 2018; BANERJEE e ADENAEUER, 2014; BENIS *et al.*, 2018).

Esse tipo de sistema de produção agropecuária pode conter tanto a produção de produtos agrícolas, como frutas, legumes, vegetais e outros, quanto animais, como peixes, aves e outros. No entanto, geralmente são implementadas culturas agrícolas de baixo porte com o intuito de facilitar o manejo *indoor* dessas, como é o exemplo das hortaliças, leguminosas e pequenas frutas, como morangos. Em alguns casos é adicionada a parcela de peixes, como tilápias, para haver a recirculação de águas e nutrientes oriundos das fezes dos peixes, em sistemas de aquaponia (Figura 8), para a fertilização das culturas (BANERJEE e ADENAEUER, 2014; BENIS *et al.*, 2018).



Figura 8: Fazenda vertical com aquaponia.

Fonte: Cairns (2022)

O setor de agricultura vertical tem recebido investimentos constantes e tem aumentado gradativamente o seu potencial de produção e o número de estabelecimentos

instalados ao longo do globo. Entre 2017 e o primeiro semestre de 2022, foram investidos cerca de US\$ 14 bilhões na construção de 1.520 fazendas verticais, um custo médio de US\$ 9 milhões por cada planta. Somente em 2021 foram investidos cerca de US\$ 6 bilhões na construção de 332 novas fazendas verticais. Isso demonstra um aumento no custo da instalação de novas plantas de fazendas verticais justamente devido ao maior nível tecnológico e aumento do porte médio dessas plantas. Porém, esse crescimento ainda tem sido concentrado em regiões mais desenvolvidas do globo, como América do Norte, Europa e Ásia, com 44%, 29% e 17%, respectivamente, do total de fazendas verticais. Contudo, é esperado que entre 2021 e 2030 haja um crescimento anual médio entre 20-25% nos investimentos em novas plantas de fazendas verticais, totalizando até 2030 investimentos de cerca de US\$ 31 bilhões e que com isso, também ocorra uma expansão demográfica desse tipo de produção (DAGHER e WALDECK, 2022; KRZYSZTOFOWICZ *et al.*, 2020; PRECEDENCE RESEARCH, 2021; PULIDINDI e PRAKASH, 2021).

2.2.1.2.2 Hortas urbanas

Com outro viés, mais sustentável, a adoção de fazendas e hortas urbanas também têm se destacado visto à sua proximidade aos consumidores e ao baixo custo de investimento, devido às pequenas proporções de implementação (HARRIS e KOUNTOURIS, 2020; IPCC, 2019). Essas hortas já são amplamente difundidas no mundo, contudo, com um viés mais social (Figura 9), de produção em pequena escala para auxiliar na segurança alimentar de comunidades carentes, escolas ou autoconsumo (CUNHA e CARDOSO, 2022; DA COSTA e SAKURAI, 2021; DO NASCIMENTO, 2018; SILVA e FONSECA, 2011).



Figura 9: Hortas urbanas do projeto Hortas Cariocas em Manguinhos - RJ.

Fonte: Hortas Cariocas (2021)

As hortas urbanas têm ganhado destaque recentemente, principalmente na Europa. Esse tipo de horta é feito em residências ou áreas comunitárias e são desenvolvidas para fornecer alguns tipos de alimentos para os próprios moradores. Essa produção já é amplamente verificada em países europeus, como a Alemanha, França, Itália, Bélgica, Noruega, Dinamarca e outros, tanto com um viés de consolidação de comunidades, inclusão social e aumento da área de drenagem de águas pluviais, quanto, mais recentemente, de aumentar a segurança alimentar desses países, visto que a maior parte de seus alimentos são advindos de países fora do bloco europeu. Em países europeus, o grau de tecnificação das hortas urbanas é superior ao encontrado em países em desenvolvimento, principalmente quando associadas à produção nas coberturas dos prédios, denominadas como hortas urbanas *rooftop* (Figura 10) (EUROPEAN COMMISSION, 2022; MCELLOWNEY, 2017b; NOONAN e BARREAU, 2021).



Figura 10: Projeto da maior horta urbana *rooftop* da Europa.

Fonte: Agripolis (2019)

Conforme Mok *et al.* (2014), as hortas comunitárias são capazes de produzir entre 22 e 48% de toda a necessidade de produtos frescos como vegetais, hortaliças e frutas dos centros urbanos. Porém, ao incluir as hortas nos topos dos prédios comerciais, essa porcentagem pode variar entre 46 e 100% de toda a demanda desses alimentos nos centros urbanos. Simone *et al.* (2023) estima que um incremento de 4.200 ha de hortas urbanas em Berlim seria o suficiente para prover toda a demanda alimentar por esses produtos na cidade. Assim, aumentando tanto a segurança alimentar, como contribuindo para diminuir as perdas de alimentos decorrentes da cadeia de produção, processamento e distribuição desses alimentos agrícolas (CSORTAN *et al.*, 2020; HUME *et al.*, 2021; KRIEWALD *et al.*, 2019; ORSINI *et al.*, 2013).

Ademais, conforme exposto por Hume, Summers, Cavagnaro (2021), McDougall *et al.* (2019), Mirzabaen (2012) e Orsini *et al.* (2013), a produção em hortas urbanas tem o viés de utilizar menores quantidades de insumos químicos e muitas vezes produzir a partir de sistemas orgânicos. Conseqüentemente, diminuindo ainda mais os fatores de emissão desses alimentos, visto que além de reduzir as emissões das etapas de transporte

e processamento desses alimentos, ainda restringe as emissões das cadeias de produção de fertilizantes e defensivos químicos, que são energointensivos.

2.2.1.2.3 Carnes alternativas

Aa produção de carnes alternativas, como as sintéticas/cultivadas, plantadas e fermentadas (Figura 11) têm se expandido devido ao seu viés de redução das emissões de GEE – dependendo da fonte energética utilizada – e por não apresentar impacto no bem-estar animal. Com pegada de carbono e hídrica geralmente inferior à da carne convencional, as carnes plantadas (origem vegetal) e as carnes cultivadas (origem laboratorial) – principalmente quando produzidas através de fontes renováveis de geração elétrica – têm ganhado espaço no mercado consumidor atual e contam com perspectivas de expansão no longo prazo (FEDDERN *et al.*, 2020; FERNANDES *et al.*, 2018; TUNES, 2019). Atualmente, as carnes fermentadas e plantadas também têm ganhado notoriedade, principalmente devido a não possuírem componentes animais, servindo como alimento em dietas veganas, e com baixa demanda energética, se comparado com as carnes cultivadas. Contudo, as carnes plantadas também começam a apresentar resistência dos consumidores devido serem consideradas alimentos ultra-processados (FARDET, 2018; FORDE e DECKER, 2022; HADI e BRIGHTWELL, 2021; TREICH, 2021).

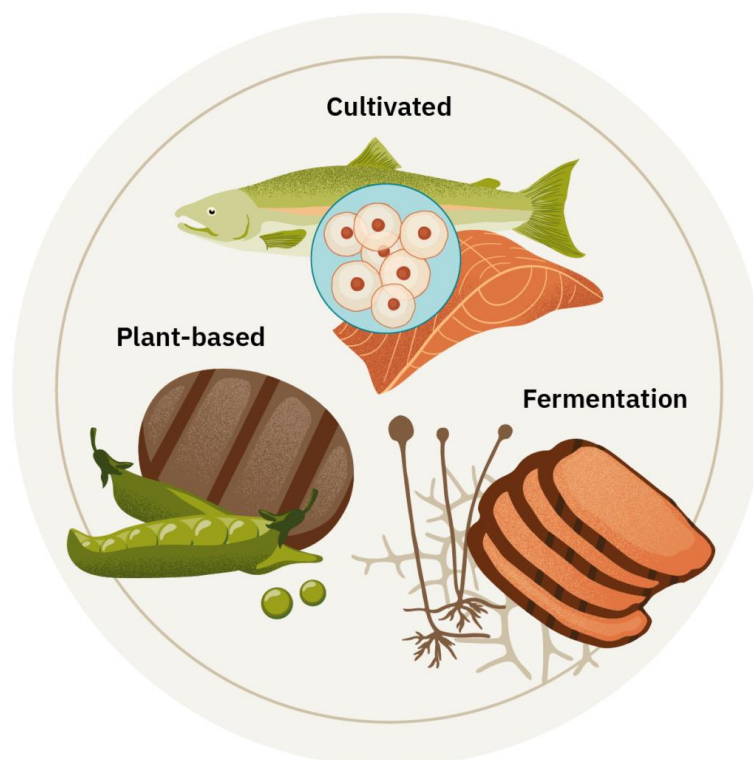


Figura 11: Tipos de carne alternativas: Cultivada (em inglês, *cultivated*); Plantada (em inglês, *plant-based*); Fermentada (em inglês, *fermentation*)

Fonte: GFI (2023)

2.2.1.2.3.1 Carne plantada

De acordo com GFI (2022b), a carne plantada ou à base de plantas (em inglês, *plant-based meat*) são produtos feitos a partir de plantas que servem como fonte alternativa de produtos de origem animal, podendo eles terem tanto a aparência, quanto o sabor de carne bovina, de galinha ou de porco, frutos do mar, ovos e laticínios. Esses produtos têm ganhado destaque atualmente devido às preferências de consumidores que desejam comer alimentos de origem não-animal em dietas vegetarianas ou veganas. Esse tipo de carne alternativa tem como principal matéria-prima fontes vegetais como soja, feijões, ervilhas, batata, arroz, trigo e outros insumos básicos da produção agrícola brasileira e mundial, além de ser necessária a adição de outros ingredientes vegetais e químicos para propiciar a textura e o sabor de carne animal para a carne alternativa.

O mercado mundial de carnes plantadas tem ganhado força por conta da vontade do consumidor de ingerir menores ou nenhuma quantidade de alimentos de origem animal. Ademais, também existe um viés importante que é a demanda global por alimentos que tragam menores impactos ao meio ambiente, com menores emissões de

GEE e menor demanda hídrica. Isso acontece devido a carne plantada possuir baixa demanda de água para a sua produção, sendo utilizada principalmente na fase agrícola, e baixa pegada de carbono e pouca energia para ser produzida. Atualmente, existem dois tipos de carnes plantadas que mais se destacam mundialmente (Figura 12), as que possuem como principal matéria-prima feijões, ervilhas e arroz, da marca Beyond Meat, e aquelas a partir de soja e batata, da marca Impossible Meat (HELLER e KEOLEIAN, 2018; KHAN *et al.*, 2019; MESSINA *et al.*, 2022; PIPER, 2021; VAN VLIET *et al.*, 2021).



Figura 12: Principais marcas e tipos de carnes plantadas.

Fonte: GFI (2020)

Em 2022, o mercado global de carnes plantadas gerou uma receita de aproximadamente US\$ 6,1 bilhões, o que representou um aumento de cerca de 8% no valor das vendas, além de apresentar um aumento de demanda por carne plantada de aproximadamente 5%, em relação a 2021 (PANESCU *et al.*, 2023). Só no mercado norte-americano, que é o país que mais consome carnes plantadas, essa apresentou um total de vendas de aproximadamente US\$ 1,4 bilhões, totalizando cerca de 137 milhões de unidades de carne plantada vendidas, um aumento de 43% em valor de vendas (US\$) e de 20% em unidades vendidas, entre os últimos três anos (2019-2022) (PANESCU *et al.*, 2023). A nível continental, a Europa é o maior mercado consumidor de carnes plantadas,

totalizando cerca de US\$ 3,3 bilhões em 2022, um aumento de 9% em comparação com 2021 (PANESCU *et al.*, 2023). Conforme Panescu *et al.* (2023), até 2030, o mercado de carnes plantadas deve representar cerca de 6% do mercado de carnes globais, necessitando de investimentos de aproximadamente US\$ 27 bilhões.

2.2.1.2.3.2 Carne cultivada

A carne cultivada, que também é conhecida como baseada em células (em inglês, *cell-based meat*), é feita através da multiplicação celular de apenas uma célula de carne originalmente retirada de um animal e multiplicado em laboratório. Dessa forma, esse tipo de carne é produzido através da multiplicação e diferenciação celular de células-tronco advindas de tecidos musculares ou embriões de animais em biorreatores para a formação do tecido animal que for desejado até se formar o pedaço de carne com as mesmas propriedades da carne animal natural (Figura 13). Assim, a carne cultivada não pode ser considerada uma carne destinada para dietas vegetarianas ou veganas, visto que para o seu desenvolvimento é necessária a utilização de células animais retiradas da carne animal. Esse tipo de carne possui como principal limitante a quantidade de energia necessária para a multiplicação celular, sendo necessária a utilização de fontes de energia renováveis para redução da pegada de carbono da carne. Entretanto, é o único tipo de carne alternativa que possui a mesma textura e sabor da carne animal convencional (TUOMISTO, 2019; TUOMISTO *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2020).



Figura 13: Diagrama de como é feita a produção da carne cultivada.

Fonte: Dewan (2023)

A grande vantagem desse tipo de carne sintética é a possibilidade de produção de carnes com textura e sabor idênticos ao da carne advinda de animais vivos, visto que a sua estrutura possui a mesma característica estrutural do tecido muscular dos animais em questão. Dessa forma, é possível produzir carnes que mimetizem a carne original, tanto de bovinos, quanto de frangos e suínos, sem haver as emissões diretas do processo de produção dessas carnes, principalmente quando comparado com a carne bovina (GFI, 2022a; PORTO e BERTI, 2022).

Assim como foi visto nas carnes plantadas, nas carnes cultivadas também é possível desenvolver esse tipo de cultivo utilizando diferentes tipos de processos. Contudo, diferentemente das carnes à base de plantas, as cultivadas não possuem tantas semelhanças nos processos de produção, podendo ser produzida por meio de três fontes alternativas de nutrientes e energia para a produção de células musculares que são as cianobactérias, o trigo e o milho. Cada um desses processos possuem diferentes níveis de consumo de energia elétrica, consumo de água, custos e emissões de processo (SINKE e ODEGARD, 2021; TUOMISTO *et al.*, 2014).

Conforme Bomkamp *et al.* (2023), desde 2011 – ano da instalação da primeira indústria focada na produção de carne cultivada – até 2022, cerca de 150 empresas focadas na produção exclusiva de carne cultivada foram instaladas e outras 70 formaram parcerias para a produção insumos e materiais dedicados exclusivamente para a produção de carnes cultivadas. Desse total, destacam-se os Estados Unidos (43 empresas), Reino Unido (17 empresas), Israel (17 empresas) e Singapura (12 empresas). Bomkamp *et al.* (2023) destaca a participação de grandes empresas multinacionais, tanto do setor agropecuário, quanto de maquinário e química, como é o caso da Nestlé, Mitsubishi, JBS e Merck. Nesse contexto, os investimentos em carne cultivada têm crescido a cada ano, totalizando cerca de US\$ 2,8 bilhões entre 2010 e 2022, sendo US\$ 2.2 milhões apenas nos últimos dois anos (2021 e 2022). Ademais, Cohen *et al.* (2022) projeta que até 2040 o mercado de carne cultivada deverá representar cerca de 20% de todo o mercado de carne global.

2.2.1.2.3.3 Carne fermentada

Por sua vez, a carne fermentada, também conhecida como carne microbiana (em inglês, *microbial meat*) é o tipo de carne alternativa mais nova no mercado mundial, possuindo um grande viés de sustentabilidade, aliando baixa pegada de carbono com baixas demandas hídricas e consumo energético, além de ser considerada uma carne vegana. Porém, ela necessita de insumos específicos como açúcares ou o caldo da cana-de-açúcar para realizar o processo de fermentação a baixo custo. A carne fermentada é pouco difundida e disponível para o consumo, visto que ainda é uma tecnologia nova e em fase final de desenvolvimento (ALVES *et al.*, 2022; RUBIO *et al.*, 2020; SINKE e ODEGARD, 2021; SINKE *et al.*, 2023; VERGEER *et al.*, 2021).

Em 2022, 10 empresas começaram a lançar seus primeiros produtos de carnes fermentadas, principalmente a partir de micélio, que é um tipo de fungo altamente adaptável e de fácil desenvolvimento, além de apresentar um crescimento rápido em tanques de fermentação. Dentre os produtos desenvolvidos com o micélio, pode-se destacar o MyBacon, para a substituição do bacon, e a BetterMeat (Figura 14), que mimetiza a carne bovina, frango e outros (CARTER *et al.*, 2023).



Figura 14: Carne fermentada, produzida a partir de micélio.

Fonte: Better Meat (2023)

2.2.1.2.4 Intensificação da produção de bovinos

Inicialmente, é necessário entender as divisões dos sistemas de produção de bovinos de corte, que podem ser divididos entre sistemas extensivos, semi-intensivos, intensivos e superintensivos. Conforme Cezar *et al.* (2005), essa divisão pode ser determinada como:

- Sistemas extensivos, no qual os bovinos são criados soltos no pasto, recebendo pouca ou nenhuma suplementação alimentar (Figura 15);



Figura 15: Sistema de produção bovina em sistema extensivo.

Fonte: Revista Rural (2021)

- Sistemas semi-intensivos, que é criação em pasto solto durante o ano inteiro, mas com cochos em áreas adequadas para a adição de suplementação alimentar como farelo de soja, milho, forragem e outros, tendo o intuito de fornecer a alimentação adequada para as diferentes fases de crescimento animal (cria, recria e engorda) (Figura 16);



Figura 16: Sistema de produção bovina em sistema semi-intensivo.

Fonte: Neto (2021a)

- Sistema intensivo, no qual o animal passa a fase de engorda em processo de confinamento de forma a melhorar as taxas de engorda e finalização da carne, pela adição de grandes quantidades de alimentos ricos em proteína e silagem. Esse tipo de sistema necessita de áreas adequadas para o confinamento, que pode ser tanto em: (a) currais a céu aberto, sem proteção para o animal e alimentação; (b) currais parcialmente abertos, com proteção para a comida e animais, aumentando parcialmente o conforto térmico animal e protegendo o alimento do contato com a água da chuva e do sol; e (c) currais coberto, com proteção total ao sol e quaisquer intempéries, com conforto térmico animal e ventilação controlados, bem como a proteção do alimento e da água. Os currais à céu aberto e parcialmente abertos são os mais comuns, visto os altos custos advindos da implementação de currais fechados (Figura 17) (CARDOSO *et al.*, 2016; KUBIAK, 2006); e,



Figura 17: Sistema de produção bovina em sistema intensivo.

Fonte: de Souza (2015)

- Sistema superintensivo, no qual os animais possuem um tempo de cria reduzido, passando diretamente para o confinamento em currais fechados (KUBIAK, 2006) já na fase de recria, logo, o gado passa do processo de desmame diretamente para a alimentação à base de ração proteica e silagem com alto teor proteico para aumentar as taxas de engorda e diminuir o tempo de abate animal. Esse tipo de sistema é o que apresenta maior produtividade na pecuária de bovinos de corte e tem potencial de redução do tempo de abate em até 75%, podendo diminuir de 60 meses para até 16 meses o tempo gasto entre o nascimento do bezerro até o abate do gado com peso entre 500-600 kg (BATISTA *et al.*, 2019; BATISTELLI *et al.*, 2022; MIRANDA *et al.*, 2021), que é a média do peso de abate de bovinos no Brasil (Figura 18).



Figura 18: Sistema de produção bovina em sistema superintensivo.

Fonte: Compre Rural (2022)

No contexto da sustentabilidade, o Brasil possui um grande potencial de aumento de produção de alimentos pecuários de baixo carbono, principalmente através da intensificação de pastagens e confinamento de animais para abrir espaço para o setor agrícola produzir insumos bioenergéticos e ampliação de áreas florestais. Batista *et al.* (2019), Cardoso *et al.* (2016), Palermo *et al.* (2014) e Ziero *et al.* (2021) indicam que o país possui um grande potencial de ganhos de produtividade e redução de emissões de GEE e de demanda hídrica no processo de confinamento bovino, principalmente em regimes de produção superintensivos. Esse tipo de produção tem como foco principal o confinamento bovino logo após o processo de desmame animal, com implementação de rações com alto valor nutricional e proteico e com abates entre 16 e 24 meses, ao invés de 40 e 60 meses conforme é observado atualmente no Brasil (BATISTA *et al.*, 2019; BATISTELLI *et al.*, 2022; MIRANDA *et al.*, 2021).

A cabeça de gado produzida a partir da adoção de sistemas superintensivos tende a ter emissões anuais superiores se comparada com sistemas extensivos, principalmente se forem consideradas as emissões de CO₂ ao longo de toda a cadeia de produção dos insumos destinados à alimentação animal. Contudo, ao analisar todo o ciclo de vida da carne, esses animais, apesar de produzirem maiores quantidades de GEE anualmente, possuem taxas de engorda superior às dos sistemas extensivos, o que permite que possa

haver uma menor quantidade de animais vivos anualmente para a produção da mesma quantidade de carne final, o que gera menores emissões anuais de GEE provenientes do setor pecuário (BERNDT *et al.*, 2013; BRUNES, 2017; BRUNES 2014; CAPPER, 2012; MACIEL, 2019; MONTEIRO, 2009; PALERMO, 2011).

Isso acontece, principalmente, devido à relação direta entre o aumento da digestibilidade dos animais à medida que a quantidade de alimento concentrado é fornecida, o que diminui as emissões de CH₄ (ESTREMOTE, 2016; MCALLISTER *et al.*, 1996). Dessa forma, há uma menor emissão de CH₄ por kg de carne produzida em sistemas superintensivos quando comparada com os sistemas extensivos (ESTREMOTE, 2016; PEDREIRA *et al.*, 2004; PEDREIRA *et al.*, 2009). Conforme Berndt *et al.* (2013), Palermo (2011), Monteiro (2009), Maciel (2019) e Brune e Couto (2017), a redução média das emissões de CH₄ proveniente da produção em sistemas superintensivos em comparação com os sistemas extensivos varia entre 30 e 40%.

Uma vantagem dos sistemas confinados, principalmente dos superintensivos, que possuem um maior tempo de confinamento, é a possibilidade de aumentar o fator de coleta de fezes desses animais para aproveitamento energético ou simplesmente alterar a disposição final desse dejetos para reduzir as emissões de GEE da pecuária. Nesse tipo de sistema, o fator de coleta das fezes bovinas pode chegar a até 100%, o que não pode ser observado em sistemas extensivos, em que muitas vezes não há qualquer coleta desses dejetos, que são deixados no campo gerando CO_{2eq} (BRUNES 2014; PALERMO, 2011).

Ademais, de acordo com o IHS Markit (2021b), entre 2012 e 2021, o Brasil apresentou uma evolução de 16,5% na quantidade de gado produzido em sistemas de confinamento e semiconfinamento, saindo de cerca de 6,4 milhões de cabeças de gado para 7,4 milhões de cabeças. Esse número deve continuar a crescer, principalmente devido a incentivos do governo brasileiro por meio de políticas públicas como o Plano ABC+.

2.2.1.2.5 Enzimas na bovinocultura

A utilização de enzimas e algas inibidoras de metano na produção bovina tem sido cada vez mais percebida no Brasil. Esse tipo de suplemento é fornecido ao gado e auxilia tanto na digestão animal, quanto na redução da produção de metano no estômago dos ruminantes. Contudo, atualmente esse suplemento possui um custo elevado para o

produtor rural e ainda é necessária a implementação de sistemas confinados ou semiconfinados para a sua utilização. Isso ocorre devido à necessidade de observar se o animal realmente está consumindo o suplemento ou não, o que não é possível em um sistema extensivo (ALVES *et al.*, 2022; IHS MARKIT, 2021).

A produção de gado de corte e leiteiro são os maiores emissores de CH₄ do setor pecuário. Contudo, esse setor ganha destaque ainda maior visto o tamanho dos rebanhos de bovinos existentes no país, com mais de 224,6 milhões de cabeças de gado de corte e leiteiro (IHS MARKIT, 2021b)⁶. Isso faz com que esse setor não seja apenas o maior emissor de CH₄ da pecuária, mas também do setor agropecuário como um todo, totalizando cerca de 89% das emissões de CH₄ do setor agropecuário (Tabela 6) (ALENCAR *et al.*, 2022; SEEG, 2023).

⁶ É importante destacar que o número de cabeças de gado proveniente de IHS Markit (2021b) – 224,6 milhões de cabeças de gado – não se difere dos dados do LAPIG (2023) – 165 milhões de UA – pois a diferença está na unidade utilizada. A unidade UA representa uma cabeça de gado de 450 kg, enquanto a unidade “cabeças de gado” representa cada animal vivo, esteja ele em qualquer um dos estágios do seu desenvolvimento.

Tabela 6: Emissões de metano por subsetor e suas respectivas fontes entre o ano de 1990 e 2020.

FONTES DE EMISSÃO POR SUBSETOR	TENELADAS DE METANO POR ANO (1.000t CH ₄ /ANO)							% DE PARTICIPAÇÃO
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2020
Fermentação Entérica	10.096	11.051	11.156	13.158	13.161	13.178	13.320	91,6%
Gado de Corte	7.918	8.719	9.156	10.942	10.771	10.948	11.497	86,3%
Gado de Leite	1.764	1.910	1.656	1.858	2.030	1.856	1.412	10,6%
Equino	110	115	105	0	99	100	107	0,8%
Ovino	100	92	74	0	87	92	103	0,8%
Bubalino	0	90	0	0	65	75	83	0,6%
Caprino	59	56	47	52	47	48	61	0,5%
Suíños	34	36	32	34	39	40	41	0,3%
Muar	20	20	13	14	13	12	11	0,1%
Asinino	13	13	12	12	10	0	6	0,0%
Manejo de Dejetos de Animais	541	602	571	664	715	1	845	5,8%
Suíños	268	294	0	265	289	371	0	45,6%
Gado de Corte	176	195	207	249	244	249	262	31,0%
Gado de Leite	63	74	85	109	137	152	145	17,2%
Aves	11	15	0	20	25	27	30	3,5%
Equino	11	12	11	11	0	10	11	1,3%
Ovino	3	3	3	3	3	0	4	0,5%
Bubalino	2	0	2	2	2	2	3	0,3%
Caprino	3	2	2	2	2	0	3	0,3%
Muar	2	2	1	2	1	1	1	0,1%
Asinino	2	2	1	1	1	1	1	0,1%
Cultivo de Arroz	331	412	368	386	385	425	370	2,5%
Arroz	331	412	368	386	385	425	370	100,0%
Queima de Resíduos Agrícolas	0	42	37	49	43	14	8	0,1%
Cana-de-açúcar	37	42	37	49	43	14	8	100,0%
Algodão	4	0	0	0	0	0	0	0,0%
Total Geral	11.008	12.108	12.133	14.257	14.304	14.436	14.544	100,0%

Fonte: Alencar *et al.* (2022)

Assim como no setor de arroz irrigado, a utilização de enzimas é observada como um possível auxiliador para a diminuição das emissões de CH₄ e consequentemente de CO_{2eq}. Assim, devido a bovinocultura apresentar elevados níveis de emissões de CH₄, a implementação de enzimas no setor passa a ter um papel de protagonismo em cenários de neutralização climática, como proposto na NDC brasileira, de emissões líquidas zero de GEE a partir de 2050.

2.2.1.2.6 Enzimas na rizicultura

As enzimas também podem ser utilizadas no setor agrícola, principalmente em sistemas irrigados por inundação, como é o caso do arroz produzido na região Sul do Brasil. Nesse caso, as enzimas inibidoras de metanogênese – processo que ocorre durante o processo de decomposição de materiais orgânicos em ambientes anaeróbios – podem ser utilizadas na rizicultura por inundação devido o volume elevado de emissões de CH₄ existente nesse tipo de produção de arroz com alta produtividade (ZSCHORNACK, 2011).

No Brasil, o cultivo de arroz (rizicultura) se dá majoritariamente na região Sul brasileira, principalmente no estado do Rio Grande do Sul, onde a sua produção é feita em grande parte por meio de sistemas de plantio irrigado por inundação, representando cerca de 70% de toda a produção de arroz nacional (CONAB, 2023a). Esse tipo de cultivo, além de propiciar uma alta produtividade, também é responsável por emissões de CH₄, representando 2% de toda a emissão brasileira, face à atuação de bactérias metanogênicas em ambientes anaeróbios (LIMA *et al.*, 2012). É esperada uma expansão da rizicultura irrigada por meio da mudança dos sistemas de produção em cenários climáticos que limitem a emissão de GEE, visto o aumento da pressão sobre áreas agrícolas para a produção de biocombustíveis aliados à produção de bioenergia com captura e armazenamento de carbono (sigla em inglês BECCS – *BioEnergy with Carbon Capture and Storage*) (DE LIMA *et al.*, 2021; MCTI, 2022).

Dessa forma, a utilização de enzimas que diminuam as emissões de CH₄ na produção de arroz irrigado se torna importante.

Assim, o presente trabalho buscou focar na adoção de meios relevantes para a transição agropecuária nacional, como os supracitados, contudo, sabendo-se da existência de diversas outras maneiras para o desenvolvimento dessa transição.

2.2.2 Descentralização da produção e distribuição de alimentos

Conforme exposto por Pinto *et al.* (2020), no Brasil, em 2020, cerca de 73% de toda a área agrícola do país é ocupada por 10% dos maiores imóveis agropecuários, sendo que 25% de toda a terra agrícola nacional pertence a 0,3% dos proprietários rurais. Esses proprietários responsáveis por produções agrícolas que, em sua maioria, são

desenvolvidas através de sistemas de monoculturas, que são mais prejudiciais para o solo e reduzem drasticamente a biodiversidade local (HELFAND *et al.*, 2014; PINTO *et al.*, 2020). Já Helfand *et al.* (2014), expõe que, em 2006, no Brasil, cerca de 10% dos estabelecimentos rurais geraram 86% de todo o valor da produção agropecuária nacional. Em 2017, esse valor subiu para 89%, demonstrando uma crescente concentração da produção agropecuária brasileira tanto em termos de acúmulo de terras, quanto de riquezas oriundas delas (HELFAND *et al.*, 2020).

Ademais, em 2022, cerca de 40% de toda a produção agrícola brasileira estava localizada na região Centro-Oeste e 27% na região Sul (IBGE, 2023c), enquanto 34% da pecuária de corte está situada nas regiões Centro-Oeste e 24% na região Norte (IBGE, 2023a). Considerando apenas dados referentes às culturas alimentares, as regiões Sul e Centro-Oeste têm ganhado destaque principalmente na produção de feijão terceira safra e milho safrinha, na região Centro-Oeste, com 53% e 72%, respectivamente (IBGE, 2023a). Já na região Sul, o arroz, feijão segunda safra e trigo, com 83%, 52% e 91%, respectivamente (IBGE, 2023a). Contudo, as regiões Centro-Oeste, Norte e Sul são as que possuem as menores quantidades de habitantes, com 8%, 9% e 14%, respectivamente (IBGE, 2022b). Isso demonstra uma grande concentração da produção agropecuária brasileira principalmente na região Centro-Oeste, enquanto a maior parte da população se encontra na região Sudeste do país. Isso faz com que haja uma dependência exacerbada da segurança alimentar do Brasil em apenas uma única região, tornando-a altamente susceptível a crises alimentares em momentos de crise climática, o que tende a aumentar a frequência e os danos de eventos extremos.

Sistemas de produção que aproximem o produtor ao consumidor final – fazendo com que a produção de alimentos passe a ocupar áreas anteriormente abandonadas ou sem utilização, como nas coberturas dos prédios comerciais, nos perímetros urbanos e periurbanos – além de diminuir os níveis de perdas alimentares ao longo de toda a cadeia de produção, ainda reduzem os níveis de emissões de GEE dos alimentos e aumentam a segurança alimentar nacional (DESPOMMIER, 2013; HARRIS e KOUNTOURIS, 2020; IPCC, 2019; NABUURS *et al.*, 2022). A produção em sistemas disruptivos, conforme exposto na seção 2.2.1.2, como hortas urbanas, fazendas verticais e carnes alternativas são sistemas de produção de alimentos que, ao se aproximarem dos consumidores finais, tendem a apresentar ganhos no quesito de segurança alimentar

(DESPOMMIER, 2013; HARRIS e KOUNTOURIS, 2020; IPCC, 2019; NABUURS *et al.*, 2022).

Além disso, devido a haver uma maior descentralização dos sistemas produtivos, esses sistemas de produção tendem a auxiliar na redução das pressões do setor de produção de alimentos agropecuários sobre áreas de vegetação nativa, visto que parte desse setor pode passar a se localizar nos perímetros urbanos e periurbanos e não mais em zonas rurais. Ainda, sistemas de produção mais eficientes e que apresentam maior produtividade e menores níveis de emissões de GEE – como é o caso da agricultura vertical – também auxiliam nesse propósito, visto que diminuem a necessidade da abertura de novas terras para a produção de uma maior quantidade de alimentos e *commodities* agropecuárias. Assim, há uma importância na participação de tecnologias descritas nas seções 2.2.1.1 e 2.2.1.2.4, como a intensificação da produção de bovinos de corte, além da adoção de sistemas integrados.

2.2.3 Digitalização

A digitalização na transição agropecuária pode ser observada por dois vieses distintos. O primeiro, e mais usual, que é o da digitalização dos sistemas produtivos, através da produção agropecuária que integre sistemas digitais para o aumento da sustentabilidade e produtividade do campo. Já o segundo, é a digitalização da demanda, identificada por meio da vontade do consumidor em consumir produtos certificados, com rastreabilidade. É possível perceber a digitalização do setor agropecuário como uma maneira de aproximar a demanda do consumidor à produção do setor rural, visto a possibilidade de o consumidor, através de plataformas digitais, solicitar ao produtor os alimentos e insumos agropecuários que ele deseja, sem a necessidade de atravessadores ou varejistas, com comércio digital (MASSRUHÁ *et al.*, 2020).

2.2.3.1 Digitalização agropecuária na produção

Nos sistemas produtivos, atualmente, já é discutida a importância da agricultura digital, também conhecida, atualmente, como agricultura 4.0. Esse é um tipo de nomenclatura que busca expressar a ligação do setor agrícola com a indústria 4.0, que tem como viés a abordagem tecnológica do setor industrial. Dessa forma, a agricultura 4.0

busca aplicar sistemas mais tecnológicos para a produção de alimentos e *commodities* do setor agrícola para que, dessa forma, seja possível desenvolver uma agricultura mais eficiente, com maiores níveis de rentabilidade e ao mesmo tempo, mais sustentável. Esse processo é feito a partir da utilização de tecnologias que façam a análise e a utilização dos dados em tempo real, através da utilização de *softwares* ao longo da cadeia produtiva, desde o momento em que os insumos agrícolas são aplicados no solo, até a comercialização final do produtor rural, também denominado como “antes da porteira” (MASSRUHÁ *et al.*, 2020).

Na agricultura 4.0 é possível destacar alguns sistemas de produção com altos níveis de produtividade aliados à sustentabilidade, como é o caso da utilização de imagens de satélites e drones, associados a sistemas de informação geográfica (do inglês: *Geographic Information System – GIS*) para a identificação de áreas agrícolas com estresse hídrico ou com doenças e pragas em estágios iniciais (BARBEDO, 2018; MASSRUHÁ *et al.*, 2020). Dessa forma, é possível desenvolver a produção agrícola, fornecendo a quantidade ideal de nutrientes, defensivos químicos e água para que a planta possa desenvolver todo o seu potencial genético, método também conhecido como agricultura de precisão (Figura 19). Além disso, os sistemas GIS podem ser associados a implementos e maquinários agrícolas com inteligência artificial e automação adequados para que todos os processos, desde a preparação do solo até a colheita, sejam feitos de forma 100% mecanizada e utilizando maquinários autônomos. Essa automação é benéfica para a produtividade das lavouras devido a não cometerem erros de aplicação dos insumos agrícolas, o que auxilia na menor utilização de insumos químicos e, conseqüentemente, menores níveis de impacto sobre o meio ambiente e melhora nos níveis de emissão de GEE e produtividade, além de diminuir os gastos com insumos químicos (ARAÚJO *et al.*, 2021; CLERCQ *et al.*, 2018; MASSRUHÁ *et al.*, 2020).

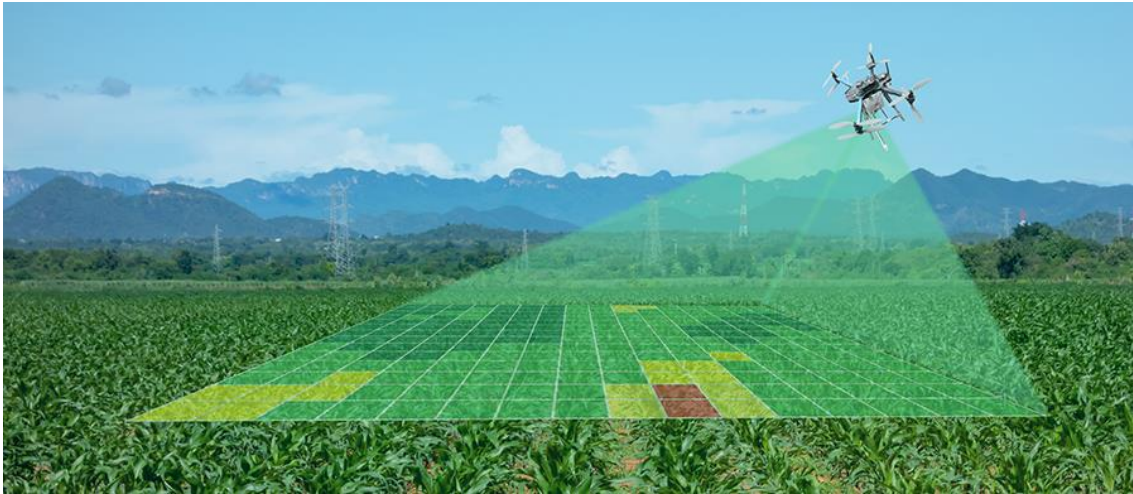


Figura 19: Agricultura de precisão.

Fonte: Embrapa (2020)

Ademais, a agricultura 4.0 ainda pode impactar ao longo de toda a cadeia de processamento e distribuição dos alimentos e commodities agrícolas, evitando desperdício e perda desnecessárias, além de melhorar o controle da qualidade dos produtos através de sistemas de monitoramento. Dessa forma, tornando mais eficiente o controle dos produtos agrícolas, suas quantidades e qualidades e, por consequência, melhorar os níveis de rentabilidade ao longo da cadeia de produção e distribuição agrícola, além de reduzir as emissões de GEE da cadeia produtiva e aumentando sua sustentabilidade (MASSRUHÁ *et al.*, 2020).

Já no setor de pecuária, a digitalização apresenta oportunidades tanto para criações em sistemas confinados quanto não confinados. Em relação os sistemas não confinados, principalmente no de bovinos de corte, a pecuária 4.0 foca em sistemas do tipo GIS com o auxílio de satélites e de drones para o controle da condição de pastagens saudáveis e com alta capacidade de produção de gramíneas para a engorda bovina. Além disso, na utilização de câmeras para o monitoramento do rebanho e identificação da saúde e bem-estar animal com sensores com diferentes níveis de espectro de análise. Isso está aliado a sistemas automatizados ou com a utilização de inteligência artificial para a realização das análises integradas das diferentes variáveis. Ademais, atualmente também são utilizados dispositivos eletrônicos individuais na forma de colares (Figura 20) que servem para o monitoramento de diversos tipos de indicadores, tanto para a determinação da produtividade, quanto para o bem-estar animal, e que são conectados diretamente com a internet para fazer a transmissão em tempo real para as centrais de coleta de dados

(ARAÚJO *et al.*, 2021; EASTWOOD *et al.*, 2021; MASSRUHÁ *et al.*, 2020; MORRONE *et al.*, 2022; YANO *et al.*, 2018).



Figura 20: Pecuária 4.0 – Colar de monitoramento.

Fonte: Neto (2021b)

Já no setor de pecuária confinada, a pecuária 4.0 possui, além dos mesmos mecanismos dispostos na pecuária não confinada, meios de controle tanto das condições de conforto térmico animal, quanto de outros sistemas para identificar os níveis adequados de luminosidade, ruído, ventilação, humidade e outros para fazer com que os animais possam se desenvolver de forma adequada. Há também sensores de tipo IoT (sigla em inglês de *Internet of Things* ou internet das coisas) associados a mecanismos de *machine-learning*, que auxiliam na análise individual dos animais para identificar possíveis mudanças de comportamento, possíveis períodos férteis das fêmeas e doenças que podem estar presentes no rebanho (EASTWOOD *et al.*, 2021; MASSRUHÁ *et al.*, 2020; MORRONE *et al.*, 2022).

2.2.3.2 Digitalização agropecuária na demanda

Pelo lado da demanda, a digitalização do setor agropecuário auxilia o consumidor final a ter suas vontades atendidas por meio de processos de certificação e de

rastreabilidade dos produtos do setor. As crescentes demandas dos consumidores, que preferem produtos mais sustentáveis, com menores níveis de emissões, maior preocupação com o meio ambiente e com o bem-estar animal, e que ao mesmo tempo propiciem uma maior segurança alimentar, têm impulsionado a transformação da agropecuária brasileira rumo à agropecuária 4.0 (BOLFE *et al.*, 2020; BOLFE e MASSRUHÁ, 2020; BRASIL, 2021; MASSRUHÁ *et al.*, 2020; SOUZA, 2021).

Dessa forma, o setor tem ampliado a utilização de sistemas de rastreabilidade utilizando muitas vezes sistemas do tipo *blockchain*, para que o consumidor possa identificar todos os passos que o alimento fez desde o produtor até chegar ao consumidor final. Assim, é possível também detalhar todos os sistemas produtivos que foram utilizados para a produção dos alimentos e, no caso da pecuária, as condições de conforto e estresse animal. Logo, também é possível identificar todo o deslocamento do produto até chegar à mesa do consumidor, todos os sistemas de produção e insumos utilizados e até mesmo informações de cunho social e ambiental provenientes de cada elo percorrido por esse produto ao longo da cadeia de produção e processamento alimentar (BOLFE *et al.*, 2020; BOLFE e MASSRUHÁ, 2020; BRASIL, 2021; MASSRUHÁ *et al.*, 2020; SOUZA, 2021).

2.2.4 Desenho de mercado

A transição agropecuária apresenta grandes vantagens tanto para o produtor rural – maior resiliência dos sistemas produtivos e produto com maior valor agregado –, quanto para os consumidores – que passam a receber um produto mais sustentável e com um maior nível de rastreabilidade – e para os governos – menores emissões do setor agropecuário assim como menores pressões sobre zonas de vegetação natural, além de auxiliar no PIB devido a melhora da imagem dos produtos locais. Contudo, para isso acontecer é necessário que todos esses sistemas passem a trabalhar juntos e que demonstrem disposição para mudanças estruturais dos sistemas produtivos, dos hábitos de consumo e das estruturas fiscais e econômicas existentes (BRASIL, 2021; MAPA e CBI, 2021).

Dessa forma, para haver uma transição agropecuária adequada, é necessário haver investimentos e incentivos financeiros e fiscais por parte dos governos para os produtores rurais, visto que a implementação de sistemas de produção mais sustentáveis e disruptivos

necessitam de investimentos iniciais elevados. Além disso, também é necessário haver a implementação de ações que estimulem a adoção de sistemas produtivos que sejam capazes de produzir de forma sustentável e em larga escala. Para isso, é importante investir tanto na formação de profissionais qualificados, quanto em complexos industriais que sejam capacitados para fornecer insumos para as medidas tecnológicas necessárias para o desenvolvimento desse novo tipo de agropecuária (BRASIL, 2021; MAPA e CBI, 2021; MARTINEZ-FERNANDEZ *et al.*, 2010; PRAUSE, 2021).

Atualmente, um exemplo importante desse tipo de política pública implementada pelo governo brasileiro é o Plano ABC+, que determina metas e formas de incentivos para o desenvolvimento de sistemas de produção mais eficientes e sustentáveis, como os sistemas integrados, plantio direto, pecuária extensiva em pastagens recuperadas, sistemas de confinamento de gado de corte e outros. De acordo com Brasil (2022), o plano ABC+ contará com investimentos de cerca de R\$ 6,2 bilhões até 2030, com taxas médias de juros entre 7-8,5% ao ano. Com a introdução desse tipo de plano governamental de longa duração, é possível que haja investimento público, através dos bancos públicos, para financiar a implementação desse tipo de sistemas no território brasileiro (BRASIL, 2021; MAPA e CBI, 2021).

Ademais, é necessário haver na transição agropecuária a diminuição dos níveis de perdas e desperdício de alimentos, tanto por parte do produtor rural quanto do consumidor final e dos demais elos da cadeia de produção de alimentos. Atualmente, no Brasil, são perdidos cerca de 16% dos alimentos produzidos no campo ao longo de toda a cadeia de produção e 28% dos alimentos que não são perdidos são desperdiçados pelo consumidor final (EMBRAPA, 2019, UNITED NATIONS, 2023). Esse nível excessivo de perdas e desperdício de alimentos é prejudicial para o meio ambiente, visto que ao serem descartados esses alimentos geram GEE e tornam necessária a produção de mais alimentos para suprir aqueles que foram descartados. Dessa forma, há a necessidade de expandir a quantidade de terras destinadas para a produção agropecuária e de aplicar maiores quantidade de água e insumos químicos no solo para produzir essa quantidade de alimentos que será perdida. Também é ruim para o consumidor, visto que com a diminuição da oferta de alimentos, seus preços tendem a subir para o consumidor final, gerando uma menor segurança alimentar para a população de baixa renda (FAO, 2014; MUTH *et al.*, 2019; SKAWIŃSKA e ZALEWSKI, 2022).

2.2.5 Democratização

A democratização do direito de todas as pessoas, não importando a classe social, terem acesso a alimentos de qualidade em quantidades apropriadas é algo indispensável para se realizar a transição agropecuária de forma adequada. Assim como acontece com a transição energética, a qual muitas vezes a parcela mais rica da sociedade é a que tem a capacidade de usufruir de fontes limpas e renováveis de energia elétrica, também acontece na transição agropecuária, visto o valor elevado de produtos mais sustentáveis, como por exemplo os alimentos orgânicos (GORDILLO e JERÓNIMO, 2013; LOCKS *et al.*, 2023; CIFUENTES e FIALA, 2022; WINDFUHR e JONSÉN, 2005).

Contudo, diferentemente do que acontece na transição energética – que apesar dos mais pobres não terem acesso às fontes energéticas mais limpas, eles ainda podem ter acesso à energia, só que mais poluente – a transição agropecuária se não for planejada de forma adequada pode gerar o encarecimento de todos os alimentos. Em cenários de mudanças climáticas até 2100, os níveis de insegurança alimentar devem aumentar à medida que a temperatura global aumente. Isso ocorre devido a deslocamentos de culturas alimentares para outras regiões em função de fatores edafoclimáticos, como mudanças nos regimes de chuvas e temperaturas excessivas para o desenvolvimento de certas culturas alimentares. Também está ligado a fatores agrícolas, como a utilização de uma maior quantidade de terras agrícolas para a produção de culturas energéticas. Ademais, os sistemas de produção sustentável do setor agropecuário atualmente possuem custos de investimento e de produção superiores aos sistemas de produção tradicionais, o que pode acabar gerando aumentos excessivos nos custos dos alimentos. Além de haver o problema da taxaçoão de carbono no setor alimentar, o que também é um agravante para a elevação dos preços dos alimentos (FUJIMORI *et al.*, 2018; HASEGAWA *et al.*, 2020).

Dessa forma, é necessário o desenvolvimento de ações políticas focadas no contexto socioambiental para diminuir as chances de primeiramente aumentar a insegurança alimentar e reduzir o acesso da população mais carente a fontes de alimentos saudáveis e sustentáveis. O desenvolvimento de hortas urbanas com o intuito de produção e distribuição em comunidades carentes e escolas públicas é um meio de promover a democratização social do consumo de alimentos saudáveis e com baixos níveis de fertilizantes e defensivos químicos (GORDILLO e JERÓNIMO, 2013; LOCKS *et al.*, 2023; CIFUENTES e FIALA, 2022; WINDFUHR e JONSÉN, 2005).

Portanto, destaca-se a importância de incentivos fiscais e econômicos governamentais para a inclusão rural, o desenvolvimento do conhecimento e assistência técnica para a produção em pequena escala, por meio de pequenos produtores rurais e fortalecimento da agricultura familiar, principalmente se esse tipo de produção em pequena escala estiver associado a produção de orgânicos ou sistemas agroecológicos e integrados de produção agropecuária. Esse tipo de incentivo por parte dos governos é importante para haver uma diminuição dos custos de produção e logística da produção agropecuária e assim, fazer com que seja possível garantir a segurança alimentar da população mais carente ao mesmo tempo da democratização do consumo desses produtos sustentáveis (GORDILLO e JERÓNIMO, 2013; LOCKS *et al.*, 2023; CIFUENTES e FIALA, 2022; MARTINELLI e CAVALLI, 2019; WINDFUHR e JONSÉN, 2005)

3 METODOLOGIA

A metodologia foi dividida em quatro subseções: Modelo BLUES, que busca detalhar o modelo BLUES antes das modificações desenvolvidas no decorrer deste trabalho; Módulo de Solo, que busca explicar e detalhar as alterações feitas no módulo de cobertura do solo do modelo; Módulo Agropecuário, destinado às alterações das tecnologias de produção agropecuárias do BLUES; Módulo de Demandas, que detalhará as modificações feitas no modelo BLUES para expandir as narrativas de perdas e resíduos de alimentos; e, Por fim, serão apresentados os cenários que foram desenvolvidos para realizar as análises sobre a transição energética em diferentes contextos climáticos. É importante destacar que devido à complexidade e interdependência entre os módulos e submódulos do modelo BLUES, buscou-se fazer ao longo de toda a seção metodológica apresentações de conteúdos que foram ou ainda serão discutidos entre os três submódulos supracitados.

3.1 Modelo BLUES

O modelo BLUES (*Brazilian Land Use and Energy System model*) que era inicialmente conhecido como Message Brazil, MSG300 e MSB8000, surgiu em 2006 e é o resultado de diversas contribuições para sua evolução de integrantes do laboratório Cenergia, como por exemplo Lucena (2010), Borba (2012), Koberle (2018), Vázquez-Arroyo (2018), Angelkorte (2019), da Silva (2020) e Baptista (2020). O modelo passou a nomenclatura “BLUES” a partir de 2018 com a tese de Koberle (2018), com a adição do setor de AFOLU no modelo MSB8000. Desde então, ele tem sido constantemente atualizado, por exemplo por Angelkorte (2019), módulo de uso do solo, da Silva (2020), poluição atmosférica, Baptista (2020), narrativas de trajetórias dos sistemas socioambientais e econômicos, setor industrial e de transportes, Moraes (2021), resíduos agropecuários e Vázquez-Arroyo (2018), módulo hídrico, Müller-Casseres *et al.* (2021), combustíveis e transporte marítimo e de Oliveira *et al.* (2021), biomateriais.

Ele é um modelo brasileiro de otimização, desenvolvido em plataforma MESSAGE (*Model for Energy Supply System Alternatives and their General Environmental impacts*), cuja função objetivo é a minimização dos custos totais do sistema (ANGELKORTE, 2019; BAPTISTA, 2020; DA SILVA, 2020; DIUANA, 2022; KÖBERLE, 2018; VÁSQUES-ARROYO, 2018). Ademais, é um modelo técnico-

econômico de otimização inteira mista com informações perfeitas (*perfect foresight*) em relação a futuras condições técnico-econômicas e políticas, desenvolvido para avaliar diferentes tipos de estratégias (energéticas, climáticas, ambientais, de uso do solo e outras) para atendimento de demandas exógenas (ANGELKORTE, 2019; BAPTISTA, 2020; DA SILVA, 2020; KÖBERLE, 2018; VÁSQUES-ARROYO, 2018).

O modelo possui seis regiões, sendo cinco representando cada sub-região brasileira e uma, o Brasil. A otimização dos cenários acontece de forma conjunta entre todos os módulos (energia, transportes, industrial, residencial e serviços e AFOLU), em *hard-link*, entre os anos de 2010 e 2060, em intervalos de 5 anos. Há uma busca para minimização dos custos do sistema como um todo, além de atender as restrições ambientais, técnicas e econômicas de acordo com cada cenário desenvolvido (ANGELKORTE, 2019).

Ademais, o modelo possui conexões indiretas, *soft-link*, com os modelos globais COFFEE e TEA, de forma que eles permitem a alteração de demandas exógenas (alimentos, serviços, energéticos e outros) e orçamento de carbono de acordo com diferentes cenários globais. Dessa forma, observando o setor de AFOLU, os modelos COFFEE e TEA alteram as demandas brasileiras por produtos agropecuários, modificando o submódulo de Demandas do AFOLU. Além disso, o módulo de AFOLU ainda possui outros dois submódulos, Agropecuário, que contém os sistemas de produção do setor agropecuário, e o Solo, que é responsável pelas coberturas do solo e suas transições **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, conforme será explicado posteriormente (Figura 21) (ANGELKORTE, 2019; CUNHA *et al.*, 2020; KÖBERLE, 2018; ROCHEDO, 2016).

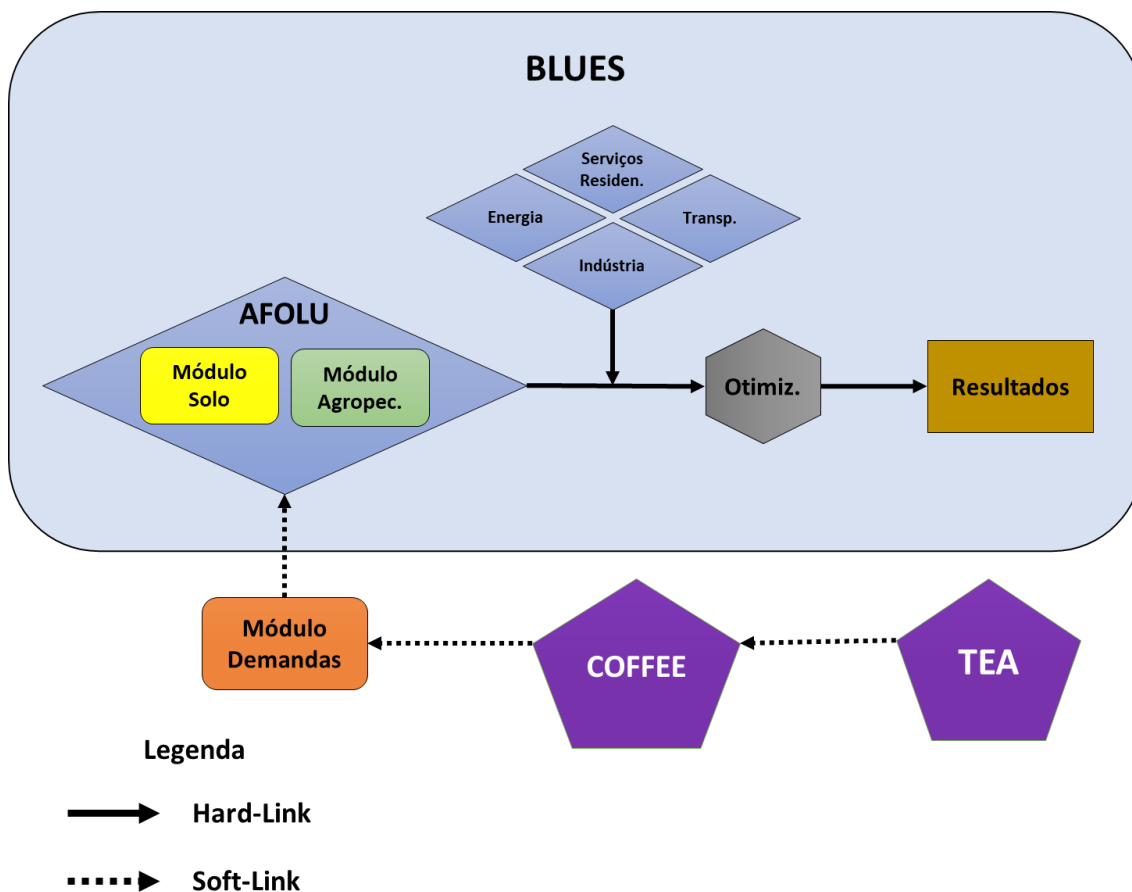


Figura 21: Estrutura do módulo de AFOLU e do modelo BLUES.

Fonte: Elaboração própria

O modelo possui os principais produtos agrícolas do Brasil seguindo a especificação definida pela FAO, conforme apresentado na Tabela 7 (KÖBERLE, 2018). Essas culturas são divididas entre alimentares, que precisam ser produzidas para atender a uma demanda exógena por alimentos para consumo regional e exportação, culturas bioenergéticas, produzidas para atender a uma demanda endógena do modelo, e culturas híbridas, para atender tanto a demandas exógenas (alimentares) quanto endógenas (energéticas) do BLUES. Além disso, o modelo ainda possui os principais produtos pecuários nacionais (Tabela 7 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), que são produzidos de forma a atender uma demanda exógena de alimentos destinados à exportação e consumo nacional.

Tabela 7: Produtos agropecuários proveniente das demandas exógenas do modelo BLUES.

PRODUTOS AGROPECUÁRIOS		
AGRICULTURA	PECUÁRIA	PROCESSADOS
Algodão	Outras Carnes	Açúcar
Arroz	Carne Bovina	Manteiga
Café	Gordura Animal	Óleo de Milho
Cana-de-Açúcar	Leite	Óleo de Soja
Castanhas	Ovos	Óleo – Outros
Cereais		
Feijões		
Frutas		
Madeira		
Milho		
Oleaginosas		
Raízes		
Soja		
Trigo		
Vegetais		

Fonte: Elaboração própria

Para atender essas demandas exógenas e endógenas do BLUES, o modelo possui diferentes tecnologias de produção agropecuárias, dispostas em 42 tipos de cultivo agrícola: 16 de culturas com cultivo simples, monoculturas, com sistemas de produção tradicionais e com insumos e produtividades regionalizados; 12 de culturas de cultivo em monoculturas produzidas através de sistemas de alta produtividade, com altos níveis de insumos e irrigação em 100% da área plantada; 12 de culturas de cultivo em monoculturas em sistemas orgânicos, sem a utilização de insumos químicos; e 2 de culturas em cultivos duplos, com a possibilidade de produzir na mesma área dois tipos de cultivos (ANGELKORTE, 2019).

Além disso, o modelo possui 4 tipos de produções pecuárias: gado de corte; gado leiteiro; galinhas poedeiras e; outros animais de corte. A categoria outras carnes, presente no modelo BLUES – versão desenvolvida por Koberle (2018) e atualizado por Angelkorte (2019) – representa a produção de outros criações da pecuária. Contudo, devido ao modelo ter como unidade de trabalho a quantidade de cabeças de animais, esse sistema produtivo acaba representando apenas a produção de frangos de corte e não as demais criações, como a de suínos (que foram adicionados durante o processo de elaboração deste trabalho). A avicultura brasileira representa cerca de 95% de todas as cabeças de animais

(excluindo gado de corte) (ANGELKORTE, 2019). As criações bovinas foram divididas em duas tecnologias de produção, uma em pastagens degradadas, que possuem menores níveis de taxa de lotação e de abate, e em pastagens saudáveis, com maiores taxas de lotação e de abate.

Assim, o modelo BLUES – na versão desenvolvida por Angelkorte (2019) – possui quatro grupos de tecnologia para a produção agropecuária: Padrão Histórico, Orgânicos, Alta Produtividade e Dupla Safra (Figura 22). As tecnologias de produção agropecuária pertencentes ao grupo Padrão Histórico podem ser consideradas como a representação dos sistemas produtivos utilizados atualmente no setor agropecuário nacional. Assim, representando os sistemas de produção atuais para cada uma das regiões do modelo BLUES, com níveis de implementação de fertilizantes, defensivos químicos, consumo de água para irrigação, níveis de tecnificação/mecanização, custos, produtividade e emissões encontrados atualmente no país. Assim, se uma região brasileira apresenta sistemas produtivos de alta produtividade e sem a adição de irrigação, enquanto outra região tem um perfil tecnológico diferente, com menor produtividade, os coeficientes de entrada de dados do modelo para esse sistema produtivo serão também diferentes no modelo BLUES. Um exemplo disso é a produção de soja na região Centro-Oeste brasileira, que possui sistemas de produção com altas produtividades e sem a necessidade de adição de irrigação, visto a condições edafoclimáticas adequadas para a sua produção, enquanto o mesmo não acontece na região Nordeste, que necessita de volumes elevados de irrigação para sua produção (ANGELKORTE, 2019).

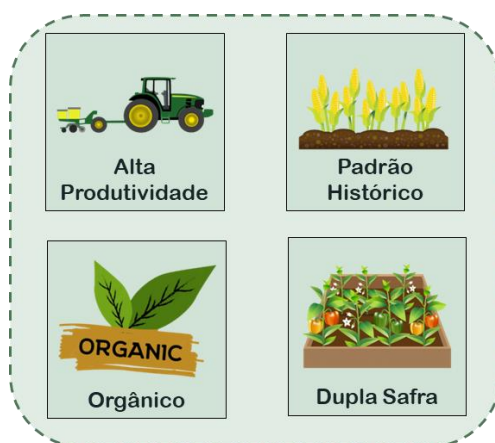


Figura 22: Grupos tecnológicos de sistemas de produção agropecuária existentes no modelo BLUES, versão Angelkorte (2019).

Fonte: Elaboração própria

Dessa forma, para o setor agrícola, o grupo de tecnologias do Padrão Histórico representam tanto sistemas de produção à plantio direto, proveniente da soja com alta produtividade na região Centro-Oeste, quanto à sequeiro, conforme o arroz de baixa produtividade da região Sudeste. Já no setor pecuário, esse grupo tecnológico produz o gado de corte em sistemas extensivos em pastagens degradadas e o mesmo gado de corte em sistemas extensivos em pastagens saudáveis, alterando apenas a qualidade e nível de degradação do solo, que é representado pelas coberturas do solo (Angelkorte, 2019).

Já os sistemas de produção agropecuária desenvolvida através de tecnologias do grupo Alta Produtividade, foram implementadas por Angelkorte (2019) de modo a representar os sistemas com o maior nível de produtividade possível. Isso sendo feito através da implementação das condições adequadas de mecanização, insumos químicos e água para irrigação, de modo que as culturas pudessem expressar todo o seu potencial genético. Dessa forma, os sistemas produtivos proveniente das tecnologias Alta Produtividade possuem 100% da área plantada sendo irrigada, sistemas produtivos avançados – como plantio direto, utilização de drones e agricultura de precisão – e com aportes superiores de fertilizantes e defensivos químicos se comparado com os sistemas produtivos do grupo tecnológico Padrão Histórico (ANGELKORTE, 2019).

Contudo, como alguns sistemas produtivos do Padrão Histórico já possuem alta produtividade, como a soja da região Centro-Oeste, o aumento no aporte de fertilizantes, defensivos químicos e água para irrigação da soja dessa região, na tecnologia Padrão Histórico, terá uma menor variação em relação a Alta Produtividade do que se comparar esses sistemas mesmos sistemas produtivos da região Nordeste. Isso porque a região Nordeste possui, na Padrão Histórico, produz uma soja com produtividades baixas, necessitando de uma maior introdução de água, fertilizantes e defensivos químicos para se produzir em sistemas de alta produtividade (ANGELKORTE, 2019).

A produção através de sistemas produtivos do grupo de tecnologias do padrão Orgânicos implementados no BLUES – versão desenvolvida por Angelkorte (2019) – representa uma migração dos sistemas intensivos na utilização de insumos químicos para sistemas de produção com a utilização exclusiva de insumos orgânicos. Contudo, conforme explicado por Angelkorte (2019), os sistemas de produção provenientes do grupo Orgânicos, também possuem níveis de produtividade elevados, mas que passam a aproveitar resíduos agropecuários para a geração de fertilizantes e defensivos orgânicos

para auxiliar na produção agrícola. Os processos de produção desses insumos orgânicos estão descritos de forma mais detalhada por Angelkorte (2019) e Morais (2021).

Já os sistemas de produção agrícola proveniente do grupo tecnológico Dupla Safra, representa a produção alternada em forma de rodízio de área agrícola entre duas culturas, uma de verão e outra de inverno. Conforme descrito por Koberle (2018) e Angelkorte (2019), esse sistema tem como predominância a alternância entre a produção de soja com uma cultura não leguminosa, como milho e trigo. Assim, diminuindo a necessidade da utilização de volumes elevados de defensivos químicos e de fertilizante nitrogenado, visto que a soja, durante o seu desenvolvimento, já realiza o processo de fixação de nitrogênio no solo. Auxiliando tanto na produtividade da área, quanto na diminuição dos níveis de emissão de GEE (ANGELKORTE, 2019).

Para o desenvolvimento de cada um dos sistemas produtivos de cada cultura/criação do setor agropecuário, são atrelados dados de entrada e de saída para que o modelo BLUES possa fazer a otimização do modelo (ANGELKORTE, 2019). Assim, cada um dos sistemas produtivos, de cada grupo tecnológico e região possuem dados de: custo, emissão de GEE, defensivos químicos ou orgânicos, fertilizantes químicos ou orgânicos, produtividade, água destinada para irrigação, nível de mecanização e potencial de expansão de cada sistema produtivo (Figura 23) (ANGELKORTE, 2019). Ademais, como os grupos tecnológicos Alta Produtividade e Orgânicos, tentem a representar uma evolução dos sistemas de produção tradicionalmente já implementados no território brasileiro nos anos base (2010, 2015 e 2020) do modelo BLUES, eles só podem ser escolhidos pelo menos a partir do primeiro ano não base do modelo, que é 2025 (ANGELKORTE, 2019).



Figura 23: Dados necessários para o desenvolvimento dos sistemas de produção do setor agropecuário do modelo BLUES.

Fonte: Elaboração própria

Além desses quatro grupos de tecnologias para produção agropecuária, o modelo BLUES também possui três tecnologias de produção a partir de sistema integrado, que é o de gado (corte e leiteiro) com milho, o de gado (corte e leiteiro) com milho e soja e o de gado (corte e leiteiro) com milho, soja e florestas plantadas. Em todos os casos, a mesma área é responsável pela produção dessas combinações de criações/cultivos agropecuários (ANGELKORTE, 2019). Contudo, esses sistemas produtivos não apresentavam níveis importantes de penetração visto à problemas de implementação que serão detalhados posteriormente.

As tecnologias de produção agropecuárias do modelo BLUES dependem inicialmente de áreas destinadas para a produção agrícola e pecuária no modelo. Para isso, ocorre uma quantificação nos anos base (2010, 2015 e 2020) da quantidade de cada tipo de cobertura do solo existente no Brasil e classificados em 8 coberturas representativas (Figura 24): Floresta, Savana, Pasto Degradado, Pasto Saudável, Áreas Agrícolas de Monocultura, Áreas Agrícolas de Cultivo Duplo, Floresta Plantada e Sistemas Integrados. As coberturas do solo podem alterar as áreas entre si em processos de transição de cobertura do solo entre os períodos do modelo (cinco em cinco anos). Contudo é necessário haver investimentos, custos e outros recursos aplicados para essas transições se desenvolverem no modelo, além de haver emissões de GEE atreladas à essas mudanças de cobertura do solo (ANGELKORTE, 2019).

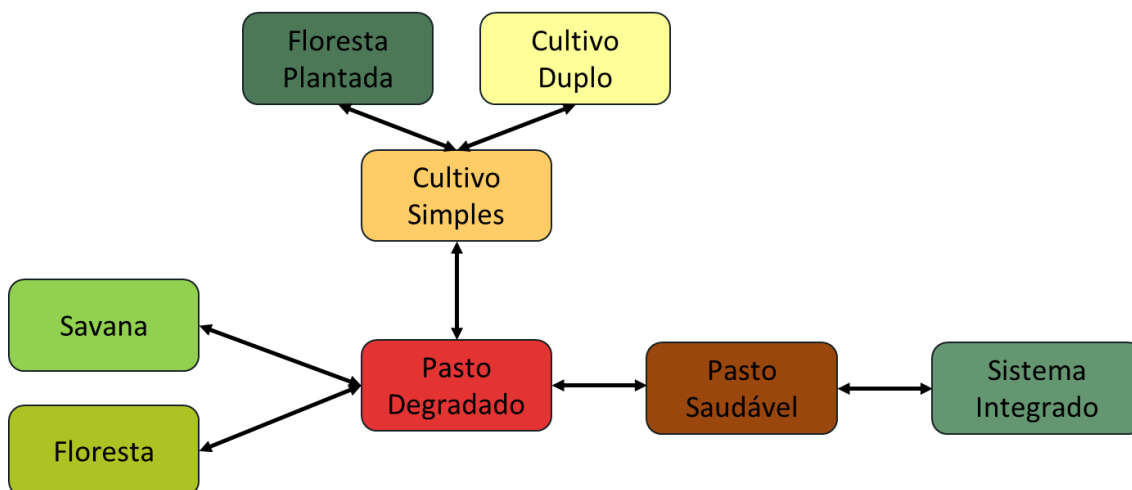


Figura 24: Transições das coberturas do solo do BLUES.

Fonte: Adaptado de Angelkorte (2019)

Dessa forma, a produção agrícola do modelo BLUES demanda áreas agricultáveis de coberturas do solo do tipo: Cultivo Duplo, Cultivo Simples, Sistemas Integrados ou Floresta Plantada. Já a produção pecuária pode ser feita em coberturas do solo do tipo: Pasto Degradado, Pasto Saudável ou Sistemas Integrados. Para haver a expansão dessas coberturas do solo, é necessário ocorrer a migração entre áreas destinadas à agropecuária ou, então, diminuir áreas de vegetação nativa (Florestas e Savanas) (ANGELKORTE, 2019).

3.2 Módulo de Solo

Nessa seção serão descritas as partes mais importantes do módulo de cobertura do solo do modelo BLUES, as modificações que foram feitas para o desenvolvimento desse trabalho, o detalhamento dos motivos para essas modificações e alguns dos resultados antes do processo de implementação no modelo BLUES.

Conforme já destacado anteriormente, o modelo BLUES é um modelo não espacialmente explícito ou georreferenciado, porém, semi-dividido em seis macrorregiões: uma é o próprio Brasil e as demais, são divisões das regiões do país. Assim, todos os agentes da paisagem têm impacto direto nos resultados do modelo. Diferentemente de modelos espacialmente explícitos, que conseguem determinar a partir de sobreposições de camadas de imagens em programas de georreferenciamento as

coberturas do solo (floresta, área agrícola, pastagens e outros), os potenciais produtivos do solo (através de aspectos edafoclimáticos) e outros fatores, os modelos não espacialmente explícitos necessitam desenvolver solos médios para cada região para representar esses fatores (ANGELKORTE, 2019, KÖBERLE, 2018).

No BLUES, para o desenvolvimento dos solos médios, foram utilizados dados de cobertura do solo, produtividade do solo e tempo de deslocamento entre o local de produção até o centro de escoamento mais próximo (grandes cidades e/ou portos). A partir da sobreposição das camadas georreferenciadas desses dados, foram desenvolvidos sete tipos de solos médios para cada região, divididos entre solos de A até G, onde o solo A possui maior produtividade e proximidade de centros de distribuição, e o solo G com menor produtividade e maior distância até centros de distribuição. Além disso, cada *pixel* é determinado como 100% de um dos tipos de solo e com fator de utilização de 100% de toda a área do *pixel* (KÖBERLE, 2018).

Com isso, cada região do BLUES possui quantidades definidas de hectares de solos do tipo A até G. Ademais, essas áreas de solos possuem quantidades iniciais determinadas de coberturas do solo que vão de florestas nativas até pasto degradado, podendo sofrer transformações entre si de acordo com a figura da mudança de cobertura do solo. Contudo, sempre se preservando a proporção inicial de tipos de solo (A-G) durante as transições. É importante salientar que cada cobertura do solo possui diferentes níveis de estoque de carbono e assim, as suas transições acarretam emissões ou absorções de carbono. Além disso, as variações dos tipos de solo médios interferem diretamente na produtividade e custos de cada tipo de sistema de produção agropecuário, que será apresentado posteriormente na seção 3.3 (ANGELKORTE, 2019, KÖBERLE, 2018).

Dessa forma, foi importante avaliar a necessidade da expansão da quantidade de coberturas de solo representativas do modelo para a introdução de novas tecnologias de produção agropecuárias, o que será discutido na próxima seção, de acordo com os estoques de carbono no solo. Assim, quando uma nova tecnologia de produção agropecuária necessitou de coberturas do solo que tivessem estoques de carbono diferentes de coberturas de solo já existentes, foi necessária a modificação ou implementação de novas coberturas do solo.

Essa alteração das coberturas do solo ocorreu apenas para a implementação das tecnologias de produção dos sistemas integrados e agroflorestais. De acordo com Nobre *et al.* (2018), os sistemas integrados e agroflorestais possuem estoques de carbono

superiores a outros tipos de sistemas de produção agropecuários por esses sistemas conterem diferentes tipos de culturas sendo implementados em uma mesma região. Dessa forma, existe uma variação nos tipos de sistemas radiculares na área, gerando uma maior diversificação de profundidades e zonas em que as raízes atingem na região e armazenando mais carbono no solo do que se comparado com sistemas de monoculturas. Esse processo acontece principalmente se considerarmos sistemas agroflorestais que possuem a implementação de árvores, nativas ou comerciais, que atingem profundidades maiores quando comparados com cultivos tradicionais de culturas alimentares ou energéticas (NOBRE *et al.*, 2018).

Assim, foi necessário ampliar o número de coberturas do solo representativas do modelo BLUES, expandindo a antiga cobertura do solo Sistemas Integrados, em duas novas coberturas do solo e refazendo o já existente, a saber: o novo Sistemas Integrados, que passou a conter apenas os sistemas integrados do tipo Integração Lavoura-Pecuária (ILP); Agroflorestas Comerciais, com sistemas integrados contendo o fator florestal com florestas comerciais/plantadas (eucalipto e pinus), como Integração Lavoura-Floresta (ILF), Integração Pecuária-Floresta (IPF) e Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF); e, Agroflorestas Nativas, com sistemas integrados contendo o fator florestal com florestas nativas, como Integração Lavoura-Floresta (ILF), Integração Pecuária-Floresta (IPF) e Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF). Os dados mais detalhados sobre o desenvolvimento dessas tecnologias de forma regionalizada e as referências para esse desenvolvimento será exposto posteriormente no trabalho.

Desse modo, cada cobertura do solo passou a ter diferentes estoques de carbono abaixo e acima do solo, sendo a cobertura do solo Agroflorestas Nativas (ILPFn) a que possui o maior estoque de carbono. Isso ocorreu visto que, além de possuir maiores estoques de carbono abaixo do solo quando comparado com a cobertura do solo Sistemas Integrados, ainda possui estoque de carbono acima do solo superior ao de Agroflorestas Comerciais, devido ao material celulósico das florestas nativas. Esse estoque de carbono acima do solo só foi considerado na cobertura do solo Agroflorestas Nativas uma vez que apenas esse tipo de cobertura garante que o carbono estocado em forma de tronco será mantido por longos períodos (maior do que 100 anos). A Agrofloresta Comercial (ILPFc), apesar de também estocar carbono no material celulósico da madeira do tronco do pinus e eucalipto, terá uma retirada da região de crescimento quando essa madeira for comercializada, não garantindo o tempo mínimo de permanência desse carbono na região.

A Figura 25 apresenta a nova representação do módulo de coberturas de solo, bem como suas transições atualizada no modelo BLUES.

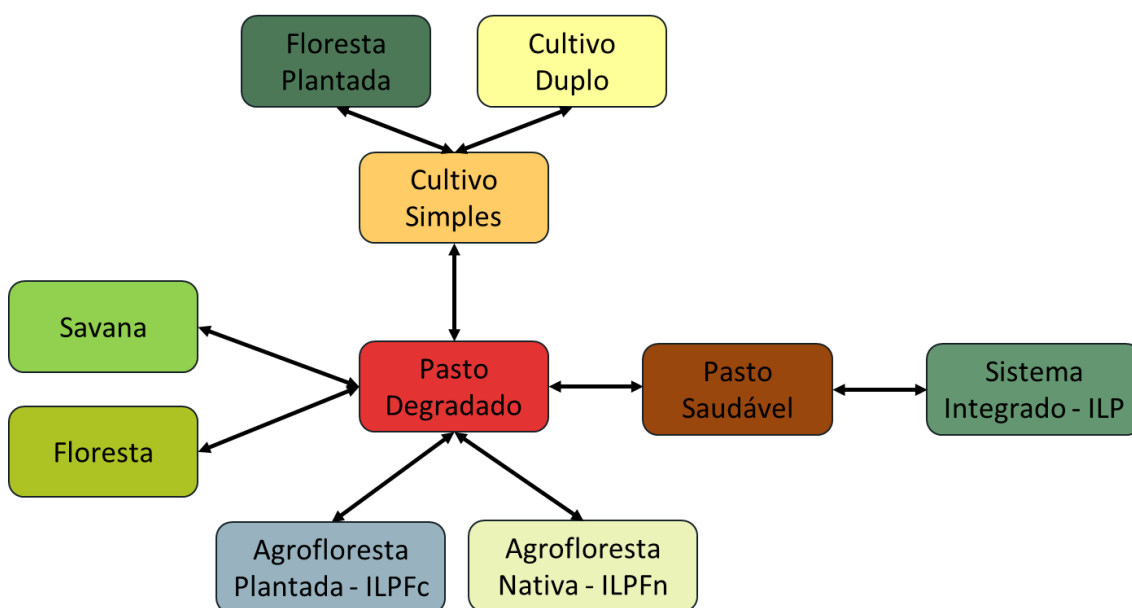


Figura 25: Nova representação do módulo de coberturas do solo e suas transições no BLUES.

Fonte: Elaboração própria

Foram utilizados dados de Salton *et al.* (2013) e Sato *et al.* (2019) para a realização dessa estimativa de estoque de carbono para as novas coberturas de solo supracitados. Além disso, foram considerados dados já desenvolvidos por Koberle (2018) sobre o estoque de carbono de monoculturas, sistemas de cultivo duplo e florestas plantadas e nativas para realizar a parametrização dos resultados de cada uma das novas coberturas do solo. O comparativo das diferenças de estoques de carbono abaixo e acima das coberturas do solo - novas e antigas - para a região Norte do Brasil podem ser encontrados na Figura 26.

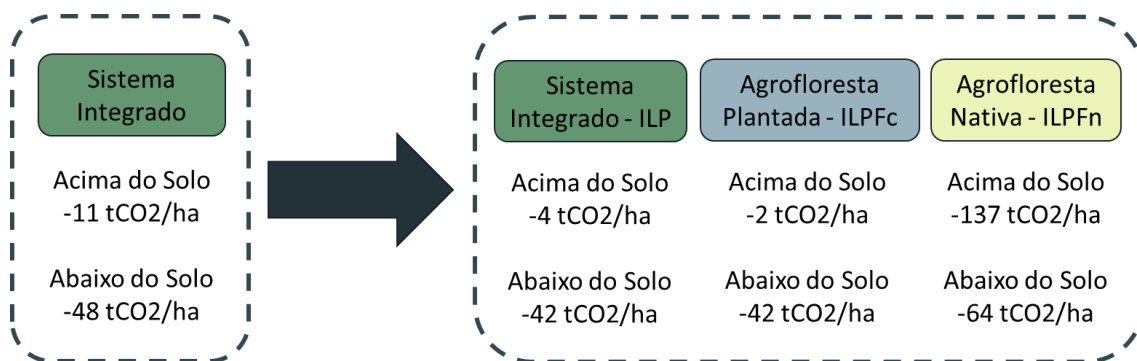


Figura 26: Comparativo das diferenças de estoque de carbono abaixo e acima do solo da antiga e das novas transições de cobertura do solo dos sistemas integrados proveniente da região Norte do modelo BLUES.

Fonte: Elaboração própria

Também foram feitas verificações no estoque de carbono nas demais coberturas do solo do modelo BLUES e suas transições. O modelo BLUES desenvolvido por Koberle (2018) e atualizado por Angelkorte (2019), considera que a mudança de cobertura do solo entre pastagem degradada para floresta nativa quantifica apenas a diferença de estoque de carbono abaixo do solo, não havendo a quantificação da parcela de carbono acima do solo, em forma de material lenhoso. Assim, por considerar essa premissa conservadora, adotou-se nesse trabalho o entendimento de que a parcela de carbono acima do solo é necessariamente quantificada durante a mudança dessa cobertura. No entanto, uma vez que o carbono acima do solo pode ser totalmente reestabelecido e parte da quantidade de carbono abaixo do solo pode retornar durante o processo de reflorestamento da área, assume-se que esse valor represente 90% do total perdido no decorrer do processo de desmatamento.

Ademais, o modelo possui como premissa chave que, em cada transição de cobertura do solo, existem quantidades pré-determinadas de emissões de CO₂ que acontecem no mesmo momento da mudança de cobertura do solo. Contudo, conforme detalhado por Nascimento *et al.* (2015), a emissão negativa, principalmente de processos de reestabelecimento de sistemas naturais, como florestas e savanas, não ocorre imediatamente após a alteração da cobertura do solo, sendo esse processo demorado e com diferenças temporais. Nascimento *et al.* (2015) indica que o carbono armazenado por florestas demora entre 15 e 25 anos para alcançar a estabilidade, sendo o período central o de maior quantidade de carbono armazenado em forma de material lenhoso. Dessa forma, optou-se por modificar o perfil de captura de carbono da cobertura do solo Florestas do modelo BLUES. Assim, ao invés de o modelo quantificar 100% da variação

do estoque de carbono entre as coberturas de solo Pasto Degradado e Florestas imediatamente após o processo de reflorestamento, o modelo passa a quantificar toda essa captura de carbono durante um período de 25 anos. Essa captura de carbono foi dividida em períodos de 5 anos, sendo 10% do carbono capturado nos primeiros 5 anos, 30% após 10 anos, 70% em 15 anos, 90% depois 20 anos e 100% somente após 25 anos da implementação do processo de reflorestamento.

Ademais, conforme Tabela 8, anteriormente, as transições de cobertura do solo não apresentavam variações regionais. Essa premissa foi alterada, considerando-se variações de carbono no solo de acordo com as classes de solo existentes no BLUES, que variam entre A, que é o solo com melhor propriedades físico-químicas e mais próximo de grandes cidades, e G, que é o solo com pior composição físico-química, representando um solo mais pobre e com menores quantidade de carbono estocado. Além disso, passou-se a considerar que todo o estoque de carbono abaixo e acima do solo deveria ser contabilizado para a quantificação do total de carbono perdido ou estocado. Assim, ocorre uma diferenciação da versão anterior do modelo, que não quantificava, por exemplo, o carbono dos processos de dessavanização ou ressavanização, tanto para o carbono abaixo ou acima do solo, ou dos processos de recuperação de pastagem, que não contabilizavam o abaixo do solo (Tabela 8).

Tabela 8: Variação dos estoques de carbono das transições das coberturas do solo da região Norte brasileira do modelo BLUES.

CONVERSÃO	VERSÃO	VARIÇÃO ESTOQUE DE CARBONO		
		ABAIXO DO SOLO (tCO ₂ /ha)*	ACIMA DO SOLO (tCO ₂ /ha)*	TOTAL (tCO ₂ /ha)*
Floresta Nativa p. Pastagem Degradada	Antiga	-74,8	-19,3	-94,1
	Nova	-55,0 / -74,8	-14,2 / -19,3	-69,2 / -94,1
Pastagem Degradada p. Floresta Nativa	Antiga	0,0	19,3	19,3
	Nova	49,5 / 67,4	14,2 / 19,3	63,7 / 86,7
Savana p. Pastagem Degradada	Antiga	-3,6	1,8	0,0
	Nova	-2,6 / -3,6	1,3 / 1,8	-1,3 / -1,8
Pastagem Degradada p. Savana	Antiga	3,6	-1,8	0,0
	Nova	2,3 / 3,2	-1,3 / -1,8	1,3 / 1,7
Pastagem Degradada p. Pastagem Saudável	Antiga	0,7	7,9	7,9
	Nova	0,5 / 0,7	5,8 / 7,9	6,3 / 8,6
Pastagem Saudável p. Pastagem Degradada	Antiga	-0,7	-7,9	-8,6
	Nova	-0,5 / -0,7	-5,8 / -7,9	-6,3 / -8,6
Pastagem Degradada p. Cultivo Simples	Antiga	0,0	-0,5	-0,5
	Nova	0,0	-0,3 / -0,5	-0,3 / -0,5
Cultivo Simples p. Pastagem Degradada	Antiga	0,0	0,5	0,5
	Nova	0,0	0,3 / 0,5	0,3 / 0,5
Cultivo Simples p. Cultivo Duplo	Antiga	0,0	9,5	9,5
	Nova	0,0	7,0 / 9,5	7,0 / 9,5
Cultivo Duplo p. Cultivo Simples	Antiga	0,0	-9,5	-9,5
	Nova	0,0	-7,0 / -9,5	-7,0 / -9,5
Cultivo Simples p. Floresta Plantada	Antiga	0,0	8,9	8,9
	Nova	0,0	6,6 / 8,9	6,6 / 8,9
Floresta Plantada p. Cultivo Simples	Antiga	0,0	-8,9	-8,9
	Nova	0,0	-6,6 / -8,9	-6,6 / -8,9
Pastagem Degradada p. Sistema Integrado	Antiga	1,5	1,8	3,3
	Nova	-	-	-
Sistema Integrado p. Pastagem Saudável	Antiga	-1,5	-1,8	-3,3
	Nova	-	-	-
Pastagem Saudável p. ILP	Antiga	-	-	-
	Nova	0,0	0,4 / 0,5	0,4 / 0,5
ILP p. Pastagem Saudável	Antiga	-	-	-
	Nova	0,0	-0,4 / -0,5	-0,4 / -0,5
Pastagem Degradada p. ILPFc	Antiga	-	-	-
	Nova	0,3 / 0,4	6,2 / 8,4	6,5 / 8,8
ILPFc p. Pastagem Degradada	Antiga	-	-	-
	Nova	-0,3 / -0,4	-6,2 / -8,4	-6,5 / -8,8
Pastagem Degradada p. ILPFn	Antiga	-	-	-
	Nova	20,1 / 27,4	9,4 / 12,8	29,5 / 40,2
ILPFn p. Pastagem Degradada	Antiga	-	-	-
	Nova	-22,3 / -30,4	-9,4 / -12,8	-31,7 / -43,2

Fonte: Elaboração própria

* Os sinais negativos (-) representam a redução do estoque de carbono abaixo e acima do solo, logo, representando emissão de carbono, e os sinais positivos (+) representam o aumento do estoque de carbono abaixo e acima do solo, logo, representando sequestro de carbono

3.3 Módulo Agropecuário

Nessa seção, os sistemas de produção do setor agropecuário do modelo BLUES serão apresentados de forma sucinta, visto que está descrito na seção 3.1. Além disso, será feita uma breve discussão da importância do aumento do detalhamento desses meios a fim de produzir de diferentes produtos agropecuários para atender demandas exógenas (alimentares) e endógenas (energéticas) ao modelo. Posteriormente, serão descritos de forma detalhada os novos sistemas de produção agropecuária desenvolvidos e implementados no modelo BLUES, com resultados de produtividade, emissões, custos e outros dados de entrada e de saída dos sistemas de produção antes de sua implementação.

O modelo BLUES possui 20 *commodities* agropecuárias desenvolvidas, que estão divididas entre produtos agrícolas e produtos pecuários, subdivididas entre 16 culturas agrícolas e 4 criações de animais (Tabela 9). Conforme Angelkorte (2019), o modelo também possui cinco tipos de tecnologias para a produção dessas *commodities* agropecuárias, sendo quatro sistemas de produção agrícola, dois sistemas de produção pecuário e um sistema de produção integrada, a saber:

- Agrícola: (i) Padrão Histórico, que espelha a produtividade, custos de produção, insumos agrícolas e emissões proveniente de sistemas de produção atuais; (ii) Alta Produtividade, onde são observados maiores rendimentos por hectare, custos mais elevados, uso mais intensivo de fertilizante e defensivos agrícolas, 100% de área plantada sendo irrigada e maior uso de maquinário agrícola, decorrentes de um sistema de produção de alta produtividade; (iii) Orgânicos, que representa uma produção de produtos orgânicos, sem a adição de fertilizantes e defensivos químicos, mas com 100% de área plantada sendo irrigada e com produtividades mais elevadas do que uma produção de orgânicos em pequenas propriedades rurais. Dessa forma, assemelhando-se a uma produção de orgânicos com alta produtividade; (iv) Dupla Safra, que considera a introdução de dois cultivos consecutivos, assim existindo um cultivo de verão e um cultivo de inverno, o que reduz a utilização de defensivos e fertilizantes químicos devido a rotação de culturas;

- Pecuária: (i) Padrão Histórico, que utiliza de meios tradicionais de produção pecuária, com baixo nível de mecanização e pequeno aporte financeiro, e se utilizando principalmente de áreas de pastagens degradadas para a sua produção; (ii) Alta Produtividade, que são sistemas de produção pecuária de alta produtividade, com altas taxas de lotação e de engorda, reduzindo o tempo de abate e aumentando o fator de carne por carcaça animal, o que produz uma maior quantidade de carne por animal se comparado com sistemas tradicionais; e,
- Produção Integrada: (i) Sistema Integrado, que consiste na junção de dois ou mais sistemas produtivos em uma mesma área.

Um breve resumo dos sistemas de produção supracitados pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9: Culturas e criações existentes no BLUES.

CULTURAS	CRIAÇÕES
Algodão	Outras Carnes
Arroz	Galinha Poedeira
Café	Gado de Corte
Cana-de-açúcar	Gado Leiteiro
Castanhas/Nozes	
Cereais	
Feijões	
Florestas Plantadas	
Frutas	
Gramíneas	
Milho	
Oleaginosas	
Raízes	
Soja	
Trigo	
Vegetais	

Fonte: Adaptado de Angelkorte (2019)

No contexto das demandas existentes no modelo BLUES, que será mais bem detalhado na seção 3.4, observa-se que existe a carência da adição de uma *commodity* pecuária de alta relevância no contexto de emissões e consumo hídrico, que é a carne suína. O BLUES, por lidar com o setor pecuária por meio da produção de cabeças de animais, engloba a criação de suínos juntamente com a criação de frangos de corte na

demanda de Outras Carnes, o que torna imperceptível a participação dos suínos, visto que a criação de frangos representa cerca de 90% de todas as cabeças de animais produzidas no Brasil (IHS MARKIT, 2021b). Outros IAMs que observam o setor de AFOLU, como o GLOBIOM, MAGNET e MAgPIE, já possuem a produção de suínos separada das demais demandas visto que a carne suína é uma das mais consumidas no mundo, e geram quantidades significativas de emissões de GEE e resíduos (FAO, 2022a). Dessa forma, no estudo se viu como necessária a separação das produções pecuárias de carne de frango da de carne de suínos. Essa adição da produção de suínos será exposta posteriormente nessa seção.

As taxas de abate, de conversão de carcaça animal em carne animal e de produção de leite e ovos foram revistas de forma a detalhar melhor a realidade das criações animais no Brasil. Para isso, foram utilizados dados recentes da base de dados AGRIANUAL e ANUALPEC da IHS Markit (IHS MARKIT, 2021a,b). As Tabela 10 e Tabela 11 apresentam os valores antigos (versão BLUES 1.0 de Koberle (2018)) e os atualizados do modelo BLUES. A reavaliação desses dados foi importante para o modelo pois pôde representar melhor a realidade da produção nacional de forma regionalizada. Além disso, é fundamental para a determinação da área ocupada por cada criação, visto que ao haver diferenças nas taxas de ocupação, abate e conversão carcaça em carne, também é alterada a quantidade de cada rebanho, que interfere na quantidade de emissões de GEE, resíduos e outros.

Com o intuito de elevar as quantidades de sistemas de produção do setor agropecuário do modelo BLUES, de forma a aumentar os sistemas de produção sustentáveis e de baixo carbono, optou-se por refazer todo o grupo de tecnologias de produção por meio de sistemas integrados e acrescentar um novo grupo tecnológico: o de sistemas de produção disruptivos. Além disso, todos os sistemas de produção já existentes - Padrão Histórico, Alta Produtividade, Dupla Safra e Orgânicos - tiveram os dados de entrada e de saída das tecnologias no ano base de 2020 atualizados.

Tabela 10: Variação das taxas de abate, antigas (BLUES 1.0) e novas, do modelo BLUES.

TECNOLOGIAS	VERSÃO	TAXA DE ABATE (anos)				
		SE	S	CO	NE	N
Gado de Corte em Pasto Degradado	Antiga	4,0	5,6	4,2	6,3	5,1
	Nova	3,5	3,5	3,5	5,0	5,0
Gado de Corte em Pasto Saudável	Antiga	4,0	5,6	4,2	6,3	5,1
	Nova	3,0	3,0	3,0	4,0	4,0
Gado de Corte em Sistema Integrado	Antiga	-	-	-	-	-
	Nova	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0
Gado de Corte Confinado Superintensivo	Antiga	-	-	-	-	-
	Nova	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Frangos	Antiga	25,0	333,3	1,2	52,6	1,2
	Nova	50 (dias)	50 (dias)	50 (dias)	50 (dias)	50 (dias)
Suínos	Antiga	-	-	-	-	-
	Nova	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Fonte: Elaboração própria

Tabela 11: Variação das taxas conversão em carne, antigas (BLUES 1.0) e novas, do modelo BLUES.

TECNOLOGIAS	VERSÃO	CONVERSÃO EM CARNE (kg carne/carçaça)				
		SE	S	CO	NE	N
Gado de Corte em Pasto Degradado	Antiga	218	218	218	218	218
	Nova	282	282	282	282	282
Gado de Corte em Pasto Saudável	Antiga	218	218	218	218	218
	Nova	282	282	282	282	282
Gado de Corte em Sistema Integrado	Antiga	218	218	218	218	218
	Nova	282	282	282	282	282
Gado de Corte Confinado Superintensivo	Antiga	-	-	-	-	-
	Nova	350	350	350	350	350
Frangos	Antiga	38	34	27	10	16
	Nova	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Suínos	Antiga	-	-	-	-	-
	Nova	81	81	81	81	81

Fonte: Elaboração própria

Os sistemas integrados implementados no modelo BLUES possuíam um baixo grau de complexidade e não possuíam dados de entrada fundamentais para o nível tecnológico das demais tecnologias de produção agropecuária do BLUES, como água, fertilizantes e defensivos químicos. Dessa forma, não possibilitava verificar fatores

importantes como as sinergias existentes na implementação dos sistemas integrados, como redução das emissões de GEE proveniente do sombreamento e melhor alimentação do gado, diminuição da necessidade de utilização de fertilizantes e defensivos químicos decorrentes da rotação de culturas com a pecuária e outros. Esse ponto é importante, pois os *trade-offs* dos sistemas integrados não são observados por nenhum IAM global ou regional atualmente.

Ademais, existiam apenas três tipos de sistemas de produção, que não espelhavam a realidade brasileira dos sistemas integrados. O modelo possuía problemas de interligação interna nos meios produtivos e nas tecnologias de conversão entre animal produzido e carne para atendimento de demanda, o que fazia com que esse tipo de tecnologia fosse raramente escolhido. Além de existir o problema citado na seção 3.2, referente à quantidade de carbono estocado abaixo e acima do solo por esse tipo de tecnologia, o que fazia com que o modelo não enxergasse como sendo ambientalmente vantajosa a produção através de sistemas integrados.

Destaca-se que os Sistemas Integrados foram subdivididos entre sistemas integrados sem a implementação de florestas plantadas ou nativas, com integração lavoura-pecuária, e sistemas integrados com a presença de florestas plantadas ou nativas, denominados sistemas agroflorestais. Os sistemas agroflorestais foram divididos entre: Lavoura-Floresta Plantada; Lavoura-Floresta Nativa; Pecuária-Floresta Plantada; Pecuária-Floresta Nativa; Lavoura-Pecuária-Floresta Plantada; e, Lavoura-Pecuária-Floresta Nativa. Esse ponto é importante devido à separação da cobertura do uso do solo (anteriormente explicado), visto que existe diferença entre os níveis de carbono armazenados abaixo e acima do solo entre as florestas nativas e plantadas, além de custos e insumos agropecuários necessários para a sua implementação.

Esses sistemas produtivos possuem variações significativas em relação à aportes de insumos e mecanização, principalmente ao se considerar a escala das propriedades rurais. Sendo a produção desses sistemas em pequena escala geralmente com produtividades, utilização de insumos e níveis tecnológicos mais reduzidos se comparado com a produção em larga escala. Ao se considerar a produção em larga escala dos sistemas integrados, eles contam com altas produtividades agrícolas e pecuárias e com menores quantidade de aporte de insumos químicos e água, quando comparado a outros sistemas de produção de alta produtividade. Isso ocorrendo devido à ciclagem de nutrientes proveniente desse tipo de produção com consórcio e rotação de culturas e ao

aumento do conforto térmico animal, por conta da maior presença de sombra proveniente de sistemas com inclusão de árvores (plantadas ou nativas). Além disso, quando associado principalmente à produção bovina possui uma menor emissão de GEE devido à melhora de digestibilidade dos alimentos ofertados ao gado, que diminui a emissão de CH₄ proveniente da fermentação entérica dos animais. O desenvolvimento dos novos sistemas de produção através de sistemas integrados será abordado na subseção 3.3.2.

Já os novos sistemas de produção agropecuária, denominados Disruptiva, são sistemas de produção que englobam um alto nível tecnológico de produção ou, então, que tentem aproximar o produtor ao consumidor final, estabelecendo-se nos perímetros urbanos e periurbanos. Destaca-se que no caso dos bovinos, os sistemas disruptivos de produção com maior tecnificação, confinamento e implementação de ração são de suma importância para o modelo, visto que busca simular algo que o modelo atualmente não tem detalhado e que já é utilizado em diversas regiões do globo. Esses sistemas produtivos auxiliam na elaboração de cenários futuros, visto que diminuem a necessidade de aberturas de novas áreas destinadas à pecuária e, assim, diminuem as pressões sobre áreas de florestas nativas. Alguns desses sistemas de produção bovina também podem ser considerados e adotados pelo modelo como medidas de mitigação de gases não-CO₂ da pecuária de corte e de leite. Esses serão descritos posteriormente, ainda nesse capítulo.

3.3.1 Suínos

A suinocultura brasileira está entre as mais competitivas e que apresentam um dos maiores níveis de exportação. Em 2022, o Brasil foi o 4º maior exportador de carne de porco do mundo, com previsão de chegar a ser o 3º entre 2024 e 2025, ultrapassando o Canadá (FAO, 2023; MIELE e MARTIONS, 2022). Nos últimos anos, a capacidade de produção de suínos tem crescido consideravelmente, passando de 44 milhões de cabeças em 2018 para 55 milhões em 2022, sendo cerca de 23% dessa produção destinada à exportação (BRASIL, 2023; IBGE, 2022).

A produção de suínos, tanto no Brasil quanto no mundo, acontece de forma confinada, com adição de suplementação nutricional, principalmente oriunda de farelo de soja e milho. Ademais, devido à sensibilidade dos suínos a temperaturas muito quentes ou muito frias, a sua produção é feita em galpões com diferentes tipos de sistemas de climatização e em climas mais quentes, com a presença constante e abundante de água,

tanto para a dessedentação animal, quanto para o conforto térmico animal (ALBUQUERQUE *et al.*, 1998; DIAS *et al.*, 2011).

Em 2020, a produção de suínos representou cerca de 2,4% das emissões de GEE do setor agropecuário, sendo essas emissões majoritariamente provenientes dos resíduos gerados por essa criação (ALBUQUERQUE *et al.*, 2020). Nesse contexto, Nunes e Miranda (2013), Amorim, de Oliveira e Tavares (2013), Brasil (2016) e da Trindade e Alvim (2022) apresentam como fundamental a utilização energética desses resíduos tanto para diminuir os volumes de emissões gerados pela criação, quanto para a geração de bioenergia e biogás com baixa pegada de carbono através da utilização de biodigestores. Uma das grandes vantagens desse tipo de criação confinada é a facilidade em se recuperar os resíduos, podendo chegar a até 100%, o que não é possível na criação de gado brasileira, que é desenvolvida em sistemas extensivos (AMORIM *et al.*, 2013; BRASIL, 2016; NUNES e MIRANDA, 2013; TRINDADE, 2022).

No modelo BLUES, desenvolvido por Koberle (2018) e aprimorado por Angelkorte (2019), a produção de carne de porco era englobada na demanda de “Outras Carnes”. Contudo, a tecnologia de produção de “Outras Carnes” não conseguia observar adequadamente a produção de suínos, uma vez que ela tinha como principal saída, a produção de cabeças de animais, sendo, nesse caso, majoritariamente representativa para a produção de frangos de corte. Dessa forma, foi necessário abrir a demanda de “Outras Carnes” para carne de frango e carne de porco e, assim, foi necessário criar toda a cadeia de produção e abate de frangos de corte e suínos no modelo BLUES. Porém, como a antiga produção de “Outras Carnes” já representava de forma adequada a produção de frangos, essa foi mantida, alterando apenas o nome para Frango de Corte.

Assim, foi necessário desenvolver os três elos da cadeia de produção de carne suína: (i) Criação animal, que é a produção de suínos em sistema confinado; (ii) Abate animal, que converte um suíno em uma carcaça e tem como função a quantificação do tempo de criação do animal, visto que o modelo BLUES é anualizado; e (iii) Produção de carne suína, que converte uma carcaça suína em carne de porco.

Dessa forma, para o desenvolvimento do primeiro elo da cadeia produtiva de carne de porco, que é a criação animal, foi necessário determinar todas as demandas necessárias para a produção desse suíno em sistemas confinados, como água, alimentação e custos atrelados. Além disso, também foram determinadas as emissões típicas por unidade

animal e o tamanho típico de uma granja suína. Os valores referentes à quantidade de dejetos foram oriundos de Moraes (2021).

Assim, determinou-se como sendo um valor padrão para uma granja típica de suínos o de 20 machos reprodutores (cachaços), 50 fêmeas reprodutoras (matrizes) e 1200 leitões sendo produzidos anualmente (ALBUQUERQUE *et al.*, 1998; DIAS *et al.*, 2011). Já a quantidade de água necessária para essa produção foi dividida entre a quantidade de água necessária para o processo de manutenção do conforto térmico animal, de aproximadamente 330 m³ de água por ano para a granja, e para a dessedentação animal, de cerca de 1575 m³ de água por ano para toda a granja, totalizando cerca de 1875 m³ de água por ano para o funcionamento da granja de suínos (BRASIL, 2016). Ademais, para a alimentação, utilizou-se uma dieta padrão de cerca de 25% de farelo de soja e 75% de milho em grão, totalizando cerca de 420 toneladas de milho em grãos por ano e 140 toneladas de farelo de soja por ano (BRASIL, 2016).

Isso foi feito a partir de um custo de produção que variou entre 4,42 R\$/kg de animal vivo e 7,90 R\$/kg de animal vivo, sendo as regiões Sul e Sudeste as mais baratas e a região Norte, a mais cara para a produção de suínos (BRASIL, 2016; IHS MARKIT, 2021b), associado a um fator de emissão médio dos dejetos de aproximadamente 0,06 kg N₂O/animal e 5,44 kg CH₄/animal (AMORIM *et al.*, 2013; NUNES e MIRANDA, 2013). As emissões de CO₂ não foram utilizadas já que elas são provenientes do processo de respiração animal e não são passíveis de quantificação.

Para o segundo elo da cadeia de produção, foi considerada uma taxa de abate (tempo médio entre o nascimento e o abate do animal) de aproximadamente 288 dias (ALBUQUERQUE *et al.*, 1998; DIAS *et al.*, 2011). Já para a fase final, de conversão de carne por carcaça, foi considerada uma produção de aproximadamente 80 kg de carne de porco e 30 kg de gordura por cada carcaça (IHS MARKIT, 2021b).

3.3.2 Sistemas integrados

Conforme exposto anteriormente na seção 2.2.1.1, existem quatro tipos de sistemas integrados, sendo que no Brasil, apenas três deles possuem importância à nível de área ocupada, que são: (i) Integração Pecuária-Floresta (IPF); (ii) Integração Lavoura-Pecuária (ILP); e, (iii) Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF). Para a implementação desses sistemas de produção agropecuárias através de sistemas integrados

e agroflorestais no modelo BLUES, foi necessária a realização de sete etapas chaves para o levantamento de dados para o desenvolvimento desse tipo de tecnologia para cada uma das regiões brasileiras que foram:

- Definição das aptidões de produção através de sistemas ILPF para cada uma das cinco macrorregiões brasileiras e posterior definição dos principais arranjos produtivos de acordo com cada sistema ILPF de forma regionalizada; determinação dos custos de cada sistema ILPF;
- Levantamento dos insumos utilizados por cada sistema;
- Definição da produtividade de cada cultura e criação de acordo com a área ocupada;
- Determinação do potencial teórico de cada sistema ILPF levantados no trabalho;
- Definição dos potenciais técnicos atuais e futuros dos sistemas ILPF; e,
- Determinação das emissões e potenciais de mitigação de GEE de cada meio produtivo desenvolvido.

3.3.2.1 Aptidões regionais dos sistemas ILPF no Brasil

Devido ao Brasil possuir proporções continentais e seu território ocupar uma vasta gama de biomas e climas, são observadas grande heterogeneidades edafoclimáticas e solos com elevado grau de diferenciação físico-química entre si (MANZATTO *et al.*, 2002). Logo, foi necessário avaliar os tipos de culturas agrícolas e criações pecuárias que possuem maior aptidão para cada região brasileira e que, ao mesmo tempo, possuíssem uma compatibilidade com as culturas e criações já existentes no modelo BLUES. Esses dados foram extraídos dos principais órgãos do governo ligado ao setor agropecuário brasileiro, como a Conab (Companhia Nacional de Abastecimento), Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e Rede ILPF.

Conforme Conab (2023a, b), a região Sul é a que possui maior produtividade e produção de trigo e arroz no Brasil, sendo eles cultivados através de sistemas produtivos com alto grau de tecnificação, além de ter a soja como cultura agrícola importante no seu perfil produtivo. Ademais, possui uma grande produção bovina, principalmente de gado de corte (REDE ILPF, 2021).

Por sua vez, o Centro-Oeste é a região brasileira que possui a maior produção de grãos, destacando-se a produção de soja rotacionada com milho, através do sistema de plantio direto (CONAB, 2023a, b), além de possuir vastos territórios destinados à produção bovina por meio de rotação de pastagem, o que permite que o estado tenha o maior rebanho bovino do país (IBGE, 2023). Essa região também possui condições edafoclimáticas favoráveis para o plantio de eucalipto (REDE ILPF, 2021).

Na região Sudeste há uma forte aptidão pela produção de cana-de-açúcar com alto grau de tecnificação e produtividade (CONAB, 2023a, b). Também nessa região ocorre uma produção consolidada de algodão, soja e milho, principalmente em sistema de rotação entre leguminosas e gramíneas. É importante destacar a grande produção de eucalipto nessa região, principalmente decorrente do clima mais quente e dos altos níveis de precipitação (REDE ILPF, 2021).

Por outro lado, a grande maioria das áreas das regiões Norte e Nordeste possuem baixas aptidões de cultivo com alto grau de tecnificação, como é o caso do sistema ILPF – a não ser algumas áreas da região do MATOPIBA⁷ que possuem condições edafoclimáticas favoráveis para a produção em alta produtividade. Essa inviabilidade é devida aos altos níveis de fertilização e correção do solo que seriam empregados nas áreas com disponibilidade de irrigação, em que ocorrem níveis ainda mais altos de degradação de solo. Além disso, esses estados possuem aptidão limitada para o cultivo de soja, milho, gado e florestas nativas e plantadas (CONAB, 2023a, b; REDE ILPF, 2021).

Assim, foram avaliadas inúmeras formas e alternativas para o desenvolvimento de tecnologias associadas ao ILPF, sendo algumas mais importantes em pequena escala e para o nível familiar, como é o caso do cultivo integrado de frutos amazônicos, como açaí, palma e outros, como raízes para subsistência, ou com maior importância em nível nacional, a exemplo da produção de soja rotacionada com milho, associada à produção de bovinos de corte e eucalipto. Dessa forma, a escalabilidade e o potencial de produção em nível nacional foram determinantes para a escolha do desenvolvimento da tecnologia no modelo BLUES, a fim de representar sistemas produtivos relevantes para o Brasil de acordo com a quantidade de área já estabelecida no país e sua importância para a economia nacional. Portanto, focou-se apenas nos sistemas produtivos mais relevantes em termos de produção e área no território brasileiro, ao invés dos pequenos produtores.

⁷ Região formada por áreas de cerrado das divisas entre os estados Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (DE MIRANDA *et al.*, 2014)

Outro ponto essencial a ser destacado é que foi avaliado o potencial de desenvolvimento de dois tipos de tecnologias envolvendo a silvicultura, por meio da produção de florestas plantadas/comerciais, como eucalipto e pinus, e florestas nativas. Esses dois sistemas de produção florestal apresentam diferenças intrínsecas no viés específico de cada um: a produção de insumos madeireiros para a produção de celulose e papel, indústria madeireira, geração de energia e biocombustíveis; ou o valor da floresta nativa intocável para armazenamento de carbono acima e abaixo do solo e mitigação climática. Assim, foram desenvolvidos 11 sistemas de produção agrícola envolvendo os mais diversos sistemas de produção com alta relevância em nível nacional (Tabela 12).

Tabela 12: Sistemas de produção agropecuária desenvolvidos.

SISTEMA INTEGRADO	SISTEMA PRODUTIVO	DESCRIÇÃO DO SISTEMA PRODUTIVO
ILP	Soja-Milho-Gado de Corte	Soja rotacionada com milho em 50% da área; Gado de corte em 50% da área
	Soja-Milho-Gado Leiteiro	Soja rotacionada com milho em 50% da área; Gado leiteiro em 50% da área
	Soja-Trigo-Gado de Corte	Soja rotacionada com trigo em 50% da área; Gado de corte em 50% da área
	Soja-Trigo-Gado Leiteiro	Soja rotacionada com trigo em 50% da área; Gado leiteiro em 50% da área
	Soja-Cana-de-Açúcar-Gado de Corte	Soja em 25% da área; Cana-de-açúcar em 25% da área; Gado de corte em 50% da área
IPF	Gado de Corte-Floresta Plantada	Floresta plantada em 40% da área; Gado de corte em 60% da área
	Gado de Corte-Floresta Nativa	Floresta nativa em 40% da área; Gado de corte em 60% da área
ILPF	Soja-Milho-Floresta Plantada	Floresta plantada em 40% da área; Soja rotacionada com milho em 30% da área; Gado de corte em 30% da área
	Soja-Milho-Floresta Nativa	Floresta nativa em 40% da área; Soja rotacionada com milho em 30% da área; Gado de corte em 30% da área
	Soja-Trigo-Floresta Plantada	Floresta plantada em 40% da área; Soja rotacionada com trigo em 30% da área; Gado de corte em 30% da área
	Soja-Trigo-Floresta Nativa	Floresta nativa em 40% da área; Soja rotacionada com trigo em 30% da área; Gado de corte em 30% da área

Fonte: Elaboração própria

Destaca-se que devido a lógica de desenvolvimento de tecnologias para a implementação no modelo BLUES, foi necessário fazer o desenvolvimento dos sistemas

de produção de forma anualizada. Sendo importante esse destaque visto que, em muitos casos, o gado dos sistemas integrados pode pastejar em áreas de produção de florestas. Contudo, isso ocorre apenas a partir de um certo estágio de desenvolvimento florestal, visto que nos primeiros anos de desenvolvimento florestal, as árvores estariam demasiadamente vulneráveis a serem consumidas ou danificadas pelo gado. Logo, nos estágios mais adiantados da implementação dos sistemas integrados, o somatório das áreas de utilização de cada sistema (lavoura, pecuária e floresta) pode ser superior à 100%. Porém, como na implementação desses sistemas produtivos em modelos do tipo IAM, como é o caso do BLUES, ocorre de forma anualizada, optou-se por utilizar proporções fixas de área ocupada por cada parcela produtiva, visto que não seria possível identificar o estágio de implementação de cada sistema produtivo.

3.3.2.2 Custos dos sistemas ILPF

Para o levantamento dos custos atrelados a cada tipo de sistema produtivo, foram utilizados dados de produção agropecuária desenvolvidos por Angelkorte (2019).

Conforme exposto por Pedreira *et al.* (2017) e Rede ILPF (2021), o investimento inicial desse tipo de sistema de produção agropecuária é mais oneroso do que o sistema de produção de monocultura levantado por Angelkorte (2019), logo, foram feitos ajustes de modo que o investimento inicial desses processos fosse mais elevado do que no sistema de monocultura.

Esse valor mais elevado de produção do sistema ILPF se deve principalmente à necessidade técnica da mão-de-obra, uma vez que uma mesma pessoa, ao invés de trabalhar apenas com a produção de um produto agropecuário, necessitará saber como desenvolver o seu trabalho em até três tipos de produtos como gado, floresta e cultura agrícola. Contudo, apesar de necessitar de maiores aportes financeiros iniciais, o sistema ILPF auxilia na ciclagem de nutrientes do solo, fazendo com que seja necessário um aporte menor de fertilizantes e defensivos químicos, gerando um gasto menor ao produtor, conforme Pedreira *et al.* (2017) e Rede ILPF (2021).

Com isso, foram determinados os custos da mão-de-obra (especializada), insumos (defensivos, fertilizantes e corretivos), maquinário (custos referentes ao aluguel diário de cada tipo de trator/implemento agrícola) e sementes/mudas de cada cultura. Já o custo com a compra da cabeça do gado de corte, foi considerado como nulo, pois quando

utilizado considerou-se que o local já possuía criação bovina em pasto degradado e com matrizes férteis.

Ademais, somado aos custos de implementação dos sistemas ILPF, são adicionados custos decorrentes da mudança de cobertura do solo. Logo, todo o custo referente ao trato inicial do solo, são considerados apenas uma única vez, durante a conversão entre coberturas do solo do modelo BLUES, ao contrário dos custos referentes a produção agropecuária, que são anuais.

3.3.2.3 Insumos dos sistemas ILPF

Como já dito anteriormente, o sistema ILPF utiliza menores volumes de insumos agropecuários no médio/longo prazo, visto sua rotação de culturas e diversificação com gado e florestas plantadas ou nativas, que faz com que seja observada uma maior biodiversidade no solo, além de melhorar os fluxos de recomposição de nutrientes do solo.

De acordo com Pedreira *et al.* (2017), Rede ILPF (2021) e Sato *et al.* (2019) essa redução de aporte de fertilizantes e defensivos químicos pode variar entre 20-100% no médio prazo, sendo adotado de forma conservadora o valor de 20%. Contudo, para a retirada de água necessária para a irrigação das culturas e dessedentação animal (sem considerar a água utilizada para lavagem de instalações agropecuárias e abate) foi adotada uma redução de 20%, visto que a presença das árvores auxilia no conforto térmico animal, reduzindo a necessidade hídrica e a maior presença de matéria orgânica no solo propicia uma maior retenção de água no solo (PEDREIRA *et al.*, 2017; REDE ILPF, 2021; SOUZA *et al.*, 2019).

3.3.2.4 Produtividade dos sistemas ILPF

Para a determinação da produtividade agropecuária foi necessário caracterizar cada tipo de sistema ILPF e dividir em três etapas de determinação de produtividade, que foi a parte agrícola, a silvícola e a da pecuária.

Inicialmente, foram determinados dois tipos de arranjos para a produção silvícola, a primeira para os sistemas IPF e ILF, em que foram divididas as áreas igualmente para a produção florestal e as demais, já na segunda, para o sistema ILPF completo, em que a

área de floresta passou a ocupar 40% da área. Para o sistema IPF e ILF as produtividades utilizadas foram condizentes com Angelkorte (2019) no sistema de produção de monocultura de alta produtividade. No caso do sistema de ILPF, foram utilizadas as mesmas produtividades, porém, relacionando as mesmas com um sistema de plantio com linhas triplas de árvores com distanciamento de 3x3 metros e distâncias entre linhas de 30 metros, que é a média para passagem do maquinário para aplicação de insumos químicos na lavoura (CORDEIRO *et al.*, 2015; REDE ILPF, 2021).

Para a parte da criação bovina, foram adotadas taxas de lotação média entre 3-5 UA/ha (unidade animal por área, onde 1 UA corresponde a um boi de 450 kg) , sendo esse valor entre 2-4 vezes superior à taxa de lotação média brasileira devido principalmente à rotação de pastagem, à recuperação do solo e ao trato cultural desenvolvido no solo com intuito de aumentar a disponibilidade de pastagem para o gado (CORDEIRO *et al.*, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2017; PEDREIRA *et al.*, 2017; REDE ILPF, 2021; SALTON *et al.*, 2013).

Por fim, foi necessário dividir a produtividade agrícola em duas partes, uma contendo os sistemas do tipo ILP e ILF e a outra apenas o sistema ILPF, sendo ambos embasados em Angelkorte (2019) para os cultivos de alta produtividade. Para os sistemas ILP e ILF, foram utilizados os mesmos valores de produtividade agrícola de Angelkorte (2019), contudo considerando apenas um cultivo de cada cultivar por ano, devido à implementação obrigatória do sistema de rotação de culturas e que a área destinada ao cultivo agrícola ocupará apenas 50% da área total. Já para o sistema ILPF, foi considerada uma redução média de produtividade de 25% para os cultivos em relação às culturas de alta produtividade de Angelkorte (2019), devido à utilização de parte da produção de grãos para a alimentação animal no período de inverno, quando o pasto possui menores níveis nutricionais se comparado a períodos de verão (FRANCHINI *et al.*, 2018; SOUZA *et al.*, 2019; WERNER *et al.*, 2017).

Um resumo dessa e das etapas anteriores pode ser visto na Tabela 13.

Tabela 13: Dados de entrada para o desenvolvimento dos novos sistemas integrados do modelo BLUES.

SISTEMA PRODUTIVO	PRODUTIVIDADE	CUSTOS (US\$/ha)	FERTILIZANTE (t ureia _{eq} /ha)	DEFENSIVO QUÍMICO (m ³ /ha)	ÁGUA (1,000 m ³ /ha)
Soja-Milho-Gado de Corte	Soja: 1,8-2,3 t/ha Milho: 0,7-2,6 t/ha Gado de corte: 1,0-1,7 UA/ha	2.000 – 2.578	0,03 – 0,05	0,002 – 0,003	0,05 – 0,47
Soja-Milho-Gado Leiteiro	Soja: 1,0-1,3 t/ha Milho: 0,4-1,4 t/ha Gado leiteiro: 1,2-1,5 UA/ha	1.070 – 1.646	0,03 – 0,05	0,004 – 0,006	0,05 – 0,51
Soja-Trigo-Gado de Corte	Soja: 1,8-2,3 t/ha Trigo: 0,0-0,7 t/ha Gado de corte: 1,0-1,7 UA/ha	1.686 – 2.448	0,01 – 0,07	0,002 – 0,003	0,05 – 0,35
Soja-Trigo-Gado Leiteiro	Soja: 1,8-2,3 t/ha Trigo: 0,0-0,7 t/ha Gado leiteiro: 1,2-1,5 UA/ha	1.311 – 2.123	0,01 – 0,07	0,002 – 0,003	0,05 – 0,39
Soja-Cana-de-Açúcar-Gado de Corte	Soja: 1,5-1,8 t/ha Cana-de-açúcar: 14,4-20,2 t/ha Gado de corte: 1,0-1,7 UA/ha	1.656 – 2.409	0,08 – 0,09	0,012 – 0,013	0,07 – 1,82
Gado de Corte-Floresta Plantada	Floresta plantada: 4,0-5,2 t/ha Gado de corte: 1,2-2,0 UA/ha	956 – 1.364	0,03 – 0,04	0,023 – 0,025	0,02 – 0,04
Gado de Corte-Floresta Nativa	Gado de corte: 1,2-2,0 UA/ha	1.100 – 1.569	0,01 – 0,03	0,023 – 0,025	0,02 – 0,03
Soja-Milho-Floresta Plantada	Soja: 1,1-1,4 t/ha Milho: 0,4-1,6 t/ha Floresta plantada: 4,0-5,2 t/ha Gado de corte: 0,6-1,0 UA/ha	2.161 – 3.401	0,02 – 0,03	0,014 – 0,015	0,02 – 0,28
Soja-Milho-Floresta Nativa	Soja: 1,1-1,4 t/ha Milho: 0,4-1,6 t/ha Gado de corte: 0,6-1,0 UA/ha	1.956 – 3.164	0,02 – 0,03	0,014 – 0,015	0,02 – 0,28
Soja-Trigo-Floresta Plantada	Soja: 1,1-1,4 t/ha Trigo: 0,0-0,4 t/ha Floresta plantada: 4,0-5,2 t/ha Gado de corte: 0,6-1,0 UA/ha	1.867 – 3.279	0,01 – 0,04	0,012 – 0,013	0,03 – 0,21
Soja-Trigo-Floresta Nativa	Soja: 1,1-1,4 t/ha Trigo: 0,0-0,4 t/ha Gado de corte: 0,6-1,0 UA/ha	1.679 – 3.076	0,01 – 0,04	0,012 – 0,013	0,03 – 0,21

Fonte: Elaboração própria

3.3.2.5 Potencial teórico dos sistemas ILPF

Para o desenvolvimento do potencial teórico, foram utilizados dados das portarias de Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), que são desenvolvidos pela Embrapa, utilizados anualmente pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e indicam as datas e períodos de plantio por cultura e municípios que possuem características edafoclimáticas adequadas para cada tipo de cultivo. Essa metodologia foi adotada em função das ZARC serem utilizadas como ferramentas de tomada de decisão para a concessão de crédito agrícola como Programa de Agricultura Familiar (PRONAF) e Plano ABC+ (SANTOS, 2016), assim como contratação do

Programa de Garantia de Atividade Agropecuária (PROAGRO) e do Seguro Rural, o que é necessário para a produção agropecuária por meio de sistemas do tipo ILPF, que necessita de grandes investimentos iniciais (ANGELKORTE, 2019; BRASIL, 2014).

Logo, para a determinação das áreas potencialmente disponíveis para cada tipo de sistema ILPF desenvolvido, foram verificadas as áreas mais aptas para a produção de cada cultura e excluídas as áreas de reserva legal de cada bioma e as áreas urbanas de cada região brasileira. Com isso, o potencial de cada sistema ILPF foi determinado a partir da área disponível para a cultura mais limitante de cada sistema ILPF desenvolvido.

3.3.2.6 Potencial de implementação dos sistemas ILPF

O desenvolvimento dos potenciais implementáveis de sistemas integrados no Brasil foi dividido em duas partes, potencial técnico e de mercado.

Para o potencial técnico, também foram utilizados dados das Portarias de ZARC, que são desenvolvidos pela Embrapa e utilizados anualmente pelo MAPA, que indicam as datas e períodos de plantio por cultura e os municípios que possuem características edafoclimáticas adequadas para cada tipo de cultivo. Essa metodologia foi adotada porque a ZARC foi utilizada como ferramenta decisória para a concessão de crédito agrícola, como o PRONAF e o Plano ABC+. A ZARC também é utilizada para a contratação do PROAGRO e do Seguro Rural, que é necessário para a produção agrícola por meio de sistemas do tipo ILPF, o que requer investimentos iniciais significativos (ANGELKORTE, 2019; BRASIL, 2014).

O potencial técnico foi considerado excessivamente otimista, dadas todas as dificuldades na capacitação da força de trabalho, aquisição de insumos e máquinas. Foi necessário desenvolver o potencial de mercado, que considerassem a dinâmica da expansão desses sistemas de produção agrícola no Brasil. Nesse sentido, foram feitos levantamentos com a Embrapa e a Rede ILPF para determinar o histórico da produção de tecnologia em cada estado brasileiro, utilizando projeções existentes até 2022. As projeções dos potenciais de mercado subsequentes foram feitas a partir de estimativas seguindo o mesmo perfil de expansão entre 2010 e 2020 a 2050 e considerando o novo Plano ABC+ de expansão de 10 milhões de hectares de sistemas ILP entre 2020 e 2030.

Portanto, foi adotado um potencial médio de expansão de 1.700 mil hectares de sistemas integrados de lavouras e pecuária. Foram considerados sinergias que existiam

nesse tipo de sistema produtivo, como aumento de produtividade, melhor ciclagem de nutrientes e menor uso de agrotóxicos, bem como o novo estímulo do Governo brasileiro nesse sentido. No entanto, alguns desafios para essa implementação como a alta demanda por financiamento inicial e a falta de mão-de-obra qualificada necessária para a implementação dessas tecnologias não foram consideradas visto a dificuldade de modelar esses tipos de nuances em um modelo IAM como o BLUES.

A mesma projeção do potencial de expansão foi feita para os sistemas agroflorestais, que foram divididos em florestas plantadas/comerciais e nativas. Sistemas contendo florestas plantadas obtiveram um potencial médio de expansão somado de 600 mil hectares e florestas nativas de 200 mil hectares. Embora tenham sinergias importantes no ciclo de fertilização e ofereçam muitos benefícios à produção de gado e à biodiversidade, eles exigem investimentos iniciais ainda mais significativos do que os sistemas de ILP e mão-de-obra ainda mais qualificada.

Um resumo dessa etapa e dos benefícios e dificuldades para a implementação da ILPF em áreas rurais pode ser visto na Tabela 14.

Tabela 14: Áreas iniciais, potenciais de expansão e sinergias dos novos sistemas integrados do modelo BLUES.

SISTEMA PRODUTIVO	ÁREA 2020 (1.000 ha)	POTENCIAL ANUAL DE EXPANSÃO (1.000 ha)	SINERGIAS
Soja-Milho-Gado de Corte	14.400	1.700	<u>Benefícios</u> Aumento do rendimento Melhor ciclagem de nutrientes Menos uso de fertilizantes e pesticidas
Soja-Milho-Gado Leiteiro			
Soja-Trigo-Gado de Corte			
Soja-Trigo-Gado Leiteiro	1.400		<u>Dificuldades</u> Aumento dos custos de produção por hectare Mão-de-obra qualificada
Soja-Cana-de-Açúcar-Gado de Corte			
Gado de Corte-Floresta Plantada	1.400		<u>Benefícios</u> Aumento do rendimento Melhor ciclagem de nutrientes Menos uso de fertilizantes e pesticidas Aumento do conforto térmico animal Diminuição da demanda de água em gado extensivo Aumento da biodiversidade local
Gado de Corte-Floresta Nativa			
Soja-Milho-Floresta Plantada	1.600	600 (Floresta plantada)	Captura de carbono atmosférico no subsolo para todas as tecnologias e acima do solo quando implementado com floresta nativa
Soja-Milho-Floresta Nativa		200 (Floresta nativa)	
Soja-Trigo-Floresta Plantada			<u>Dificuldades</u> Aumento dos custos de produção por hectare Mão-de-obra qualificada
Soja-Trigo-Floresta Nativa			

Fonte: Elaboração própria

3.3.2.7 Emissões de gases de efeito estufa dos sistemas ILPF

Para a determinação das emissões de gases de efeito estufa foram utilizados dados da Embrapa (2017), Salton *et al.* (2013) e Sato *et al.* (2019). Foi considerado para sistemas ILPF, que continham a participação de florestas nativas/plantadas, que a floresta é capaz de capturar carbono e armazená-lo ou no material lenhoso para o crescimento vegetativo da árvore ou então no solo, porém, não foi considerada a possível saturação desse solo com carbono.

Já para os sistemas que não contavam com a participação de florestas, foi considerado apenas a redução da quantidade de emissões de N₂O devido a menor necessidade de utilização de fertilizantes nitrogenados para a produção das culturas e menor revolvimento do solo em processos de aração, o que diminui a volatilização do fertilizante nitrogenado. Essa premissa se baseia no processo de plantio direto rotacionado, que melhora a estrutura física do solo ao adicionar maiores quantidades de

matéria orgânica no solo, aumenta a profundidade do sistema radicular no perfil do solo e aumenta a presença de volumes de agregados do solo com maiores diâmetros, fazendo com que haja menores emissões de N₂O, que pode chegar a reduções de até 70% (no estudo foi adotada uma redução conservadora de 50%) (NOGUEIRA *et al.*, 2016; SATO *et al.*, 2019; SOUZA *et al.*, 2019).

Ademais, foi praticada uma redução das emissões de CH₄ advinda da produção bovina proveniente do melhoramento das taxas de estresse animal e do melhoramento da alimentação, que aumenta a nutrição animal e facilita o processo de digestão que diminui as emissões de metano em sistemas do tipo IPF e ILPF. Desse modo, foi considerada – novamente de forma conservadora – uma diminuição de 20% das emissões de metano associadas à criação bovina em sistemas do tipo agroflorestais, diminuição essa que pode variar entre 20% e 27%, dependendo do sistema agroflorestal implementado e a região de implementação (FROTA, 2017; PORTUGAL, 2020).

3.3.3 Sistemas disruptivos

Conforme citado anteriormente, os sistemas de produção agropecuária, através de sistemas ditos disruptivos no modelo BLUES, envolvem uma modificação dos meios tradicionais de produção por meio da aproximação do produtor de alimentos ao consumidor final, mediante a produção em perímetros urbanos ou periurbanos, ou então, do aumento do nível tecnológico da produção agropecuária. No contexto da aproximação do produtor ao consumidor final, pode-se utilizar como exemplo o caso das hortas urbanas, fazendas verticais e carnes alternativas (plantadas ou cultivadas). Já para o aumento tecnológico dos sistemas produtivos, citam-se as fazendas verticais, cultivo de carne alternativa, a produção superintensiva do gado de corte e a utilização de enzimas com viés de reduzir as emissões do GEE dos produtos agropecuários. Algumas tecnologias podem ser agregadas nos dois eixos, como é o caso das fazendas verticais e as carnes alternativas.

Para o setor agrícola, foram desenvolvidas duas novas tecnologias de Agricultura Disruptiva: Agricultura Vertical, que possui capacidade de implementação em prédios com condições edafoclimáticas perfeitas para o desenvolvimento agrícola e que permite ganhos de produtividade em relação as tecnologias tradicionais, porém, necessitando de grandes quantidades de insumos agropecuários, água e energia para o desenvolvimento;

e, Hortas Urbanas, que possui baixo nível de investimento inicial e baixos níveis de desperdício e perda durante o seu processo de distribuição até o consumidor final (AVGOUSTAKI e XYDIS, 2020; DANIEL, 2014; HARRIS e KOUNTOURIS, 2020; KOZAI *et al.*, 2019). Para essa implementação, foi necessário desenvolver novas tecnologias que representem toda a cadeia de produção de alimentos, desde o produtor inicial até o consumidor final. Assim, há uma ligação mais adequada entre os diferentes tipos de tecnologias de produção de alimentos com as demandas e seus respectivos níveis de perdas e resíduos de alimentos ao longo da cadeia produtiva. A construção das cadeias de perdas e resíduos de alimentos serão descritas na seção 3.4 (Módulo de Demandas).

Para o setor pecuário, foi realizada uma expansão dos sistemas de produção do setor de bovinos, que é o mais importante para as emissões de não-CO₂ brasileiras, e não-bovinos através de carnes alternativas. Assim, foram desenvolvidas tecnologias de produção dos tipos: Pecuária de bovinos de corte superintensiva, considerando a produção bovina confinado consumindo apenas ração; Pecuária de bovinos de corte superintensiva, consumindo apenas ração e gado leiteiro com adição de enzimas para auxiliar na redução das emissões de gases não-CO₂ provenientes do processo digestivo dos animais - para isso, foi necessário expandir o modelo BLUES de modo a introduzir toda a cadeia de produção de rações e de forrageiras para a alimentação bovina; Carne Plantada, considerando a elaboração de “carne” através de proteína vegetal como soja e feijões; e, Carne Sintética, no qual a carne (bovina, suína e de frango) é produzida por meio do cultivo de células de carne em laboratórios. Esses dois últimos sistemas de produção são considerados de grande importância, visto que diminuem significativamente a necessidade de área para pecuária e diminuem a pegada hídrica e de carbono da carne animal.

A elaboração dessas novas medidas de produção agropecuária será explicada nas próximas subseções desse capítulo.

3.3.3.1 Agricultura – Fazendas verticais

Para a implementação desse tipo de sistema produtivo, com alto nível de tecnificação e produtividade, optou-se por desenvolver dois tipos de tecnologias padrão em sistemas de agricultura vertical, uma com médio nível de investimento e de menor escala e a outra com alto nível de investimento e com grande escala. Isso ocorreu devido à vasta gama de formas e opções de implementação de sistemas de agricultura vertical.

Assim, o sistema com maior escala considerou a implementação desse tipo de sistema produtivo em prédios de múltiplos pavimentos, entre 30 e 40 pavimentos, havendo a produção com alto nível de adensamento de vegetais, raízes, feijões e frutas, como bananas e maçãs. Assim, foi desenvolvido uma tecnologia padrão de fazendas verticais *hightech*, considerando sistemas de reciclagem e recirculação de água, com iluminação através de lâmpadas de LED, funcionando entre 16 e 24 horas por dia e com níveis de produção que chegam a 3.600 toneladas de produtos agrícolas por ano. Para esse desenvolvimento, utilizou-se dados de custo de investimento, custo variável, quantidades de insumos e produtividades oriundos de Banerjee e Adenaever (2014) e Benis, Reinhart e Ferrão (2017).

Já a tecnologia de produção em fazendas verticais com nível mediano de investimentos e menores dimensões foi desenvolvida de forma simular a um sistema produtivo em galpões ou pequenos prédios, com níveis de produtividade também elevados e com produções individualizadas de produtos agrícolas. Dessa forma, foi necessário desenvolver quatro tecnologias distintas de fazendas verticais com menores dimensões: (i) Fazendas verticais para produção de vegetais; (ii) Fazendas verticais para produção de raízes; (iii) Fazendas verticais para produção de feijões; e (iv) Fazendas verticais para produção de frutas. Para o desenvolvimento desses sistemas de produção, foram utilizados dados de Al-Kodmany (2018), Benis, Reinhart e Ferrão (2017) e Despommier (2011; 2013).

A lista dessas tecnologias pode ser observada na Tabela 15.

Tabela 15: Tecnologias desenvolvidas para produção em fazendas verticais.

TECNOLOGIAS	PRODUTOS
Fazenda vertical com alto nível de tecnificação	Feijões, frutas, raízes e vegetais
Fazenda vertical com baixo nível de tecnificação - 1	Feijões
Fazenda vertical com baixo nível de tecnificação - 2	Frutas
Fazenda vertical com baixo nível de tecnificação - 3	Raízes
Fazenda vertical com baixo nível de tecnificação - 4	Vegetais

Fonte: Elaboração própria

3.3.3.2 Agricultura – Hortas urbanas

As hortas urbanas são amplamente difundidas não apenas no Brasil, mas também no mundo. Assim como as fazendas verticais, as hortas urbanas são encontradas de diversas formas e têm como preceito inicial a produção de alimentos em cidades a fim de diminuir a dependência de alimentos provenientes de terceiros, ou então, aumentar a segurança alimentar das comunidades.

Nesse contexto, pode-se dividir as hortas urbanas em duas grandes classes, as privadas e as comunitárias. As hortas comunitárias no Brasil são feitas geralmente com o auxílio do governo e implementadas dentro ou no entorno de comunidades ou então, em escolas públicas, para alimentação dos estudantes e, distribuição solidária aos pais dos alunos da escola. Esse tipo de parceria pode ser atualmente observado no Rio de Janeiro no projeto Hortas Cariocas em parceria entre comunidades carentes e a prefeitura, sendo todo o alimento voltado para as comunidades carentes, com insumos e mão-de-obra especializada fornecida pela prefeitura do município (ARRUDA, 2016; DO NASCIMENTO e NEVES, 2018; MARGEM, 2021; O'REILLY, 2014). Além desse tipo de hortas comunitárias, atualmente têm se tornado cada vez mais comum no mundo inteiro encontrar hortas comunitárias nos topos dos prédios residenciais e comerciais, para abastecer restaurantes e prover alimentos frescos e muitas vezes sem insumos químicos aos condôminos (BEGUM *et al.*, 2021; MCELDFOWNEY, 2017; MENGUAL, 2015; QUDDUS, 2022).

Dessa forma, devido à vasta gama de sistemas de produção em hortas urbanas, optou-se por criar mais de uma tecnologia para esse sistema de produção agrícola. As hortas urbanas foram divididas em dois padrões distintos, uma com baixo grau de tecnificação, espelhando uma horta comunitária em comunidades e escolas públicas, e outra com alto grau de tecnificação, que buscou representar uma horta nos topos dos edifícios comerciais ou *rooftops*. É importante destacar que nas hortas urbanas desenvolvidas nesse projeto, foi considerada a produção apenas de vegetais, legumes, hortaliças e temperos, visto que são os cultivos mais comuns nas hortas urbanas brasileiras.

A horta comunitária, apesar de não requisitar grandes investimentos iniciais, baixo custo de manutenção e poucos insumos, possui uma baixa produtividade se comparada com as hortas em *rooftops*. Não obstante, nos *rooftops*, apesar de terem uma grande produtividade, necessitam de muitos insumos, além de eletricidade, o que não é

necessário nas comunitárias, e possuem um alto nível de emissão de GEE, devido aos fertilizantes nitrogenados.

Dessa forma, foi determinada a necessidade de desenvolver dois tipos de hortas urbanas, uma com maior nível de tecnificação, representando as hortas do tipo *rooftop*, e uma com menor nível de tecnificação e de insumos, representando as comunitárias. As duas tecnologias de produção em hortas urbanas foram desenvolvidas de modo a produzir vegetais para consumo local e, para isso, utilizaram-se dados de Benis *et al.* (2018), Csortan, Ward e Roetman (2020), Hume, Summers e Cavagnaro (2021), Martellozzo *et al.* (2014), McDougall, Kristiansen e Rader (2019), Mirzabaev *et al.* (2012), Mohareb (2017), Orsini *et al.* (2013), Pradhan *et al.* (2015) e Pradhan (2020) para a sua elaboração.

3.3.3.3 Agricultura – Cultivo de arroz irrigado com enzimas

Utilizou-se como base para o desenvolvimento desse tipo de cultivo com a adição de enzimas a própria tecnologia de produção de arroz irrigado do modelo BLUES. Assim, adotou-se os dados do modelo para a produção de arroz irrigado desenvolvido por Angelkorte (2019). Logo, foram utilizados dados já regionalizados e com todos os insumos necessários para o desenvolvimento dessa tecnologia no modelo, contudo, sendo necessário atualizar dados de custos decorrentes da compra e utilização dessa enzima nos arrozaís e, a redução das emissões provenientes da produção de arroz irrigado com as enzimas. Para isso, utilizou-se dados de custos de mitigação oriundos de Harmsen (2019) e Harmsen *et al.* (2019), assim como o percentual de mitigação dessa tecnologia de Harmsen *et al.* (2019).

Desse modo, foi adotado um fator de redução das emissões de CH₄ de 30%, sendo necessário haver um aumento médio de US\$ 45,00 por cada tonelada de carbono equivalente mitigado (HARMSSEN, 2019; HARMSSEN *et al.*, 2019). Além disso, o potencial de expansão desse tipo de produção não foi limitado, sendo possível que todo o arroz brasileiro que for produzido através de sistemas de irrigação possa utilizar enzimas durante a sua produção. Contudo, limita-se apenas a entrada inicial desse tipo de tecnologia, visto que atualmente não são utilizadas essas enzimas. Assim, optou-se por permitir a entrada dessa tecnologia no modelo a partir de 2025.

3.3.3.4 Pecuária – Sistema confinado superintensivo de produção de gado de corte

Conforme já mencionado anteriormente, a produção de bovinos no modelo BLUES possui dois meios produtivos, envolvendo apenas criação em sistemas extensivos, com gado solto no pasto e sem a adição de qualquer suplemento alimentar. Dessa forma, o BLUES observa o melhoramento do pasto como forma de aumento de produtividade pecuária de bovinos de corte. Como consequência, percebeu-se a oportunidade de desenvolver um novo sistema de produção para a pecuária de bovinos de corte no modelo BLUES, que é o sistema superintensivo, no qual, o novilho passa diretamente para o processo de desenvolvimento e engorda com alimentação baseada em ração e forragem.

Assim, além dos sistemas de produção já existentes no modelo BLUES, ainda poderiam ser adicionados outros tipos de sistemas de produção com aumento de produtividade e respectivos *trade-offs* no setor de gado de corte. Porém, como o modelo BLUES se trata de um modelo de otimização com informações perfeitas e com função objetivo para minimização de custos, a implementação de tecnologias produtivas intermediárias, como é o caso dos sistemas semi-intensivos e intensivos, geralmente é escolhida pelo modelo. Portanto, optou-se pela atualização das tecnologias de produção de bovinos de corte já existentes, sistema extensivo, e a criação de um novo sistema de produção, com alto nível tecnológico, custos elevados e alta produtividade, que é o sistema superintensivo de criação de bovinos de corte.

Esse sistema tem como premissa chave o confinamento dos bezerros logo após o término da primeira etapa da vida desse animal, a fase de cria, que contempla desde o nascimento do bezerro até o período de desmame. Após essa etapa, outras duas fases seguintes são feitas em sistema de confinamento em currais totalmente cobertos, com fornecimento de alimentos com alto nível energético e condições climáticas adequadas para que o animal possa desenvolver todo o seu potencial genético. Dessa forma, finaliza-se o ciclo de cria, recria e engorda do animal em 18 meses e com rendimentos de carcaça de 60% (MONTEIRO, 2009). Logo, gerando um animal jovem terminado para o abate em cerca de 30% do tempo habitual de um sistema extensivo e com taxas de aproveitamento de carcaça melhor do que do sistema extensivo, o que gera maior volume de carne por animal.

Foi necessário desenvolver um sistema típico de criação de gado de corte em sistema superintensivo para que pudesse ser implementado nas regiões no modelo

BLUES. Assim, foi desenvolvida uma dieta padrão para o gado de corte em sistema superintensivo que se alimentaria nessa dieta durante 10 meses, visto que os outros 8 meses são destinados à fase de cria do animal. Foi verificado que para um tempo de abate tão curto seria necessário introduzir altas doses de alimento concentrado⁸ ao gado que, nesse caso, foi representado no modelo BLUES pela introdução de milho moído e farelo de soja. Portanto, optou-se pelo desenvolvimento de uma dieta animal composta de 65% de alimento concentrado, com 40% de milho moído e 25% de farelo de soja, e 35% de volumoso⁹, silagem feita a partir do cultivo de gramíneas na propriedade (BATISTELLI *et al.*, 2022; KUBIAK, 2006; PALERMO, 2011; TEIXEIRA, 2019). A quantidade máxima regional para a produção de volumoso foi o limitante para a determinação da taxa de lotação dessa tecnologia no modelo BLUES. Para isso, utilizaram-se dados de Angelkorte (2019) para a determinação da quantidade máxima de gramíneas produzidas de forma regionalizada no BLUES.

Além da dieta base diária, composta por milho, farelo de soja e silagem, foi determinado um consumo médio diário de água para sua dessedentação. Esse valor foi estimado de acordo com Maciel (2019) e Mota e Marçal (2019), que verificaram a necessidade de introdução de 40 litros de água por dia para cada animal do rebanho durante todo o período de recria e engorda, visto que durante a fase de cria, o bezerro ingere água proveniente exclusivamente do leite da mãe. Assim, esse valor de demanda hídrica de 40 litros de água/cabeça.dia é constante durante os 10 meses de recria e engorda animal.

A Tabela 16 apresenta um resumo da dieta padrão desenvolvida.

Tabela 16: Dieta padrão do gado confinado superintensivo.

ALIMENTO	QUANTIDADE (kg/animal.dia)
Farelo de Soja	5
Milho Moído	8
Silagem	7

Fonte: Elaboração própria

⁸ Alimento concentrado é o alimento que possui menos de 18% de fibras brutas na matéria seca e ricos em energia e/ou proteínas (DE GOES *et al.*, 2013).

⁹ Alimento volumoso é alimento com baixa concentração de nutrientes e energéticos e com alto teor de fibras, com níveis de fibras brutas superiores à 18% na relação com à quantidade de matéria seca (DE GOES *et al.*, 2013).

Um ponto importante para o desenvolvimento desse sistema de produção no modelo BLUES é a determinação dos custos fixos e variáveis e o investimento necessário para a implementação desse tipo de sistema de criação animal. Como já citado, o sistema superintensivo torna necessária a implementação de currais cobertos e com condições adequadas de ventilação e umidade para que o sistema possa ser desenvolvido de forma satisfatória. Desse modo, um dos principais investimentos para a sua produção é o da instalação de currais. Além disso, ainda é necessária a implementação de instalações para o armazenamento de rações e silagem, assim como para o processamento e homogeneização da ração final e armazenamento de equipamentos. Contudo, foi necessário fazer uma parametrização dos tempos de vida de cada um dos itens que compõem o investimento para a implementação dos sistemas superintensivos, visto que a vida útil dos itens varia entre 10 e 25 anos (KUBIAK, 2006). Dessa forma, foi estabelecida a vida útil desse sistema produtivo como sendo igual a 25 anos e posteriormente, é necessário haver um novo investimento para continuar com a adoção desse sistema produtivo.

Por sua vez, os custos fixos são decorrentes da manutenção das instalações, dos currais e dos equipamentos e da contratação de mão-de-obra qualificada para o manejo dos animais e controle da dieta animal. Já os custos variáveis são decorrentes da alimentação animal, compra de milho e farelo de soja, visto que a silagem será produzida na propriedade, combustível para o trato da produção e colheita das gramíneas e energia elétrica para a operação dos equipamentos e climatização dos currais.

Para isso, foram utilizados dados advindos da literatura para o desenvolvimento desses custos de produção e investimento (KUBIAK, 2006; LIMA, 2016; PALERMO, 2011; VOLPATO *et al.*, 2021). Contudo, utilizaram-se os dados de Angelkorte (2019) para determinar os custos para a produção das gramíneas em sistemas de alta produtividade para a produção da silagem.

Um breve resumo dos custos e investimentos necessários para a implementação dos sistemas superintensivos na criação bovina de corte para o modelo BLUES pode ser observado na Tabela 17.

Tabela 17: Investimentos e custos para a implementação de sistemas confinados superintensivos.

VARIÁVEL	TEMPO DE DURAÇÃO	VALOR POR CURRAL (R\$)	
Investimento	Instalações	25 anos	6.401,00
	Curral	25 anos	6.122,00
	Equipamentos	10 anos	15.515,00
Custo Fixo	Manutenção	Anual	18.346,00
	Mão-de-obra	Anual	40.556,00
Custo Variável	Combustível	Anual	1.922,00
	Eletricidade	Anual	861,00
	Alimentação	Anual	24.236,00 – 109.062,00

Fonte: Elaboração própria

Além disso, a produtividade desse sistema foi desenvolvida de forma que 100% da necessidade de volumoso fornecido para os animais pudesse ser produzida dentro da própria fazenda. Dessa forma, foram utilizados dados regionalizados de Angelkorte (2019) para a determinação da capacidade de produtividade a nível regional desse sistema, que variou entre 48 e 76 UA/ha. Essa taxa de ocupação também teve influência direta nos custos e insumos necessários para a implementação desses sistemas de forma regionalizada.

A regionalização a nível de taxa de lotação também foi importante para o desenvolvimento das taxas de emissão de GEE provenientes desse tipo de sistema de criação animal. Esse é um ponto importante para a definição da entrada desse sistema de produção em cenários que envolvam limitações de CO₂ e CO_{2eq}. Conforme detalhado na seção 2.2.1.2.4, a redução de CH₄ proveniente da produção de carne bovina em sistemas superintensivos com confinamento, em comparação com os sistemas extensivos, varia entre 30-40%, em relação as emissões de CO_{2eq} do produto final. Dessa forma, foi adotada uma redução média de 35% nas emissões de CH₄ provenientes do gado em sistema superintensivo em comparação com o sistema extensivo desenvolvido por Angelkorte (2019).

Para a determinação do potencial de expansão desse sistema, utilizou-se dados históricos de produção pecuária de bovinos confinados proveniente de IHS Markit (2021b). Dessa forma, verificou-se um potencial de expansão dos sistemas de confinamento de aproximadamente 100 mil cabeças por ano. Esses dados foram utilizados como parâmetros de referência para a determinação do potencial de expansão

dos sistemas de confinamento superintensivos. Foi utilizado um potencial inicial de implementação de sistemas superintensivos de 1 milhão de cabeças, em 2025, à nível Brasil e regionalizado de forma a espelhar os dados de IHS Markit (2021b) para o ano de 2021. Além disso, foi utilizado um fator de potencial de expansão 4% a.a. referente a taxa de expansão da implementação desses sistemas entre os últimos 5 anos da análise desenvolvida por IHS Markit (2021b).

Conforme explicitado na seção 2.2.1.2.4, a produção de gado confinado em sistemas superintensivos também possui a vantagem de haver uma maior possibilidade do aproveitamento energético dos resíduos gerados pelos animais. Dessa forma, alterou-se o fator de coleta de resíduos desse tipo de produção para 100%, assim, sendo possível coletar e aproveitar todo o resíduo gerado pelos bovinos de corte produzidos através desse sistema. Essa premissa se difere do que havia sido considerado anteriormente por Morais (2021), visto que anteriormente o máximo de coleta dos bovinos de corte era de aproximadamente 25%, oriundo dos sistemas de produção através de sistemas integrados.

3.3.3.5 Pecuária – Enzimas em Sistema Superintensivo de Bovinos de Corte e Semi-intensivo de Gado Leiteiro

Para a elaboração dos sistemas de produção de bovinos de corte superintensivo e gado leiteiro semi-intensivo com enzimas se utilizou como base para o desenvolvimento dessa tecnologia no modelo BLUES os próprios dados do modelo para a produção de gado leiteiro desenvolvido por Angelkorte (2019) e dos dados expostos anteriormente, na seção 3.3.3.4, sobre o gado de corte em sistemas superintensivos. Isso foi feito visto a necessidade de controle da alimentação do gado para a adição das enzimas, que só pode ser garantido por meio de sistemas que tenham adição de suplementação animal.

Assim, ocorre a diferenciação entre as tecnologias com e sem a adição de enzimas através de diferenciação dos custos de produção, para a compra das enzimas, e nas taxas de emissão de CH₄ e CO_{2eq} das tecnologias de produção dentro do modelo BLUES. Para isso, do mesmo modo que foi feito para os sistemas com enzimas em arrozais, nessas tecnologias também se utilizaram os dados de custos de mitigação oriundos de Harmsen (2019) e Harmsen *et al.* (2019) assim como o percentual de mitigação de CH₄ e CO_{2eq} dessa tecnologia de Harmsen *et al.* (2019).

Ademais, utilizou-se fatores de redução das emissões de CH₄ de 30% a um custo médio de US\$ 45,00 por cada tonelada de carbono equivalente mitigado (HARMSEN, 2019; HARMSEN *et al.*, 2019). Além disso, optou-se por não restringir o potencial de penetração dessa tecnologia nos sistemas produtivos de gado de corte e leiteiro, sendo apenas vinculado o seu uso à produção em sistemas confinados a partir de 2025, visto que atualmente não são utilizadas em larga escala no Brasil.

3.3.3.6 Pecuária – Carne plantada

Foram desenvolvidos esses dois tipos de produção de carnes alternativas a partir de plantas, uma com matéria-prima a base de ervilhas, feijões e arroz e outra à base de soja e batata. Assim, utilizou-se como base de dados Heller e Keoleian (2018), van Vliet *et al.* (2021) e GFI (2022b) para o desenvolvimento da carne plantada do tipo Beyond Meat, e Vliet *et al.* (2021), Messina *et al.* (2022), Piper (2021) e GFI (2022b). Os dois sistemas de produção se mostraram similares, apenas com algumas diferenciações nas etapas agrícolas para a produção dos insumos necessários para a produção dessas carnes à base de plantas.

Assim, o desenvolvimento metodológico das tecnologias para implementação no BLUES seguiu as mesmas premissas de uso de água, emissões de processo, uso de energia elétrica e os custos de produção. Existem alterações apenas dos insumos agrícolas e suas proporções em cada uma das tecnologias desenvolvidas e a diferenciação dos sabores e texturas das carnes produzidas, podendo elas mimetizarem a carne bovina, a de frango e a de suínos.

3.3.3.7 Pecuária – Carne cultivada

Foram desenvolvidas três tecnologias de produção para cada tipo de carne produzida (bovina, frango e suína). Para isso, foram utilizados dados advindos de FAIRR (2021), Lynch e Pierrehumbert (2019), Tuomisto e de Mattos (2011), Tuomisto *et al.* (2014) e para as tecnologias desenvolvidas através de cianobactérias, Tuomisto *et al.* (2014) e FAIRR (2021) para sistemas de produção tendo como base o trigo e milho.

Ademais, para a determinação dos potenciais de expansão desses sistemas produtivos foram utilizados dados de GFI (2022a), Porte e Berti (2022) e Vergeer *et al.* (2021). Utilizou-se como base premissas conservadoras, com a instalação de uma planta

típica de 50 mil toneladas por ano a partir de 2025 para a produção a partir de trigo e milho e 2030 com cianobactérias.

3.4 Módulo de Demanda

O modelo BLUES possui demandas agropecuárias exógenas e endógenas. As demandas endógenas são oriundas do processo de otimização do modelo para o setor de energia e estão sujeitas às restrições de entrada que são fornecidas. Já as demandas exógenas são referentes às culturas e criações pecuárias alimentares. Essas demandas exógenas do modelo BLUES são fornecidas, em *soft-link*, através de dados brasileiros de produção de alimentos e projetadas até 2060 por meio de dados provenientes da otimização de demandas alimentares brasileiras e exportações nacionais da região Brasil do modelo COFFEE. No modelo COFFEE, essas demandas alimentares são geradas por meio de premissas fixas de dietas nacionais e capacidades regionais de produção de alimentos. A partir dessas demandas do COFFEE, são avaliadas e calibradas através de dados econômicos fornecidos em *soft-link* no modelo COFFEE com o modelo de equilíbrio geral computável TEA (ANGELKORTE, 2019; CUNHA *et al.*, 2020; CUNHA, 2019; KÖBERLE, 2018; ROCHEDO, 2016).

Conforme citado anteriormente, um dos pontos importantes para o trabalho foi a modificação das demandas agropecuárias do modelo BLUES para retirar a demanda por Outras Carnes, que englobava majoritariamente a criação de frangos, para a inclusão de Carne Suína e Carne de Frango. Dessa forma, é possível melhorar a representação das emissões de GEE e consumo hídrico proveniente da criação de suínos.

Ademais, também foi feita a inclusão de perdas e resíduos nas tecnologias de produção de alimentos do setor agropecuário. Ocorre uma conexão direta entre os sistemas de produção agropecuária, descritos na seção 3.3, com a diferenciação dos níveis de perdas ao longo da cadeia de alimentos. Dessa forma, foram implementados no modelo tecnologias de transformação dos alimentos agropecuários “antes da porteira” até o consumo final.

Essas etapas serão descritas nas subseções a seguir.

3.4.1 Demandas exógenas do modelo BLUES

Conforme citado anteriormente, uma das demandas do modelo BLUES desenvolvido por Koberle (2018) e Angelkorte (2019), é a de Outras Carnes que representa basicamente a produção de frangos para a produção de carne de frango. Isso acontece porque a tecnologia de produção de Outras Carnes tem como saída a produção de cabeças de animais e a criação de frangos representa cerca de 90% da produção de carnes não bovinas (IHS MARKIT, 2021b).

Dessa forma, por conta da importância da produção de suínos para as emissões e consumo de água e rações, optou-se por separar as demandas e as tecnologias de produção de Outras Carnes para Carne Suína e Carne de Frango, através da produção de Frangos de Corte e Suínos. Assim, como a tecnologia de produção, abate e conversão em carne já existente no BLUES para Outras Carnes representava apenas a produção de Frango de Corte, foi determinado que essa tecnologia poderia se manter inalterada, tendo o seu nome convertido para Frango. Assim, foi necessário o desenvolvimento da cadeia de produção da carne de porco, com meios de criação padrões para a produção de suínos e sistemas de abate e conversão de carcaça para carne suína, conforme descrito na sessão 3.3.1.

Portanto, além das 15 culturas alimentares e 6 culturas energéticas já existentes no modelo BLUES, o modelo passou a conter 5 criações pecuárias, devido à adição da produção de suínos (Tabela 18). Dessa forma, se tornou possível determinar de forma mais adequada as divisões das emissões e os consumos de água e outros insumos do setor agropecuário nacional.

Tabela 18: Nova divisão de commodities agropecuárias do modelo BLUES.

CULTURAS		CRIAÇÕES
ALIMENTARES	ENERGÉTICAS	
Algodão	Cana-de-açúcar	Frango de Corte
Arroz	Florestas Plantadas	Galinha Poedeira
Café	Gramíneas	Gado de Corte
Cana-de-açúcar	Milho	Gado Leiteiro
Castanhas/Nozes	Oleaginosas	Suínos
Cereais	Soja	
Feijões		
Florestas Plantadas		
Frutas		
Milho		
Oleaginosas		
Raízes		
Soja		
Trigo		
Vegetais		

Fonte: Elaboração própria

As demandas exógenas do modelo BLUES apresentavam inicialmente uma boa representação a nível nacional do montante produzido no país para os anos base (2010, 2015 e 2020). Contudo, a nível regional (Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste), isso não era percebido. Uma vez que o modelo não apresenta uma regionalização da demanda, assim como dos potenciais de expansão da produção de cada produto agropecuário, algumas inconsistências podiam ser percebidas ao analisar cada região de forma individualizada. Ocorriam migrações abruptas de culturas entre cada período de análise (5 em 5 anos), às vezes com mudanças totais das demandas nacionais de algumas culturas para uma única região, o que não é plausível.

Portanto, o primeiro esforço para o aprimoramento do módulo de demandas do modelo BLUES foi o de desenvolver no BLUES meios para regionalizar as demandas das culturas e limitar as projeções das mudanças, tanto para a expansão, quanto da diminuição das culturas regionalmente. Para isso, foram utilizadas as bases de dados provenientes da CONAB (2023b) e do IHS Markit (IHS MARKIT, 2021a, b), sobre os níveis de produção do setor agropecuário brasileiro. Dessa forma, para cada uma das regiões do modelo BLUES, foram determinados valores fixos de produção para cada produto agropecuário para os anos base (2010, 2015 e 2020). Posteriormente, foram determinados três tipos de projeções, para os anos entre 2025 e 2060, possíveis para cada cultura ou criação existente no modelo BLUES, considerando o grau de importância dessa cultura ou criação para a região em questão.

Assim, os seguintes cenários possíveis para as projeções regionais dos produtos agropecuários foram determinados:

- Cultura/criação com alto nível de importância para a região. Como a região possui um histórico importante de criação ou cultivo de um produto agropecuário, essa região é mais propensa para a expansão do mesmo. Há um crescimento permitido de 5% a.a. da cultura/criação na região, ou então de 0,5% a.a. de redução da produção desse cultivo/criação;
- Cultura/criação com médio nível de importância para a região. A região possui histórico de criação ou cultivo do produto agropecuário, contudo, não sendo a que mais se destaca a nível regional. Essa região passa a ter um médio nível de propensão para a expansão dele. Dessa forma, o crescimento permitido é de 1,5% a.a. da cultura/criação na região, ou então de 1,5% a.a. de redução da produção desse cultivo/criação; e,
- Cultura/criação com baixo nível de importância para a região. A região não possui histórico de criação ou cultivo do produto agropecuário, assim, essa região é será prioritária para a expansão do mesmo. Assim, o crescimento permitido é de 0,5% a.a. da cultura/criação na região, ou então de 10% a.a. de redução da produção desse cultivo/criação.

Dessa forma, regiões que já são tradicionais na produção de um determinado produto agropecuário tenderão a seguir um potencial de expansão, contudo, sem poder assumir sozinhas a produção desse determinado produto no médio prazo. Já regiões que não são tradicionais para a produção desse produto não serão capazes de produzir quantidades relevantes, mesmo que no longo prazo. Um resumo das categorizações regionais das culturas e criações desenvolvidas no BLUES pode ser observado na Tabela 19.

Tabela 19: Categorização regional das culturas e criações.

PRODUTO	NÍVEL DE IMPORTÂNCIA REGIONAL				
	SE	S	CO	NE	N

Trigo	Médio	Alto	Baixo	Baixo	Baixo
Frutas	Alto	Médio	Baixo	Médio	Baixo
Soja	Baixo	Alto	Alto	Baixo	Baixo
Milho	Médio	Médio	Alto	Baixo	Baixo
Cereais	Alto	Médio	Alto	Baixo	Baixo
Raízes	Médio	Médio	Baixo	Médio	Médio
Arroz	Baixo	Alto	Baixo	Baixo	Baixo
Feijões	Médio	Médio	Médio	Alto	Baixo
Oleaginosas	Baixo	Baixo	Alto	Alto	Alto
Castanhas/Nozes	Alto	Baixo	Baixo	Alto	Baixo
Cana-de-açúcar	Alto	Médio	Médio	Baixo	Baixo
Café	Alto	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
Algodão	Baixo	Baixo	Alto	Médio	Baixo
Floresta Plantada	Alto	Alto	Alto	Médio	Alto
Gado de Corte	Médio	Médio	Alto	Baixo	Médio
Suínos	Médio	Alto	Médio	Baixo	Baixo
Frangos	Médio	Médio	Médio	Médio	Baixo
Gado Leiteiro	Alto	Alto	Médio	Baixo	Baixo
Ovos	Alto	Médio	Médio	Médio	Baixo

Fonte: Elaboração própria

3.4.2 Perdas e resíduos de alimentos agropecuários

Atualmente, o modelo BLUES possui uma boa estruturação dos níveis de resíduos provenientes dos processos produtivos na fase agrícola da produção de culturas alimentares e energéticas, assim como de criações da pecuária. Logo, é feita de forma adequada a quantificação desses resíduos e dos níveis de emissões, destinação e meios de utilização desses resíduos agropecuários para o setor energético e de fertilizantes orgânicos (MORAIS, 2021). Contudo, não há no modelo a devida quantificação e detalhamento de meios de mitigação dos resíduos e perdas de alimentos decorrentes da cadeia de produção desses alimentos entre o momento “pós-porteira” ou “pós-colheita” até a aquisição desse alimento pelo consumidor final.

A construção dessa cadeia é importante principalmente porque o Brasil apresenta números elevados de perdas e desperdício de alimentos, alcançando entre 15 e 26 Mt/ano, sendo essa cadeia supracitada responsável por cerca de 90% desse montante (FAO, 2017a). Assim, fica claro que os processos de perdas, oriundas do transporte, armazenamento e distribuição, e de resíduos, decorrentes do processamento desse

alimento, são a parte mais importante dessa cadeia de perdas e desperdício de alimentos agropecuários.

Com o intuito de reduzir esses números Csorban *et al.* (2020), Hume, Summers e Cavagnaro (2021), IPCC (2022a), Kriewald *et al.* (2019) e Orsini *et al.* (2013) apontam como sendo de suma importância a aproximação do produtor inicial ao consumidor final, assim como a utilização de meios tecnológicos que auxiliem na redução dos níveis de perdas da cadeia produtiva.

Dessa forma, buscou-se desenvolver uma metodologia adequada para a implementação das cadeias de perdas e desperdício de alimentos agropecuários na estrutura do modelo BLUES. Portanto, o modelo passou a ter a liberdade de escolher de forma endógena medidas de produção agropecuárias com menores ou maiores níveis de perdas.

Para isso, foram desenvolvidos no modelo três cadeias alimentares:

- Criação de uma conexão da produção de alimentos no campo com o consumidor final;
- Interligação do grande produtor urbano com o consumidor final; e,
- Caracterização do próprio produtor urbano como consumidor final, diminuindo assim, os níveis de perdas e resíduos ao longo da cadeia produtiva.

Na primeira cadeia produtiva o alimento sai do campo (nível primário) e é transportado até o armazenamento e posteriormente, até as centrais de processamento. Nesse processo de transporte, o alimento primário é transformado em secundário, sendo introduzido o fator de perdas de alimentos durante os processos de armazenamento e transporte dos alimentos. Posteriormente, esse alimento secundário é transformado em alimento final através da tecnologia de processamento do alimento. Nessa etapa, foi descontado do alimento secundário todos os resíduos de processamento desse alimento até ele se tornar o produto final ofertado para o consumidor final. Esse produto passa pelo processo de distribuição, que interliga a fase industrial com a fase de oferta até o consumidor. Nesse processo são observadas perdas de produto ocasionadas pela má armazenagem e manuseio incorreto desse alimento, o que gera perdas de distribuição. Por

último, esse produto serve como entrada para a tecnologia de produção de demanda de alimentos. Existe um fator de desperdício de alimentos durante o processo, chegando ao último nível, que é o da demanda de alimentos que pode ser exportada ou consumida nacionalmente.

Na segunda cadeia de produção de alimentos, a *commodity* agropecuária é produzida em perímetros urbanos por grandes produtores rurais, gerando como produto inicial um alimento secundário, visto que não há desperdícios oriundos do transporte ou armazenamento desse alimento até o seu processamento. Posteriormente, o alimento secundário segue toda a cadeia anteriormente explicada até se tornar em alimento final, que será distribuído para os supermercados, gerando perdas na distribuição e será ofertado ao consumidor final, atendendo a demanda exógena alimentar.

Na terceira cadeia de produção de alimentos, o alimento é produzido em perímetros urbanos, gerando como produto inicial um alimento final, visto que não há perdas oriundas do transporte ou armazenamento desse alimento até o seu processamento. Posteriormente, esse alimento final é distribuído e consumido ou mesmo vendido pelo pequeno produtor, diminuindo os níveis de perda e resíduos do processo e segue toda a cadeia anteriormente explicada até se tornar alimento para atingir a demanda exógena alimentar.

Esse processo de produção em zonas urbanas possui um paralelo muito similar ao sistema de geração elétrica através de geração distribuída (GD). Nos dois sistemas o produtor está próximo ao consumidor final ou então é o próprio consumidor final (prosumidor). Assim, os níveis de perdas são reduzidos já que não há necessidade da interligação em grande escala entre o consumidor e o produtor, que é feita por atravessadores. Ocorre também a diminuição de custos devido ao transporte, armazenamento e logística. No entanto, há problemas de falta de espaço urbano para a produção em larga escala desses dois produtos (alimentos e energia elétrica).

Em todas essas cadeias foram alterados os níveis de perdas e desperdício de alimentos agropecuários. Contudo, não foram alterados os níveis de desperdício de alimentos, visto que isso depende de mudanças de hábitos do consumidor final, o que não é proposto nesse trabalho, porém, é interessante para desenvolvimento futuro.

A Figura 27 apresenta um resumo da metodologia aplicada.

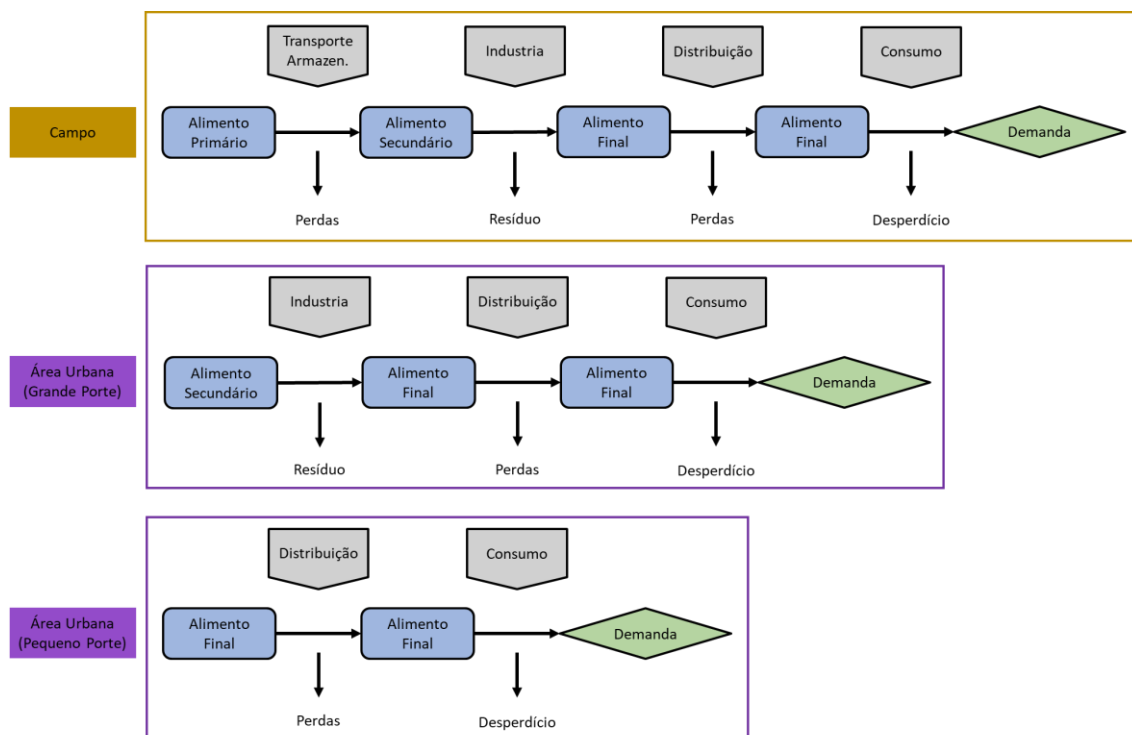


Figura 27: Cadeia de produção de alimentos.

Fonte: Elaboração própria

Para a implementação dessas cadeias produtivas, foi necessário alterar de forma individualizada para cada produto agropecuário os níveis de perdas e resíduos gerados ao longo da cadeia produtiva. Para isso, utilizou-se FAO (2022b) como base de dados de perdas e resíduos. Contudo, para não haver mudanças nas demandas exógenas de alimentos, que são provenientes do modelo COFFEE e TEA, pois poderia causar uma visão errada da importância da adoção de sistemas produtivos que reduzissem os níveis de perda ao longo da cadeia produtiva, optou-se por premiar os sistemas de produção em áreas urbanas com um excedente de produção agropecuária.

Logo, para os sistemas de produção agropecuária em perímetros urbanos e periurbanos, para cada tonelada de produto produzido era adicionado um valor percentual correspondente à quantidade de perdas que aquele sistema produtivo estaria evitando. Assim, por exemplo, ao se produzir uma tonelada de frutas em sistemas provenientes do “Campo”, estaríamos atendendo uma tonelada na demanda de frutas. Por outro lado, ao se produzir uma tonelada de frutas em hortas urbanas (cadeia de produção “Área Urbana [Pequeno Porte]”), que possuem um baixo nível de perdas e resíduos, essa quantidade produzida estaria atendendo cerca de 1,25 toneladas de frutas da demanda de frutas do modelo BLUES. Isso acontece visto que, conforme FAO (2022b), o nível de perdas de

frutas na cadeia produtiva é de aproximadamente 25%. Dessa forma, além de não ser necessário haver modificações nas demandas exógenas do modelo BLUES, ainda é possível observar a importância do papel do encurtamento da cadeia produtiva nos resultados provenientes da otimização do modelo e não decorrentes de modelos satélites ou de premissas heroicas.

A Tabela 20 apresenta os níveis de premiação para cada cadeia de produção de alimentos e produtos alimentares.

Tabela 20: Níveis de premiação das cadeias de produção de alimentos.

PRODUTO	PREMIAÇÃO (%)
Carne Bovina (Plantada/Cultivada)	15
Carne Frango (Plantada/Cultivada)	15
Carne Suína (Plantada/Cultivada)	15
Frutas (Fazendas Verticais/Hortas Urbanas)	25
Vegetais (Fazendas Verticais/Hortas Urbanas)	15
Raízes (Fazendas Verticais/Hortas Urbanas)	15
Feijões (Fazendas Verticais/Hortas Urbanas)	10

Fonte: Elaboração própria

3.5 Cenários

Com o intuito de verificar as variações e entender melhor o impacto das modificações realizadas no modelo BLUES, optou-se por desenvolver diferentes tipos de cenários, com variações de premissas climáticas e de grupos tecnológicos implementados no modelo.

Assim, foram desenvolvidos um total de 10 cenários, sendo um inicial representando o modelo BLUES antes das modificações sugeridas no desenvolvimento desse trabalho e outros nove contendo todas as alterações dos módulos de solo e de

demandas agropecuárias, mas com variações de premissas climáticas e de penetração tecnológica.

A respeito das variações das premissas climáticas, foram desenvolvidos três cenários base:

- Cenário BAU (do inglês – *Business-as-Usual*), representando o Brasil seguindo as mesmas políticas públicas que são adotadas atualmente, sem haver modificações comportamentais ou em questões ambientais e energéticas devido a ambições climáticas. Esse comportamento também é projetado até o final do horizonte de análise (2060), sem haver quaisquer alterações no contexto socioambiental e energético devido a medidas de combate às mudanças climáticas;
- Cenário NDC, cumprindo as ambições da NDC brasileira, com neutralidade climática até 2050, logo, atingindo emissões líquidas zero de GEE até 2050. Ademais, é imposto nesse cenário uma precificação de carbono equivalente de 50 US\$.tCO_{2eq}⁻¹, em 2060, para CH₄ e N₂O, não havendo custo de carbono para o CO₂ visto que esse é advindo diretamente do modelo. Para a ponderação dos custos de carbono equivalente de cada gás de efeito estufa, foram utilizados os valores do potencial de aquecimento global de 100 anos (do inglês: *Global Warming Potential 100* – GWP₁₀₀) advindo do Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (do inglês: *IPCC Fifth Assessment Report – AR5*), que é igual a 28, para o CH₄, e 265, para o N₂O. O custo de carbono equivalente cresce linearmente entre 2025 e 2060; e,
- Cenário 1.5, que atinge o orçamento de carbono previsto para o Brasil até 2060 para que o mundo possa atingir 1,5°C em 2100. Esse orçamento é oriundo do modelo COFFEE e é igual à -1,3 GtCO₂ acumulado entre os anos de 2010 e 2060. Nesse cenário também é utilizado o mesmo custo de carbono equivalente exógeno de 50 US\$.tCO_{2eq}⁻¹, em 2060, do cenário NDC.

Ressalta-se que tanto o cenário NDC, quanto o cenário 1.5, foram desenvolvidos de forma a assumir desmatamento líquido zero até 2030. Ademais, os dois cenários cumprirem as principais metas estabelecidas pelo Plano ABC+ como recuperação mínima de pastagens (pelo menos 30 Mha), implementação de sistemas do tipo ILPF (pelo menos 10 Mha), participação de sistemas de plantio direto e irrigados – representado pelo sistema Alta Produtividade (pelo menos 12,5 Mha) e floresta plantadas (pelo menos 4 Mha).

Em relação das diferentes penetrações de grupos tecnológicos, apresentados na sessão sobre a atualização do módulo agropecuário do modelo BLUES, foram desenvolvidos outros três cenários:

- Cenário 1, sem nomenclatura adicional, contendo todas as atualizações e mudanças estruturais descritas nas sessões sobre os módulos de solo e demandas e com a adição do grupo de tecnologias descritos na sessão de Sistemas Integrados;
- Cenário 2, “Agri”, é o Cenário 1 com a adição das medidas disruptivas agrícolas e perdas do setor agrícola; e,
- Cenário 3, “Comp”, que é o Cenário 2 mais a incorporação das tecnologias disruptivas da pecuária e a parte das perdas da pecuária.

Dessa forma, foram desenvolvidos 10 cenários conforme exposto na Tabela 21.

Tabela 21: Cenários desenvolvidos.

CENÁRIO	RESTRICÇÕES CLIMÁTICAS	MÓDULOS						
		SOLO	DEMANDAS	AGROPECUÁRIO				
				SISTEMAS INTEGRADOS	DISRUPTIVAS AGRICULTURA	DISRUPTIVAS PECUÁRIA	PERDAS AGRÍCOLAS	PERDAS PECUÁRIA
BLUES 1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
BAU	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
NDC	Net-zero GEE até 2050	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
1.5	Orçamento brasileiro de carbono em 2060 para um mundo 1.5°C em 2100	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
BAU_AGRI	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Não
NDC_AGRI	Net-zero GEE até 2050	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Não
1.5_AGRI	Orçamento brasileiro de carbono em 2060 para um mundo 1.5°C em 2100	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Não
BAU_COMP	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
NDC_COMP	Net-zero GEE até 2050	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
1.5_COMP	Orçamento brasileiro de carbono em 2060 para um mundo 1.5°C em 2100	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: Elaboração própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão expostas as comparações dos resultados decorrentes do antigo modelo BLUES 1.0 com a nova versão do modelo no cenário BAU (seção 4.1), as comparações dos resultados dos novos cenários desenvolvidos para a transição agropecuária (seção 4.2) e uma discussão das oportunidades, desafios e barreiras para a implementação da transição agropecuária no Brasil assim como suas implicações políticas nas áreas climática, econômicas, tecnológicas e de energia (seção 4.3).

4.1 Comparações com o antigo BLUES 1.0

Inicialmente, a seguinte seção apresentará uma breve comparação da implementação das atualizações do modelo BLUES e a versão anterior do modelo, denominado BLUES 1.0, que é oriundo do desenvolvimento metodológico feito por Koberle (2018) e posteriormente atualizado por Angelkorte (2019).

A escolha pelo desenvolvimento da comparação do BLUES 1.0 apenas com o cenário BAU se deu devido ao fato de que as modificações do novo BLUES foram tão extensas que não seria possível desenvolver comparações justas nos demais cenários. Essa comparação será feita apenas de forma exemplificativa e a análise será feita de forma a verificar as alterações oriundas das mudanças de energia primária, geração elétrica, produção de biocombustíveis, mudança de uso do solo e emissões setoriais. Não serão feitas análises de comparações regionais devido o BLUES 1.0 não apresentar níveis de produção agropecuária regionalizados.

Ao analisar o resultado mais amplo do setor energético fornecido pelo BLUES, que é a oferta de energia primária da matriz energética nacional, percebe-se que as alterações decorrentes da atualização do modelo fizeram com que em 2050 o modelo necessitasse de uma menor quantidade de energia primária, principalmente decorrente de óleo, biomassa e cana-de-açúcar (Figura 28). As atualizações no modelo fizeram com que o cenário BAU necessitasse de 21% menos energia primária em comparação ao cenário BLUES 1.0, representando uma redução de aproximadamente 94 Mtep/ano em 2050. Essa redução se deu principalmente devido a redução da demanda por biomassa, 37,5 Mtep/ano em 2050, óleo, 28,2 Mtep/ano em 2050, carvão, 20,6 Mtep/ano em 2050 e cana-de-açúcar, 16,4 Mtep/ano em 2050. Contudo, havendo um incremento significativo na

participação de fontes renováveis como eólica, com um incremento de 296% em comparação com o cenário BLUES 1.0, cerca de 13,8 Mtep/ano em 2050, solar, que aumentou em 444% sua participação, aproximadamente 6,1 Mtep/ano em 2050, e hídrica, cerca de 9,5% de incremento, passando de 40,4 Mtep/ano em 2050, no cenário BLUES 1.0, para 44,2 Mtep/ano em 2050, no cenário BAU.

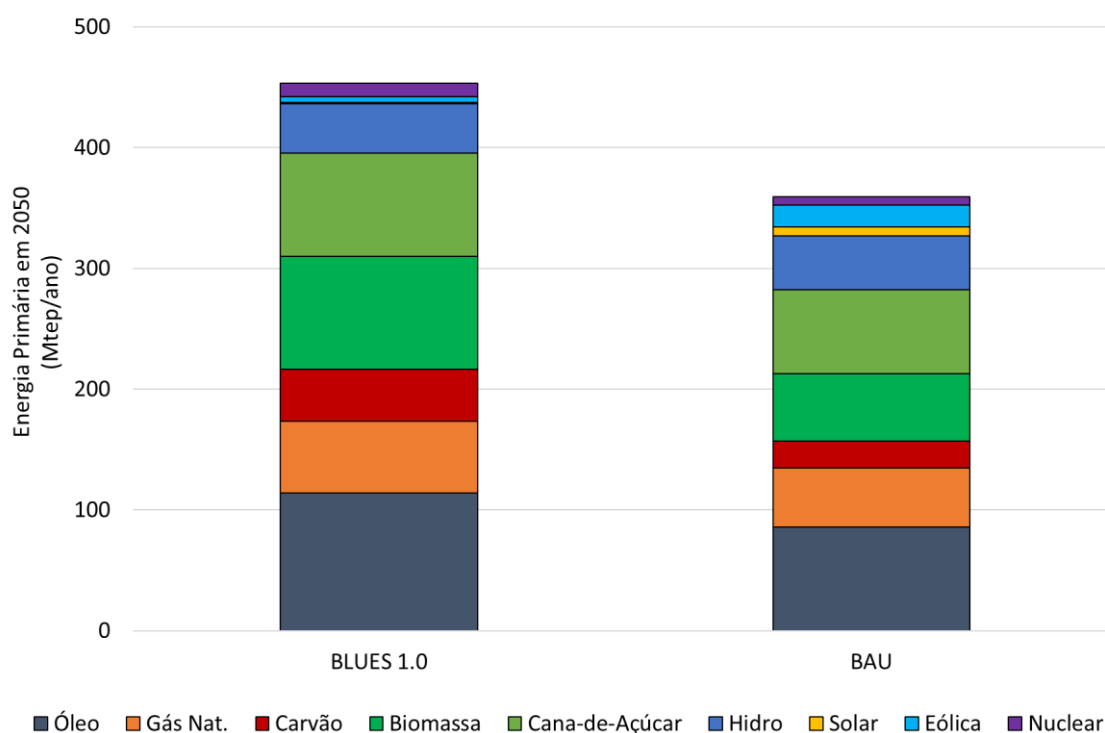


Figura 28: Energia primária dos cenários BLUES 1.0 e BAU em 2050 (Mtep/ano).

Fonte: Elaboração própria

Contudo, o mesmo comportamento não foi observado na geração de energia elétrica. Na geração de energia elétrica, as atualizações do BLUES, no cenário BAU, apresentaram um aumento na demanda de energia elétrica de aproximadamente 97,7 TWh/ano em 2050, um crescimento de cerca de 11% (Figura 29). Entretanto, esse crescimento foi decorrente principalmente do aumento da produção de energia elétrica fontes renováveis como solar, eólica e hídrica, conforme destacado anteriormente na energia primária. O crescimento dessas três fontes ocasionou um aumento na geração de renováveis de 277,5 TWh/ano em 2050, 72,7 TWh/ano, 160,3 TWh/ano e 44,5 TWh/ano, respectivamente. Esse aumento das fontes renováveis acabou compensando o decréscimo

da geração a partir de outras fontes como carvão e biomassa, de reduziram em 76,4% (123,7 TWh/ano em 2050) e 49,9% (76,9 TWh/ano em 2050), respectivamente.

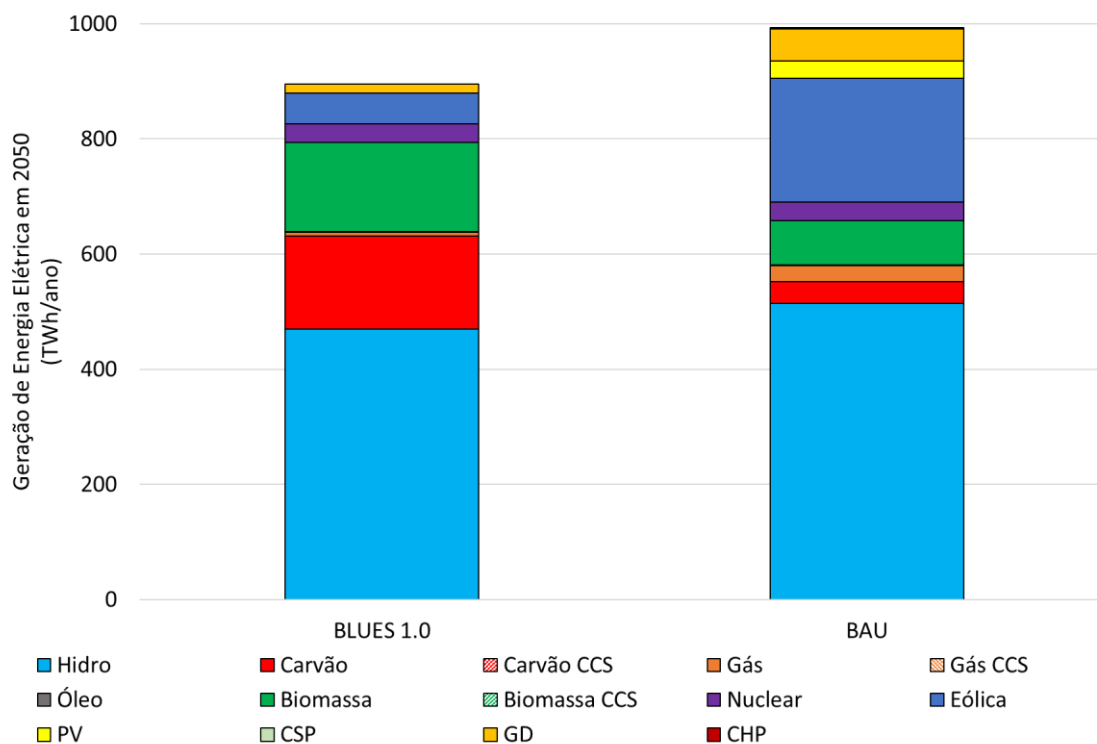


Figura 29: Geração elétrica dos cenários BLUES 1.0 e BAU em 2050 (TWh/ano).

Fonte: Elaboração própria

Ressalta-se que devido a alteração do perfil de produção de energia elétrica e biocombustíveis, que acabou reduzindo a necessidade de utilização de insumos advindos da biomassa – que tem um menor nível de eficiência energética do que combustíveis fósseis ou renováveis como eólica, solar e hidro – ocorreu uma diminuição da demanda por energia primária apesar de aumentar a demanda por energia elétrica.

Por sua vez, o setor de biocombustíveis apresentou um perfil que corroborou com a diminuição da demanda de energia primária. As modificações no BLUES fizeram com que o cenário BAU apresentasse uma redução de cerca de 31,6% na demanda por biocombustíveis, principalmente os provenientes de cana-de-açúcar como o etanol e de florestas plantadas, como o bioquerosene a partir de rotas de biomassa para líquidos (do inglês: *Biomass to liquid* – BTL) (Figura 30). Dessa forma, ocorreu uma redução de cerca de 830 PJ/ano em 2050, na produção total de biocombustíveis, sendo 856 PJ/ano, em 2050, da produção bioquerosene, 316 PJ/ano, em 2050, decorrente da menor produção de

etanol e 39 PJ/ano, em 2050, oriundos da produção de diesel verde. Contudo, havendo um aumento significativo da participação de biodiesel no setor de biocombustíveis, aumentando cerca de 64,4%, passando de 349 PJ/ano, em 2050, no cenário BLUES 1.0, para cerca de 574 PJ/ano, em 2050, no cenário BAU, e a entrada de uma pequena proporção de bio-GLP, bio-nafta e bio-bunker, de 61 PJ/ano, 59 PJ/ano e 33 PJ/ano, em 2050, respectivamente.

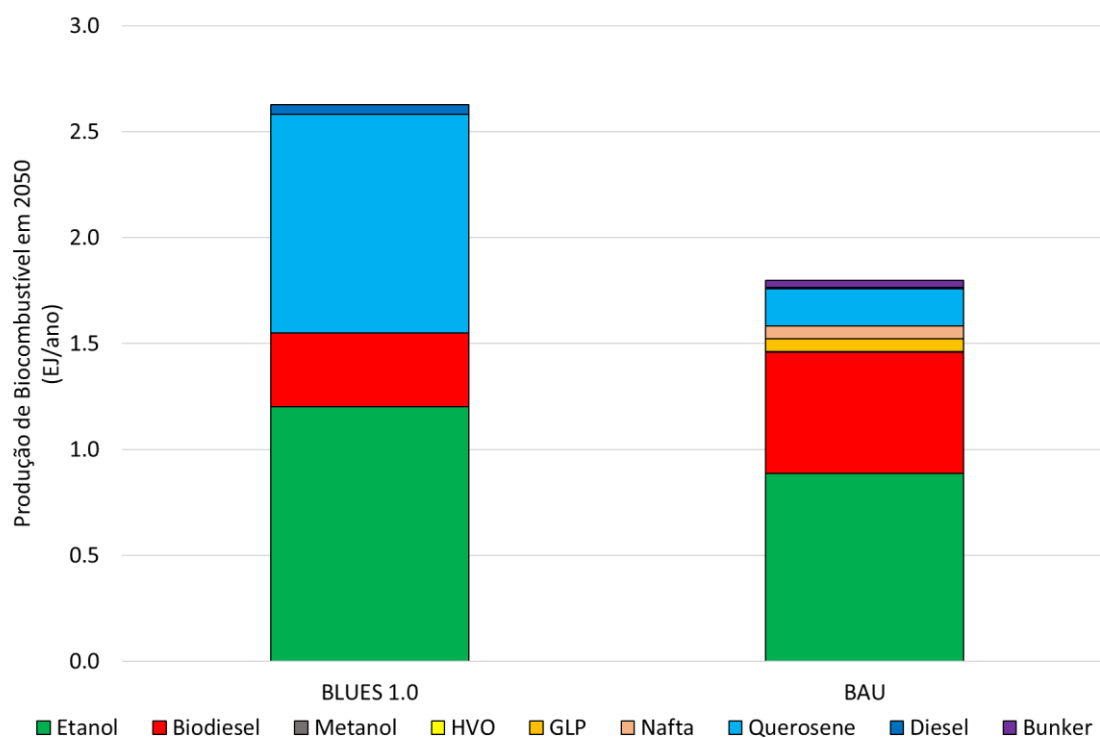


Figura 30: Produção de biocombustíveis dos cenários BLUES 1.0 e BAU em 2050 (EJ/ano).

Fonte: Elaboração própria

Ademais, o setor que apresentou a maior variação proporcional nos resultados entre os cenários BLUES 1.0 e BAU, foi o setor de mudança na cobertura do solo. As atualizações no modelo, que impuseram níveis superiores de desmatamento ao longo de todo o período de análise, geraram um aumento na mudança de cobertura de solo de aproximadamente 404% (Figura 31). Isso ocorreu principalmente devido as taxas de desmatamento seguirem nos novos cenários BAU projeções conforme são observadas no período histórico e não mais liberando essas taxas e apenas definindo o quanto que seria a variação máxima anual permitida para o desmatamento. Desse modo, o cenário BAU apresentou um desmatamento acumulado entre 2010 e 2050 de aproximadamente 112

Mha, enquanto no cenário BLUES 1.0 esse desmatamento era de apenas 13 Mha. Ressalta-se que a taxa de desmatamento utilizado na nova versão do BLUES é advinda de uma política de perpetuação da média das taxas de desmatamento dos últimos 10 anos no Brasil. Assim, havendo a conversão de florestas nativas para outras coberturas do solo, que podem ou não serem utilizadas pelo setor agropecuário, podendo haver áreas agropecuárias abandonadas em forma de pastagens degradadas.

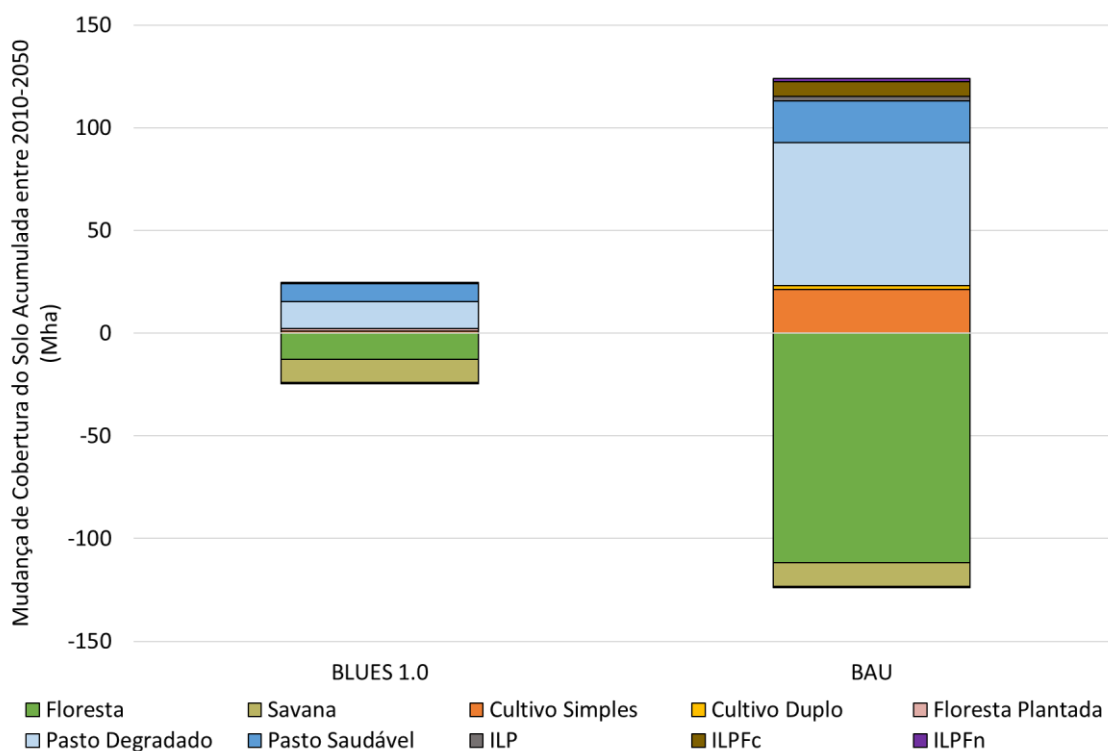


Figura 31: Mudança de cobertura do solo dos cenários BLUES 1.0 e BAU acumulada entre 2010 e 2050 (Mha).

Fonte: Elaboração própria

Essa alteração fez com que fosse liberado mais áreas de pastagens degradadas que poderiam ser convertidas em outras coberturas do solo. Assim, também foram observados crescimentos acumulados de áreas de monoculturas (cultivo simples), culturas rotacionadas (cultivo duplo) e pastagens saudáveis, que aumentaram, em relação ao cenário BLUES 1.0, 20 Mha, 3 Mha e 12 Mha, respectivamente. Além disso, devido a atualização dos sistemas de produção denominados como sistemas integrados (ILP, ILPFc e ILPFn) o modelo passou a verificar como sendo vantajoso economicamente a migração de culturas e criações bovinas para esses sistemas, visto que anteriormente não

havia qualquer penetração da tecnologia ILP (única existente no BLUES 1.0) e no cenário BAU, esses sistemas produtivos já representam uma expansão de 11 Mha no acumulado até 2050, em relação ao que havia no Brasil em 2020. Isso ocorreu devido a criação da tecnologia de abate animal para os sistemas integrados, anteriormente, no BLUES 1.0, o gado que era produzido nesses sistemas não era consumido, logo, perdendo competitividade perante os demais sistemas de produção.

Essa nova variação na quantidade de mudança do uso do solo também foi responsável pelo aumento nas emissões totais dos cenários em 2050 (Figura 32). Anteriormente, no BLUES 1.0, as emissões de CO₂ do setor de AFOLU eram quase que neutras em 2050 (12 Mt CO_{2eq}/ano), enquanto no cenário BAU elas cresceram para 552 Mt CO_{2eq}/ano, se tornando o maior contribuinte para as emissões do cenário em 2050. Sendo essas emissões de CO₂ AFOLU justamente decorrentes das mudanças de uso do solo, principalmente do desmatamento de florestas nativas. Contudo, o cenário BAU também passou a emitir menores emissões em todos os GEE provenientes do setor de energia, com redução de 13,4% no CO₂, 10,5% no CH₄ e 11,1% no N₂O. Já no setor de AFOLU, tanto o CO₂, já supracitado, quanto o N₂O aumentaram, cerca de 4.616% no CO₂ e 17,7% no N₂O. Já o CH₄ AFOLU, apresentou uma redução de cerca de 10,5%. Isso mostra que houve uma maior utilização de fertilizantes nitrogenados nos cenários atualizados (BAU) em relação ao BLUES 1.0. Por sua vez, o setor pecuário, apresentou uma redução significativa das emissões de metano decorrente principalmente da utilização de sistemas integrados para a produção de bovinos com maiores níveis de produtividade e maior conforto animal, o que reduz as emissões de metano por cabeça animal. Além disso, com a redução do tempo de abate, também há uma menor contribuição do setor pecuário nessas emissões de GEE, principalmente CH₄.

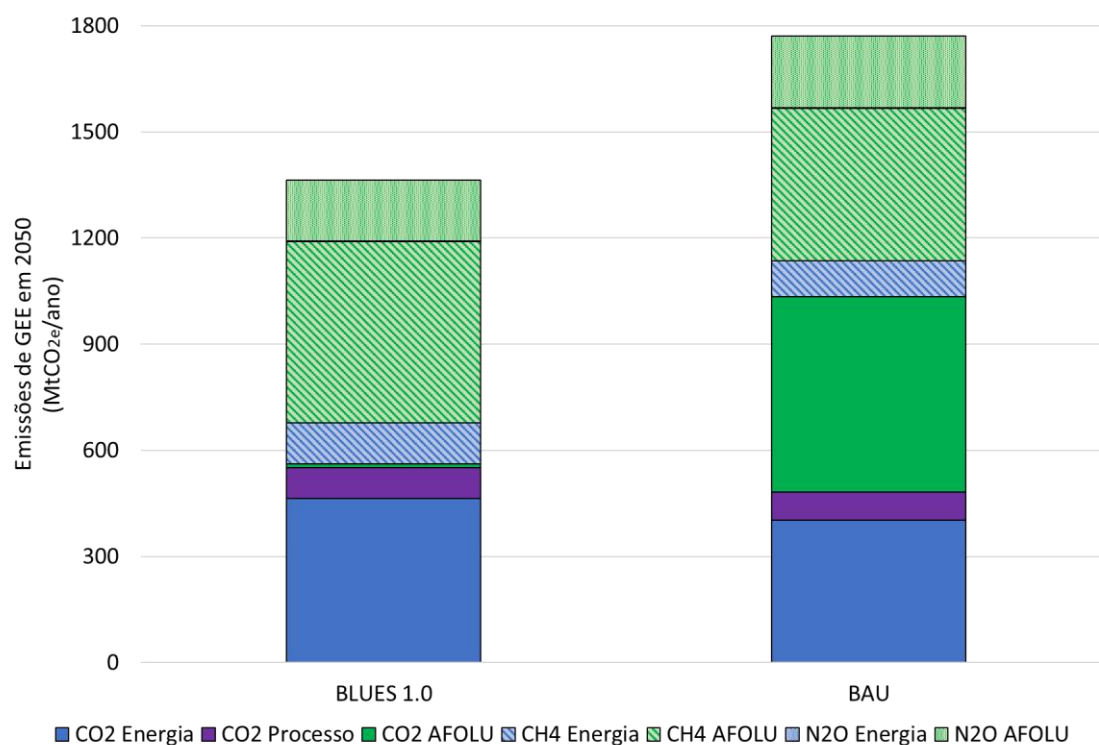


Figura 32: Emissões de GEE dos cenários BLUES 1.0 e BAU em 2050 (Mt CO_{2eq}/ano).

Fonte: Elaboração própria

4.2 Cenários da Transição Agropecuária

Nessa seção são feitas a exposição dos resultados mais relevantes, assim como as análises nos cenários desenvolvidos já com as alterações propostas. Nessa seção não serão feitas comparações entre o cenário BLUES 1.0 com os demais cenários desenvolvidos nesse trabalho. Os demais resultados, mais extensos e que foram considerados menos relevantes para a discussão da transição agropecuária, que não foram elencados para serem inseridos, são apresentados no Anexo em forma de tabelas ou figuras.

Inicialmente, os resultados oriundos dos cenários com apenas a implementação das tecnologias de ILPF (BAU, 1.5 e NDC) foram, em geral, similares aos resultados obtidos com a implementação das tecnologias do tipo “Agri” (BAU_Agri, 1.5_Agri e NDC_Agri). Conforme exposto na seção 3.5, os cenários “Agri” contemplam os cenários desenvolvidos com a adição dos sistemas de produção através de sistemas integrados e sistemas disruptivos do setor agrícola, assim como as tecnologias de redução de perdas do setor de agricultura. Isso mostra que apesar das tecnologias “Agri” serem consideradas pelo modelo como tecnologias importantes, visto que aumentam a variedade de opções

de mitigação de CO₂ e não-CO₂, nos cenários climáticos, sua penetração não é significativamente alta para alterar a otimização do BLUES no setor energético, como na geração elétrica, produção de biocombustíveis e em tecnologias de captura de CO₂. Contudo, como veremos a seguir, os cenários “Agri” demonstraram a importância das opções para a diminuição dos níveis de perdas de alimentos e utilização de enzimas em cenários de descarbonização (1.5) e neutralidade climática (NDC). Essas características auxiliam o setor elétrico e de biocombustíveis a adotar medidas menos disruptivas e com melhor relação custo x benefício nesses setores.

Um dos setores mais importantes da análise de resultados do modelo BLUES é o setor de geração elétrica, pois dele é possível analisar as principais demandas energéticas que serão utilizadas pela transição energética em cenários de descarbonização e neutralidade climática. Inicialmente, a adição de medidas disruptivas do setor agrícola e de perda de alimentos agrícolas geraram resultados similares dos observados nos cenários sem estas opções, principalmente nos cenários do tipo BAU. Em outros termos, tanto o BAU quanto o BAU_Agri apresentaram a mesma solução ótima para a geração elétrica.

Contudo, o mesmo não ocorreu de forma tão marcante nos cenários do tipo 1.5 e NDC, que apresentaram algumas mudanças. O cenário 1.5_Agri apresentou um incremento de 1,5% no total de energia elétrica produzida em 2060, com incremento de aproximadamente 17 TWh em 2060. Esse aumento foi decorrente de uma maior produção de energia elétrica proveniente de óleo, 9% (1,6 TWh), de biomassa, 11% (5,1 TWh), eólica, 3% (7,3 TWh), e solar PV, 5% (2,83 TWh), sem haver redução na produção de energia elétrica proveniente de outras fontes.

Já nos cenários NDC, a adição das tecnologias “Agri” apresentou uma redução na demanda total de energia elétrica requisitada pelo modelo, reduzindo em cerca de 4,2 TWh (0,4%) a demanda de eletricidade total em 2060. Desse total, cerca de 3,5 TWh foram provenientes de sistemas de produção de energia elétrica através de biomassa associada ao CCS, redução de 7% da necessidade de CCS para a produção de energia elétrica nesse tipo de cenário. Os resultados indicam que com a ampliação das medidas de neutralização de gases não-CO₂, as tecnologias à base de biomassa de se tornam menos necessárias, visto que não é mais necessário neutralizar volumes tão grandes de CO₂.

Em relação aos cenários os quais se adicionou todos os sistemas de produção desenvolvidos, tanto para a agricultura, quanto para a pecuária, assim como as tecnologias de redução de perdas agropecuárias – Cenários “Comp” – foi possível observar mudanças

mais robustas na solução do modelo. No cenário 1.5_Comp, as modificações já expostas, para o cenário 1.5_Agri, foram ampliadas, destacando-se a maior penetração de energia elétrica sendo produzida a partir de óleo, 22% superior em relação ao cenário 1.5, representando um aumento de 4 TWh em 2060 de energia elétrica a partir de óleo, além de aumentar a participação de eólicas em 10 TWh (4%) (Figura 33). As demais fontes seguiram o mesmo comportamento do cenário 1.5_Agri.

Além disso, no cenário NDC, a implementação de todos os novos sistemas de produção agropecuária (NDC_Comp) propiciou um aumento na demanda de energia elétrica de aproximadamente 50 TWh em 2060, em comparação ao cenário NDC. Esse comportamento foi diferente ao observado no cenário NDC_Agri, que apresenta uma redução de 5 TWh na demanda de energia em 2060. Esse resultado se deve principalmente ao aumento da demanda energética proveniente da produção de carne bovina sintética para redução das emissões de gases não-CO₂, visto que no ano, a demanda por eletricidade no setor de transporte em 2060 passou de 414 PJ, no cenário NDC, para 381 PJ (redução de 8%), no cenário NDC_Agri, e posteriormente 369 PJ (redução de 11%), no cenário NDC_Comp (Figura 33). Nos cenários “Agri” e “Comp”, toda a demanda por eletricidade que foi reduzida, em comparação com o cenário NDC, foi compensado pelo aumento da demanda por gasolina. Isso demonstra uma menor necessidade de eletrificação do setor de transportes visto que o modelo passa a ter outras medidas mais custo efetivas para mitigar GEE do que apenas focar na redução de CO₂ ao longo de toda a matriz energética brasileira.

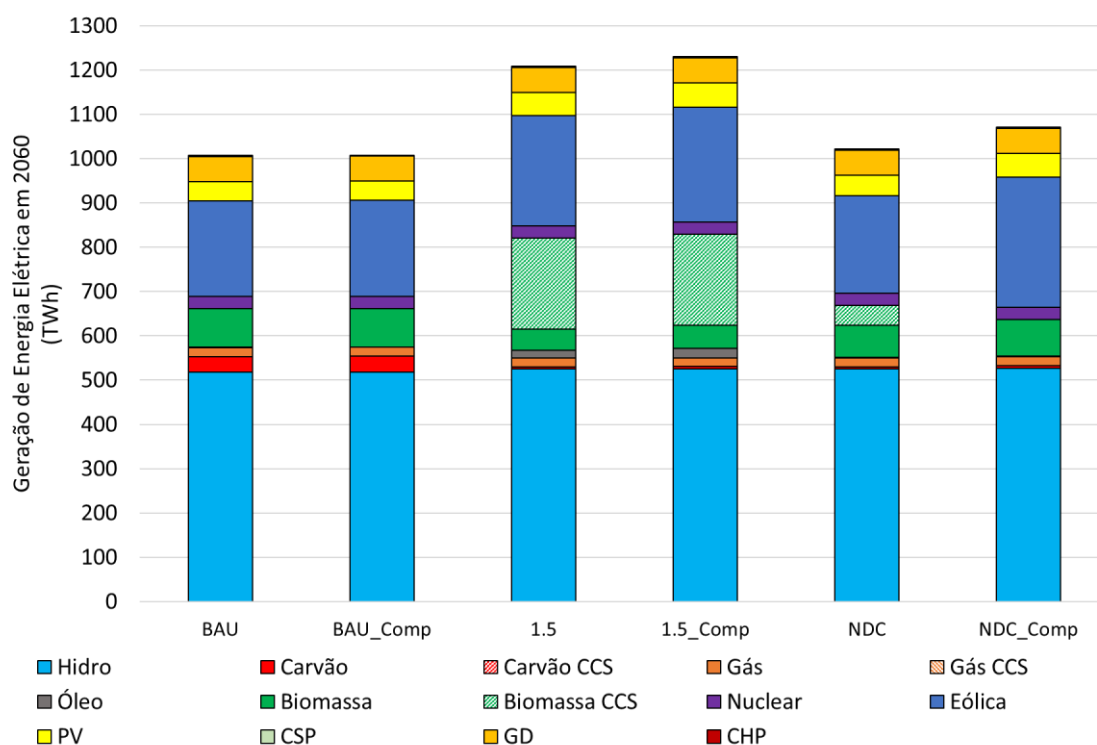


Figura 33: Geração elétrica. PV: Pannel fotovoltaico (do inglês – *Photovoltaic*); CSP: Energia solar de concentração (do inglês – *Concentrated Solar Power*); GD: Geração distribuída; CHP: Sistema combinado de geração de calor e energia (do inglês – *Combined Heat and Power*).

Fonte: Elaboração própria

Ademais, o cenário NDC_Comp apresentou um resultado que não era inicialmente esperado e que vai de encontro com a maioria dos resultados já obtidos com a utilização do modelo BLUES, que foi a ausência de utilização da biomassa, no setor elétrico, associada ao CCS para o atingimento da neutralidade climática. No cenário NDC_Comp, o modelo conseguiu reduzir em 99% a utilização de biomassa com CCS para a geração elétrica, em comparação ao cenário NDC, reduzindo de 46 TWh de biomassa com CCS em 2060, para 0,5 TWh no novo cenário (Figura 33). Isso ocorreu devido ao modelo, com a adição das novas tecnologias, possuir novos meios de mitigação de gases do tipo não-CO₂, o que diminui drasticamente a necessidade de utilização de tecnologias de CCS no setor elétrico para compensar o remanescente das emissões nacionais par atingir a neutralidade.

Porém, para isso acontecer, foi necessário aumentar a produção de energia elétrica através de outras fontes, principalmente eólica. Dessa forma, houve um aumento de 3 TWh (1%) na produção de energia elétrica através de fontes hídricas, 10 TWh (14%) na

biomassa – sem CCS –, 73 TWh (33%) de geração através de aerogeradores e 8 TWh (17%) de PV (Figura 33).

Contudo, ao verificar o contexto geral entre os cenários BAU, 1.5 e NDC – com e sem a implementação das novas tecnologias – pode-se verificar que a história entre os cenários com e sem os novos sistemas de produção implementados é similar, havendo apenas pequenas modificações. É possível verificar que em comparação aos cenários BAU, os cenários 1.5, possuem uma maior penetração de fontes renováveis, principalmente provenientes do setor agropecuário, visto a possibilidade de haver a produção de carbono negativo com a implementação de CCS na produção de energia elétrica. Além disso, há uma troca significativa entre as fontes fósseis, havendo uma menor produção de energia elétrica através de carvão e parte dessa eletricidade passando a ser produzida através de óleo (Figura 33). Isso tudo acontecendo devido a uma maior necessidade de descarbonização da matriz energética brasileira além de aumentar a demanda por eletricidade, principalmente advinda do setor de transportes de passageiros. Os cenários 1.5 mostraram que mesmo com a necessidade de descarbonização da matriz elétrica brasileira, o setor de óleo e gás continuam tendo um papel importante para a geração elétrica, principalmente devido o problema de intermitência das novas renováveis – solar e eólica – que entram em maior quantidade nos cenários 1.5. Assim, mostra a necessidade da continuidade nos investimentos na indústria de óleo e gás nacional para auxiliar na descarbonização nacional.

Por sua vez, nos cenários NDC, essa descarbonização ainda é importante, mas devido a ser necessária a redução também de gases não-CO₂ se torna mais complicada a escolha do modelo apenas por medidas de descarbonização e ele passa a reduzir também a produção de energia elétrica. Assim, diminui a necessidade de produção de eletricidade a partir de óleo e da utilização de volumes elevados de biomassa, com e sem CCS, para a geração elétrica (Figura 33), o que reduz as emissões de não-CO₂ proveniente do campo. Contudo, ainda mantendo os níveis de geração elétrica a partir de gás natural para estabilização do sistema elétrico nacional.

O setor de biocombustíveis é outro setor amplamente utilizado pelo BLUES como meio de redução das emissões de CO₂ (ANGELKORTE, 2019; BAPTISTA, 2020; DE OLIVEIRA *et al.*, 2021; MÜLLER-CASSERES *et al.*, 2021; ROCHEDO *et al.*, 2018; TAGOMORI *et al.*, 2023). Isso acontece devido a possibilidade da substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis, o que reduz a pegada de carbono do setor de

transportes, além de também possibilitar emissões negativas através de BECCS. Nos cenários analisados, foi possível observar comportamento muito similares entre os cenários BAU – com e sem a implementação dos novos sistemas de produção – e diferenças mais expressivas nos cenários 1.5 e principalmente, no cenário NDC_Comp. Com relação aos cenários BAU, foram observados mudanças marginais no cenário BAU_Comp, em relação com cenário BAU, havendo uma redução de 0,4% na demanda total de biocombustíveis em 2060 (8 PJ), referentes à redução de 4 PJ da produção de diesel verde de rotas avançadas e 4 PJ de biodiesel.

Nos cenários 1.5, também foram observadas variações pouco expressivas. Novamente o cenário “Comp” foi o que apresentou maior alteração, contudo, com ligeiro aumento na demanda por biocombustíveis em 2060, de apenas 0,2%, proveniente principalmente do aumento de 4 PJ de bio-GLP, 4 PJ de bio-nafta e 10 PJ de diesel verde. Nos cenários 1.5 esse tipo de comportamento já é esperado visto que o foco desse cenário é a descarbonização e o setor de biocombustíveis é o que propicia a maior possibilidade de redução das emissões de CO₂ do modelo BLUES, inclusive, com redução negativas devido a produção de biocombustíveis associados ao processo de BECCS.

Já nos cenários NDC, o modelo começa a verificar diferentes alternativas de mitigação de GEE, principalmente de gases não-CO₂, como o metano do setor pecuário. Assim, o setor de biocombustíveis diminui seu protagonismo, principalmente no cenário NDC_Comp, onde há uma redução de 22,5% na demanda de biocombustíveis (1,2 EJ), enquanto no cenário NDC_Agri, essa redução é de apenas 2% (88,2 PJ), em 2060.

No cenário NDC_Comp, a variação mais relevante é na demanda de diesel verde, que é produzido através de rotas avançadas, principalmente com a utilização de biomassa lignocelulósica proveniente de florestas plantadas, que reduz cerca de 0,6 EJ a sua demanda em 2060, passando de aproximadamente 2,0 EJ/ano para 1,4 EJ/ano, redução de cerca de 30% na demanda de diesel verde. Ademais, também há uma redução significativa na produção de bioquerosene (32,6%), bio-GLP (28,5%), bio-bunker (28,5%) e bio-nafta (28,4%), apenas com incremento na produção de biodiesel (35,3%) para suprir parte da demanda de diesel verde que deixou de ser produzido. Contudo, essa demanda superior de biodiesel foi de apenas 0,04 EJ/ano, consideravelmente inferior a parcela que deixou de ser produzida pelo diesel verde, que foi de 0,57 EJ/ano (Figura 34).

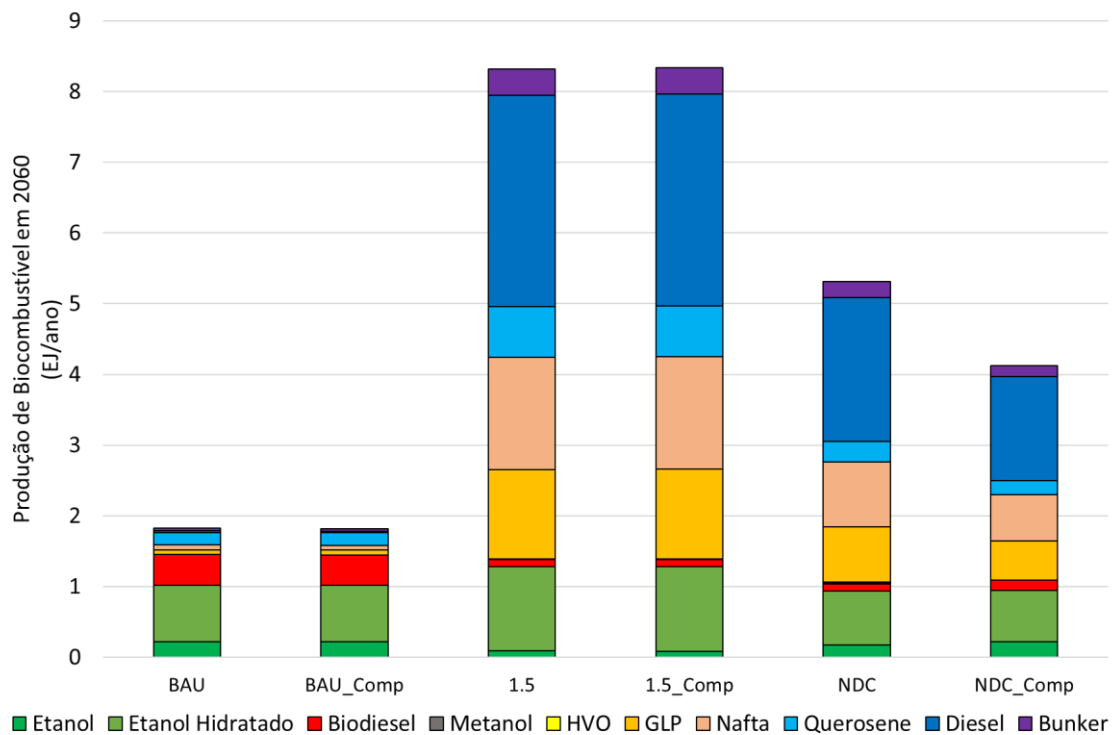


Figura 34: Produção de biocombustíveis em 2060. HVO: Óleo vegetal hidrotratado (do inglês – *Hydrotreated Vegetable Oil*); GLP: Gás liquefeito de petróleo; Diesel: Diesel verde; Bunker: Biobunker - Combustível marítimo.

Fonte: Elaboração própria

Assim, pode-se perceber que há uma diminuição importante da participação da produção de biocombustíveis na neutralização climática, principalmente do diesel verde. Logo, a implementação dos novos sistemas de produção agropecuários no BLUES auxiliou na redução, mais custo efetiva, de GEE que anteriormente se concentravam apenas em CO₂, junto com tecnologias de remoção de carbono, como o CCS e o BECCS.

Contudo, ao analisar a diferença entre os cenários climáticos, ainda é possível perceber a grande dependência dos cenários de restrição de carbono (1.5) em biocombustíveis avançados, principalmente diesel verde, que tem como saída a coprodução de bioquerosene, bio-nafta e bio-bunker, que são as principais parcelas produzidas nesses cenários. Já os cenários NDC, apesar de ainda possuírem dependência por biocombustíveis, entre 2-3 vezes mais do que em cenários BAU, passaram a ter menores volumes de biocombustíveis avançados sendo produzidos, redução essa de cerca de 29% inferior no cenário NDC_Comp ao comparar com o cenário NDC. Os resultados indicam um potencial redução, não só do custo dos combustíveis, mas também da dependência de tecnologias em grau de maturidade e escala ainda questionáveis.

Conforme Figura 35, essa redução do cenário NDC_Comp ocorreu principalmente devido a menor demanda por energia primária proveniente de florestas plantadas, resíduos florestais, oriundos da produção de áreas de florestas plantadas, e resíduos secos da agricultura (palhada). Além disso, não se observa a necessidade da expansão de outras fontes de energia primária, como cana-de-açúcar. Isso demonstra que nos cenários NDC ainda seria possível reduzir ainda mais as emissões de GEE a partir do aproveitamento energético dos resíduos agropecuários, como os resíduos agrícolas, florestais e gordura animal.

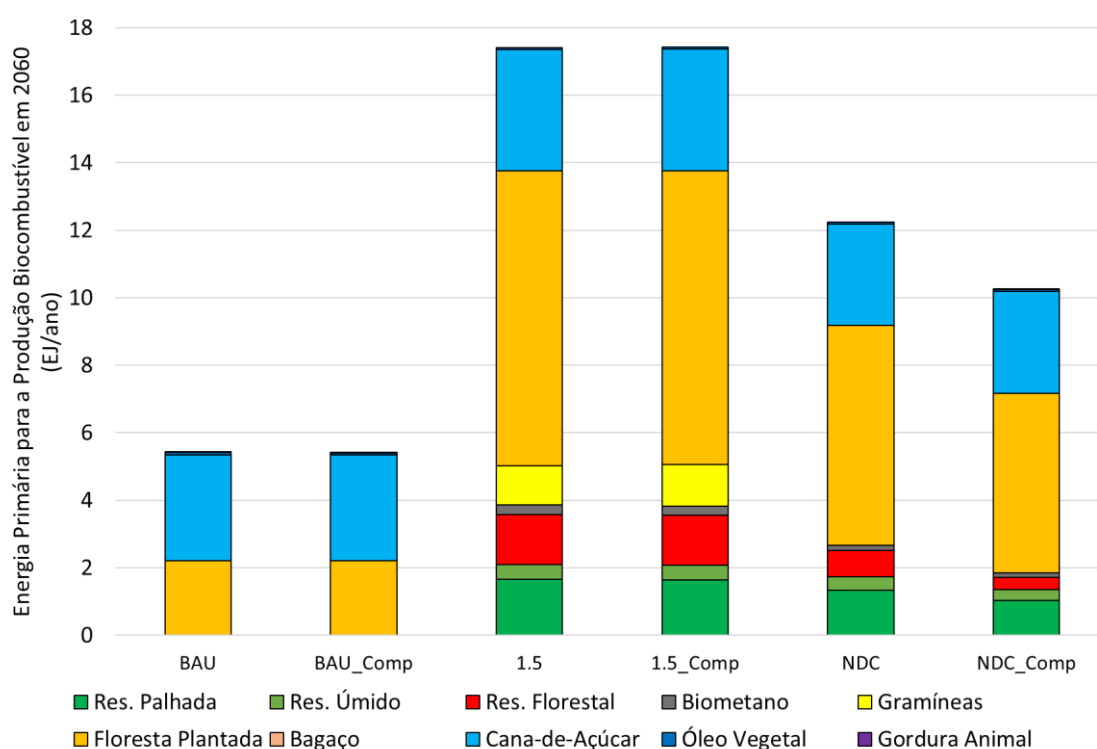


Figura 35: Participação das fontes de energia primária e biometano (energia secundária) para a produção de biocombustíveis em 2060. Res.: Resíduos; Bagaço: Bagaço de cana-de-açúcar.

Fonte: Elaboração própria

Em relação à cobertura do solo e suas transições, a implementação das novas tecnologias de produção agropecuárias não apresentou alterações significativas em termos do total acumulado de mudanças de cobertura do solo entre 2020-2060 (Figura 36). Novamente, os cenários NDC e NDC_Comp foram os que apresentaram maior diferença entre si, com redução 4% (4 Mha) na variação total de cobertura do solo acumulada. Contudo, conforme apresentado na Figura 36, mudanças significativas da

transição de cada tipo de cobertura do solo podem ser percebidas, a não ser nos cenários BAU e BAU_Comp, que apresentam o mesmo comportamento.

O cenário NDC_Comp apresentou menor necessidade de conversão de áreas de pastagem degradadas em áreas florestais, reduzindo o ganho de área florestal em 4 Mha entre 2020 e 2060. Além disso, houve um aumento na área de cultivo simples, principalmente envolvendo sistemas de produção com alta produtividade, sem haver a necessidade de migrar em larga escala para áreas de produção agropecuária sustentável, como a produção em sistemas ILP ou ILPF – com florestas comerciais ou nativas. No cenário NDC, a área de cultivo simples apresentava uma retração de 6 Mha e no cenário NDC_Comp, passou a aumentar a área de cultivo simples em 4 Mha, uma diferença de 10 Mha no acumulado entre 2020 e 2060. No cenário NDC_Comp, a solução ótima do modelo deixou de aumentar 6 Mha de áreas de sistemas integrados do tipo Integração Lavoura-Pecuária, 3 Mha de sistemas integrados do tipo Integração Lavoura-Pecuária-Florestas nativas e 1 Mha de sistemas integrados do tipo Integração Lavoura-Pecuária-Florestas comerciais. Assim, passando de um aumento de cerca de 25 Mha de áreas de sistemas integrados para 15 Mha, redução essa de aproximadamente 37% (Figura 36).

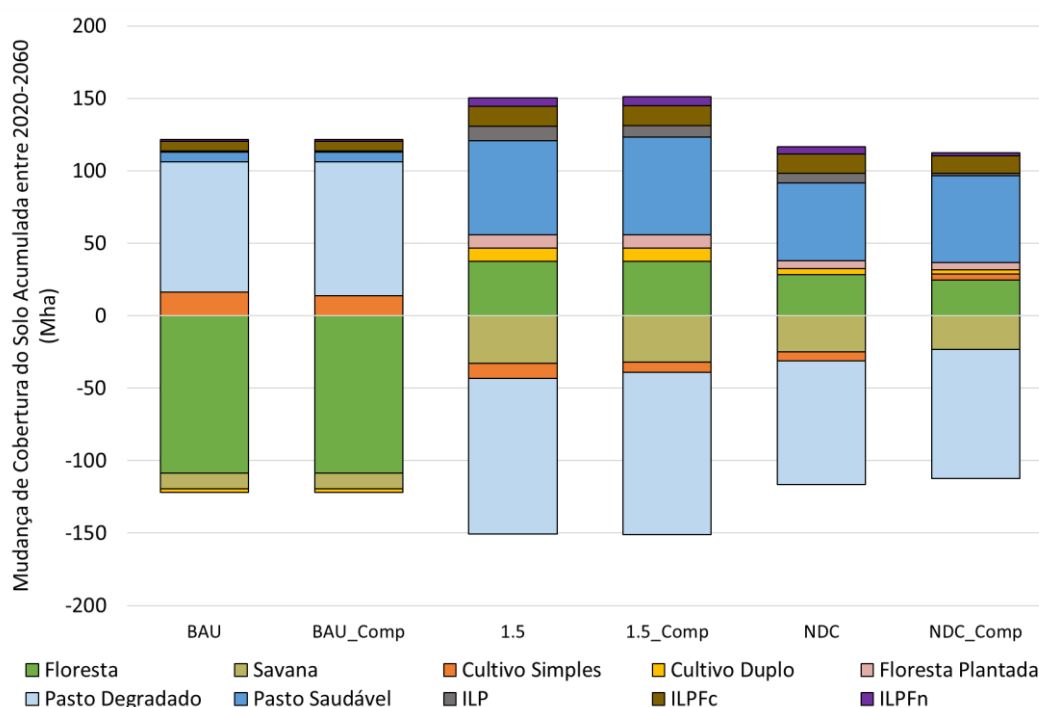


Figura 36: Acumulado das mudanças de cobertura do solo entre 2020 e 2060. ILP: Integração Lavoura-Pecuária; ILPFc: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta comercial (pinus/eucalipto); ILPFn: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta nativa.

Fonte: Elaboração própria

Dessa forma, é possível verificar que com a implementação das novas tecnologias agropecuárias no cenário NDC, passa a existir uma menor pressão na otimização do modelo BLUES sobre o setor de mudança de cobertura do solo. Logo, algumas coberturas do solo, com maior custo de carbono e grau de complexidade de implementação, deixam de ser tão requisitadas e passam a migrar para outras coberturas do solo, com menor grau de tecnificação implementada e mais custo efetivas, como é o caso da recuperação das pastagens degradadas – com aumento de área de 6 Mha. Assim, observar-se que também na transição da cobertura do solo as novas tecnologias agropecuárias trazem efeitos positivos para o modelo BLUES, que passa a ter a necessidade de implementar menores quantidades de carbono estocado acima e abaixo do solo. Logo, torna o modelo mais custo efetivo, aumenta a gama de opções de mitigação de não-CO₂ e diminui a necessidade de implementar crescimentos tão altos em áreas de sistemas integrados.

Além disso, a implementação dos novos sistemas de produção auxiliou na redução dos níveis de perdas alimentares na cadeia de produção, o que auxiliou na menor necessidade de expansão de áreas de culturas alimentares e de pastagens para a produção de carne animal. Assim, também auxiliando os cenários “Comp” na redução da abertura de novas áreas para a agropecuária visto que ao mesmo tempo que demanda menores quantidades de alimentos, devido ao menor nível de perda de alimentos, o setor de alimentos também passa a produzir uma menor quantidade de GEE. Sendo essa redução de emissões oriunda do menor volume de descarte inadequado desses alimentos, que faz com que também sejam necessários menores níveis de armazenamento de carbono no solo para cenários climáticos.

Assim como no caso das mudanças de cobertura do solo, os cenários NDC foram os únicos que mostraram alterações significativas ao se tratar da mudança do perfil comportamental das medidas de remoção de dióxido de carbono (do inglês – *Carbon Dioxide Removal* ou CDR). As opções de CDR (Figura 37) permaneceram relevantes, principalmente nos cenários 1.5 – com e sem a adição dos novos sistemas de produção agropecuários – por possuírem enfoque somente na descarbonização brasileira com base no orçamento de CO₂. Dessa forma, apenas as tecnologias de CDR – do setor de AFOLU ou do setor energético e industrial – é que conseguem reduzir a pegada de carbono nacional no nível necessário. Vale destacar que estes cenários não observam vantagens nas opções de mitigação de gases não-CO₂.

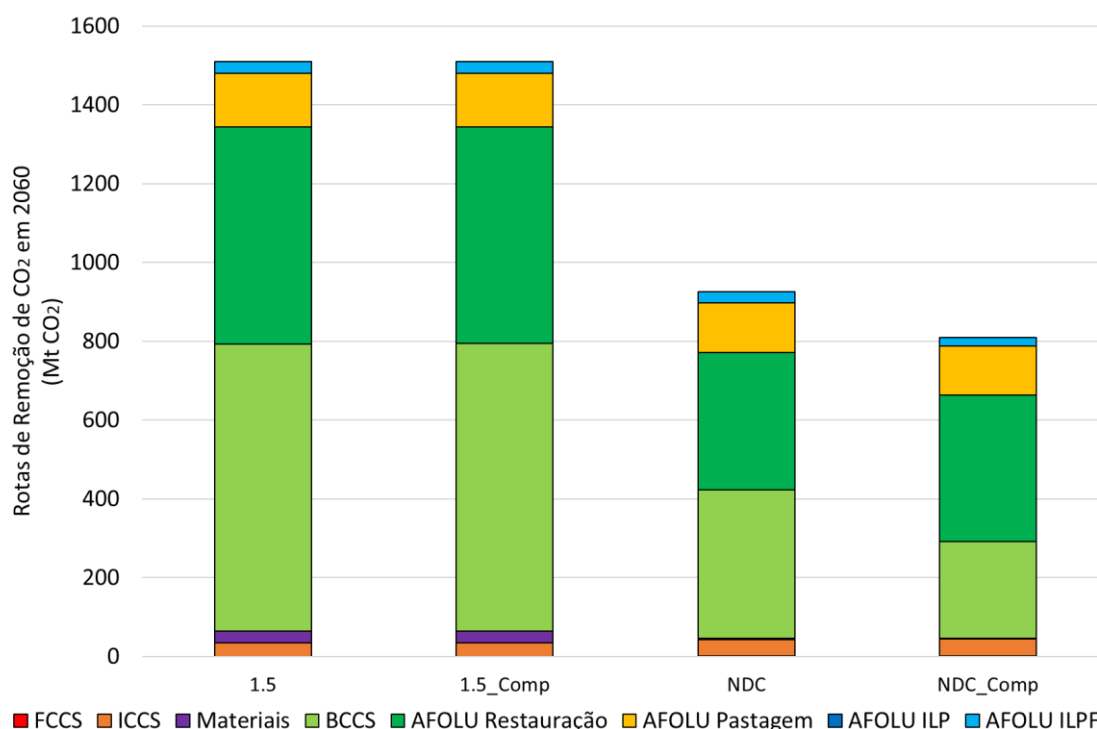


Figura 37: Participação de tecnologias de remoção de CO₂ em 2060. FCCS: CCS de fontes energéticas de origem fóssil; ICCS: CCS industrial; Materiais: CCS através de materiais; BCCS: CCS de fontes energéticas de origem renovável (BECCS); AFOLU Restauração: Captura de carbono através de restauração de ambientes nativos; AFOLU Pastagem: Captura de carbono através de restauração de pastagens; AFOLU ILP: Captura de carbono através da implementação de sistemas de Integração Lavoura-Pecuária; AFOLU ILPF: Captura de carbono através da implementação de sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta.

Fonte: Elaboração própria

Já nos cenários NDC, houve uma redução significativa da quantidade de BECCS necessário para o atingimento da neutralidade climática, chegando em 2060 a uma redução de cerca de 131 Mt CO₂ na quantidade de BECCS no cenário NDC_Comp, em relação ao NDC. Essa redução no cenário NDC_Comp representa um volume 35% menor do que era necessário para o cenário NDC também manter a neutralidade climática (GEE zero) em 2060. Também ocorreram reduções percentuais importantes em meios de remoção de dióxido de carbono através de sistemas integrados e materiais, com redução de 77% na utilização de CDR através de ILP, 35% em materiais e 26% em ILPF, principalmente referente a parcela de ILPFn (ILPF com nativas). Contudo essa parcela é pouco expressiva nos números finais de CDR, representando uma redução de 0,4 Mt CO₂ em 2060 para ILP, 0,8 Mt CO₂ para materiais e 7,4 Mt CO₂ para ILPFn.

Entretanto, o cenário NDC_Comp necessitou de maiores quantidades de remoções provenientes de sistemas florestais, através da restauração florestal. Logo, aumentando

cerca de 7% a necessidade de remoção de dióxido de carbono através de restauração florestal, o que representa aproximadamente 24 Mt CO₂ em 2060. Contudo, na Figura 36, esse comportamento de aumento da restauração florestal, em termos de área ocupada, não foi verificado. A explicação para esse resultado é que como o modelo passou a ter uma maior quantidade de sistemas de produção para o setor agropecuário, inclusive com capacidade de intensificação dos meios produtivos, ele passou a destinar áreas de classe A e B – que têm capacidades de armazenamento de carbono baixo do solo maiores, conforme explicado na Tabela 8, seção 3.2 – para o processo de recomposição florestal. Por causa disso é que também ocorreu um aumento nas áreas de monoculturas, conforme apresentado na Figura 36.

Ademais, apesar de haver uma redução de cerca de 8% na quantidade de áreas de florestas plantadas no cenário NDC_Comp, em relação ao cenário NDC, a redução total da demanda insumos provenientes de florestas plantadas foi de aproximadamente 18%. Isso corrobora com a afirmação de que houve uma migração de algumas culturas para classes do solo com menor produtividade e conseqüentemente, deixando áreas de classes de solo com maiores potenciais de armazenamento de carbono livres para serem novamente convertidas em áreas de florestas nativas. Contudo, também é observado que houve uma migração inter-regional de algumas culturas para áreas mais propícias para a sua produção, como é o caso da cana-de-açúcar, soja e trigo que aumentaram a participação de suas produções nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul, respectivamente. Regiões essas que mesmo em classes de solo menos produtivas (regionalmente), são mais produtivas (inter-regionalmente) do que as outras que tinham uma maior participação no cenário NDC.

Contudo, apesar de existirem essas diferenças, tanto os cenários 1.5 quanto NDC, ainda necessitam de grandes volumes de CDR, sendo o BECCS, a restauração florestal e a recuperação de pastagens, os três contribuintes mais importantes para a remoção de carbono no BLUES. Em todos os cenários 1.5, o modelo destaca como sendo imprescindível a remoção de cerca de 1,5 bilhões de toneladas de CO₂ por ano em 2060 para que o orçamento de carbono não seja ultrapassado. Já nos cenários NDC, esse montante fica entre 800 e 930 milhões de toneladas de CO₂ por ano em 2060, redução que variou entre 39-46% se comparado com os cenários 1.5, mas que ainda representam um grande desafio para o Brasil nos próximos 40 anos.

Um ponto de destaque na análise da Figura 37 é que em cenários do tipo NDC, o modelo BLUES passa a ter mais meios de mitigar GEE que não estejam apenas ligados ao setor energético, reduzindo consideravelmente a participação de BECCS, que está intrinsecamente ligado ao CO₂ proveniente da energia. Com isso, o modelo possui a possibilidade de escolher opções e medidas mais maduras da transição energética e dessa forma, não o restringindo a apenas um grupo restrito de tecnologias energéticas que devam ser implementadas para atingir as metas climáticas, como é o caso dos combustíveis avançados associados ao CCS.

Já em relação as trajetórias de emissões de GEE, os cenários BAU seguiram o mesmo padrão de emissões, com emissões de CO₂ e não-CO₂ crescentes durante todo o período de análise, com picos de emissões de CO₂ próximas a 1615 Mt CO₂ por ano em de não-CO₂ de 880 Mt CO_{2eq} por ano. Por sua vez, os cenários 1.5 apresentaram algumas variações entre si, principalmente entre o cenário 1.5_Comp e os cenários 1.5 e 1.5_Agri, que tiveram variações marginais. Ao implementar as tecnologias de produção do setor pecuário (1.5_Comp), o modelo passou a modificar a solução ótima do cenário, passando a incluir nela medidas disruptivas, tanto do setor agrícola quando da pecuária. Também, o modelo passou a mudar o sistema produtivo de carne bovina, passando a contar com a participação de produção de bovinos através de sistemas confinados superintensivo, além de produzir carnes plantadas e cultivadas, que reduzem os níveis de perdas da carne bovina ao longo da cadeia de processamento e transporte.

Com isso, além de diminuir as emissões de CO₂ do setor agropecuário, o modelo ainda passou a diminuir as emissões de gases não-CO₂ ao longo do período de análise. Isso fez com que a trajetória de emissões de CO₂ do cenário 1.5_Comp fosse condizente com o orçamento de carbono fornecida ao modelo até 2060 e ainda reduziu a trajetória das emissões de GEE do cenário. Dessa forma, diferentemente do que era apresentado anteriormente, nos cenários 1.5, que os cenários se tornavam net-zero CO₂ entre 2037-2038 e net-zero GEE em 2050, o novo cenário 1.5_Comp passa a se tornar net-zero em gases de efeito estufa em 2045, além de manter net-zero CO₂ entre 2037-2038. Logo, o cenário 1.5_Comp mostra que as metas brasileiras da NDC de alcançar as metas climáticas de mundo 1,5°C mais quente até 2100 e de tornar o país net-zero GEE em 2050 são pouco ambiciosas, visto que a proposta das emissões de GEE podem ser adiantadas em pelo menos 5 anos e ainda mantendo o orçamento de carbono anteriormente estipulado.

Com relação aos cenários NDC, eles apresentaram variações mais relevantes à medida que as novas tecnologias do setor agropecuário foram adicionadas. Inicialmente, no cenário NDC_Agri, nos 2 últimos períodos de análise do modelo (2055 e 2060), os setores indústria, agropecuária, transporte e residencial apresentaram valores de emissões de CO₂ superiores aos obtidos no cenário NDC. Já no setor de energia, entre 2040 e 2060, período no qual os dois cenários possuem emissões de CO₂ negativas, as emissões do cenário NDC foram mais negativas do que as do cenário NDC_Agri. No mesmo período, as emissões dos gases não-CO₂ foram inferiores no cenário NDC_Agri. Sendo esse comportamento observado devido ao cenário 1.5_Agri migrar cerca de 5% da sua produção de frutas para sistemas disruptivos, que reduzem as emissões de não-CO₂, além de reduzirem os níveis de perda de alimentos ao longo da cadeia de produção, e conversão de quase 80% do arroz produzido no Brasil para sistemas irrigados com a adição de enzimas metanogênicas. Dessa forma, conseguindo reduzir a pressão sobre o setor energético, que teve que apresentar cerca de 4,5 vezes menos emissões negativas ao longo do período de análise do que se comparado com o cenário NDC, sem as medidas disruptivas do setor agrícola. Logo, necessitando de menores volumes de BECCS e biocombustíveis avançados.

Já o cenário NDC_Comp, ele apresentou um comportamento ainda mais marcante, com emissões superiores para os setores industrial, agropecuária, transportes, residencial, serviços e processos industriais desde 2045, se comparado com os valores dos cenários NDC e NDC_Agri. Ademais, entre o período de 2040 e 2060, período o qual as emissões de CO₂ dos cenários NDC e NDC_Agri são neutras ou negativas, o cenário NDC_Comp mostrou um menor esforço para a redução de CO₂, com cerca de 36,5% de CO₂ a menos sendo compensado se comparado com cenário NDC_Agri. Isso ocorreu devido as menores emissões dos gases não-CO₂ proveniente do setor agropecuário, principalmente de carne cultivada e plantada e carne bovina, leite e arroz irrigado produzidos através da implementação de enzimas metanogênicas.

Dessa forma, os cenários “Agri” ou “Comp” foram responsáveis pela redução, ou minimamente manutenção, dos níveis de emissão dos gases não-CO₂. Conforme demonstrado na Figura 38, a maior emissão de metano entre os cenários foi no cenário BAU, emitindo um acumulado de 32,6 Gt CO_{2eq} ao longo de todo o período de análise. Mesmo sem haver qualquer condição climática envolvida, o BAU_Comp apresentou uma ligeira diminuição da emissão de metano obtida a partir de uma pequena parcela de carne

bovina sendo produzida através de sistemas de produção de carne cultivada – cerca de 1% da carne produzida a nível nacional em 2060.

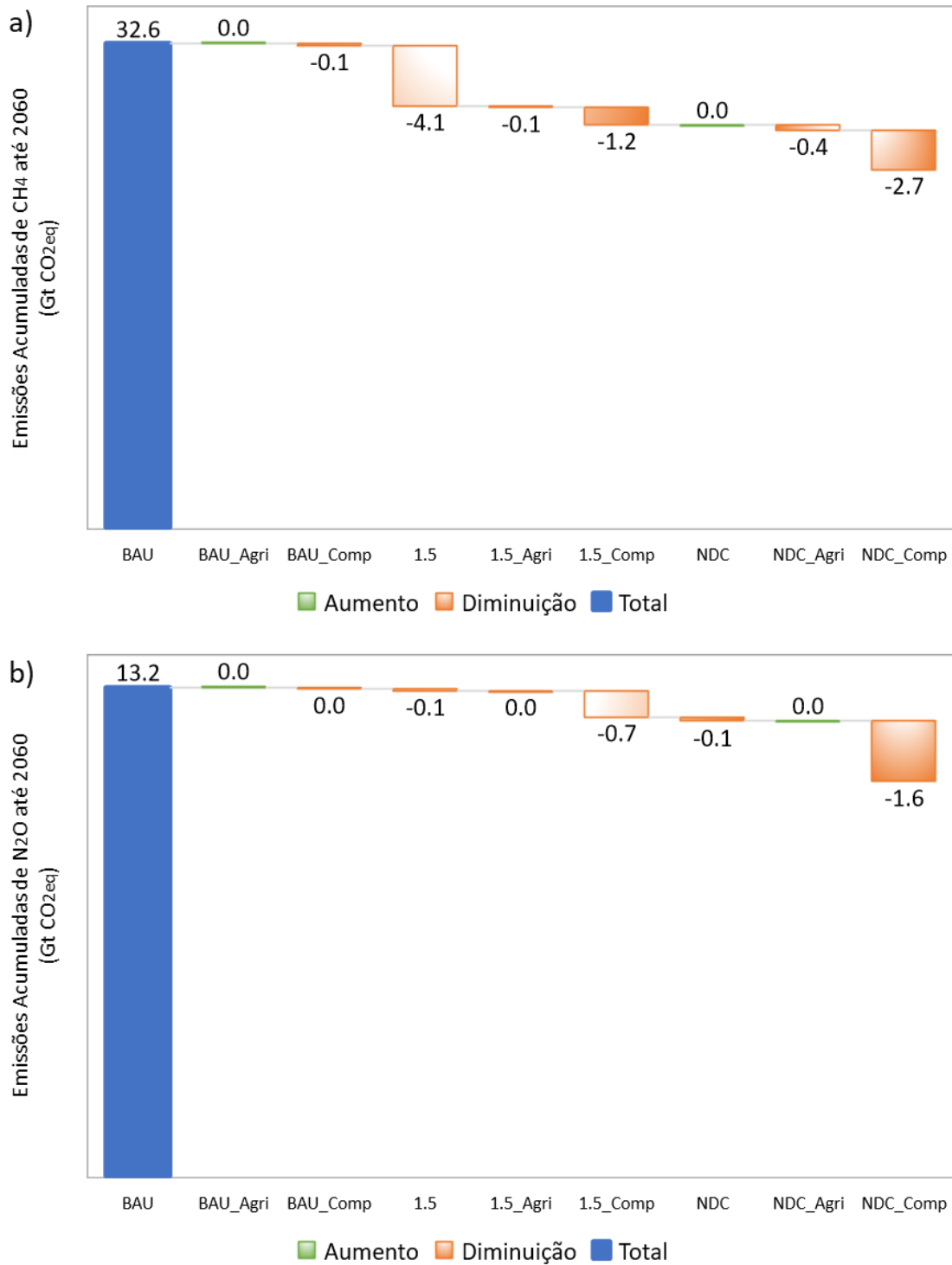


Figura 38: Emissões acumuladas de CH₄ e N₂O entre 2020 e 2060 para os diferentes cenários desenvolvidos. a) Emissões acumuladas de CH₄ entre 2020 e 2060; b) Emissões acumuladas de N₂O entre 2020 e 2060.

Fonte: Elaboração própria

No cenário 1.5, a emissão de CH₄ já foi naturalmente menor do que o visto no BAU, reduzindo o acumulado para 28,5 Gt CO_{2eq}. A partir desse cenário, a implementação das novas tecnologias agropecuárias começou a ser importantes para a diminuição das emissões de metano no modelo, com o cenário 1.5_Agri emitindo 0,1 Gt CO_{2eq} a menos do que no cenário 1.5 base, enquanto o 1.5_Comp reduziu suas emissões de CH₄ em 1,3 Gt CO_{2eq}, redução de 4,5% nas emissões de CH₄. Contudo, foi nos cenários NDC que essa implementação das tecnologias disruptivas realmente fizeram diferença para o BLUES, visto que reduziu as emissões acumuladas de CH₄ de 27,3 Gt CO_{2eq}, no cenário NDC, para 24,0 Gt CO_{2eq}, redução de 12% entre os cenários.

O mesmo aconteceu em relação as emissões de N₂O, contudo, em menores proporções, visto que ele está mais intrinsecamente ligado a produção agrícola e não ao setor pecuário, como no caso do metano. Grande parte dos novos sistemas de produção de carnes alternativas, confinamento superintensivo e tecnologias de CDR dependem do setor agrícola, logo, aumentam a demanda por produtos agrícolas. Isso faz com que já fosse esperado não haver mudanças tão significativas como no caso do metano.

Todos os cenários BAU – BAU, BAU_Agri e BAU_Comp – apresentaram o mesmo valor de emissões acumuladas de N₂O, de 13,2 Gt CO_{2eq}. Já os cenários NDC sem a implementação de sistemas disruptivos para a pecuária ou gado confinado superintensivo – NDC e NDC_Agri – apresentaram uma ligeira redução de 0,1 Gt CO_{2eq} em relação aos cenários BAU. Já o 1.5_Comp, reduziu em 0,7 Gt CO_{2eq} (5,3% de redução) as emissões de óxido nitroso. O mesmo comportamento aconteceu nos cenários NDC, o qual apenas o cenário NDC_Comp teve suas emissões de N₂O em relação ao cenário 1.5. Contudo, essa redução foi ainda mais expressiva, de 1,6 Gt CO_{2eq} (19,0% de redução em relação ao cenário BAU).

A redução na quantidade de N₂O entre os cenários se deve principalmente ao deslocamento dos sistemas produtivos de culturas que demandam grandes quantidades de nitrogênio para aumentares suas produtividades. Inicialmente, o cenário 1.5_Comp apresenta uma característica particular em relação aos cenários anteriores, que é o maior nível de utilização de sistemas integrados (ILP, ILPFc e ILPFn) para a produção de culturas energéticas e não energéticas que tenham uma alta demanda de fertilizante nitrogenado, o que diminuiu as emissões de N₂O. Isso permite com que fosse possível abrir áreas suficientes para a produção de insumos agrícolas suficientes para a produção de carne cultivada, a partir de milho e trigo, e carne plantada, a partir de feijões.

Além disso, o cenário 1.5_Comp ainda reduziu a participação total de sistemas de alta produtividade do setor agrícola, que são intensivos em fertilizantes nitrogenados e realocou algumas culturas energéticas para regiões mais produtivas, principalmente cana-de-açúcar e floresta plantada. Nesse caso, a otimização do modelo definiu como sendo mais importante focar na produção através de tecnologias de alta produtividade de culturas chaves, que possuíam melhores relações fertilizante nitrogenado e ganho de produtividade, como foi o caso do milho e do trigo. Além deles, a soja também foi beneficiada para ser produzida através de sistemas de alta produtividade, visto que ela não necessita de aporte significativo de fertilizante nitrogenado para ser produzida nesse tipo de sistema.

Por sua vez, no cenário NDC_Comp, essa mudança inter-regional foi ainda mais forte e mais cedo, como será discutido ainda neste capítulo. Além disso, apesar dos sistemas ILPFc e ILPFn apresentarem uma área ocupada inferior no cenário NDC_Comp, em comparação com o cenário 1.5_Comp em 2060, eles entram mais rapidamente no cenário NDC_Comp do que no 1.5_Comp. Isso faz com que a mitigação de N₂O advinda dos sistemas integrados comece mais cedo no cenário NDC_Comp do que no 1.5_Comp e conseqüentemente haja uma maior mitigação acumulada ao longo da análise. Assim, ganha destaque a participação dos sistemas integrados aliados a produção de floresta plantada para a produção de culturas alimentares como milho e o trigo não apenas no final do período de análise, como também durante os primeiros anos da análise. Dessa forma, apesar do cenário NDC_Comp apresentar uma menor demanda energética por florestas plantadas, a porcentagem de floresta plantada produzida através de sistemas integrados é maior (Figura 39), justamente para haver a mitigação de não-CO₂ durante o cultivo, quanto para geração de biomassa sustentável para o setor de biocombustíveis e geração elétrica.

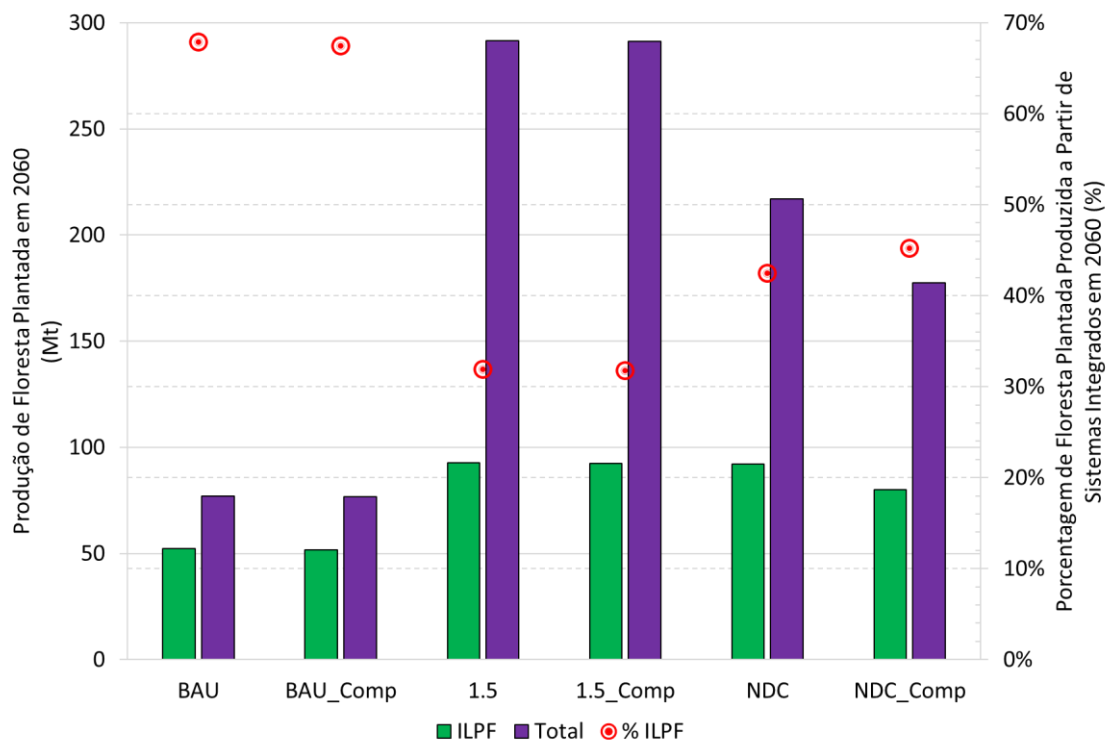


Figura 39: Produção de floresta plantada e a participação de sistemas integrados na produção de material lenhoso.

Fonte: Elaboração própria

Entretanto, esse comportamento em que os cenários NDC_Comp apresentam menores emissões nos gases não-CO₂ não se repete nas emissões de CO₂, o que acaba gerando emissões menores nos cenários 1.5 do que nos cenários BAU e NDC, inclusive com o cenário NDC_Comp sendo o que mais emite CO₂ dentre os cenários NDC e 1.5. Isso ressalta a relevância do *trade-off* entre as emissões de GEE para atingir a neutralidade.

Conforme apresentado na Figura 40, todos os cenários BAU apresentam a mesma emissão acumulada de CO₂, cerca de 76,8 Gt CO₂. Já os cenários 1.5, por definição, apresentam níveis de CO₂ acumulado entre 2020 e 2060 igual a 4,4 Gt CO₂, definido pelo orçamento de carbono usado no modelo. Já os cenários NDC apresentam emissões maiores de CO₂ justamente pelo fato deles possuírem outros meios de mitigação de gases não-CO₂ conforme explicado anteriormente. Ademais, possuem uma maior folga nas atividades de mitigação de CO₂, não dependendo tão fortemente de opções de mitigação no setor florestal e energético para atingir a meta de GEE. Assim, quanto mais sistemas de produção agropecuários e opções para lidar com gases não-CO₂ são implementados no modelo, maior é a liberdade do modelo em escolher outros sistemas de produção que

mitiguem N₂O ou CH₄, justamente devido os seus potenciais de aquecimento global (do inglês – *Global Warming Potential* ou GWP) serem superior ao do CO₂.

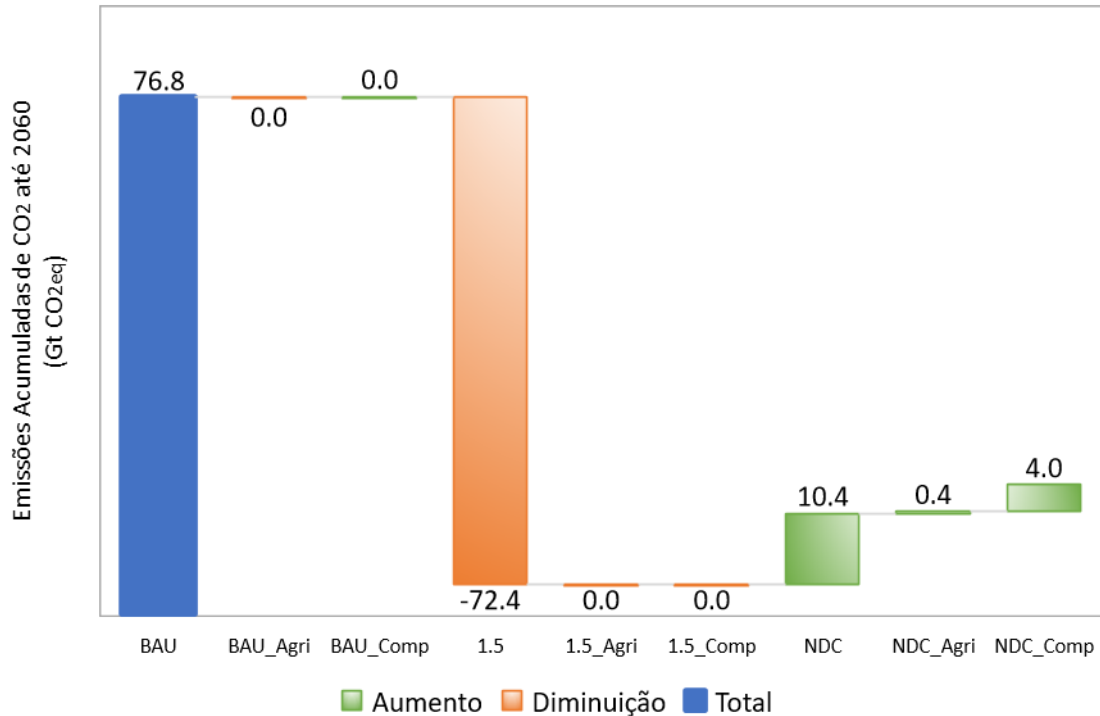


Figura 40: Emissões acumuladas de CO₂ entre 2020 e 2060 para os diferentes cenários desenvolvidos.

Fonte: Elaboração própria

Conforme exposto anteriormente, os cenários mostraram variações da penetração de tecnologia, principalmente ao se comparar os cenários “Comp” com os demais. Uma das produções que apresentaram maior variação foi a de carne bovina, visto a sua importância na emissão de GEE, mais especificamente de CH₄, e a possibilidade de intensificação da pecuária para abrir novas áreas para a agricultura sem pressionar áreas de vegetação nativa. A Figura 41 mostra que mesmo em cenários BAU, a carne cultivada já possui uma ligeira penetração. Contudo, somente a partir dos cenários 1.5 e NDC que o modelo passa a realmente optar por alterar os sistemas produtivos de carne bovina com o viés de mitigação climática.

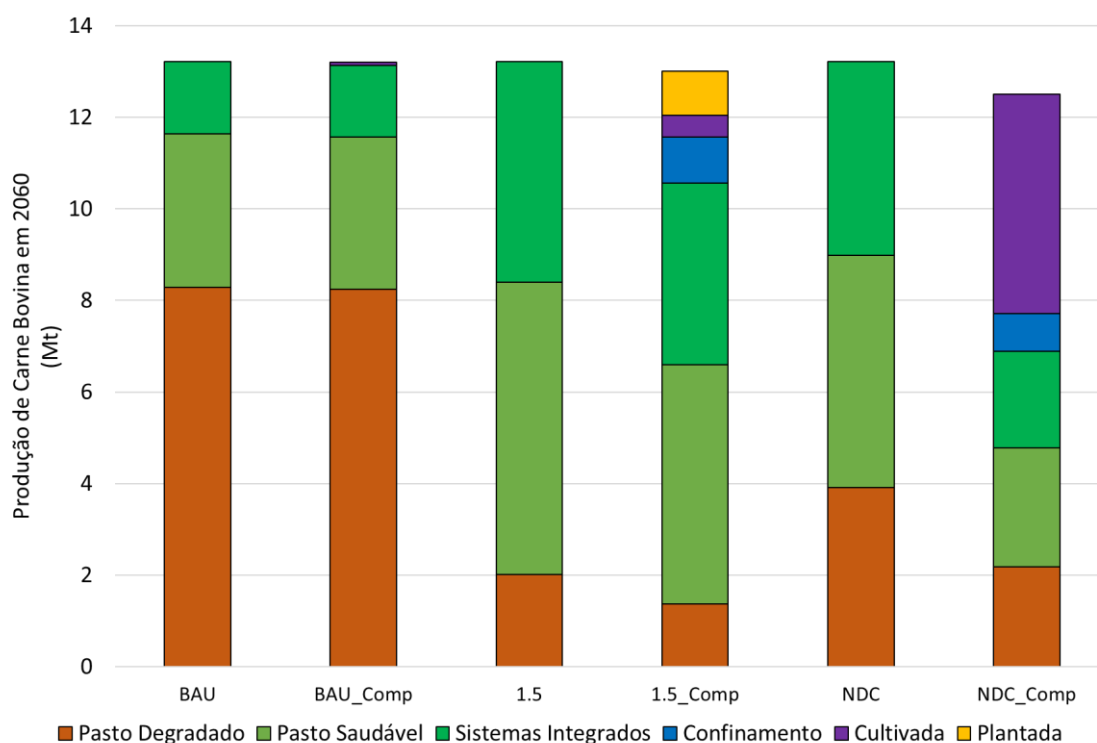


Figura 41: Produção de carne bovina de acordo com os diferentes tipos de tecnologia de produção.

Fonte: Elaboração própria

O cenário 1.5_Comp, por exemplo, migrou cerca de 19% da sua produção de carne bovina para novos sistemas de produção de carne bovina, passando a produzir aproximadamente 8% de toda a carne bovina através de sistemas confinados superintensivos, 7% em tecnologias de produção de carne plantada e 4% de carne cultivada. Desse modo, diminuindo os sistemas de produção através de sistemas mais tradicionais, principalmente em pastagens (degradadas ou saudáveis), que diminuiu cerca de 22%. Além disso, esse cenário mostrou uma redução de 2% na demanda de carne bovina devido a diminuição das perdas da cadeia de produção de carne advindas da produção através de sistemas disruptivos, aproximando o produtor ao consumidor final e encurtando toda a cadeia produtiva.

Já no cenário NDC_Comp, a migração para as novas tecnologias de produção de carne bovina foi ainda maior, com cerca de 45% de toda a carne bovina desse cenário sendo produzida através de sistemas disruptivos ou de confinamento superintensivo. Contudo, nesse cenário, a participação da produção de carne plantada já não foi uma opção viável para o modelo, que passou a produção de carne bovina para sistemas confinados superintensivos – 7% da produção total – e de carne cultivada – 38% da

produção. Essa escolha ocorreu devido a carne cultivada não emitir volumes significativos de gases não-CO₂ devida necessitar de menores volumes de insumos agropecuários. Apesar da carne cultivada ser mais energointensiva do que a carne plantada, o modelo compensou essa demanda energética com a ampliação de fontes renováveis de geração elétrica, como a energia eólica, sem geração de GEE. Com essa maior produção de carne em sistemas confinados superintensivos e cultivada, foi possível abrir novas áreas para a produção de culturas agrícolas e ainda reduzir em quase 6% a demanda de carne bovina no modelo, devido a diminuição das perdas da cadeia de produção da carne.

Ademais, verificou-se que em 2060, regionalmente, a região Nordeste foi a que geralmente apresentou maior penetração dos novos sistemas de produção – sistemas integrados, disruptivos ou confinamento superintensivo – seguida pela região Sul, Centro-Oeste, Sudeste e Norte (Figura 42 e Figura 43). O destaque da região Nordeste se deve a migração quase que total de sua produção em pastagens degradada para sistemas com maior produtividade, sejam eles através de pastagens recuperadas, sistemas integrados ou disruptivos. Além disso, a região Nordeste já é uma região com baixo nível de produção de carne bovina, devido a justamente sua produção ser feita em pastagens com baixa taxa de ocupação, mas durante todo o período de análise, essa oferta de carne bovina na região se torna ainda menor e se concentrando em sistemas que mitiguem GEE.

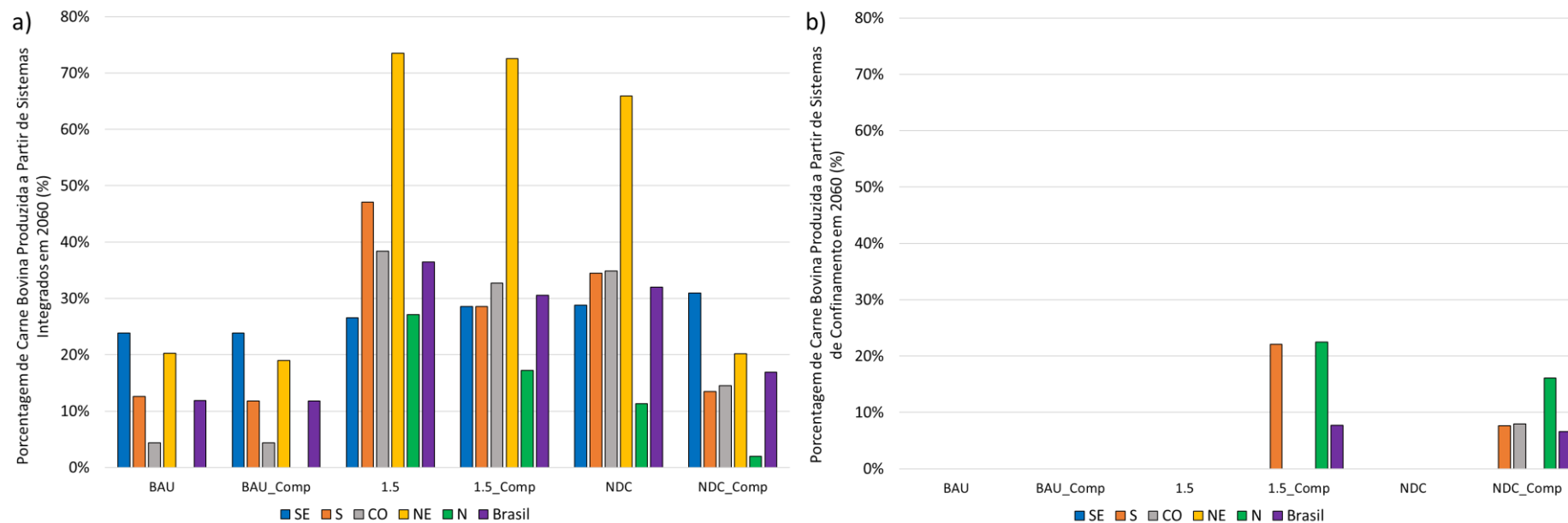


Figura 42: Participação das tecnologias de sistemas integrados e confinamento superintensivo na produção de carne bovina a nível regional. a) Carne bovina produzida através de sistemas integrados; b) Carne bovina produzida através de sistemas de confinamento superintensivo.

Fonte: Elaboração própria

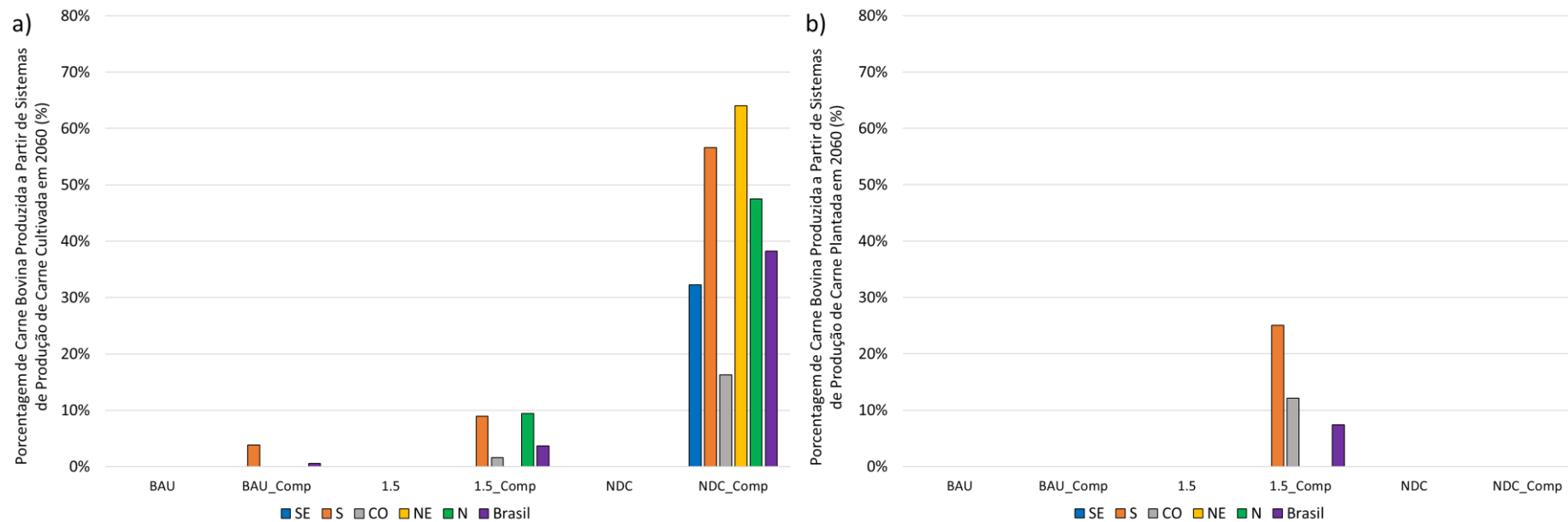


Figura 43: Participação das tecnologias disruptivas na produção de carne bovina a nível regional. a) Carne bovina produzida através de sistemas produção de carne cultivada; b) Carne bovina produzida através de sistemas de produção de carne plantada.

Fonte: Elaboração própria

Já as regiões Sul e Centro-Oeste mantêm o nível de oferta de carne bovina ao longo do tempo, mas também migrando áreas de pastagens degradadas para sistemas integrados ou de confinamento superintensivo, além de apresentar penetrações importantes de carnes produzidas em sistemas disruptivos. Por sua vez, a região Sudeste não se apresentou como sendo uma região importante para a produção em sistemas confinados superintensivos ou de carne plantada, mantendo sua trajetória de produção focada em sistemas integrados em áreas anteriormente degradadas. Apenas no cenário NDC_Comp essa característica se alterou, apresentando entrada significativa de carne cultivada na região. A região Norte, é a que possui melhor relação custo-benefício para a implementação de sistemas confinados superintensivos, transformando parte do seu território de pastagens degradadas em áreas para produção de confinados, contudo, sem focar na produção através de sistemas integrados devido as demais regiões possuírem ou melhores produtividades ou menores custos.

A nível de culturas agrícolas, o milho, o trigo e a soja foram as culturas que apresentaram maior variação à nível de mudanças nos sistemas de produção, principalmente devido as alterações nas demandas deles como insumos para a produção de alimentos a partir de tecnologias disruptivas e alimentação animal. No caso da soja (Figura 44), os cenários climáticos com a implementação das tecnologias da pecuária (cenários Comp) apresentaram uma migração de parte dos cultivos de soja para a alimentação do gado confinado. Isso gerou uma maior necessidade de produção de outras culturas oleaginosas para compensar a perda da oferta de soja para a geração de biocombustíveis como biodiesel e HVO. Ademais, no cenário 1.5_Comp foi necessário ampliar a oferta de soja sendo produzida a partir de tecnologias de produção em alta produtividade e diminuir a produzida a partir de sistemas integrados. Essa diminuição se deu principalmente na região Centro-Oeste que diminuiu a produção de soja em sistemas integrados do tipo ILP associados a produção de gado de corte e passou a produzir uma pequena parte dessa soja em sistemas de dupla safra com o milho e uma maior parte migrou para a região Sul para ser produzida em sistemas de alta produtividade, mantendo a oferta de soja brasileira.

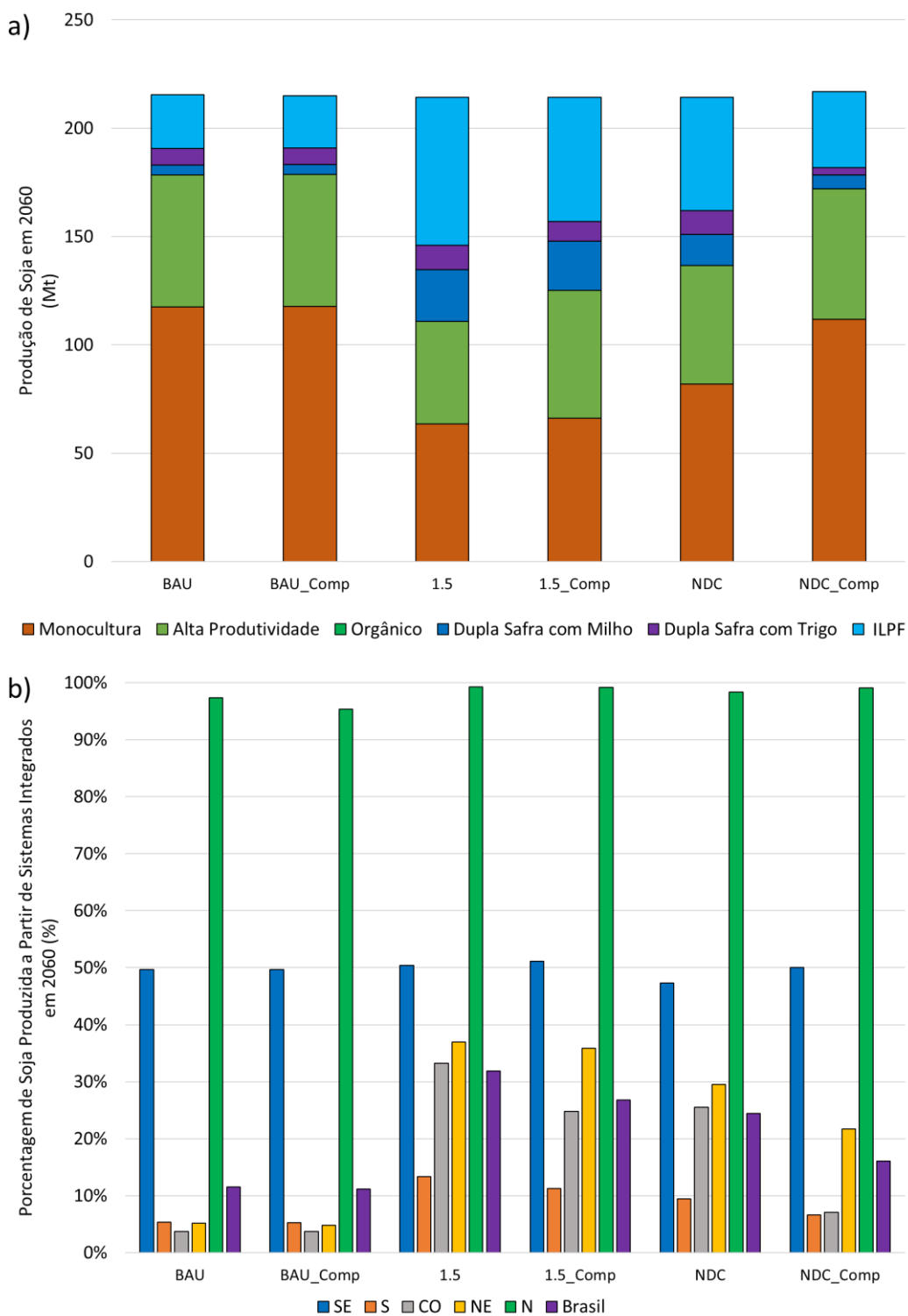


Figura 44: Produção de soja de acordo com os diferentes tipos de tecnologia de produção e a regionalização da participação dos sistemas integrados na produção de soja. a) Produção de soja em 2060; b) Participação da produção de soja em 2060 a partir de sistemas integrados à nível regional.

Fonte: Elaboração própria

Já no cenário NDC_Comp, foi necessário aumentar a demanda de soja nacional em 2,6 Mt devido ao aumento da demanda de soja ocasionado pela expansão da produção

de gado de corte através de sistemas confinados superintensivos que demandam ração, como o farelo de soja. Para isso, como houve a aumento das tecnologias disponíveis para a produção agropecuária com meios de mitigação de gases não-CO₂ o modelo passou a deixar de produzir a soja em sistemas integrados e consorciado com milho e trigo para produzir através de monoculturas e tecnologias de alta produtividade. Isso ocorreu pois se tornou mais viável economicamente deixar de produzir através desses métodos mais sustentáveis a nível de agricultura, para aumentar a produção pecuária com baixa emissão de não-CO₂. Logo, não havendo mais a necessidade de se produzir através de métodos agrícolas que apresentavam menores emissões de CO₂. Também ocorreu o processo que o cenário NDC_Comp necessitou de volumes ainda menores de biocombustíveis do que os demais cenários, o que tornou dispensável a produção em larga escala e sustentável de florestas plantadas para fornecer insumos para biocombustíveis e geração elétrica a partir de biomassa associado ao CCS. Isso influenciou a necessidade de utilização dos sistemas integrados tanto à nível regional, quanto nacional, com grandes diminuições principalmente na região Centro-Oeste, como já havia acontecido no caso do cenário 1.5_Comp.

Com essa redução da participação da soja em sistemas integrados e dupla safra, o trigo foi uma das *commodities* agropecuárias mais afetadas. Em 2060, sua produção teve que ser totalmente reestruturada entre os cenários com e sem a inclusão dos novos sistemas de produção disruptivos do setor pecuário. Inicialmente, em 2060, tanto para o cenário 1.5, quando NDC, o trigo era produzido em dois sistemas, dupla safra com a soja ou em sistemas integrados, também em rotação com a soja (Figura 45). Contudo, nos cenários “Comp”, a participação da produção do trigo em sistemas integrados ou dupla safra reduziu e no seu lugar, foi necessário implementar sua produção através de sistemas de alta produtividade. No cenário 1.5_Comp, a participação do sistema integrados passou de 59% para 37%, de dupla safra de 41% para 30% e de alta produtividade de 0% para 33%. Já no cenário NDC_Comp, essa mudança foi ainda maior, com os sistemas integrados passando de 60% para 16%, dupla safra de 40% para 8% e alta produtividade de 0% para 75%. Além disso, os cenários 1.5_Comp e NDC_Comp ainda tiveram que aumentar a oferta de trigo nacional para servir como insumo base para a produção de carne cultivada, aumentando 0,6 Mt (8% de aumento) e 4,2 Mt (51% de aumento), respectivamente.

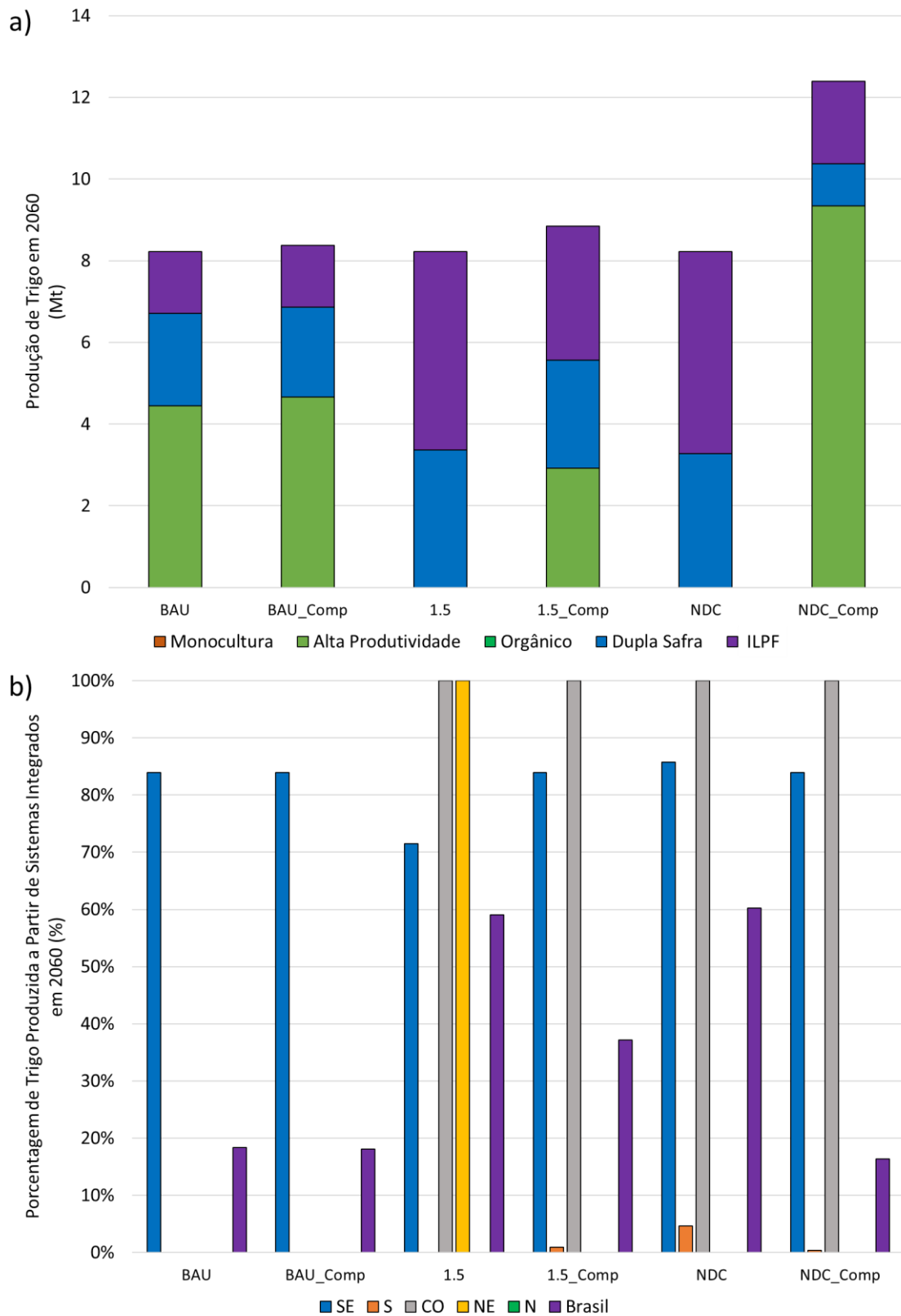


Figura 45: Produção de trigo de acordo com os diferentes tipos de tecnologia de produção e a regionalização da participação dos sistemas integrados na produção de trigo. a) Produção de trigo em 2060; b) Participação da produção de trigo em 2060 a partir de sistemas integrados à nível regional.

Fonte: Elaboração própria

Regionalmente, isso fez com que houvesse a migração de uma grande parte do trigo que era produzido na região Centro-Oeste, em sistema integrado ou dupla safra, para a região Sul, em sistemas de alta produtividade. Além disso, todo o aumento da oferta de trigo referente a demanda advinda da carne cultivada, foi feito na região Sul, visto que é a região que possui melhores condições edafoclimáticas para o crescimento do trigo em sistemas de alta produtividade. Além disso, a produção em sistema integrado da região Nordeste do cenário 1.5_Comp, também foi extinta e passou a ser produzida na região Sul em sistemas de alta produtividade.

Além do trigo, o milho também foi outra cultura que sofreu impacto com a mudança do perfil produtivo da soja, que reduziu sua participação em sistemas de dupla safra e integrados (Figura 46). Contudo, esse impacto no milho foi menor do que com o trigo. Inicialmente, nos cenários 1.5, o milho continuou com uma participação forte com a soja nos cenários 1.5_Comp, havendo apenas uma pequena redução de 0,7 Mt em cultivos do tipo dupla safra. Dessa forma, pode-se afirmar que houve uma clara vantagem para o modelo em continuar a produção consorciada de milho e soja, mesmo em cenários com a maior disponibilidade de sistemas de produção agropecuária (cenário “Comp”). Entretanto, como foi necessário haver um maior aporte de milho nos sistemas de produção de gado de corte confinado superintensivo, além do modelo fazer uma ligeira migração para carne cultivada com o milho como fonte de insumo, foi necessário haver um aumento na oferta de milho no cenário 1.5_Comp de cerca de 15,1 Mt (aumento de 10% na oferta de milho).

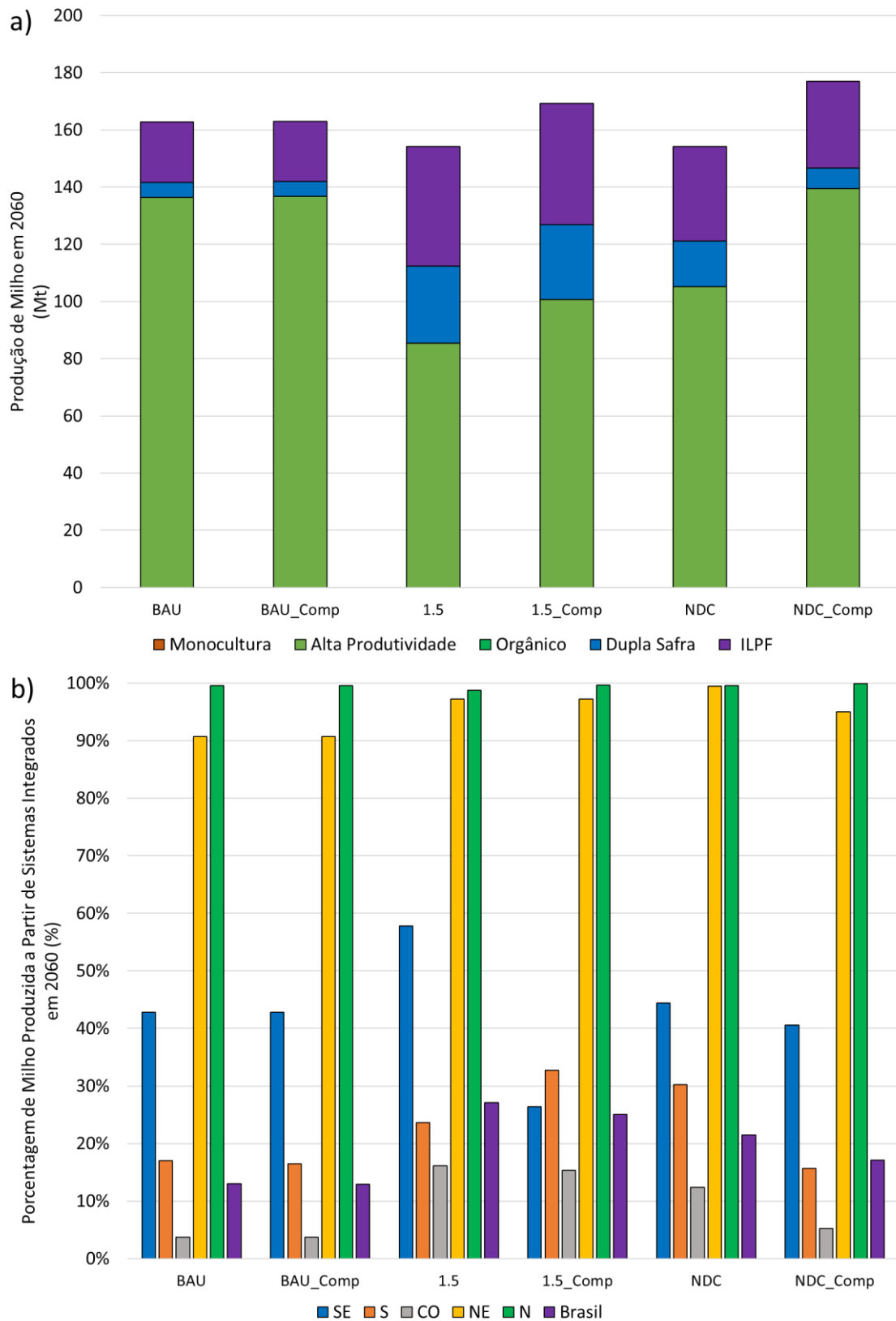


Figura 46: Produção de milho de acordo com os diferentes tipos de tecnologia de produção e a regionalização da participação dos sistemas integrados na produção de milho. a) Produção de milho em 2060; b) Participação da produção de milho em 2060 a partir de sistemas integrados à nível regional.

Fonte: Elaboração própria

Essa maior oferta de milho foi suprida principalmente com o aumento da produção de milho em sistemas de alta produtividade na região Sudeste, que aumentou sua produção em sistemas de alta produtividade em 25 Mt. Inclusive, no cenário 1.5_Comp, a região Sudeste foi a região que ganhou destaque na produção de milho, se tornando o segundo maior produtor de milho no Brasil em 2060, com cerca de 43 Mt no ano, enquanto no cenário 1.5, produzia apenas 26 Mt, ficando atrás do Sul que produzia cerca de 32 Mt em 2060 e que no cenário 1.5_Comp deixou de ofertar cerca de 8 Mt de milho em sistemas de alta produtividade. Em termos de implementação de sistemas integrados, as regiões Norte e Nordeste foram as que mais se descaram, produzindo sempre pelo menos 90% e 98%, respectivamente em 2060, o milho da região nesses sistemas produtivos.

O mesmo comportamento se repetiu nos cenários NDC, contudo, com maior intensidade do que nos cenários 1.5. No cenário NDC, a quantidade de milho sendo produzido em sistemas integrados ou dupla safra já são inferiores aos apresentados no cenário 1.5, com reduções de 9 Mt e 1 Mt, respectivamente. Entretanto, com volumes superiores de milho produzido em sistemas de alta produtividade, 15 Mt. Assim, em comparação ao cenário 1.5, o NDC já produz cerca de 5 Mt de milho a mais. Ao comparar os resultados do cenário NDC com os do NDC_Comp, verifica-se um crescimento ainda maior da demanda de milho devido a uma penetração ainda maior de sistemas de produção de carne cultivada tendo o milho como insumo e da produção equivalente ao cenário 1.5 de gado de corte confinado superintensivo.

Diferentemente dos resultados do cenário 1.5_Comp, o NDC_Comp necessitou aumentar a produção de milho em quase todas as regiões do modelo BLUES, à exceção da região Nordeste. A demanda por milho cresceu cerca de 9 Mt na região Sul, 7 Mt na região Sudeste, 6 Mt na região Norte e 2 Mt na região Centro-Oeste. Dessa forma, apresentando uma melhor distribuição espacial da expansão da produção nacional de milho do que o apresentado no cenário 1.5_Comp, que focou na expansão da produção na região Sudeste em detrimento das demais.

Além dessas culturas, outro ponto de destaque foi o crescimento da produção de feijões, de cerca de 18%, para o atendimento da demanda de carne plantada no cenário 1.5_Comp. Também, da produção de frutas a partir de sistemas disruptivos nos cenários 1.5_Agri e 1.5_Comp, através de fazendas verticais com baixo nível de tecnificação (Figura 47). Essa penetração desse sistema produtivo representou cerca de 1,5 Mt de

frutas no cenário 1.5_Agri – cerca de 2,7% da demanda por frutas no Brasil no cenário 1.5_Agri – e 1,2 Mt de frutas no cenário 1.5_Agri – o que representa aproximadamente de 2,2% da demanda por frutas no Brasil no cenário 1.5_Comp. Essa produção em sistemas disruptivos, que aproximam o produtor ao consumidor faz com que o nível de perdas ao longo da cadeia da produção e distribuição das frutas reduza e com isso, o cenário 1.5_Agri demandou cerca de 0,7% a menos de frutas e o cenário 1.5_Comp, aproximadamente 0,6%. Essa produção de frutas a partir de sistemas disruptivos ocorreu nas regiões Sul, Norte, Nordeste e Centro-Oeste do Brasil, mas significativamente apenas nas regiões Centro-Oeste e Norte, com cerca de 99% das frutas sendo produzidas a partir desse sistema. É importante salientar que o modelo BLUES entende como frutas uma cesta das principais frutas brasileiras, como banana, laranja e outras, sem considerar para essa quantificação a participação de frutas tradicionais e mais comumente encontradas na região Amazônica, Caatinga, Cerrado ou Pantanal.

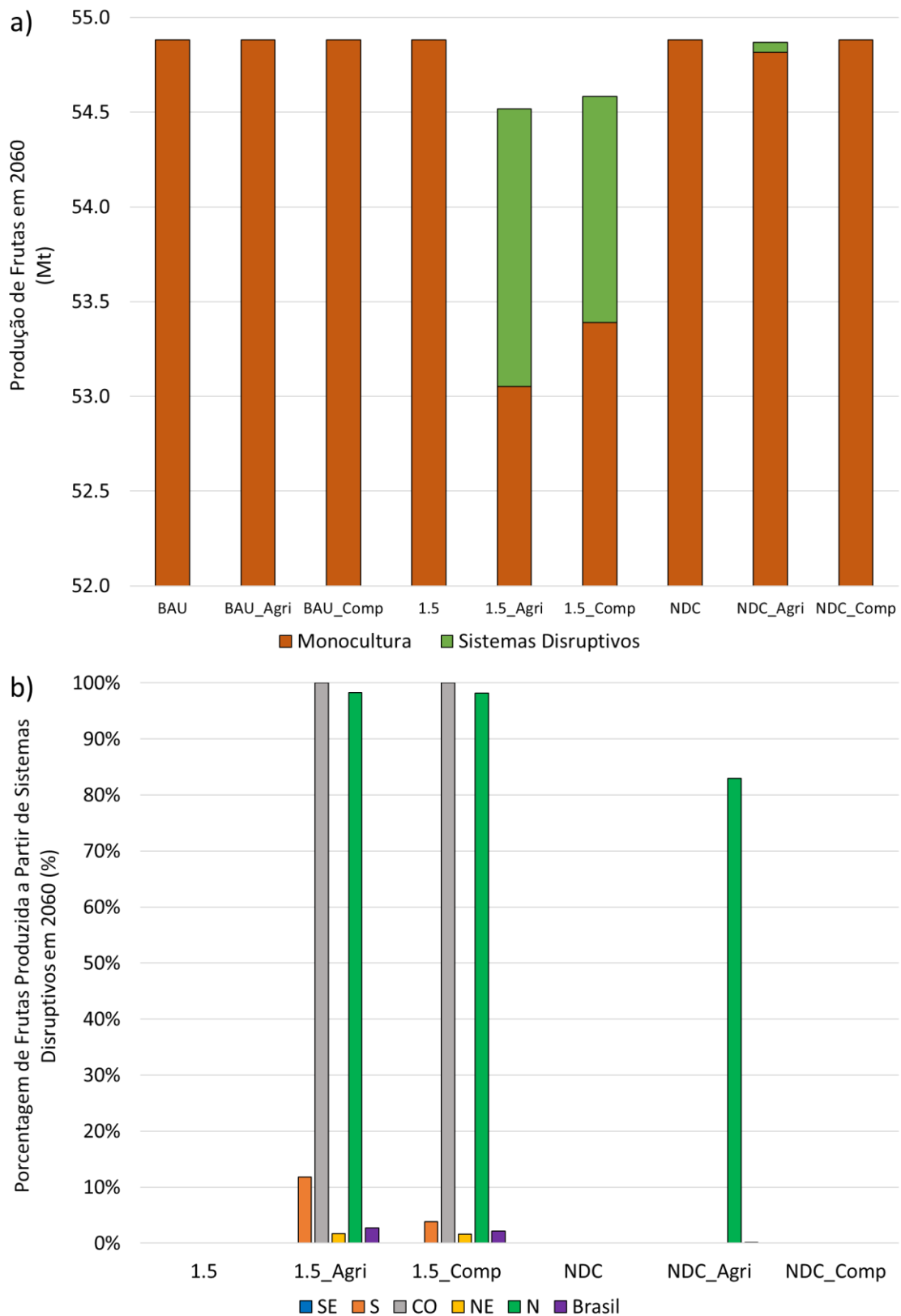


Figura 47: Produção de frutas de acordo com os diferentes tipos de tecnologia de produção e a regionalização da participação dos sistemas disruptivos na produção de frutas. a) Produção de frutas em 2060; b) Participação da produção de frutas em 2060 a partir de sistemas disruptivos à nível regional.

Fonte: Elaboração própria

Essas produções em sistemas disruptivo que foram supracitadas auxiliaram na redução dos níveis de perdas de alimentos ocorridos durante a cadeia de produção, processamento e distribuição dos alimentos, visto que aproxima o produtor ao consumidor final. Dessa forma, praticamente todos os cenários desenvolvidos, que apresentavam algum sistema de produção disruptiva, fosse ela do setor agrícola ou pecuário, apresentou melhorias nos níveis de perda de alimentos, mesmo que insignificante. Essa redução das perdas também auxiliou na mitigação de emissões desses alimentos, visto que ao perdê-los, o modelo precisa produzir mais alimento para compensar a perda desse e com isso, adicionando mais fertilizante no solo, usando mais diesel para os maquinários agropecuários, mais emissões de CH₄ proveniente do gado de corte e outros.

O cenário NDC_Comp foi o cenário que apresentou melhor nível de alimentos que deixaram de ser perdidos ao longo da cadeia de alimentos, evitando a perda de cerca de 0,7 Mt de carne bovina em 2060 e totalizando uma redução acumulada entre 2020 e 2060 de perdas de aproximadamente 16,5 Mt de alimentos, prioritariamente carne bovina (Figura 48). Já os cenários 1.5_Agri e 1.5_Comp, também apresentaram níveis significativos de redução de perda de alimentos, contudo, não focando apenas na carne bovina, mas também na perda evitada decorrendo da produção de frutas. O cenário 1.5_Agri, em 2060, evitou cerca de 0,4 Mt de perdas de frutas, no acumulado, esse valor chegou a 3,7 Mt de frutas. Por sua vez, o cenário 1.5_Comp, em 2060, evitou perdas de carne bovina e frutas de aproximadamente 0,2 Mt e 0,3 Mt, respectivamente, totalizando entre 2020 e 2060 um cerca de 7,3 Mt de perdas evitadas, 4,3 Mt de carne bovina e 3,0 Mt de frutas. Sendo todas essas perdas descontadas endogenamente da demanda exógena de cada um desses alimento do modelo BLUES durante o processo de otimização dos cenários.

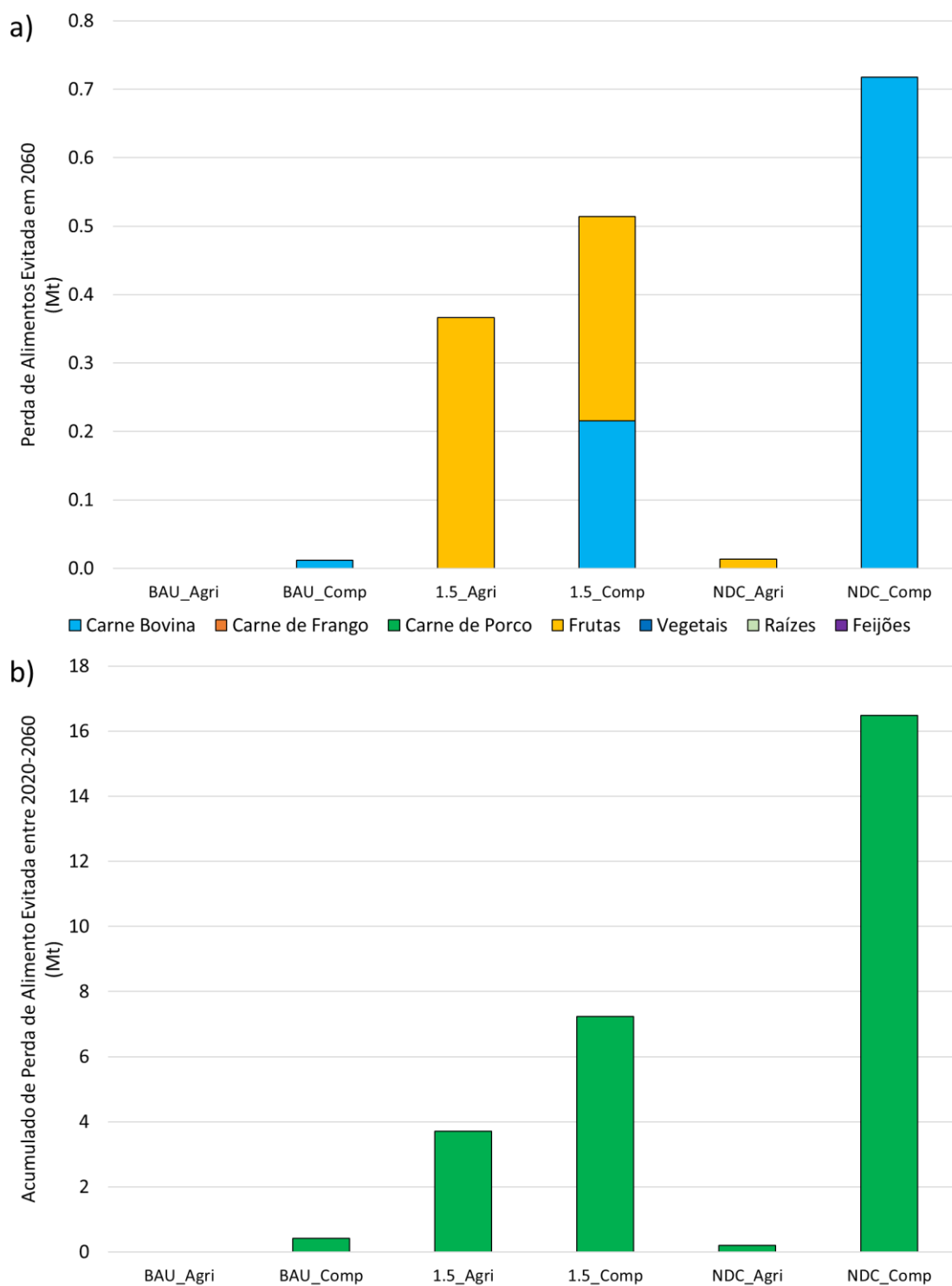


Figura 48: Perda de alimentos evitada em 2060 e no acumulado do período de análise. a) Quantidade de alimentos que deixaram de ser perdidos em 2060 através da produção em sistemas disruptivos; b) Acumulado da quantidade de alimentos que deixaram de ser perdidos entre 2020 e 2060 devido a implementação de sistemas disruptivos.

Fonte: Elaboração própria

Além dessas tecnologias, o modelo BLUES também pode decidir se haveria ou não vantagens para a implementação de sistemas de produção de carne bovina, leite e arroz irrigado com a adição de enzimas metanogênicas. Conforme Figura 49, esses sistemas de produção agropecuários tiveram participações importantes nos cenários NDC, visto que eles conseguem mitigar cerca de 30% de todas as emissões de CH₄ provenientes desses sistemas de produção. No cenário NDC_Agri, cerca de 78% de toda a produção de arroz nacional passou a ser produzido através de sistemas com a adição de enzimas metanogênicas (Figura 49). Sendo produzido cerca de 11,7 Mt de toneladas de arroz através desse sistema, o que representa cerca de 100% da produção nacional de arroz irrigado. Assim, todo o arroz produzido através de sistemas irrigados em 2060 no cenário NDC_Agri, foi produzido com a adição de enzimas para a redução das emissões de CH₄.

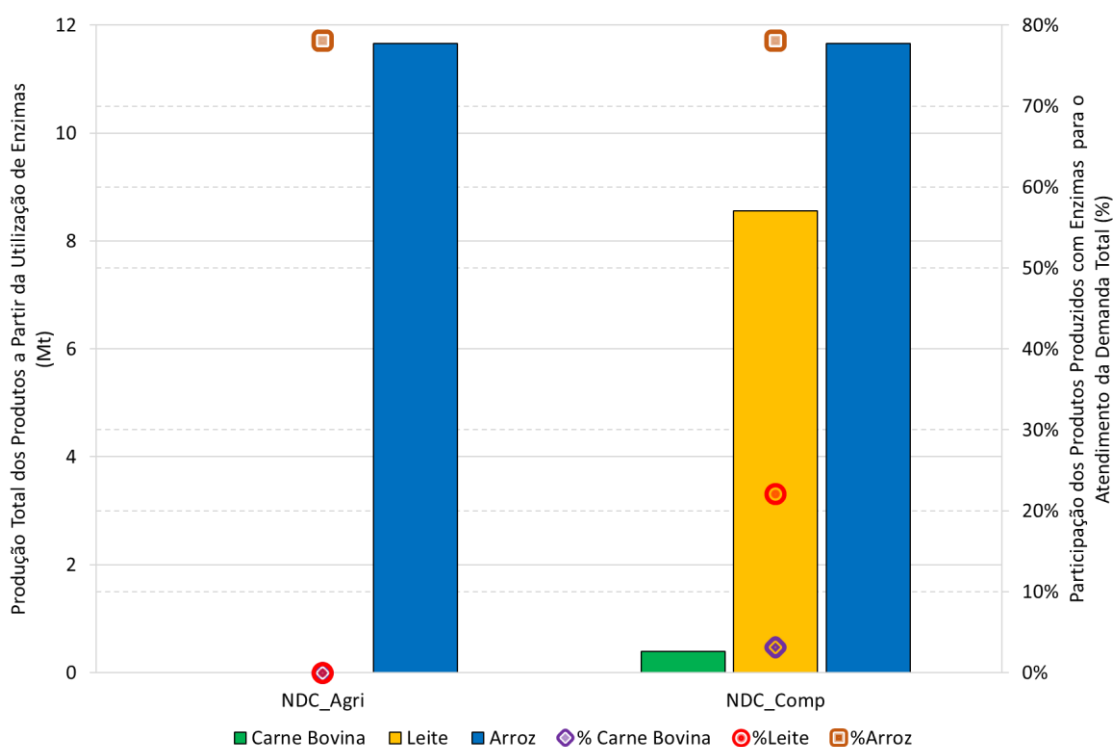


Figura 49: Produção de produtos agropecuários com a adição de enzimas para redução das emissões de CH₄ e sua participação nos cenários NDC.

Fonte: Elaboração própria

Além disso, a participação das enzimas no cenário NDC_Comp foi ainda maior, visto que com a adição da produção de gado de corte a partir de sistemas de confinamento

superintensivo e gado leiteiro em sistemas semi-intensivo, foi possível incluir a adição de enzimas para esses sistemas produtivos. Isso possibilitou com que houvesse uma produção de carne e leite com baixos níveis de emissões de metano, o que é essencial para os cenários NDC. Desse modo, no cenário NDC_Comp, a penetração de enzimas na produção de arroz continuou estável com o que foi visto para o cenário NDC_Agri, contudo, com a participação 22,1% do leite nacional (8,6 Mt) sendo produzido através de sistemas com enzimas e 3,1% da carne nacional (0,4 Mt) através de sistemas de confinamento superintensivos com adição de enzimas na ração animal.

4.3 Oportunidades, Desafios e Barreiras para a Transição Agropecuária Brasileira e suas Implicações Políticas

A transição agropecuária no Brasil possui alguns desafios inerentes à mudança estrutural de todo o conjunto de ideias e sistemas de produção que existem atualmente no Brasil. Assim, há a necessidade de aumentar a sustentabilidade do campo ao mesmo tempo que é preciso desenvolver sistemas de produção que aumentem a produtividade agropecuária, de forma que o país possa atender as demandas por insumos e alimentos agropecuários necessários para o abastecimento humano e produção de *commodities* para os demais setores. Além disso, é necessário que o setor passe a diminuir as pressões que ele causa sobre áreas de vegetação nativa e mitigar suas emissões. Desse modo, percebe-se que os desafios necessários para a realização da transição agropecuária de forma adequada passam por diferentes níveis da sociedade, sendo importante adaptar tanto os sistemas de produção, quanto a cadeia de produção e a vontade do consumidor.

A transição agropecuária possui diversos tipos de desafios que transpassam tanto o setor produtivo quanto do consumidor. Contudo, seis grandes desafios são necessários de serem discutidos, que são:

- Redução das pressões sobre áreas de vegetação nativa e povos originários;
- Redução das emissões do setor;
- Aumento da sustentabilidade do campo;
- Alteração da vontade do consumidor;

- Atingir as demandas agropecuárias que são esperadas do setor em cenários climáticos; e,
- Adaptação às mudanças climáticas.

Associados a esses desafios, existem diversos meios de superação das barreiras inerentes a eles, bem como oportunidades atreladas. O Brasil, por se tratar de um país que está situado em uma posição privilegiada no globo e por ser um dos países com maior potencial de produção de *commodities* agropecuárias, possui a oportunidade de ganhar protagonismo ainda maior na agropecuária mundial. Contudo, é necessário que o país mude seus sistemas tradicionais de produção agrícola e pecuária de modo que possa passar a produzir insumos e alimentos sustentáveis, com baixa pegada de carbono e de gases não-CO₂.

As tecnologias de produção da transição agropecuária expostas na seção 4.2 demonstram que é possível que o país ganhe esse protagonismo de forma sustentável, diminuindo os impactos da cadeia de produção, aumentando o valor agregado dos insumos e alimentos e ainda, melhorando a sua imagem perante a comunidade global. Contudo, é necessário que algumas barreiras para a implementação dessas tecnologias sejam superadas.

Para fim de neutralidade climática, as novas tecnologias implementadas no modelo BLUES deram tempo para que novas tecnologias do setor energético fossem implementadas. Com isso, há menores níveis de penetração de tecnologias do setor energético com menor grau de maturidade tecnológica como, por exemplo, CCS/BECCS e rotas avançadas de produção de biocombustíveis, como de biomassa para líquidos (do inglês: *Biomass to Liquid* – BTL) e álcool para combustível de aviação (do inglês: *Alcohol to Jet* – ATJ). No Brasil, a necessidade da utilização de tecnologias que envolvam emissões negativas aliadas ao CCS, que tem grau de risco elevado em larga escala, ainda é algo controverso, principalmente envolvendo as escalas de produção que são necessárias de acordo com diversos estudos já realizados com o modelo BLUES e outros (BELLO *et al.*, 2023; IEA, 2021; IPCC, 2018; MACHADO *et al.*, 2021). Dessa forma, é feita uma aposta tecnológica, do setor agropecuário, contra outra, do setor energético, que é sabidamente controversa, que é o caso do CCS, principalmente devido ao risco de

ruptura dos dutos de transporte de CO₂ (KOTCHER *et al.*, 2019; PSR-LA, 2022; SMITH, 2023; SORAGHAN e ANCHONDO, 2022).

Nos cenários de 1.5°C, não houve tanto impacto em relação ao perfil tecnológico do setor energético, havendo ainda uma grande penetração de BECCS. Isso acontece principalmente devido às novas tecnologias implementadas no modelo BLUES não terem efeitos significativos sobre a redução da descarbonização do setor agropecuário. Assim, como os cenários de limitação de aquecimento global limitado à 1.5°C têm apenas a restrição em relação aos níveis de emissão de CO₂ e não de GEE, as tecnologias disruptivas não tiveram tanta relevância para o modelo. Contudo, ocorre uma penetração significativa dos sistemas de produção agropecuária através de sistemas integrados, principalmente quando envolve florestas plantadas (pinus e eucalipto) ou florestas nativas. Logo, é importante a participação de sistemas integrados do tipo ILF (Integração Lavoura-Floresta), IPF (Integração Pecuária-Floresta) e ILPF (Integração Lavoura-Pecuária-Floresta) em cenários climáticos de descarbonização.

Esse tipo de sistema de produção integrada foi utilizado, principalmente, como medida para aumentar o estoque de carbono no solo através de processos de recuperação de pastagens degradadas e, como fonte de insumo de material energético para a produção de biocombustíveis e bioenergia associada ao CCS, o BECCS. Apesar de não ser muito significativo, os sistemas integrados também auxiliaram na redução da necessidade de utilização de BECCS devido a ser mais um meio de mitigação climática através do aumento de carbono no solo. Assim, aumentando a variedade de possibilidades de opções baseadas na natureza (do inglês: *Nature Based Solutions* – NBS), e dessa forma, não sendo necessário apenas focar esforços em medidas de reflorestamento de florestas nativas.

Contudo, para isso acontecer, tem que, inicialmente, haver linhas de financiamento para implementação de novos sistemas de produção agropecuária, pois conforme indicado nas seções 2.2.1.2 e 3.3, esses sistemas de produção requerem altos níveis de investimento. Isso muitas vezes inibe o produtor rural em migrar para sistemas produtivos mais sustentáveis ou mesmo o empresário que queria investir em sistemas disruptivos no perímetro urbano, devido às incertezas inerentes a esse tipo de produção (BLAKENEY, 2022; LOPES *et al.*, 2016; OECD-FAO, 2022; OECD, 2022). Ademais, é necessário haver investimento em educação para o desenvolvimento de mão-de-obra qualificada para suprir as novas necessidades de que a inovação no campo e na

agropecuária urbana irá necessitar, visto que esses novos sistemas de produção agropecuário serão voltados para o maior nível de tecnificação e automação do setor (BLAKENEY, 2022; OECD/FAO, 2022). Além disso, o setor de pesquisa, desenvolvimento e inovação (P&DI) brasileiro tem que ser reforçado, com novos incentivos econômicos e financeiros para que essas novas tecnologias de produção de alimentos e *commodities* agropecuárias sejam adaptadas para o território brasileiro (LOPES *et al.*, 2016; EUROPEAN UNION, 2019; OECD/FAO, 2022). Atualmente, no Brasil, a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), juntamente com os ministérios de Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) são as principais redes de investimento em ações de fomento a P&DI, tanto por meio de financiamentos reembolsáveis, quanto não reembolsáveis (FINEP, 2021, 2022).

Contudo, o trabalho realizado não avaliou na modelagem pontos sensíveis e de grande dificuldade para a implementação em modelo do tipo IAM, como por exemplo:

- Capacidade de geração de empregos desses novos sistemas de produção agropecuário, assim como a variação do salário médio dos trabalhadores rurais;
- Níveis de desperdício de alimentos;
- Disponibilidade de investimento públicos e privados para a implementação dessas novas tecnologias implementadas no modelo BLUES; e,
- Possíveis impactos desses sistemas de produção sobre a biodiversidade brasileira.

Ademais, para haver esse nível de penetração das tecnologias implementadas no modelo BLUES, é necessário entender de forma mais detalhada e na prática os parâmetros de custo, taxa de penetração, disponibilidade de matéria prima e outros itens que foram considerados no desenvolvimento das tecnologias do modelo. Logo, pode haver diferenciações entre as projeções obtidas pelo modelo e as observadas na realidade. Isso é devido a custos de diferentes níveis de alteração de custos, potenciais de expansão e outros parâmetros que foram projetados no BLUES e que, na realidade, não seguiram a mesma trajetória.

O modelo verifica vantagens importantes para o desenvolvimento da transição agropecuária rumo a sustentabilidade, havendo benefícios e cobenefícios atrelados a diversos sistemas produtivos e, principalmente, para o combate as mudanças climáticas. Porém, isso apenas é possível se as barreiras econômicas, socioculturais, científico-tecnológicas e de mercado forem atacadas – para o desenvolvimento dessas barreiras se utilizou como base o trabalho desenvolvido por Schaeffer *et al.* (2017) e Soares-Filho *et al.* (2017). Destacam-se algumas das principais barreiras da transição agropecuária como sendo:

- (i) Falta de mão-de-obra qualificada para a implementação em larga escala de alguns sistemas de produção mais disruptivos;
- (ii) Falta de conscientização do produtor rural e do consumidor sobre a possível mitigação de GEE através da adoção de alguns sistemas de produção;
- (iii) Precarização dos sistemas de extensão rural para divulgação e acompanhamento técnico de alguns sistemas de produção;
- (iv) Dificuldade de acesso ao crédito rural;
- (v) Desconhecimento do produtor rural e da cadeia de suprimento de alimentos sobre novos sistemas de produção e de transporte de carga para minimização das perdas ao longo de toda a cadeia de produção de alimentos;
- (vi) Alteração da preferência do consumidor em consumir novos tipos de alimentos; e,
- (vii) Custo final dos alimentos e *commodities* agropecuárias que geram menores níveis de impacto no meio ambiente.

Em relação às barreiras econômicas, elas podem ser divididas em duas sub-barreiras, de investimento e de custo. As barreiras de investimento podem ser entendidas como as barreiras pertencentes as tecnologias agropecuárias que necessitam de grandes volumes financeiros iniciais para a sua implementação. Dessa forma, sendo necessária a utilização de fundos públicos ou privados para a implementação desses sistemas de produção. Esses investimentos públicos e privados são muitas vezes escassos e onerosos – com altas taxas de juros – para o pequeno e médio produtor rural devido ao risco

associado. Isso muitas vezes acontece por causa desse tipo de produtor rural ter menor capacidade de resiliência a perdas de safra e não ter como pagar o empréstimo ou, então, não contratar o seguro rural para arcar com as perdas da safra. Assim, é necessário o auxílio de planos governamentais para estimular empréstimos a baixo custo ou a fundo perdido para que os pequenos e médios produtores tenham condição de realizar a migração para esses sistemas de produção mais sustentáveis.

Os sistemas integrados, por exemplo, são sistemas produtivos que possuem rendimentos superiores aos sistemas produtivos convencionais, contudo, necessitam de investimentos iniciais elevados para o pequeno produtor rural. Isso ocorre devido a necessidade de aumentar a área de cerca na propriedade, para divisão das áreas de pastejo e plantio de culturas ou silvicultura. Também, o melhoramento da fertilidade e condições estruturais do solo para a produção em larga escala, o que possui alta demanda de implementos agrícolas, fertilizantes e corretivos para o solo que são custosos e têm que ser feito para a implementação desse tipo de cultivo.

Além disso, pode-se ter o exemplo dos sistemas de produção urbana de fazendas verticais com alto nível de tecnificação, que exigem uma grande quantidade de investimento inicial para comprar o terreno, implementar o prédio para a produção de diversos tipos de produtos agropecuários e o maquinário necessário para fazer como que todos os cultivos e criações tenham condições ideais para expressar todo o seu potencial genético. Esse exemplo é marcante pois foi um tipo de tecnologia agropecuária que não foi escolhido pelo modelo BLUES, mesmo ela sendo um sistema altamente produtivo e com um dos níveis mais baixos de emissões de GEE. Isso aconteceu devido a essa tecnologia requerer altos níveis de investimento e talvez, se não fosse tão alto, teria sido escolhido pelo modelo como uma das tecnologias chaves para a descarbonização ou neutralização climática dos cenários estudados. Entretanto, o setor de agropecuária urbana ainda possui outros limitantes, principalmente a dificuldade da aquisição de empréstimos para a produção agropecuária, visto que, em geral, a política de financiamento e concessão de crédito para o setor está focada para a região rural e não urbana. Assim, é necessário o desenvolvimento de políticas públicas que passem a também contemplar o produtor agropecuário que esteja localizado no perímetro urbano, justamente para contemplar esse tipo de produção agropecuária disruptiva.

Já a barreira de custo pode ser entendida como a quantidade de aporte financeiro necessário para se produzir uma certa quantidade de um bem. Esse tipo de barreira

econômica também é relevante para a produção agropecuária e para a solução ótima do modelo BLUES, visto que o modelo é do tipo minimização de custos. Para superar esse tipo de barreira é necessário que sejam projetados sistemas de barateamento dos insumos necessários para a sua produção ou então, que valorem mais esse produto em detrimento a um mesmo produto produzido de forma diferente. Nesse segundo caso, é a certificação e rastreabilidade de meios existentes para valoração dos produtos que possuem diferenciais produtivos, como uma menor pegada de carbono.

No modelo BLUES, é possível identificar a produção de orgânicos como um caso clássico dessa barreira de custos de produção, visto que apesar de possuir uma menor pegada de carbono, esse sistema não é escolhida pelo modelo. Isso ocorre devido ao modelo não possuir meios de precificar positivamente a preferência do produtor em consumir alimentos mais saudáveis e sustentáveis. Se houvesse um meio de se fazer esse tipo de quantificação, provavelmente os sistemas orgânicos teriam obtido taxas de penetração significativas no modelo, pois devido a utilização de fertilizantes orgânicos, eles auxiliam na diminuição da pegada de GEE de toda a cadeia de produção. O mesmo pode ser dito sobre a produção de hortas urbanas, que não foi escolhida pelo modelo devido aos seus custos de produção serem superiores aos dos demais sistemas de produção agrícola. Se esse problema fosse resolvido, por meio de certificações e selos de produção, que diminuíssem o preço desses alimentos, talvez tivesse sido escolhido pelo modelo. Ademais, no setor urbano, alguns incentivos fiscais, como a redução da tarifa elétrica fornecida para a região rural e que contempla o produtor rural, não são concedidos para o produtor urbano, o que também acaba onerando ainda mais os custos da produção. Nesse caso, a produção em fazendas verticais seria impactada positivamente visto que uma parte considerável dos custos de produção são advindos dos custos com energia elétrica para condicionamento do ambiente, circulação de água e nutrientes e iluminação.

Assim, a barreira econômica de investimento é uma das principais barreiras para a transição agropecuária, visto que muitas vezes pode fazer com que se deixe de implementar um tipo de sistema produtivo justamente por falta de recursos para o investimento inicial. Já a barreira econômica de custo é mais facilmente contornável visto que depende também da vontade do consumidor em consumir um produto mais saudável e sustentável, o que atualmente já é feito, tornando esse tipo de produto valorizado através de selos e certificações. Assim, para essa barreira ser superada, é necessário haver inicialmente a participação do governo em promover políticas públicas que incentivem o

produtor rural na adoção de sistemas mais sustentáveis de produção agropecuária, com diferentes tipos de aportes financeiros e empréstimos que possibilite o pequeno produtor ter condições econômicas para implementar esses sistemas produtivos. Ademais, também é necessário o incentivo à produção agropecuária urbana para aumentar a segurança alimentar regional, diminuindo os níveis de perdas ao longo da cadeia de produção e transporte dos alimentos agropecuários. Além disso, a promoção de certificações e fiscalização para a produção sustentável no país é um dos pontos importantes para a diferenciação financeira dos produtos advindos de sistemas de produção sustentáveis.

A Tabela 22 apresenta um resumo das barreiras econômicas e sugestões para a superação dessas barreiras.

Tabela 22: Barreiras, grau de dificuldade de superação das barreiras e sugestões para a superação das barreiras por sistema de produção das barreiras econômicas.

TECNOLOGIA	BARREIRA IDENTIFICADA	GRAU SUPERAÇÃO	SUGESTÕES P/ SUPERAÇÃO
Agricultura alta produtividade	- Alto custo de produção	- Baixo	- Planos governamentais para estimular empréstimos a baixo custo ou a fundo perdido para produtores agropecuários;
Agricultura orgânica	- Alto custo de produção	- Médio	
Enzimas na agricultura	- Alto custo de produção	- Baixo	
Hortas urbanas	- Alto custo de produção	- Baixo	
Fazenda vertical	- Investimento elevado - Alto custo de produção	- Alto - Alto	- Desenvolvimento de políticas públicas que enxergue o produtor agropecuário urbano para a concessão de empréstimos e outros benefícios fiscais;
Sistemas integrados (ILP, IPF, ILF, ILPF)	- Investimento elevado - Alto custo de produção	- Médio - Baixo	
Pecuária confinada	- Investimento elevado - Alto custo de produção	- Alto - Médio	- Desenvolvimento de selos e certificações de sustentabilidade ou de produção de baixo carbono;
Enzimas na pecuária	- Alto custo de produção	- Baixo	
Carne plantada	- Investimento elevado	- Médio	
Carne cultivada	- Investimento elevado - Alto custo de produção	- Alto - Alto	- Taxação de gases de efeito estufa.

Fonte: Elaboração própria

A barreiras socioculturais têm relação com as práticas exercidas pelos indivíduos que fazem parte de uma sociedade, que geralmente dificultam a alteração de vontade e

das preferências do produtor rural ou do consumidor. Sendo necessário mais tempo para que as barreiras sejam superadas, sem alterar a cultura ou costumes do indivíduo. Nesse contexto, tanto os sistemas de produção, integrados e disruptivos, são impactados diretamente pela tradição rural de produção em sistemas já consolidados, em que, muitas vezes, as propriedades e os sistemas produtivos já são passados de geração em geração.

Assim, constitui-se como uma forte barreira sociocultural a relutância do produtor rural ao não se interessar em alterar os sistemas produtivos mesmo havendo o conhecimento de que esses podem gerar um maior rendimento ao produtor. Pode-se ter como exemplo a alteração da produção de gado de corte em sistemas extensivos para sistemas confinados superintensivos. Isso ocorre, principalmente, devido a esses sistemas necessitarem de alterações muito expressivas, desde o tipo de criação, que sai de um pasto degradado e sem adição de suplementação animal, para um sistema que deverá produzir insumos agrícolas – para a alimentação animal – juntamente da produção através exclusivamente da suplementação animal e climatização do ambiente para os animais. Logo, altera-se completamente o sistema de produção que já era utilizado pelo produtor rural e que geralmente é passado entre gerações. Nesse caso, um meio adequado para tratar esse tipo de barreira seria o melhoramento e fortalecimento de políticas públicas de práticas extensionistas no setor rural como é feito atualmente pela Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER), presente em todos os estados brasileiros, e pela EMBRAPA. Não obstante, é fundamental o desenvolvimento de campanhas de conscientização do produtor rural sobre a importância da adoção de medidas ligadas a transição agropecuária e seus potenciais econômicos.

Outro ponto sensível para as barreiras socioculturais é a alteração da alimentação humana pensando em adotar alimentos mais saudáveis e com uma menor pegada de carbono, visto que em algumas religiões a ingestão de por exemplo carne de porco – que possui menor pegada de carbono – é proibida. Ademais, em algumas sociedades, a ingestão de carne bovina é também uma questão de ascensão econômica, logo, não é factível a sua troca por outros tipos de carnes ou até a alimentação através de dietas vegetarianas ou veganas. Dessa forma, é necessário adotar novas medidas de produção de carnes e outros alimentos intensivos em carbono equivalente, para que esses produtos de difícil substituição devido a barreiras socioculturais sejam substituídos por produtos similares, mas com menos pegada de GEE, como por exemplo a carne bovina produzida em sistemas confinados superintensivos ou carne cultivada.

A nível social também pode-se colocar a dificuldade do acesso aos produtos saudáveis e sustentáveis, visto que, muitas vezes, são mais caros para o consumidor. Isso acaba gerando problemas de manutenção do poder de compra do consumidor e até mesmo, gerando nichos de classes sociais que possuem condições financeiras de comprar esse tipo de alimento. Atualmente, isso já acontece com os alimentos orgânicos, que possuem um preço mais elevado do que os não orgânicos. Contudo, também é possível acontecer no caso dos alimentos produzidos através da adição de enzimas e fazendas verticais, visto o seu maior custo de produção. Esse aspecto já é identificado com as carnes sintéticas (plantada e cultivada), visto o seu alto custo de produção aliado ao baixo nível de oferta, que acaba gerando preços elevados para o consumidor final e assim, gerando um nicho muito específico para o consumo desse tipo de alimento. Atualmente não existem muitas maneiras para se resolver esse problema, que já acontece com os alimentos orgânicos, mas uma das possibilidades é o desenvolvimento de políticas públicas focadas no fornecimento de subsídios para o barateamento desses produtos com maior grau de sustentabilidade. A taxaço de carbono é um dos meios possíveis para a viabilização desse tipo de subsídio focado no barateamento dos alimentos sustentáveis, podendo gerar níveis mais adequados de acesso à alimentos saudáveis e de baixa pegada de GEE para toda a população, aumentando a democratização desses alimentos.

A Tabela 23 apresenta um resumo das barreiras socioculturais e sugestões para a superação dessas barreiras.

Tabela 23: Barreiras, grau de dificuldade de superação das barreiras e sugestões para a superação das barreiras por sistema de produção das barreiras socioculturais.

TECNOLOGIA	BARREIRA IDENTIFICADA	GRAU SUPERAÇÃO	SUGESTÕES P/ SUPERAÇÃO
Agricultura alta produtividade	- Relutância do produtor rural em aceitar a troca de sistema de produção	- Baixo	
Agricultura orgânica	- Relutância do produtor rural em aceitar a troca de sistema de produção - Elevado custo para o consumidor	- Médio - Médio	- Fortalecimento de órgãos governamentais de práticas de extensão rural;
Enzimas na agricultura	- Relutância do produtor rural em aceitar a troca de sistema de produção - Elevado custo para o consumidor	- Baixo - Baixo	- Desenvolvimento de campanhas de conscientização focadas no produtor rural e na população sobre a necessidade de adoção de práticas ligadas a transição agropecuária;
Hortas urbanas	---	---	
Fazenda vertical	- Elevado custo para o consumidor	- Médio	
Sistemas integrados (ILP, IPF, ILF, ILPF)	- Relutância do produtor rural em aceitar a troca de sistema de produção	- Médio	- Taxação de gases de efeito estufa de alimentos com menores níveis de sustentabilidade para subsidiar o consumo de alimentos saudáveis e sustentáveis por parte da população mais pobre;
Pecuária confinada	- Relutância do produtor rural em aceitar a troca de sistema de produção	- Alto	
Enzimas na pecuária	- Relutância do produtor rural em aceitar a troca de sistema de produção - Elevado custo para o consumidor	- Médio - Baixo	- Estimulo a produção de alimentos alternativos com baixa pegada de GEE e mais sustentáveis.
Carne plantada	- Elevado custo para o consumidor - Consumidor aceitar trocar carne animal por carne vegetal	- Médio - Médio	
Carne cultivada	- Elevado custo para o consumidor	- Alto	

Fonte: Elaboração própria

Em relação as barreiras científico-tecnológicas, alguns pontos podem ser destacados, como por exemplo a falta de maturidade tecnológica de algumas das tecnologias que atualmente são vistas como indispensáveis para a transição agropecuária e energética, como por exemplo BECCS, que têm seus insumos sendo produzidos no setor agropecuário. Atualmente, a participação de CCS e de BECCS é unanimidade dentre os principais relatórios do IPCC, quanto dos resultados dos cenários climáticos oriundos dos IAMs nacionais e globais, contudo, ainda é uma tecnologia com baixo grau de maturidade

tecnológica. Ademais, com enfoque na transição agropecuária, as tecnologias disruptivas mais avançadas como a produção de carne cultivada e fazendas verticais ainda possuem um grau de prontidão tecnológica ainda reduzido, devido à dificuldade de implementação em larga escala desses sistemas de produção. Assim também há o impacto na penetração dessas tecnologias nos resultados do modelo BLUES nos cenários NDC, visto que o potencial de implementação dessas tecnologias também é reduzido. Dessa forma, é necessário incentivo econômico para o setor disruptivo para atrair um número maior de empresas para o setor e estimular o desenvolvimento desses novos sistemas de produção.

Analisando-se com o viés científico, o desconhecimento da possibilidade e das vantagens da implementação de alguns sistemas de produção por parte do produtor rural também ainda é uma barreira para o seu desenvolvimento. No caso, por exemplo, dos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, muitos produtores rurais ainda possuem um grau elevado de desconfiança da razão pela qual seria interessante sua implementação. Em geral, os produtores estão acostumados a trabalhar apenas com um sistema de produção – principalmente gado de corte – e se torna difícil a compreensão da necessidade de expandir a quantidade dos sistemas para trazer maior nível de resiliência para a produção rural. Também pode ser destacada a falta de um senso comum da necessidade de haver mudanças no sistema produtivo e do real impacto do setor sobre o meio ambiente. O setor agropecuário possui baixa predisposição a mudanças nos sistemas produtivos e que muitas vezes não percebe a necessidade de alterar os sistemas de produção devido a não crer que exista a necessidade da mudança. Além disso, existe a descrença de que essa alteração possa gerar retornos financeiros superiores aos que são gerados através dos sistemas de produção tradicionais. Assim, há a necessidade de aumentar o nível de esclarecimento e compreensão do produtor rural das oportunidades de que uma migração para sistemas de produção mais sustentáveis, com menores impactos ao meio ambiente, pode gerar. Isso é possível por meio do fortalecimento dos órgãos governamentais de extensão rural e desenvolvimento científica, como EMATER e EMBRAPA, de modo que haja um maior nível de divulgação de novas práticas agropecuárias e seus potenciais econômicos juntamente com os pequenos e médios produtores rurais. É necessário que também haja um acompanhamento mais próximo entre o extensionista e o produtor rural, principalmente nos anos iniciais de implementação desses novos sistemas de produção agropecuária para identificação e

correção de problemas, de modo que um produtor rural sirva de exemplo para os demais e ajude na divulgação desses sistemas produtivos.

Uma das barreiras mais proeminentes para a transição agropecuária e que mais se destaca dentre as barreiras científico-tecnológicas é a da mão-de-obra qualificada. Os sistemas de produção agropecuários decorrentes da transição agropecuária, muitas vezes, requerem outros tipos de profissionais, com maior nível de conhecimento técnico e que saibam desenvolver múltiplas tarefas. Por exemplo, os sistemas integrados – que requerem um menor nível de qualificação do que os sistemas disruptivos – necessitam de profissionais qualificados que consigam desenvolver múltiplas tarefas para cuidar e manejar tanto o setor pecuário, quanto agrícola ou silvícola. Ademais, é necessário haver a presença de técnicos e profissionais graduados com conhecimentos de agronomia, agricultura e veterinária para realizar diagnósticos e tratamentos em um curto espaço de tempo nas criações e culturas. Ainda, tanto para os sistemas integrados, quanto os de criação de bovinos confinados superintensivos também necessitam de profissionais qualificados que possam operar implementos e maquinários agrícolas de forma adequada. Assim, são necessários investimentos em capacitação da mão-de-obra, para que a educação do profissional rural seja mais multidisciplinar e dessa forma, fazendo com que essa barreira seja superada.

A Tabela 24 apresenta um resumo das barreiras científico-tecnológicas e sugestões para a superação dessas barreiras.

Tabela 24: Barreiras, grau de dificuldade de superação das barreiras e sugestões para a superação das barreiras por sistema de produção das barreiras científico-tecnológicas.

TECNOLOGIA	BARREIRA IDENTIFICADA	GRAU SUPERACÃO	SUGESTÕES P/ SUPERACÃO
Agricultura alta produtividade	- Desconhecimento dos benefícios por parte do produtor - Mão-de-obra qualificada	- Baixo - Médio	- Incentivo econômico para o setor de produção disruptiva da agropecuária; - Desenvolvimento de campanhas de conscientização focadas no produtor rural e na população sobre a necessidade de adoção de práticas ligadas a transição agropecuária;
Agricultura orgânica	---	---	
Enzimas na agricultura	- Mão-de-obra qualificada	- Baixo	
Hortas urbanas	---	---	
Fazenda vertical	- Prontidão tecnológica - Mão-de-obra qualificada	- Baixo - Médio	- Fortalecimento de órgãos governamentais de práticas de extensão rural com o intuito de divulgação de novos sistemas de produção e suas vantagens econômicas;
Sistemas integrados (ILP, IPF, ILF, ILPF)	- Desconhecimento dos benefícios por parte do produtor - Mão-de-obra qualificada	- Médio - Médio	
Pecuária confinada	- Desconhecimento dos benefícios por parte do produtor - Mão-de-obra qualificada	- Médio - Médio	- Promoção do acompanhamento da produção nos anos iniciais da implementação para que sejam criadas fazendas modelo para servir de estímulo para os demais produtores rurais da região;
Enzimas na pecuária	- Mão-de-obra qualificada	- Baixo	
Carne plantada	- Mão-de-obra qualificada	- Médio	- Políticas públicas que aumente estimule o desenvolvimento acadêmico e científico da mão-de-obra rural, para que ela possa atender as necessidades técnicas e quantitativas do setor.
Carne cultivada	- Prontidão tecnológica - Mão-de-obra qualificada	- Médio - Alto	

Fonte: Elaboração própria

No caso das barreiras de mercado é possível considerá-las como as mais difíceis de serem resolvidas, visto que para isso é necessária a alteração da vontade e preferência do consumidor. Essa barreira tem relação com a vontade do consumidor em apresentar uma alteração na sua preferência por produtos mais saudáveis e sustentáveis, mesmo que isso acabe impactando no seu poder de compra. Assim, alterando a conscientização por parte do consumidor, da necessidade de demandar novos tipos de alimentos e produtos

produzidos através de *commodities* agropecuárias sustentáveis. Logo, essa é uma barreira de compreensão do consumidor de que é necessária uma demanda e consumo conscientes de produtos agropecuários, não só de produtos sustentáveis, mas também que reduzam o nível de desperdício.

Por parte da barreira da demanda, existe a dificuldade em alterar a percepção do consumidor da necessidade de consumir alimentos mais saudáveis, evitando o consumo de alimentos ultraprocessados e grandes quantidades de carnes provenientes de criações com alta pegada de carbono. Em suma, conscientizando a demanda sobre a necessidade de alterar toda uma cadeia de meio de consumo de alimentos e materiais provenientes do setor agropecuário. Contudo, essa barreira também tem um dificultador que é a população decidir que é mais adequado consumir produtos mais saudáveis e sustentáveis, mesmo que sejam mais caros, havendo a possibilidade dessa mudança dos hábitos de consumo gerarem o aumento da cesta de alimentos e conseqüentemente aumentar os níveis de insegurança alimentar, diminuindo a democratização dos alimentos. Logo, é necessário a implementação de campanhas focadas no consumidor final, sobre a importância e benefícios de se ter uma alimentação mais saudável e que tragam menores níveis de impacto à natureza.

Já pelo lado da barreira do consumo consciente, essa também traz a necessidade de alterar todos os hábitos de alimentação e de compras do consumidor, a fim de diminuir os níveis de desperdício de alimentos. Dessa forma, evitando a produção desnecessária de alimentos, o que poderia acabar gerando uma sobra na oferta de alimentos e conseqüentemente, reduzindo o preço dos alimentos. Contudo, essa barreira não é tão simples de ser resolvida, devido a também alterar a preferência do consumidor. Atualmente, verduras, legumes e frutas que não têm uma boa aparência são descartados indiscriminadamente ao longo da cadeia de produção e processamento de alimentos, sendo entre 20-25% desses alimentos jogados fora devido a possuírem uma aparência considerada não comercial. Algumas medidas já vêm sendo tomadas para reduzir esses problemas, tanto de desperdício e perda de alimentos, quanto da democratização dos alimentos, que são projetos do tipo “Frutas Feias”, que existe em Portugal, que comercializam produtos considerados não comercializáveis, devido apenas à sua aparência, por um preço módico e acessível a todos (FRUTA FEIA, 2023). Ademais, também é necessário um maior controle e fiscalização sobre os níveis de desperdício de

alimentos por parte da população, além de haver penalizações ou cobranças sobre o nível exacerbado de desperdício de alimentos.

Também é importante destacar que alguns sistemas de produção agropecuários têm resistência perante o consumidor final devido a fatores não climáticos, como no caso da criação confinada em sistemas superintensivos, que é o fator de bem-estar animal. Muitos consumidores consideram que não seria pertinente haver um incentivo ao consumo de carne bovina produzida a partir desses sistemas produtivos, visto que não o confinamento poderia diminuir os níveis de bem-estar animal. Dessa forma, há a ponderação entre pontos técnicos e éticos dessas novas tecnologias de produção agropecuária, o que torna essa uma barreira de grande dificuldade de superação.

A Tabela 25 apresenta um resumo das barreiras de mercado e sugestões para a superação dessas barreiras.

Tabela 25: Barreiras, grau de dificuldade de superação das barreiras e sugestões para a superação das barreiras por sistema de produção das barreiras de mercado.

TECNOLOGIA	BARREIRA IDENTIFICADA	GRAU SUPERAÇÃO	SUGESTÕES P/ SUPERAÇÃO
Agricultura alta produtividade	---	---	
Agricultura orgânica	- Preço alimento	- Baixo	
Enzimas na agricultura	- Demanda consciente por produtos sustentáveis	- Médio	
Hortas urbanas	- Demanda consciente por produtos sustentáveis	- Baixo	- Desenvolvimento de campanhas de conscientização focadas no consumidor final sobre a importância e benefícios à saúde e à natureza de uma alimentação mais saudável e sustentável;
Fazenda vertical	- Demanda consciente por produtos sustentáveis - Preço alimento	- Médio - Médio	
Sistemas integrados (ILP, IPF, ILF, ILPF)	- Demanda consciente por produtos sustentáveis	- Médio	- Desenvolvimento de campanhas de conscientização focadas no consumidor final sobre a importância de se evitar o desperdício de alimentos;
Pecuária confinada	- Demanda consciente por produtos sustentáveis - Bem-estar animal	- Alto - Alto	
Enzimas na pecuária	- Demanda consciente por produtos sustentáveis - Bem-estar animal	- Alto - Médio	- Maior controle, fiscalização e cobrança sobre o desperdício de alimentos.
Carne plantada	- Demanda consciente por produtos sustentáveis - Preço alimento	- Médio - Médio	
Carne cultivada	- Demanda consciente por produtos sustentáveis - Preço alimento	- Alto - Alto	

Fonte: Elaboração própria

Assim, da mesma forma que foi desenvolvido por Schaeffer *et al.* (2017) e Soares-Filho *et al.* (2017), para o projeto “Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil”, pode-se perceber a existência de barreiras, vantagens e oportunidades para a implementação dos novos sistemas de produção agropecuária ligados à transição agropecuária. Sendo atrelados a elas, instrumentos de políticas públicas que servem como meios para a superação dessas para a implementação desses sistemas produtivos.

Nesse contexto, é possível determinar que os sistemas de produção agropecuária oriundos da transição agropecuária possuem diversos tipos de vantagens e oportunidade atrelados. Assim, podendo-se destacar cinco eixos fundamentais para a determinação das vantagens e oportunidades desses sistemas produtivos, que são:

- Clima;
- Tecnologias;
- Setor agropecuário;
- Economia brasileira; e,
- Sociedade.

Inicialmente, é possível identificar que os novos sistemas de produção do modelo BLUES aliados aos sistemas produtivos já implementados por Angelkorte (2019) possuem vantagens importantes nos quesitos climáticos. Isso ocorre devido a eles serem formas de produção agropecuária que reduzem a pegada de GEE do produto final ou então, fornecem condições para haver o aumento da produtividade rural e assim, diminuir às pressões sobre áreas de vegetação nativa. De acordo com os resultados apresentados na seção 4.2, é possível perceber que tanto em cenários com restrição de emissões de CO₂ quanto em cenários que atendem a NDC brasileira, de zerar as emissões líquidas de GEE até 2050, existe uma forte migração dos sistemas de produção agropecuária tradicionais para sistemas com maior nível de produtividade, integrados ou disruptivos. Sendo essa migração necessária para reduzir as emissões de GEE ao mesmo tempo que possibilita o atingimento da demanda alimentar brasileira e de exportação e a produção em larga escala de *commodities* agropecuários para a produção de bioenergéticos associados ao CCS.

Além disso, os resultados expostos na seção 4.2 revelam uma nova perspectiva sobre a factibilidade dos cenários NDC perante o de limitação de aquecimento terrestre em 1,5°C. A NDC brasileira foi feita de forma a respeitar e compatibilizar os esforços nacionais para limitar as emissões nacionais de acordo com o necessário para respeitar cenários do tipo “Bem abaixo de 2,0°C” (do inglês – *Well below 2.0°C*), que é entendido pelo IPCC como sendo cenários de aquecimento global restritos a 1,5°C, logo, sendo condizente com o cenário 1.5 desenvolvido no modelo BLUES. Contudo, a NDC brasileira coloca como sendo uma das metas o país atingir emissões líquidas zero até

2050, sem identificar necessariamente se são emissões de CO₂ ou de GEE, o que influencia diretamente no futuro das emissões nacionais. Assim, ao se comparar o ponto de atingimento de emissões líquidas zero de CO₂ e de GEE, do cenário 1.5 desenvolvido no modelo BLUES, é possível observar um descasamento entre o cenário 1.5 com o que é proposto nas duas interpretações da NDC brasileira. Destaca-se que o cenário 1.5 é o mais restritivo nas trajetórias de emissões tanto de CO₂ quanto de GEE, com o Brasil se tornando neutro em CO₂ entre 2035 e 2040 e em GEE em 2045.

Isso mostra que devido a adição das novas tecnologias de produção agropecuária, provenientes da transição agropecuária, a NDC brasileira se tornou menos robusta e audaciosa do que ela realmente poderia e deveria ser, quando contava apenas com medidas de mitigação de CO₂ provenientes do setor energético e não de GEE como é possível por parte do setor de AFOLU. Logo, mostra a necessidade de haver novas reformulações do potencial brasileiro em mitigar tanto CO₂ quanto GEE para o desenvolvimento de sua NDC. Principalmente visto que a partir do desenho da política climática nacional é que será possível influenciar nos tipos de tecnologias e medidas que serão adotadas no futuro. Portanto, existe a necessidade de implementar as novas medidas da transição agropecuária na NDC brasileira, tanto com o intuito de torná-la condizente com a realidade e o potencial nacional, quanto para guiar o desenvolvimento e as oportunidades do setor agropecuário e energético brasileiro. Ressalta-se que a NDC nacional tem que ser condizente com os cenários climáticos assinados internacionalmente, que é o de limitar as emissões a cenários de 1,5°C.

Além disso, foi possível observar que a grande vantagem da implementação desses tipos de sistemas produtivos é a de possibilitar o atingimento das demandas superiores de produtos alimentos e insumos energéticos em cenários climáticos – em comparação com os cenários BAU, com o Brasil seguindo as trajetórias de produção e emissão atuais – sem haver a necessidade de aumentar a pressão sobre áreas de vegetação nativa. É possível determinar que as tecnologias de produção agropecuária que estão associadas a transição agropecuária possuem grandes vantagens no contexto de sustentabilidade visto que possibilitam aumentar as áreas de vegetação nativa entre 2020 e 2060 ao mesmo tempo que são adotados sistemas de produção que possuem como ponto central a recuperação de áreas degradadas. Isso auxilia tanto no aumento da produtividade do campo, quanto na redução de pressões sobre áreas de florestas e savanas e aumentam a biodiversidade rural, visto a presença de uma maior quantidade de área florestal e a

utilização de sistemas integrados que permitem o desenvolvimento de corredores ecológicos ao longo das áreas de produção agropecuária.

Ademais, os cenários desenvolvidos mostraram a existência de vantagens e oportunidades importantes a nível tecnológico ao se implementar medidas da transição agropecuária. Inicialmente, pode-se salientar a possibilidade de o Brasil diminuir a sua dependência em tecnologias com baixos níveis de prontidão tecnológica ou que ainda apresentam um baixo potencial de escalabilidade, se comparado com o esperado delas, como é o caso do CCS. Em todos os cenários climáticos analisados, houve uma menor necessidade na implementação de tecnologias energéticas que envolvessem a utilização de CCS, principalmente nos cenários NDC, com necessidade de atingir emissões líquidas zero de GEE até 2050.

No caso dos cenários NDC, ocorreu uma migração significativa de tecnologias da transição energética para as da transição agropecuária, para diminuição principalmente de gases não-CO₂ advindos principalmente do setor pecuário. Isso acontece devido ter sido apresentado ao modelo uma maior gama de opções de medidas de mitigação de GEE, diminuindo a dependência da mitigação climática nacional do setor energético. Assim, também diminuiu o risco de investimento em tecnologias não maduras do setor energético para tecnologias mais maduras do setor agropecuário, como é o caso dos sistemas integrados.

Apesar de algumas das tecnologias disruptivas do setor agropecuário, como carnes sintéticas e fazendas verticais, apresentarem atualmente problemas de escalabilidade ou grau de prontidão tecnológica similar ao do CCS, elas possuem a vantagem de contribuir para a segurança alimentar, de forma a proporcionar novos sistemas de produção com baixas emissões de GEE e com alta produtividade, sem pressionar áreas de vegetação nativa. Dessa forma, as tecnologias da transição agropecuária, além de serem benéficas para a população ao diminuírem os níveis de GEE emitidos pelo setor, ainda aumentam a disponibilidade de alimentos e insumos agropecuários e permitem que não seja necessário aumentar áreas agricultáveis por meio de desmatamento. Ao aproximar a produção ao consumidor final, também há a diminuição das demandas alimentares, visto a redução significativa das perdas ao longo da cadeia de distribuição, o que, conseqüentemente, também diminui as emissões de GEE oriunda dessas perdas. Gerando assim uma oportunidade para o setor agropecuário brasileiro se desenvolver com a implementação de Recursos Agropecuários Distribuídos e até mesmo propiciar maiores

níveis de exportação de alimentos e *commodities*, que passam a não ser mais perdidas durante os processos de colheita, transporte e distribuição.

Além disso, ao retirar parte da dependência da descarbonização e neutralidade climática de apenas uma tecnologia, o CCS, ainda auxilia na redução de riscos de investimentos desnecessários, que poderiam ser utilizados para financiar a implementação de sistemas de produção mais maduros, como o caso dos oriundos da transição agropecuária. Contudo, não significa que não será mais necessária a utilização do CCS, nos cenários climáticos, visto que esse continuará sendo utilizado, mas em quantidades mais moderadas, sendo parte dessa dependência pelo CCS substituída por sistemas maduros de produção agropecuária. Inclusive, com algumas dessas tecnologias sendo consideradas e priorizadas pelo Plano ABC e ABC+. Contudo, essas tecnologias devem continuar sendo estudadas para que no futuro o Brasil não continue focando apenas na cadeia de produção de energia e energéticos como forma de mitigação de CO₂ e GEE. O país possui um grande potencial agropecuário que deve continuar crescendo e ganhando destaque, mas para isso, é necessário que haja uma melhor distribuição de financiamento de pesquisas de base no setor agrícola e pecuário e não apenas concentrando esses investimentos em pesquisas do setor energético.

Assim, há uma maior ligação entre as políticas climáticas com as do setor agropecuário, estimulando e ampliando planos como o Plano ABC+ para que novas tecnologias e sistemas de produção penetrem mais rapidamente em uma menor escala de tempo. Para isso, é necessário o desenvolvimento de novas estratégias para a concessão de linhas de crédito, capacitação de mão-de-obra, treinamento de profissionais e conscientização da população sobre a importância do setor para o combate às mudanças climáticas. Logo, passando a ter a oportunidade de desenvolver o setor de forma limpa e mais sustentável, além de gerar maiores níveis de lucro para o produtor e mais impostos para a país.

Um exemplo dessa necessidade de alinhamento de políticas públicas para o setor agropecuário no desenvolvimento de novas estratégias é o aumento da utilização de métodos de plantio direto pelos produtores nacionais. Essa tecnologia de produção agrícola foi introduzida no Brasil na década de 70, mas foi apenas no início da década de 90 que ela ganhou força no país devido a participação da EMBRAPA para o seu desenvolvimento, adequação e divulgação. Dessa forma, auxiliando – através de investimentos públicos e políticas para o aumento da produtividade e sustentabilidade no

campo – na formação de uma agricultura por meio de plantio direto adaptada para as condições edafoclimáticas nacionais, desenvolvendo pesquisas de base para determinar os melhores cultivos que deveriam ser plantados e os melhores tipos de maquinários que deveriam ser implementados. Assim, a EMBRAPA, juntamente de políticas públicas e planos de governo para o desenvolvimento do setor, observaram a oportunidade para o setor agrícola em implementar esse tipo de tecnologia devido a diversos tipos de vantagens que ela traz para a produção brasileira. Assim, conseguiram impulsionar o setor agropecuário para a elaboração da tecnologia de produção agrícola que atualmente é mais utilizada no país, principalmente em sistemas de plantio rotacionado entre soja e milho ou soja e trigo, além de sistemas inovadores como a utilização de plantio direto para o cultivo de cana-de-açúcar.

Logo, verifica-se a importância da aceitação e participação do setor agropecuário na adoção de medidas mais sustentáveis, como as que foram implementadas no modelo BLUES, visto a possibilidade de gerarem ganhos de produtividade e financeiros para o setor agropecuário. Dessa forma, auxiliando na formação de políticas públicas para a geração de investimentos para o desenvolvimento de pesquisas de tecnologias sustentáveis e disruptivas para o setor – assim como na época foi o plantio direto –, capacitação da mão-de-obra para a implementação dessas tecnologias e da criação de linhas de crédito para financiar o desenvolvimento de novos sistemas de produção no campo.

Ademais, a implementação da transição agropecuária no Brasil é importante também para a melhoria da imagem do setor agropecuário brasileiro dentro e fora do país. Atualmente, o setor é conhecido por ser o setor que mais causa pressões sobre áreas de vegetação nativa e mais emite GEE no Brasil. Isso acaba gerando problemas comerciais, desvalorização e até mesmo embargos aos produtos agropecuários brasileiros. Dessa forma, há a necessidade de diminuir essa característica ruim do setor agropecuário nacional e voltar a mostrar que ele pode voltar a ter o protagonismo ambiental e climático que tem a possibilidade de ter, aproveitando as oportunidades que a imagem de ser um setor sustentável pode gerar.

Economicamente, o melhoramento da imagem do setor agropecuário brasileiro pode gerar uma maior confiança nos alimentos e *commodities* agropecuárias produzidos no país, de que eles são mais sustentáveis, ambientalmente conscientes e com menores níveis de emissões e utilização de defensivos químicos perigosos como o glifosato.

Assim, existe a oportunidade de diminuir a quantidade de embargos existentes para a exportação dos produtos nacionais, principalmente decorrente de desmatamento e uso excessivo de defensivos químicos. Ademais, ao se produzir um produto mais sustentável e com menores níveis de aplicação de insumos químicos, é possível haver uma maior agregação de valor a esse produto. O que gera lucros superiores para o produtor, maiores salários para os trabalhadores e uma maior quantidade de impostos sendo gerados para o país. Além disso, gera uma maior procura por esse tipo de produto por parte do consumidor, o que também impulsiona a produção e gera mais oportunidade para a agropecuária brasileira expandir, de forma sustentável e com menos emissões de GEE, sua rede de comercialização com o mercado exterior.

Dessa forma, as tecnologias provenientes da transição agropecuária geram para o país grandes vantagens econômicas e financeiras, tanto para o produtor, quanto para o país e para a população. Isso ocorre visto que ao aumentar a participação da agropecuária sustentável, o Brasil também passa a necessitar de um maior número de empregos diretos e indiretos. Atrelado a isso, existe o aumento da renda do trabalhador, visto que são empregos que necessitam de uma mão-de-obra mais especializada, se comparado com os sistemas convencionais de produção agropecuária.

Assim, com o melhoramento da imagem do agronegócio brasileiro, o Brasil tem a oportunidade de voltar a ter protagonismo no quesito meio ambiente e no setor agropecuário. Tudo isso, sem haver imposição de um sobre o outro, como muitas vezes é observado. Dessa forma, existem vantagens para o país ao aumentar a produção de produtos agropecuários com alto valor agregado, decorrentes dos novos sistemas de produção sustentáveis do agronegócio, visto que possibilita a expansão de sua participação no mercado externo, assim como nos níveis de exportação de alimentos e *commodities* agropecuárias. Logo, o PIB agropecuário e brasileiro possui a oportunidade de aumentar e tornar a balança comercial brasileira cada vez mais positiva, através da exportação de produtos com alto valor agregado decorrentes da transição agropecuária brasileira.

Ademais, a nível social, o Brasil possui uma grande oportunidade no desenvolvimento de sistemas produtivos provenientes da transição agropecuária. De acordo com Fiocruz (2021), Freitas et al. (2019), Leal et al. (2017) e OECD (2021), tecnologias de produção sustentável, como orgânicos, sistemas integrados e hortas urbanas apresentam uma maior participação de profissionais do setor rural. Além disso,

esses sistemas de produção ainda possuem como premissa básica a valorização do trabalho do profissional do campo, através da valorização da mão-de-obra e da mulher, sem haver distinção entre gêneros.

Já as tecnologias de produção agropecuária que envolvem uma maior participação da mecanização e sistemas com nível tecnológico, como os sistemas de produção de carne bovina em sistemas confinados superintensivos, as fazendas verticais e as carnes sintéticas, além de necessitarem de maiores quantidades de mão-de-obra, ainda requerem um nível de escolaridade superior. Dessa forma, melhora o nível de educação tanto do perímetro urbano quanto rural, auxiliando no aumento da escolaridade da população. Além disso melhora os níveis de emprego das regiões e da renda das famílias, devido a esses empregos serem gerados para profissionais com maiores níveis de escolaridade.

Ademais, os sistemas de produção de orgânicos, sistemas integrados e hortas urbanas em geral são feitos em menor escala do que os sistemas de alta produtividade que envolvem monoculturas, que são geralmente feitos a partir de propriedades pertencentes a latifundiários. Atualmente, a produção de orgânicos é desenvolvida por pequenas propriedades rurais, e o seu estímulo auxilia na divisão da renda da produção rural e a dignificação do pequeno produtor rural.

Além disso, todos os sistemas de produção ligados a transição agropecuária geram melhores níveis de educação ambiental tanto do produtor agropecuário, quanto da população, que passa a demandar alimentos e insumos agropecuários mais sustentáveis e com baixa pegada de carbono e demais gases de efeito estufa. Logo, há o aumento do nível de conscientização da população em relação aos assuntos relacionados as questões climáticas e ambientais. Com isso, gerando oportunidades para toda a sociedade, diminuindo os impactos dela sobre o clima global e o meio ambiente, além de diminuir riscos relacionados à segurança alimentar e desigualdade entre a população brasileira.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são abordadas as considerações finais a respeito das oportunidades da transição agropecuária tanto para o modelo BLUES, quanto para o Brasil, sendo apresentado inicialmente um resumo da motivação e das contribuições observadas através do desenvolvimento desse estudo. Posteriormente, serão discutidas algumas limitações de estudo e sugestões de possíveis melhorias em trabalhos futuros.

5.1 Contribuições da implementação da transição agropecuária no modelo BLUES e para o Brasil

O trabalho realizado teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma pesquisa sobre o papel da transição agropecuária nacional rumo a sustentabilidade no contexto do combate e mitigação das mudanças climáticas. Dessa forma, utilizou-se diferentes tipos de cenários climáticos de longo prazo para a realização de uma análise quantitativa da importância da transição energética para a dimensão ambiental – mudanças climáticas – da sustentabilidade. Essa primeira análise – através da utilização do modelo BLUES – serviu como ponto inicial para a realização de uma análise mais ampla e qualitativa das barreiras e oportunidades para as demais dimensões da sustentabilidade da transição agropecuária.

Com esse intuito, o presente trabalho se utilizou das premissas da transição agropecuária, que foi descrita na seção 2, e as interpretou de forma a introduzir no modelo BLUES, um IAM nacional, os principais sistemas de produção identificados na seção 2. Dessa forma, o modelo BLUES foi atualizado de forma a possuir novos elementos do setor de AFOLU que permitiram a avaliação da sustentabilidade no setor agropecuário. Para isso, foi necessário desenvolver uma nova metodologia para modelar novas tecnologias e práticas de produção agropecuária, de novas coberturas do solo. Assim, conseguindo expressar os potenciais de produção e mitigação climáticos (CO₂ e outros GEE que não o CO₂) provenientes da transição agropecuária. Assim, foram implementados no modelo BLUES novos grupos tecnológicos de produção agropecuária, como sistemas integrados e disruptivos, que contemplam desde a produção em hortas urbanas, até produção de carnes sintéticas e criação animal através de sistemas confinados superintensivos.

O aprimoramento do modelo permitiu expandir as análises do potencial da agropecuária sustentável brasileira, sendo o modelo BLUES, atualmente o modelo do tipo IAM com a maior variedade de sistemas de produção agropecuária e com o maior número de opções de tecnologias – não apenas econômicas – de mitigação de gases não CO₂. Dessa forma, foi possível utilizar o modelo BLUES para avaliar diferentes políticas de mitigação climática e identificar toda uma nova gama de sinergias no setor agropecuários.

A respeito da transição agropecuária, é importante destacar que ela é pouco debatida tanto nacionalmente, quanto internacionalmente. A pouca literatura existente sobre o tema não propõe diretrizes sólidas e pilares bem estruturados sobre o papel da transição agropecuária rumo a sustentabilidade e os meios para o seu desenvolvimento, conforme o que já é visto e feito na transição energética. Dessa forma, o setor de AFOLU, que engloba a agropecuária, que é o setor que apresenta os maiores níveis de emissões de GEE no Brasil e é o segundo à nível mundial, ainda é visto como sendo de baixa importância globalmente para o combate a crise climática. Atualmente, muito ainda é estudado sobre o papel de tecnologias energéticas que possuem um grau de maturidade ainda baixo, potenciais de expansão ainda pequenos e custos elevados para implementação. Contudo, pouco é investido para determinar o potencial e as oportunidades para o setor agropecuário e florestal, que apresenta formas economicamente mais viáveis e grandes potenciais para remoção de CO₂ atmosférico.

Assim, percebe-se a importância do desenvolvimento desse trabalho, ao determinar pilares para a elaboração da transição agropecuária, suas principais tecnologias e medidas para implementação, seus principais desafios, barreiras e oportunidades e algumas das principais implicações políticas para o seu fortalecimento. No desenvolvimento da pesquisa, foi possível determinar como sendo os cinco pilares da transição agropecuária:

- (i) Descarbonização do setor agropecuário;
- (ii) Descentralização da produção e distribuição dos alimentos e commodities agropecuária;
- (iii) Digitalização da oferta e da demanda;
- (iv) Desenho de mercado; e,
- (v) Democratização da demanda.

Ademais, ao implementar as novas tecnologias da transição agropecuária no BLUES e atualizar todo o módulo de AFOLU do modelo, foi possível observar todo um novo perfil comportamental do modelo, com novos perfis de emissões de GEE – mais condizentes com o que acontece atualmente – e com o modelo achando novas soluções ótimas para solucionar a otimização dos cenários, tanto para o setor energético, quanto para o de AFOLU do BLUES. Devido o modelo ter novas alternativas para mitigar os GEE e para a produção dos alimentos e *commodities* agropecuárias, o BLUES passou a aumentar a penetração de medidas decorrentes da agropecuária e do setor florestal para minimizar as emissões de CO₂ e de GEE, dependendo do cenário climático. Sendo que em todos os cenários desenvolvidos, tanto os sistemas integrados, quanto a produção disruptiva ganharam destaque. Os sistemas integrados, por apresentarem altos níveis de produtividade e estocarem uma maior quantidade de carbono no solo, se comparado com as pastagens degradadas e os sistemas disruptivos, por gerarem uma menor quantidade de resíduos, diminuirão a demanda de terras agropecuárias para atingir a demanda de alimentos e culturas energéticas e mitigarem grandes quantidades de metano do setor pecuário e da rizicultura.

Além disso, o desenvolvimento de dois cenários climáticos, de 1,5°C até 2100 e NDC brasileira, foram de grande importância, visto que com a adição das tecnologias provenientes da transição agropecuária, percebeu-se que a NDC brasileira ainda é pouco ambiciosa. Ao analisar o cenário 1.5, analisou-se a possibilidade de a NDC brasileira passar a considerar uma neutralidade climática pelo menos a partir de 2045, cinco anos antes do que é proposto atualmente, sendo possível inclusive, antecipar essa neutralidade se houver maiores incentivos para a transição agropecuária. Contudo, ao se interpretar a NDC como sendo neutralidade de carbono, esse valor deveria ser atingido pelo menos entre 2035 e 2040, isso para se manter as expectativas de manutenção de aquecimento global restrito a 1,5°C até 2100.

Ademais, é importante salientar que a implementação da transição agropecuária no modelo BLUES permitiu com que nos cenários climáticos, fosse reduzida a participação de CCS e BECCS na solução ótima do modelo. No lugar dessas tecnologias do setor energético, o modelo passou a implementar tecnologias do setor agropecuário, aumentando a quantidade de áreas de produção em sistemas integrados com florestas plantadas ou nativas e florestas nativas. Isso ocorreu devido o setor agropecuário, com a adição das novas tecnologias, aumentar a sua produtividade do campo, substituir áreas de

produção rural por produção urbana – reduzindo assim os níveis de desperdício de alimentos – e reduzir pressões para a abertura de novas áreas agrícolas em detrimento de áreas de vegetação nativa.

Contudo, para atingir os potenciais que foram observados pelo modelo BLUES e tornar mais viável a implementação de sistemas produtivos que não foram escolhidos pelo modelo, é necessário que as barreiras econômicas, socioculturais, científico-tecnológicas e de mercado sejam superadas. Para isso, destacam-se a implementação de políticas públicas que por exemplo estimulem:

- O crédito ao produtor rural e urbano com baixas taxas ou à fundo perdido;
- A criação de selos e certificações de produção sustentável e de baixo carbono/GEE;
- A taxação de GEE;
- O fortalecimento da extensão rural
- O desenvolvimento de mão-de-obra qualificada; e,
- A criação de campanhas de conscientização da importância da transição agropecuária o nível de oferta e demanda.

Assim, permitindo com que o Brasil concretize a imagem do setor agropecuário nacional e ganhe novamente o protagonismo ambiental e climático que outrora já teve. Alinhando o protagonismo ambiental com o agropecuário, por meio da produção de alimentos e commodities com alto valor agregado e sustentável. Dessa forma, com o aumento da sustentabilidade do setor, há a possibilidade de reduzir ou até mesmo zerar os embargos que o setor brasileiro possui e passa a ter a oportunidade de aumentar os volumes de produção agropecuária, bem como o seu PIB. Assim, aumentando as exportações e o valor médio do produto e conseqüentemente melhorando os resultados da balança comercial brasileira e a qualidade de vida e dignidade da população brasileira.

5.2 Limitações do estudo e sugestões de desenvolvimento futuro

O estudo desenvolvido possui algumas limitações, principalmente envolvendo a sustentabilidade no mais amplo contexto. Inicialmente, devido ao trabalho ter sido

desenvolvido em um modelo do tipo IAM, não é possível desenvolver algumas análises mais detalhadas sobre alguns cobenefícios diretos da transição agropecuária, como por exemplo renda, emprego, escolaridade e potenciais conflitos por posse da terra. Ademais, não foi foco desse trabalho a avaliação dos impactos da transição agropecuária sobre a biodiversidade, água e geração de resíduos da cadeia do agronegócio. Por exemplo, de acordo com a literatura e as análises qualitativas, pode-se estimar que exista um aumento na biodiversidade local e nacional, assim como a diminuição da demanda hídrica das bacias hídricas existentes no BLUES, mas não foram feitos estudos sobre a cadeia. Também, não foi considerado os possíveis impactos do clima sobre a agropecuária, além da análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados.

O nexos uso do solo-clima-energia foi avaliado com um maior nível de detalhe, porém não foram feitas avaliações quantitativas sobre setores como economia, residências, transporte e indústria. Assim, podem existir impactos de segunda ou terceira ordem sobre os demais setores e, alterações em relação ao preço da cesta de alimentos à nível regional e nacional.

Assim, como sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros podem ser citados:

- Avaliação dos impactos da transição agropecuária sobre a biodiversidade brasileira;
- Avaliação dos impactos da transição agropecuária sobre os corpos hídricos brasileiros;
- Determinação dos impactos da transição agropecuária sobre a cesta de alimentos;
- Verificação dos impactos da transição agropecuária sobre o nexos água-energia-alimentos;
- Avaliação econômica dos resultados obtidos para verificar os possíveis impactos sobre a economia brasileira;
- Aprimorar as taxas de penetração das tecnologias disruptivas;
- Melhorar a tendência da curva de penetração de tecnologias disruptivas e sistemas integrados no modelo para determinar a propensão de o produtor brasileiro implementar essas tecnologias;

- Desenvolvimento de novos cenários climáticos para verificar novas possibilidades para a NDC brasileira, tanto a nível de emissões líquidas zero de carbono, como neutralidade climática; Aprimoramento de cenários de demanda, incluindo mudança de dietas; e,
- Desenvolvimento de cenários de referências que incluem impactos climáticos e vulnerabilidade do setor agropecuário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEROFARMS. **Corporate Vertical Farms Partnership Opportunities**. 2023. Disponível em: <https://www.aerofarms.com/corporate-farms/>. Acesso em: 10 maio 2023.

AGRIPOLIS. **Communiqué : la plus grande ferme urbaine d'Europe en toiture a réalisé sa 1e saison – Agripolis**. 2019. Disponível em: <https://agripolis.eu/non-classe/communique-la-plus-grande-ferme-urbaine-deurope-en-toiture-a-realise-sa-1e-saison/>.

AL-KODMANY, K. "The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City", **Buildings**, v. 8, n. 2, p. 24, 5 fev. 2018a. DOI: 10.3390/buildings8020024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/8/2/24/html>. Acesso em: 22 abr. 2023.

AL-KODMANY, K. "The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City", **Buildings**, v. 8, n. 2, p. 24, 5 fev. 2018b. DOI: 10.3390/buildings8020024. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2075-5309/8/2/24>.

ALBUQUERQUE, N. I. De, FREITAS, C. M. K. H. D. F., SAWAKI, H., *et al.* **Manual sobre criação de suínos na agricultura familiar: noções básicas**. [S.l: s.n.], 1998.

ALBUQUERQUE, I., ALENCAR, A., ANGELO, C., *et al.* **Análise Das Emissões Brasileiras De Gases De Efeito Estufa E Suas Implicações Para As Metas De Clima Do Brasil 1970-2019**. [S.l.], SEEG, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41893-020-0488-7><http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.04.020><http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/325723><http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.001><https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientif>.

ALENCAR, A., ZIMBRES, B., SILVA, C., *et al.* **Desafios e Oportunidades para Redução das Emissões de Metano no Brasil**. [S.l: s.n.], 2022. v. 369.

ALVES, A. A., COUTO E SILVA, E., ANGELKORTE, G. B., *et al.* "Identificação das Oportunidades e o Potencial do Impacto da Bioeconomia para a Descarbonização do Brasil", 2022. .

AMORIM, B. D. N., OLIVEIRA, P. A. V. De, TAVARES, J. M. R. "Emissão de gases na produção de suínos, nas fases de crescimento e terminação", **XLII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2013**, n. 2012, 2013. .

ANGELKORTE, G. B. **Modelagem do Setor Agropecuário Dentro de Modelo de Análise Integrada Brasileiro**. 2019. UFRJ, 2019. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publicações/mestrado/DISSERTAÇÃO_-_GERD_ANGELKORTE_Versão_FINAL.pdf.

APARECIDA DE LIMA, M., VIEIRA, R. F., JOSÉ, A., *et al.* **Emissão de metano em cultivo de arroz irrigado sob sistema pré-germinado.** , **BOLETIM DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO.**, nº 91. Jaguariúna, [s.n.], 2021. Disponível em: www.embrapa.br/fale-conosco/sac. Acesso em: 22 fev. 2023.

ARAÚJO, S. O., PERES, R. S., BARATA, J., *et al.* "Characterising the Agriculture 4.0 Landscape—Emerging Trends, Challenges and Opportunities", **Agronomy**, v. 11, n. 4, p. 667, 1 abr. 2021. DOI: 10.3390/agronomy11040667. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/4/667>.

ARRUDA, J. **AGRICULTURA URBANA E PERI-URBANA EM CAMPINAS/ SP: análise do Programa de Hortas Comunitárias como subsídio para políticas públicas**. 2016. 165 f. Universidade Estadual de Campinas, 2016.

AVGOUSTAKI, D. D., XYDIS, G., "How energy innovation in indoor vertical farming can improve food security, sustainability, and food safety?". **Advances in Food Security and Sustainability**, [S.l.], Elsevier Ltd, 2020. v. 5. p. 1–51. DOI: 10.1016/bs.af2s.2020.08.002. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452263520300021>. Acesso em: 22 mar. 2023.

AZEVEDO, T., ROSA, M. R., SHIMBO, J. Z., *et al.* "RAD 2021: Relatório Anual do Desmatamento no Brasil 2021", **Mapbiomas**, p. 126, 2022. Disponível em: <http://alerta.mapbiomas.org>.

BAKER, B. P., GREEN, T. A., LOKER, A. J. "Biological control and integrated pest management in organic and conventional systems", **Biological Control**, v. 140, p. 104095, 1 jan. 2020. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2019.104095. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1049964419301586>. Acesso em: 9 maio 2023.

BANERJEE, C., ADENAEUER, L. "Up, Up and Away! The Economics of Vertical Farming", **Journal of Agricultural Studies**, v. 2, n. 1, p. 40, 9 jan. 2014. DOI: 10.5296/jas.v2i1.4526. Disponível em: <http://www.macrothink.org/journal/index.php/jas/article/view/4526>.

BAPTISTA, L. B. C. da S. **Aprimoramento do modelo de análise integrada BLUES e estudo de caso para os Shared Socioeconomic Pathways**. 2020. 141 f. UFRJ, 2020.

BARBEDO, J. G. A. **Estado da arte da classificação automática de áreas agrícolas usando imagens de sensoriamento remoto**. Campinas, Embrapa, 2018.

BATISTA, E., SOARES-FILHO, B., BARBOSA, F., *et al.* "Large-scale pasture restoration may not be the best option to reduce greenhouse gas emissions in Brazil", **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 12, p. 125009, 1 dez. 2019. DOI: 10.1088/1748-9326/ab5139. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab5139>.

BATISTELLI, I. J. C., BATISTELLI, J. C. de O. R., BESS, B. L., *et al.* "Recria intensiva em confinamento como estratégia de manejo em bovinos de corte - revisão de literatura", **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, p. e1611225179, 17 jan. 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i2.25179. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/25179>.

BEGUM, M. S., BALA, S. K., ISLAM, A. K. M. S., *et al.* "Environmental and Social Dynamics of Urban Rooftop Agriculture (URTA) and Their Impacts on Microclimate Change", **Sustainability**, v. 13, n. 16, p. 9053, 12 ago. 2021. DOI: 10.3390/su13169053. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/16/9053>.

BELLO, A., LYRO, B., PAIVA, G., *et al.* **Neutralidade de carbono até 2050: Cenários para uma transição eficiente no Brasil**. [S.l: s.n.], 2023. Disponível em: www.cebri.org.

BENIS, K., REINHART, C., FERRÃO, P. "Development of a simulation-based

decision support workflow for the implementation of Building-Integrated Agriculture (BIA) in urban contexts", **Journal of Cleaner Production**, v. 147, p. 589–602, mar. 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.01.130. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617301452>.

BENIS, K., TURAN, I., REINHART, C., *et al.* "Putting rooftops to use – A Cost-Benefit Analysis of food production vs. energy generation under Mediterranean climates", **Cities**, v. 78, n. February, p. 166–179, ago. 2018. DOI: 10.1016/j.cities.2018.02.011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.02.011>.

BERNDT, A., SOLÓRZANO, L. A. R., SAKAMOTO, L. S. "PECUÁRIA DE CORTE FRENTE À EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E ESTRATÉGIAS DIRETAS E INDIRETAS PARA MITIGAR A EMISSÃO DE METANO". 2013. **Anais [...]** [S.l: s.n.], 2013. p. 3–19.

BETTER MEAT. **The Better Meat Co. - Mycoprotein Ingredients for Better Meats**. 2023. Disponível em: <https://www.bettermeat.co/>. Acesso em: 15 maio 2023.

BLAKENEY, M. "Agricultural Innovation and Sustainable Development", **Sustainability**, v. 14, n. 5, p. 2698, 25 fev. 2022. DOI: 10.3390/su14052698. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/5/2698/htm>. Acesso em: 28 maio 2023.

BOLFE, E. L., BARBEDO, J. G. A., MASSRUHÁ, S. M. F. S., *et al.*, "Desafios, tendências e oportunidades em agricultura digital no Brasil". **Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas.**, Brasília, Embrapa, 2020. p. 380–406. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1126283>.

BOLFE, É. L., MASSRUHÁ, S. M. F. S. "A transformação digital e a sustentabilidade agrícola", **AgroANALYSIS**, v. 40, n. 3, p. 32–34, 2020. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/agroanalysis/article/view/86288>.

BOMBARDI, L. M. **Geografia do Uso de Agrotóxicos no Brasil e Conexões com a União Europeia**. São Paulo, FFLCH USP, 2017. v. 1. Disponível em: https://ecotoxbrasil.org.br/upload/587ed92192e9dbe77bddffd31cbe25a7-e-book_atlas_agrot_axico_2017_larissa_bombardi.pdf.

BOMKAMP, C., CARTER, M., COHEN, M., *et al.* **2022 State of the Industry Report - Cultivated meat and seafood.** . [S.l: s.n.], 2023. Disponível em: <https://gfi.org/wp-content/uploads/2023/01/2022-Cultivated-Meat-State-of-the-Industry-Report-1-1.pdf>. Acesso em: 15 maio 2023.

BORBA, B. S. M. C. **Modelagem integrada da introdução de veículos leves conectáveis à rede elétrica no sistema energético brasileiro.** 2012. 1–179 f. UFRJ, 2012. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publicações/doutorado/Bruno_Soares_Moreira_Cesar_Borba.pdf.

BRAGANÇA, A., NEWTON, P., COHN, A., *et al.* "Extension services can promote pasture restoration: Evidence from Brazil's low carbon agriculture plan.", **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 119, n. 12, p. e2114913119, 22 mar. 2022. DOI: 10.1073/pnas.2114913119. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/35298338>. Acesso em: 23 abr. 2023.

BRASIL, MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. e A. **AGROSTAT - Estatísticas de Comércio Exterior do Agronegócio Brasileiro - MAPA Indicadores.** 2023. Disponível em: <https://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>. Acesso em: 20 fev. 2023.

BRASIL, MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. e A. **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030) : visão estratégica para um novo ciclo.** Brasília, MAPA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/abc-portugues.pdf>. Acesso em: 19 maio 2023.

BRASIL, MCTI - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, I. e C., ONU, M. A. **Modelagem setorial de opções de baixo carbono para agricultura, florestas e outros usos do solo (AFOLU).** Brasília, MCTI, 2017.

BRASIL, MDIC - MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, C. e S. **Resultados da Balança Comercial Brasileira de 2022.** . Brasília, [s.n.], 2 jan. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/economia/pt->

br/assuntos/noticias/2023/janeiro/Balanca2022.pdf. Acesso em: 7 abr. 2023.

BRASIL, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. e A. **Coletânea de Fatores de Emissão e Remoção de Gases de Efeito Estufa da Pecuária Brasileira**. Brasília, MAPA/SENAR, 2020a. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/fatores-nacionais-para-emissao-e-remocao-de-gases-de-efeito-estufa-na-agropecuaria-estao-em-coletanea-inedita-do-mapa/coletanea_PECUARIA.pdf.

BRASIL, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. e A. **Coletânea dos Fatores de Emissão e Remoção de Gases de Efeito Estufa da Agricultura Brasileira**. Brasília, MAPA/SENAR, 2020b.

BRASIL, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. e A. **Suinocultura de baixa emissão de carbono: tecnologias de produção mais limpa e aproveitamento econômico dos resíduos da produção de suínos**. Ministério ed. Brasília, MAPA, 2016.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. e A. **Potencialidades e desafios do agro 4.0: GT III “Cadeias Produtivas e Desenvolvimento de Fornecedores” Câmara do Agro 4.0 (MAPA/MCTI)**. Brasília, Mapa, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/agricultura-digital/GT3VERSAOABNT.pdf>.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. e A. **Sustentabilidade - ABC+**. 2022. Sustentabilidade. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/plano-safra/2022-2023/sustentabilidade>. Acesso em: 20 maio 2023.

BRASIL. **Auditoria Operacional no Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (Proagro) e no Zoneamento Agrícola do Risco Climático (ZARC)**. . Brasília, [s.n.]. Disponível em: <https://portal.tcu.gov.br/biblioteca-digital/auditoria-operacional-no-programa-de-garantia-da-atividade-agropecuaria-proagro-e-no-zoneamentoagricola-do-risco-climatico-zarc.htm>. Acesso em: 19 set. 2022. , 2014

BRASIL, M. **Report on the technology needs assessment for the implementation of climate action plans in Brazil: mitigation**. . Brasília, [s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti>. Acesso em: 9 maio 2023.

BRASIL, M. da S. **Relatório: Missão Yanomami**. [S.l: s.n.], 2023.

BRUNES, L. C., COUTO, V. R. M. "Balanço de gases de Efeito estufa em sistemas de produção de bovinos de corte", **Archivos de Zootecnia**, v. 66, n. 254, p. 287–299, 2017. DOI: 10.21071/az.v66i254.2334. .

BRUNES, Ludmilla Costa. **BALANÇO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE BOVINOS DE CORTE**. 2014. 51 f. Universidade Federal de Goiás, 2014.

BURLINGAME, B., CLAPP, J., SOLH, M. El, *et al.* "Impacts of COVID-19 on food security and nutrition: developing effective policy responses to address the hunger and malnutrition pandemic", **HLPE issues paper**, v. 3, 2021. DOI: 10.4060/cb1000en. Disponível em: www.fao.org/cfs/cfs-hlpe. Acesso em: 25 jul. 2023.

BYERLEE, D., STEVENSON, J., VILLORIA, N. "Does intensification slow crop land expansion or encourage deforestation?", **Global Food Security**, v. 3, n. 2, p. 92–98, 1 jul. 2014. DOI: 10.1016/j.gfs.2014.04.001. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221191241400011X>. Acesso em: 22 mar. 2023.

CAIRNS, R. **This Hong Kong farm is using fish and blue lights to grow basil the size of your face | CNN Business**. 2022. CNN Business. Disponível em: <https://edition.cnn.com/2022/07/19/business/farm66-hong-kong-aquaponics-scen-hnk-spc-intl/index.html>. Acesso em: 10 maio 2023.

CAPPER, J. L. "Is the Grass Always Greener? Comparing the Environmental Impact of Conventional, Natural and Grass-Fed Beef Production Systems", **Animals**, v. 2, n. 2, p. 127–143, 10 abr. 2012. DOI: 10.3390/ani2020127. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-2615/2/2/127/htm>. Acesso em: 22 abr. 2023.

CARDOSO, A. S., BERNDT, A., LEYTEM, A., *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, mar. 2016. DOI: 10.1016/j.agsy.2015.12.007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2015.12.007>.

CARTER, M., COHEN, M., EASTHAM, L., *et al.* **2022 State of the Industry**

Report - Fermentation: Meat, seafood, eggs, and dairy. . [S.l: s.n.], 2023. Disponível em: <https://gfi.org/wp-content/uploads/2023/01/2022-Fermentation-State-of-the-Industry-Report-2.pdf>.

CASTRO, N. de, ALVES, A., CASTRO, B., *et al.* "A Transição Energética na lógica da Descarbonização: do carvão para o gás natural", **Agência CanalEnergia**, 2019.

CEZAR, I. M., QUEIROZ, H. P., S. THIAGO, L. R. L. de, *et al.* **No Sistemas de Produção de Gado de Corte no Brasil: Uma Descrição com ênfase no Regime Alimentar e no Abate.** [S.l: s.n.], 2005.

CLERCQ, M. de, VATS, A., BIERL, A. **Agriculture 4.0: The future of farmin technology.** **WORLD GOVERNMENT SUMMIT.** [S.l: s.n.], 2018.

CLIMATE WATCH. **Greenhouse Gas (GHG) Emissions. GHG Emissions.** Washington, [s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>. Acesso em: 20 fev. 2023.

COHEN, M., IGNASZEWSKI, E., MURRAY, S., *et al.* **2021 State of the Industry Report - Cultivated meat and seafood.** **GFI - Good Food Institute.** [S.l: s.n.], 2022. Disponível em: <https://gfi.org/wp-content/uploads/2022/04/2021-Cultivated-Meat-State-of-the-Industry-Report-1.pdf>.

COMMISSION, E. **European Forum for a Comprehensive Vision on Urban Agriculture | EFUA Project.** . [S.l: s.n.], 2022. Disponível em: <https://cordis.europa.eu/project/id/101000681>.

COMPRES RURAL. **Gigante usa luz artificial em bovinos confinados.** 2022. Compre Rural. Disponível em: <https://www.comprerural.com/maior-grupo-de-confinamento-testa-luz-artificial-em-bovinos/>. Acesso em: 12 maio 2023.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos - 5º levantamento safra 2022/23.** Brasília, [s.n.], 2023a. v. 9. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/>.

CONAB. **Conab - Séries Históricas das Safras.** [S.l: s.n.], 2023b. Disponível

em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 22 fev. 2023.

CONAB. **Oferta e demanda de carnes**. fev. 2023c. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuário-e-extrativista/analises-do-mercado/oferta-e-demanda-de-carnes>. Acesso em: 20 fev. 2023.

CONAB. **Portal de Informações Agropecuária**. 2023d. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/download-arquivos.html>. Acesso em: 22 maio 2023.

CORDEIRO, L. A. M., VILELA, L., KLUTHCOUSKI, J., *et al.* "Integração lavoura-pecuária-floresta : o produtor pergunta, a Embrapa responde", **Embrapa**, v. 1^a Edição, p. 393, 2015. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1019632>. Acesso em: 16 set. 2022.

COSTA, W., SOARES-FILHO, B., NOBREGA, R. "Can the Brazilian National Logistics Plan Induce Port Competitiveness by Reshaping the Port Service Areas?", **Sustainability** **2022**, Vol. **14**, Page **14567**, v. 14, n. 21, p. 14567, 5 nov. 2022. DOI: 10.3390/SU142114567. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/21/14567/htm>. Acesso em: 17 abr. 2023.

CSORTAN, G., WARD, J., ROETMAN, P. "Productivity, resource efficiency and financial savings: An investigation of the current capabilities and potential of South Australian home food gardens", **PLOS ONE**, v. 15, n. 4, p. e0230232, 14 abr. 2020. DOI: 10.1371/journal.pone.0230232. Disponível em: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0230232>.

CSR/UFMG. **Dinamica EGO**. 2023a. Disponível em: <https://csr.ufmg.br/dinamica/>. Acesso em: 23 abr. 2023.

CSR/UFMG. **Otimizagro**. 2023b. Disponível em: <https://csr.ufmg.br/otimizagro/>. Acesso em: 23 abr. 2023.

CUNHA, Bruno S L, GARAFFA, R., GURGEL, A. C. **TEA Model Documentation**, 1., nº 520. São Paulo, [s.n.], 2020. Disponível em: www.fgv.br. Acesso em: 21 abr. 2023.

CUNHA, Bruno Scola Lopes. **DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO GLOBAL DE EQUILÍBRIO GERAL COMPUTÁVEL PARA AVALIAÇÃO DE POLÍTICAS CLIMÁTICAS: O PAPEL DA MUDANÇA DE DIETA**. 2019. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

CUNHA, M. A. da, CARDOSO, R. de C. V. "Hortas urbanas na promoção da Segurança Alimentar e Nutricional e desenvolvimento sustentável em Salvador, Brasil", **Ambiente & Sociedade**, v. 25, 2022. DOI: 10.1590/1809-4422asoc20210094r3vu202214ao. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc20210094r3vu2022L4AO>. Acesso em: 23 abr. 2023.

CUNNINGHAM, S. A., ATTWOOD, S. J., BAWA, K. S., *et al.* "To close the yield-gap while saving biodiversity will require multiple locally relevant strategies", **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 173, p. 20–27, 1 jul. 2013. DOI: 10.1016/j.agee.2013.04.007. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167880913001175>. Acesso em: 22 mar. 2023.

DA COSTA, B. M., SAKURAI, T. "A participação comunitária em projetos de soluções baseadas na natureza na cidade de São Paulo: estudo das hortas urbanas, Horta da Dona Sebastiana, Agrofavela-Refazenda e Horta Popular Criando Esperança", **Revista LABVERDE**, v. 11, n. 1, p. 171–195, 14 dez. 2021. DOI: 10.11606/issn.2179-2275.labverde.2021.188679. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revistalabverde/article/view/188679>.

DA SILVA, M. I. M. **Nexo entre Poluição Atmosférica de Impacto Local e Mudanças Climáticas Globais em um Modelo de Avaliação Integrada para o Brasil**. 2020. UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 2020.

DAGHER, R., WALDECK, G. **Global Vertical Farming Market**. . [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: https://jahaniandassociates.com/wp-content/uploads/2022/07/20220719_Report_Global-Vertical-Farming-Market_JA.pdf. Acesso em: 10 maio 2023.

DALMAGO, G. A. **Sustentabilidade: reflexões sobre uso do termo e evolução de conceitos**. Documentos 193 ed. Passo Fundo, Embrapa Trigo, 2021. v. 1. Disponível

em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1131564/sustentabilidade-reflexoes-sobre-uso-do-termo-e-evolucao-de-conceitos>. Acesso em: 31 jul. 2023.

DANIEL, P. "Contribution of Vertical Farms to Increase the Overall Energy Efficiency of Urban Agglomerations", **Journal of Power and Energy Engineering**, v. 02, n. 04, p. 82–85, 2014. DOI: 10.4236/jpee.2014.24013. Disponível em: <http://www.scirp.org/journal/jpee><http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2014.24013><http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2014.24013>. Acesso em: 22 mar. 2023.

DE GOES, R. H. T. B., DA SILVA, L. H. X., DE SOUZA, K. A. "Alimentos e Alimentação Animal", p. 1–23, 2013. .

DE LEO, J. **The Best Plant-Based Burger (Impossible vs. Beyond and More)**. 2020. Epicurious. Disponível em: <https://www.epicurious.com/ingredients/best-meatless-burger-beyond-impossible-taste-test-plant-based-burger-article>. Acesso em: 12 maio 2023.

DE LUCENA, A. F. P., SCHAEFFER, R., SZKLO, A. S. "Least-cost adaptation options for global climate change impacts on the Brazilian electric power system", **Global Environmental Change**, v. 20, n. 2, p. 342–350, maio 2010. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2010.01.004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.01.004>.

DE MIRANDA, E. E., MAGALHÃES, L. A., DE CARVALHO, C. A. **Proposta de Delimitação Territorial do MATOPIBA**. . Campinas, [s.n.], 2014. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/139202/1/NT1-DelimitacaoMatopiba.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2023.

DE OLIVEIRA, C. C. N., ANGELKORTE, G., ROCHEDO, P. R. R., *et al.* "The role of biomaterials for the energy transition from the lens of a national integrated assessment model", **Climatic Change**, v. 167, n. 3–4, 2021. DOI: 10.1007/s10584-021-03201-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03201-1>.

DE SIMONE, M., PRADHAN, P., KROPP, J. P., *et al.* "A large share of Berlin's vegetable consumption can be produced within the city", **Sustainable Cities and Society**, v. 91, n. December 2022, p. 104362, abr. 2023. DOI: 10.1016/j.scs.2022.104362.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104362>.

DE SOUSA, N. W. L. **Povos Yanomami sob Ataque: Violência do Garimpo Ilegal e os Estímulos de uma Colonialidade Estatal**. 2022. UFP, João Pessoa - Paraíba, 2022.

DE SOUZA, E. **Governo privilegia, em crédito rural, sistemas de pecuária intensiva**. 2015. Revista Globo Rural. Disponível em: <https://globorural.globo.com/Noticias/Criacao/Boi/noticia/2015/08/governo-privilegia-em-credito-rural-sistemas-de-pecuaria-intensiva.html>. Acesso em: 12 maio 2023.

DELGADO, F., CUNHA, P. C. **Matriz Energetica Brasileira No Futuro: O Que Nos Espera Em 2050? O Desafio É a Entrega Das Transformações**. . Rio de Janeiro, [s.n.], 2020.

DESIRÉE LOPES, LOWERY, S., PEROBA, T. L. C. "Crédito rural no Brasil: desafios e oportunidades para a promoção da agropecuária sustentável", **Revista do BNDES**, p. 155–196, jun. 2016. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/9518/1/5- Crédito rural no Brasil desafios e oportunidades para a promoção da agropecuária sustentável.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/9518/1/5-Crédito_rural_no_Brasil_desafios_e_oportunidades_para_a_promoção_da_agropecuária_sustentável.pdf).

DESPOMMIER, D. "Farming up the city: The rise of urban vertical farms", **Trends in Biotechnology**, v. 31, n. 7, p. 388–389, 2013. DOI: 10.1016/j.tibtech.2013.03.008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.008>.

DESPOMMIER, D. "The vertical farm: controlled environment agriculture carried out in tall buildings would create greater food safety and security for large urban populations", **Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit**, v. 6, n. 2, p. 233–236, 3 jun. 2011. DOI: 10.1007/s00003-010-0654-3. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00003-010-0654-3>.

DEWAN, P. **Carne sem animais: O potencial do laboratório de carne e da substituição de carne**. 2023. ClimateScience. Disponível em: <https://climatescience.org/ptBR/advanced-food-lab-meat-plant-based>. Acesso em: 12 maio 2023.

DIAS, A. C., CARRARO, B. Z., DALLANORA, D., *et al.* "Manual brasileiro de boas práticas agropecuárias na produção de suínos", **Concordia: Embrapa Suínos e Aves**, p. 140, 2011. .

DINIZ, T., FERREIRA-FILHO, J. B. "Impactos Econômicos do Código Florestal Brasileiro: uma discussão à luz de um modelo computável de equilíbrio geral", **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 53, n. 2, p. 229–250, jun. 2015. DOI: 10.1590/1234-56781806-9479005302003. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-20032015000200229&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 23 abr. 2023.

DIUANA, F. A. **A NEW SPATIALLY EXPLICIT METHODOLOGY FOR INPUTTING LAND USE DATA INTO BLUESix – AN IMPROVED INTEGRATED ASSESSMENT MODEL FOR BRAZIL BASED ON THE ORIGINAL BLUES MODEL**. 2022. 222 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2022.

DO NASCIMENTO, F. A. F., DIAS, A. N., FIGUEIREDO FILHO, A., *et al.* "A system for Pinus taeda growth and yield in the north of Santa Catarina", **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 235–242, 2015. DOI: 10.1590/01047760201521021494. .

DO NASCIMENTO, S. N. **Agricultura Urbana e sua Influência na Sociedade: Alimentação, Saúde e Fonte de Renda**. 2018a. Fundação Oswaldo Cruz - FIOCRUZ, Rio de Janeiro, 2018.

DO NASCIMENTO, S. N. **AGRICULTURA URBANA E SUA INFLUÊNCIA NA SOCIEDADE: ALIMENTAÇÃO, SAÚDE E FONTE DE RENDA**. 2018b. 45 f. FIOCRUZ, 2018.

DORAN, P. T., ZIMMERMAN, M. K. "Examining the Scientific Consensus on Climate Change", **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 90, n. 3, p. 22, 20 jan. 2009. DOI: 10.1029/2009EO030002. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2009EO030002>. Acesso em: 22 maio 2023.

E+ TRANSIÇÃO ENERGÉTICA. **Vídeo Infográficos E+ | Transição Energética Brasileira**. 2022. Disponível em: <https://emaisenergia.org/video/video->

infograficos-e-transicao-energetica-brasileira/. Acesso em: 22 abr. 2023.

EASTWOOD, C. R., EDWARDS, J. P., TURNER, J. A. "Review: Anticipating alternative trajectories for responsible Agriculture 4.0 innovation in livestock systems", **Animal**, v. 15, p. 100296, 1 dez. 2021. DOI: 10.1016/j.animal.2021.100296. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751731121001397>. Acesso em: 18 maio 2023.

ELKINGTON, J. "Cannibals With Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business", **Journal of Business Ethics** 2000 23:2, v. 23, n. 2, p. 229–231, 2000. DOI: 10.1023/A:1006129603978. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/a:1006129603978>. Acesso em: 31 jul. 2023.

EMBRAPA. **Food loss and food waste**. 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/tema-perdas-e-desperdicio-de-alimentos/sobre-o-tema>. Acesso em: 19 maio 2023.

EMBRAPA. **Pesquisa mostra o retrato da agricultura digital brasileira**. 2020. Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/54770717/pesquisa-mostra-o-retrato-da-agricultura-digital-brasileira>. Acesso em: 18 maio 2023.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. "PNE 2050: Plano Nacional de Energia", p. 231, 2020. Disponível em: http://www.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=71e6850d-e7f9-4962-331e-2316b93c0480&groupId=36208.

ESTREMOTE, M. **PRODUÇÃO E EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA DE BOVINOS ALIMENTADOS COM TEORES DE CONCENTRADO**. 2016. 76 f. Universidade Estadual Paulista, 2016.

EUROPEAN UNION. **EU Achievements in Food and Nutrition Security and Sustainable Agriculture 2014-2018 International Cooperation and Development**. Brussels, European Union, 2019. Disponível em: https://international-partnerships.ec.europa.eu/system/files/2020-01/p3293-euachievements-brochure-web_en.pdf. Acesso em: 28 maio 2023.

F. G. ASSIS, L. F., FERREIRA, K. R., VINHAS, L., *et al.* "TerraBrasilis: A Spatial Data Analytics Infrastructure for Large-Scale Thematic Mapping", **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 11, p. 513, 12 nov. 2019. DOI: 10.3390/ijgi8110513. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2220-9964/8/11/513>. Acesso em: 20 abr. 2023.

FAIRR. **Appetite for disruption: The last serving.** . [S.l: s.n.], 2021. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC91013>.

FAO. **Climate Change and Food Security: Risks and Responses.** Rome, FAO, 2016. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i5188e.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2023.

FAO. **Dashboard-old | Global Livestock Environmental Assessment Model (GLEAM) | Food and Agriculture Organization of the United Nations.** 2022a. Disponível em: <https://www.fao.org/gleam/dashboard-old/en/>. Acesso em: 21 abr. 2023.

FAO. **FAO Food Price Index | World Food Situation | Food and Agriculture Organization of the United Nations.** 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/worldfoodsituation/foodpricesindex>. Acesso em: 21 abr. 2023.

FAO. **Food Balances 2010-2019: Global, regional and country trends.** (FAO, Org.), Series No. 40. Rome, FAO, 2022b. Disponível em: https://fenixservices.fao.org/faostat/static/documents/FBS/New_FBS_methodology.pdf. Acesso em: 6 abr. 2023.

FAO. **Food Wastage Footprint: Fool cost-accounting.** [S.l: s.n.], 2014. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjYgbWn0pDKAhWHCI4KHUlyCEUQFggoMAE&url=http://www.fao.org/3/a-i3991e.pdf&usg=AFQjCNH7yX7VQI_OF8sfkIIR3yUbjJG06w&sig2=uKA9X-6f2YpJF4i-ZgmBcw&bvm=bv.110151844,d.c2E.

FAO. **Global food losses and food waste.** . [S.l: s.n.], 2011.

FAO. **The future of food and agriculture and challenges.** Rome, FAO, 2017a. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2023.

FAO. **Water for Sustainable Food and Agriculture**. . [S.l.: s.n.], 2017b.

FAO. **Water quality for agriculture**. 2019.

FAO. **World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2021**. [S.l.], FAO, 2021.

FAO, IFAD, UNICEF, *et al.* **The State of Food Security and Nutrition In The World 2018. Building Climate Resilience for Food Security and Nutrition**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: www.fao.org/publications.

FAO, IFAD, UNICEF, *et al.* **The State of Food Security and Nutrition in the World 2022. Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable**. Rome, FAO, 2022. Disponível em: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/cc0639en>.

FARDET, A., "Characterization of the Degree of Food Processing in Relation With Its Health Potential and Effects". **Advances in Food and Nutrition Research**, [S.l.], Academic Press, 2018. v. 85. p. 79–129. DOI: 10.1016/bs.afnr.2018.02.002. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S104345261830007X>. Acesso em: 18 jul. 2023.

FEDDERN, V., ESTEVES, P. A., SANDI, A. J., *et al.* "Biocarnes: Uma Solução de Futuro?", **Setor Agro&Negócios**, p. 38–42, 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1125672/1/final9229.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2023.

FEIL, A. A., CYRNE, C. C. da S., SINDELAR, F. C. W., *et al.* "Profiles of sustainable food consumption: Consumer behavior toward organic food in southern region of Brazil", **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120690, 10 jun. 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120690. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965262030737X>. Acesso em: 9 maio 2023.

FELLOWS, M., COELHO, M. E., SILVESTRINI, R., *et al.* **Isolados por um fio - Riscos impostos aos povos indígenas isolados: Nota técnica No. 10**. , nº 10. Brasília-DF, [s.n.], 2023. Disponível em: <https://ipam.org.br/bibliotecas/isolados-por-um-fi-o>

riscos-impostos-aos--povos-indigenas-isolados.

FELLOWS, Martha, ALENCARA, A., BANDEIRAA, M., *et al.* **Amazônia em Chamas - Desmatamento e fogo em terras indígenas: nota técnica nº 6**. Brasília-DF, [s.n.], 2021. Disponível em: <https://ipam.org.br/bibliotecas/amazonia-em--chamas-6-desmatamento-e-fogo-nas-terras-indigenas-da-amazonia>.

FELTRAN-BARBIERI, R., FÉRES, J. G. "Degraded pastures in Brazil: improving livestock production and forest restoration", **Royal Society Open Science**, v. 8, n. 7, p. 201854, 7 jul. 2021. DOI: 10.1098/rsos.201854. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsos.201854>. Acesso em: 23 fev. 2023.

FINEP. **MCTI, MAPA e Finep assinam Acordo de Cooperação para apoio a projetos de inovação no setor agropecuário**. 2021. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/noticias/todas-noticias/6326-mcti-mapa-e-finep-assinam-acordo-de-cooperacao-para-apoio-a-projetos-de-inovacao-no-setor-agropecuario>.

FINEP. "Plano Anual de Investimento 2022: Recursos Não Reembolsáveis". 2022. **Anais** [...] [S.l: s.n.], 2022. p. 14. Disponível em: http://www.finep.gov.br/images/a-finep/FNDCT/2022/18_04_2022_Plano_Anual_de_Investimento_Nao_Reembolsavel_2022_-_Resumo_Executivo.pdf.

FIOCRUZ. **Agricultura urbana está em expansão no Rio de Janeiro e tem protagonismo de mulheres**. 2021.

FISCHER, J., DYBALL, R., FAZEY, I., *et al.* "Human behavior and sustainability", **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 10, n. 3, p. 153–160, 27 abr. 2012. DOI: 10.1890/110079. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/110079>. Acesso em: 31 jul. 2023.

FISCHER, J., MANNING, A. D., STEFFEN, W., *et al.* "Mind the sustainability gap", **Trends in Ecology & Evolution**, v. 22, n. 12, p. 621–624, 1 dez. 2007. DOI: 10.1016/j.tree.2007.08.016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169534707002820>. Acesso em: 31 jul. 2023.

FLINT, R. W., DANNER, M. J. E. "The nexus of sustainability & social equity: Virginia's Eastern Shore (USA) as a local example of global issues", **International Journal of Economic Development**, v. 3, n. 2, 1 abr. 2001. Disponível em: <https://go.gale.com/ps/i.do?p=AONE&sw=w&issn=15239748&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA176368828&sid=googleScholar&linkaccess=fulltext>. Acesso em: 31 jul. 2023.

FORDE, C. G., DECKER, E. A. "The Importance of Food Processing and Eating Behavior in Promoting Healthy and Sustainable Diets", **Annual Review of Nutrition**, v. 42, n. 1, p. 377–399, 22 ago. 2022. DOI: 10.1146/annurev-nutr-062220-030123. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-062220->. Acesso em: 18 jul. 2023.

FRANCHINI, J. C., BALBINOT JUNIOR, A. A., DEBIASI, H. **Produção de grãos, pastagem e madeira em sistema ILPF no norte do Paraná. Documentos, n. 407**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1103604/producao-de-graos-pastagem-e-madeira-em-sistema-ilpf-no-norte-do-parana>. Acesso em: 19 set. 2022.

FROTA, M. N. L. da. **Emissão de metano entérico e parâmetros comportamentais de bovinos tropicais em sistema silvipastoril**. 2017. 1–78 f. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/22449>. Acesso em: 1 ago. 2023.

FRUTA FEIA. **Fruta Feia - O projeto**. 2023. Disponível em: <https://frutafeia.pt/pt/projecto>. Acesso em: 29 maio 2023.

FUCHS, R., BROWN, C., ROUNSEVELL, M. "Europe's Green Deal offshores environmental damage to other nations", **Nature**, v. 586, n. 7831, p. 671–673, 2020. DOI: 10.1038/d41586-020-02991-1. .

FUJIMORI, S., HASEGAWA, T., ROGELJ, J., *et al.* "Inclusive climate change mitigation and food security policy under 1.5 °C climate goal", **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 7, p. 074033, 1 jul. 2018. DOI: 10.1088/1748-9326/aad0f7. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aad0f7>. Acesso em: 9 maio 2023.

FUJIMORI, S., WU, W., DOELMAN, J., *et al.* "Land-based climate change mitigation measures can affect agricultural markets and food security", **Nature Food**, v.

3, n. 2, p. 110–121, 24 fev. 2022. DOI: 10.1038/s43016-022-00464-4. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43016-022-00464-4>. Acesso em: 9 maio 2023.

GARNETT, T., APPLEBY, M. C., BALMFORD, A., *et al.* "Sustainable Intensification in Agriculture: Premises and Policies", **Science**, v. 341, n. 6141, p. 33–34, 5 jul. 2013. DOI: 10.1126/science.1234485. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1234485>. Acesso em: 22 mar. 2023.

GFI. **Defining alternative protein**. 2023. Good Food Institute. Disponível em: <https://gfi.org/defining-alternative-protein/>. Acesso em: 12 maio 2023.

GFI. **State of the Industry Report | Cultivated Meat and seafood**. [S.l.], GFI, 2022a.

GFI. **State of the Industry Report | Plant-Based Meat, Seafood, Eggs, and Dairy**. [S.l.: s.n.], 2022b. v. 3. Disponível em: <https://gfi.org/wp-content/uploads/2021/04/COR-SOTIR-Fermentation-2021-10-01-1.pdf>.

GORDILLO, G., JERÓNIMO, O. M. "Food security and sovereignty", **FAO**, p. 41, 2013. Disponível em: <https://www.fao.org/3/ax736e/ax736e.pdf>.

GOUDIE, A. **Human impact on the natural environment: past, present and future**. [S.l.], Wiley, 2018. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/Human+Impact+on+the+Natural+Environment%2C+8th+Edition-p-9781119403555>. Acesso em: 22 mar. 2023.

GREENPEACE. **EU-Mercosur: A nightmare for nature**. [S.l.: s.n.], 2023.

GREGIO, F., FARIA, G. **Área com sistemas lavoura-pecuária em Mato Grosso ultrapassa 2,6 milhões de hectares**. 2022. Portal Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/67714776/area-com-sistemas-lavoura-pecuaria-em-mato-grosso-ultrapassa-26-milhoes-de-hectares>. Acesso em: 10 maio 2023.

HADDAD, E. A., DOMINGUES, E. P. "EFES - Um modelo aplicado de equilíbrio geral para a economia brasileira: projeções setoriais para 1999-2004", **Estudos Econômicos**, v. 31, n. 1, p. 89–125, 2001. .

HADI, J., BRIGHTWELL, G. "Safety of Alternative Proteins: Technological, Environmental and Regulatory Aspects of Cultured Meat, Plant-Based Meat, Insect Protein and Single-Cell Protein", **Foods**, v. 10, n. 6, p. 1226, 28 maio 2021. DOI: 10.3390/foods10061226. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/10/6/1226/htm>. Acesso em: 18 jul. 2023.

HANSMANN, R., BAUR, I., BINDER, C. R. "Increasing organic food consumption: An integrating model of drivers and barriers", **Journal of Cleaner Production**, v. 275, p. 123058, 1 dez. 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123058. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620331036>. Acesso em: 22 mar. 2023.

HARFUCH, L. **Economic and environmental impacts of PPCerrado policy using the Brazilian Land Use Model – BLUM.**, n° 201235. [S.l.], Latin American and Caribbean Environmental Economics Program, 2012. Disponível em: <https://ideas.repec.org/p/lae/wpaper/201235.html>. Acesso em: 23 jan. 2023.

HARMSSEN, J. H.M., VAN VUUREN, D. P., NAYAK, D. R., *et al.* "Long-term marginal abatement cost curves of non-CO2 greenhouse gases", **Environmental Science and Policy**, v. 99, n. August 2018, p. 136–149, 2019. DOI: 10.1016/j.envsci.2019.05.013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.05.013>.

HARMSSEN, Jan Hartger Mathijs. **Non-CO2 Greenhouse Gas Mitigation in the 21st Century.** [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/380367>.

HARMSSEN, M. J. H. M., VAN VUUREN, D. P., NAYAK, D. R., *et al.* "Data for long-term marginal abatement cost curves of non-CO2 greenhouse gases", **Data in Brief**, v. 25, p. 104334, ago. 2019. DOI: 10.1016/j.dib.2019.104334. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352340919306882>.

HARRIS, Z. M., KOUNTOURIS, Y. "Vertical Farming as a Game Changer for BECCS Technology Deployment", **Sustainability**, v. 12, n. 19, p. 8193, 5 out. 2020. DOI: 10.3390/su12198193. Disponível em: www.mdpi.com/journal/sustainability. Acesso em: 22 mar. 2023.

HASEGAWA, T., FUJIMORI, S., HAVLÍK, P., *et al.* "Risk of increased food

insecurity under stringent global climate change mitigation policy", **Nature Climate Change**, v. 8, n. 8, p. 699–703, 30 ago. 2018. DOI: 10.1038/s41558-018-0230-x. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0230-x>. Acesso em: 22 mar. 2023.

HASEGAWA, T., SANDS, R. D., BRUNELLE, T., *et al.* "Food security under high bioenergy demand toward long-term climate goals", **Climatic Change**, v. 163, n. 3, p. 1587–1601, 26 dez. 2020. DOI: 10.1007/s10584-020-02838-8. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s10584-020-02838-8>. Acesso em: 9 maio 2023.

HAUGHEY, E., STYLES, D., SAUNDERS, M., *et al.* **Land Use Review: Fluxes, Scenarios and Capacity**. [S.l: s.n.], 2023. Disponível em: www.epa.ie. Acesso em: 25 jul. 2023.

HAY, H. A. Y., AWY, A. W. Y. **Yanomami sob Ataque: Garimpo Ilegal na Terra Indígena Yanomami e Propostas para Combatê-lo**. [S.l: s.n.], 2022.

HEINRICH-BÖLL-STIFTUNG. **Pesticide Atlas 2022 - Facts and figures about toxic chemicals in agriculture**. 2º ed. Berlin, Heinrich-Böll-Stiftung, 2022. Disponível em: <https://eu.boell.org/PesticideAtlas>. Acesso em: 20 fev. 2023.

HEINRICH BOLL STIFTUNG, FRIENDS OF THE EARTH EUROPE, BUND, *et al.* **Pesticide Atlas: Facts and figures about toxic chemicals in agriculture 2022**. [S.l: s.n.], 2022. Disponível em: <https://eu.boell.org/PesticideAtlas>.

HELFAND, S. M., DA FONSECA, V., WAGNER, P., *et al.*, "Pequenos e médios produtores na agricultura brasileira Situação atual e perspectivas". In: BUAINAIN, A. M., ALVES, E., SILVEIRA, J. M. DA, *et al.* (Org.), **O mundo rural no Brasil do século 21: A formação de um novo padrão agrário e agrícola**, Brasília, Embrapa, 2014. p. 533–358.

HELFAND, S. M., VIEIRA COSTA, L., SOARES, W. L., "Pequenos e Médios Produtores no Brasil: Uma análise relativa ao tamanho e à escala de produção". In: FILHO, J. E. R. V., GASQUES, J. G. (Org.), **UMA JORNADA PELOS CONTRASTES DO BRASIL: CEM ANOS DO CENSO AGROPECUÁRIO**, Brasília, [s.n.], 2020. p. 219–228. DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/978-65-5635-011-0/cap15>. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/country/brazil/overview>.

HELLER, M. C., KEOLEIAN, G. A. **Beyond Meat's Beyond Burger Life Cycle Assessment: A detailed comparison between a plant-based and an animal-based protein source.** . Michigan, [s.n.], 2018.

HORTAS CARIOCAS. **Manguinhos (RJ) abriga maior horta comunitária da América Latina.** 2021. Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/mao-na-massa/horta/manguinhos-maior-horta-comunitaria-america-latina/>.

HUME, I. V., SUMMERS, D. M., CAVAGNARO, T. R. "Self-sufficiency through urban agriculture: Nice idea or plausible reality?", **Sustainable Cities and Society**, v. 68, p. 102770, maio 2021. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102770. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210670721000627>.

HUPPMANN, D., GIDDEN, M., FRICKO, O., *et al.* "The MESSAGE Integrated Assessment Model and the ix modeling platform (ixmp): An open framework for integrated and cross-cutting analysis of energy, climate, the environment, and sustainable development", **Environmental Modelling & Software**, v. 112, p. 143–156, 1 fev. 2019. DOI: 10.1016/j.envsoft.2018.11.012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815218302330>. Acesso em: 23 abr. 2023.

HUPPMANN, D., ROGELJ, J., KRIEGLER, E., *et al.* "A new scenario resource for integrated 1.5 °C research", **Nature Climate Change**, v. 8, n. 12, p. 1027–1030, 15 dez. 2018. DOI: 10.1038/s41558-018-0317-4. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41558-018-0317-4>. Acesso em: 1 ago. 2023.

HURTADO-BARROSO, S., TRESSERRA-RIMBAU, A., VALLVERDÚ-QUERALT, A., *et al.* "Organic food and the impact on human health", **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 59, n. 4, p. 704–714, 21 fev. 2017. DOI: 10.1080/10408398.2017.1394815. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2017.1394815>. Acesso em: 9 maio 2023.

IAASTD, I. A. of A. K. S. and T. for D. **Agriculture at a crossroads - Global report.** [S.l.], International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development, 2009. Disponível em:

<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8590>. Acesso em: 22 mar. 2023.

IBAMA. **Painel de Avaliações Concluídas dos Agrotóxicos Utilizados no Brasil entre 2019-2022**. 2023. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNmFhMzQ0YjEtNzA5ZC00NDQ5LWEzMGUtNGM5M2IyY2IwZjUwIiwidCI6IjZhZTNmNWU3LTU0MTktNDJhNy04MDc1LThjMTQ5MGM3MmIyNSJ9>. Acesso em: 23 abr. 2023.

IBAMA. **Relatórios de comercialização de agrotóxicos**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos>. Acesso em: 22 mar. 2023.

IBGE. **Pesquisa da Pecuária Municipal**. 2023a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?=&t=resultados>. Acesso em: 16 maio 2023.

IBGE. **Sistema de Contas Nacionais Trimestrais | IBGE**. 2023b. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9300-contas-nacionais-trimestrais.html?=&t=resultados>. Acesso em: 7 abr. 2023.

IBGE. **Tabela 1093: Número de informantes, Quantidade e Peso total das carcaças dos suínos abatidos, no mês e no trimestre, por tipo de inspeção**. 2022a. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1093>. Acesso em: 21 abr. 2023.

IBGE. **Tabela 6579: População residente estimada**. 2022b. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6579>. Acesso em: 16 maio 2023.

IBGE. **Tabela 6588: Série histórica da estimativa anual da área plantada, área colhida, produção e rendimento médio dos produtos das lavouras**. 2023c. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6588>. Acesso em: 16 maio 2023.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores IBGE: estatística da produção pecuária**. 2023. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?id=72380&view=detalhes>. Acesso em: 23 abr. 2023.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Land**

Use and Cover in Brazil. 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/en/geosciences/environmental-information/land-use-and-cover/18428-land-use-and-cover-in-brazil.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 23 abr. 2023.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **MONITORAMENTO DA COBERTURA E USO DA TERRA DO BRASIL 2016-2018.** . [S.l: s.n.], 2020.

IFPRI, I. F. P. R. I. **Global nutrition report 2015: Actions and accountability to advance nutrition and sustainable development.** . [S.l.], International Food Policy Research Institute (IFPRI), 2015. Disponível em: <https://ebrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/129443/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

IHS MARKIT. **Agriannual 2021 : anuário da Agricultura Brasileira.** São Paulo, IHS Markit - Agribusiness Intelligence, 2021a.

IHS MARKIT. **Anualpec 2021 : anuário da pecuária brasileira.** São Paulo, IHS Markit - Agribusiness Intelligence, 2021b.

INPE, C.-G. de O. da T. **PRODES — Amazônia: Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite.** 2023. INPE. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/prodes/>. Acesso em: 10 maio 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector.** . [S.l: s.n.], 2021. Disponível em: www.iea.org/t&c/. Acesso em: 27 maio 2023.

IPCC. **Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change.** [S.l: s.n.], 2014.

IPCC. **Climate Change 2022, Mitigation of Climate Change Summary for Policymakers (SPM).** [S.l: s.n.], 2022a. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.

IPCC. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel**

on Climate Change. Cambridge University Press. [S.l: s.n.], 2022b. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Full_Report.pdf.

IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. [S.l: s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl/download/>. Acesso em: 13 set. 2022.

IPCC, "Summary for Policymakers". In: MASSON-DELMOTTE, V.,P. ZHAI, H.-O. PÖRTNER, D. ROBERTS, J. SKEA, P.R. SHUKLA, A. PIRANI, W. MOUFOUMA-OKIA, C. PÉAN, R. PIDCOCK, S. CONNORS, J.B.R. MATTHEWS, Y. CHEN, X. ZHOU, M.I. GOMIS, E. LONNOY, T. MAYCOCK, M. TIGNOR, AND T. W. (Org.), **Global Warming of 1.5°C**, Cambridge, UK and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2018. p. 1–24. DOI: 10.1017/9781009157940.001. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>. Acesso em: 27 maio 2023.

JOBÁGY, E. G., SALA, O. E. "The imprint of crop choice on global nutrient needs", **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 8, p. 084014, 1 ago. 2014. DOI: 10.1088/1748-9326/9/8/084014. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/8/084014>. Acesso em: 22 mar. 2023.

KARIMI, F., GAUR, S., SINGH, R. "A Comprehensive Review on Land Use/Land Cover (LULC) Change Modeling for Urban Development: Current Status and Future Prospects", **Sustainability 2023, Vol. 15, Page 903**, v. 15, n. 2, p. 903, 4 jan. 2023. DOI: 10.3390/SU15020903. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/2/903/htm>. Acesso em: 17 abr. 2023.

KHAN, S., LOYOLA, C., DETTLING, J., *et al.* **Comparative Environmental Lca of the Impossible Burger With Conventional Ground Beef Burguer.** . [S.l: s.n.], 2019.

KÖBERLE, A. de C. **Implementation of Land Use in an Energy System Model To Study the Long-Term Impacts of Bioenergy in Brazil and its Sensitivity to the Choice of Agricultural Greenhouse Gas Emission Factors**. 2018. 149 f. PPE-COPPE UFRJ, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://antigo.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/aKoberle.pdf>. Acesso em: 24 maio 2019.

KOTCHER, J., MAIBACH, E., CHOI, W. T. "Fossil fuels are harming our brains: Identifying key messages about the health effects of air pollution from fossil fuels", **BMC Public Health**, v. 19, n. 1, 28 ago. 2019. DOI: 10.1186/S12889-019-7373-1. Disponível em: <https://www.psr-la.org/danger-ahead-the-public-health-disaster-that-awaits-from-carbon-capture-and-sequestration-ccs/>. Acesso em: 27 maio 2023.

KOZAI, T., NIU, G., TAKAGAKI, M. **Plant factory : an indoor vertical farming system for efficient quality food production**. [S.l.], Academic Press, 2019.

KRIEGLER, E., LUDERER, G., BAUER, N., *et al.* "Pathways limiting warming to 1.5°C: a tale of turning around in no time?", **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 376, n. 2119, p. 20160457, 13 maio 2018. DOI: 10.1098/rsta.2016.0457. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2016.0457>. Acesso em: 22 mar. 2023.

KRIEWALD, S., PRADHAN, P., COSTA, L., *et al.* "Hungry cities: how local food self-sufficiency relates to climate change, diets, and urbanisation", **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 9, p. 094007, 1 set. 2019a. DOI: 10.1088/1748-9326/ab2d56. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab2d56>.

KRIEWALD, S., PRADHAN, P., COSTA, L., *et al.* "Hungry cities: how local food self-sufficiency relates to climate change, diets, and urbanisation", **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 9, p. 094007, 1 set. 2019b. DOI: 10.1088/1748-9326/ab2d56. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab2d56>.

KRZYSZTOFOWICZ, M., RUDKIN, J., WINTHAGEN, V., *et al.* **Farmers of the future**. EUR 30464 ed. Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2020. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC122308>.

KUBIAK, K. I. "Proposta de um Sistema de Custos para uma Fazenda de

Confinamento de Gado Proposta de um Sistema de Custos para uma Fazenda de Confinamento de Gado", 2006. .

LAN, X., TANS, P., THONING, K. W. **Trends in globally-averaged CO2 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2023-03.** 2023. NOAA/GML. Disponível em: gml.noaa.gov/ccgg/trends. Acesso em: 22 mar. 2023.

LAPIG. **Atlas das Pastagens.** 2023. Disponível em: <https://atlasdaspastagens.ufg.br/map>. Acesso em: 20 fev. 2023.

LEAL, L. S. G., PIZZAIA, L. G. E., FERRANTE, V. L. S. B. "AS MULHERES NA PRODUÇÃO ORGÂNICA NA REGIÃO DE ARARAQUARA: ROMPENDO INVISIBILIDADES". 2017. **Anais [...]** Campinas, [s.n.], 2017.

LIMA, M. A., BODDEY, R. M., ALVES, B. J. R., *et al.* **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Meio Ambiente Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira.** 1. ed. Brasília, EMBRAPA, 2012. Disponível em: www.cnpma.embrapa.br. Acesso em: 22 fev. 2023.

LIMA, R. A. M. C. "a Importância Do Confinamento Para a Pecuária De Corte Curitiba 2016", 2016. .

LOARIE, S. R., LOBELL, D. B., ASNER, G. P., *et al.* "Direct impacts on local climate of sugar-cane expansion in Brazil", **Nature Climate Change**, v. 1, n. 2, p. 105–109, 17 maio 2011. DOI: 10.1038/nclimate1067. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nclimate1067>. Acesso em: 25 jul. 2023.

LOCKS, A. M., POLDI, A., MENDES, A., *et al.* **O FUTURO DA AGRICULTURA BRASILEIRA 10 VISÕES.** Brasília, Embrapa, 2023. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1153216/1/FUTURO-AGRICULTURA-BRASILEIRA.pdf>. Acesso em: 20 maio 2023.

LÓPEZ CIFUENTES, M., FIALA, V. "Covid-19 as a chance for more food democracy in European cities? The responses of actors within Vienna's urban food system to the pandemic", **Cities**, v. 131, p. 104041, 1 dez. 2022. DOI:

10.1016/j.cities.2022.104041. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264275122004802>. Acesso em: 20 maio 2023.

LYNAS, M., HOULTON, B. Z., PERRY, S. "Greater than 99% consensus on human caused climate change in the peer-reviewed scientific literature", **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 11, p. 114005, 19 out. 2021. DOI: 10.1088/1748-9326/ac2966. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac2966>. Acesso em: 22 maio 2023.

LYNCH, J., PIERREHUMBERT, R. "Climate Impacts of Cultured Meat and Beef Cattle", **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 3, 19 fev. 2019. DOI: 10.3389/fsufs.2019.00005. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fsufs.2019.00005/full>.

M. PATHAK, R. SLADE, SHUKLA, P. R., *et al.*, "Technical Summary". **Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change**, Cambridge, Cambridge University Press, 2023. p. 51–148. DOI: 10.1017/9781009157926.002. Disponível em: www.ipcc.ch. Acesso em: 25 jul. 2023.

MACHADO, P. G., HAWKES, A., RIBEIRO, C. de O. "What is the future potential of CCS in Brazil? An expert elicitation study on the role of CCS in the country", **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 112, p. 103503, dez. 2021. DOI: 10.1016/j.ijggc.2021.103503. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103503>. Acesso em: 27 maio 2023.

MACIEL, I. C. de F. **Desempenho e emissões de gases de efeito estufa de bovinos zebuínos e cruzados em sistema intensivo e integrado de produção**. 2019. 91 f. Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

MAIA, C. M. B. de F., GUIOTOKU, M., PEIXOTO, R. T. dos G., *et al.*, "Biochar e o eucalipto". In: OLIVEIRA, E. B. DE, PINTO JUNIOR, J. E. (Org.), **O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**, Brasília, Embrapa Florestas, 2021. p. 589–609. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/223314/1/EmbrapaFlorestas-2021-LV-EucaliptoEmbrapa-cap13.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2023.

MANZATTO, C. V., JUNIOR, E. D. F., PEREZ, J. R. R., *et al.* "Indirect N2O Emissions from Agriculture", **Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories**, v. 4, n. 1, p. 381–397, 2002. DOI: 10.5935/1806-6690.20160056. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. e A. S., CBI - CLIMATE BONDS INITIATIVE. **Sustainable Agriculture Investment Roadmap 2020**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: https://www.climatebonds.net/files/reports/brazil_agri_roadmap_english.pdf.

MARGEM, C. G. F. de S., SILVA, N. M. "Agricultura urbana, governança territorial e planejamento urbano em área protegida de Manaus – Brasil", **Cadernos Metr pole**, v. 23, n. 51, p. 809–834, ago. 2021. DOI: 10.1590/2236-9996.2021-5116. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2236-99962021000200809&tlng=pt.

MARQUES, A. C., FUINHAS, J. A., PAIS, D. F. "Economic growth, sustainable development and food consumption: Evidence across different income groups of countries", **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 245–258, 20 set. 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618316603>. Acesso em: 22 mar. 2023.

MARTELLOZZO, F., LANDRY, J.-S., PLOUFFE, D., *et al.* "Urban agriculture: a global analysis of the space constraint to meet urban vegetable demand", **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 6, p. 064025, 1 maio 2014. DOI: 10.1088/1748-9326/9/6/064025. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/6/064025>.

MARTINELLI, S. S., CAVALLI, S. B. "Alimenta o saudável e sustentável: uma revisão narrativa sobre desafios e perspectivas", **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 24, n. 11, p. 4251–4262, nov. 2019. DOI: 10.1590/1413-812320182411.30572017. Disponível em: <https://orcid.org/0000-0002-2835-9424>. Acesso em: 20 maio 2023.

MARTINEZ-FERNANDEZ, C., HINOJOSA, C., MIRANDA, G. **Green jobs and skills : the local labour market implications of addressing climate change**. [S.l.:

s.n.], 2010. Disponível em: <http://www.oecd.org/dataoecd/54/43/44683169.pdf>.

MASSRUHÁ, S. M. F., LEITE, M. A. A., OLIVEIRA, S. R. M., *et al.* **Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas**. Brasília, Embrapa, 2020. Disponível em: www.embrapa.br/fale-conosco/sac.

MBOW, C., ROSENZWEIG, C., BARIONI, L., *et al.* **Chapter 5: Food security. IPCC Special Report on Climate Change and Land**. [S.l: s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-5/>. Acesso em: 25 jul. 2023.

MCALLISTER, T. A., CHENG, K.-J., OKINE, E. K., *et al.* "Dietary, environmental and microbiological aspects of methane production in ruminants", **Canadian Journal of Animal Science**, v. 76, n. 2, p. 231–243, 1 jun. 1996. DOI: 10.4141/cjas96-035. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.4141/cjas96-035>. Acesso em: 23 abr. 2023.

MCDUGALL, R., KRISTIANSEN, P., RADER, R. "Small-scale urban agriculture results in high yields but requires judicious management of inputs to achieve sustainability", **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, n. 1, p. 129–134, 2 jan. 2019. DOI: 10.1073/pnas.1809707115. Disponível em: <https://pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1809707115>.

MCELDOWNEY, J. "IN-DEPTH ANALYSIS", 2017a. DOI: 10.2861/413185. Disponível em: <http://www.europarl.europa.eu/thinktank>. Acesso em: 22 abr. 2023.

MCELDOWNEY, J. "Urban agriculture in Europe. Patterns, challenges and policies", **European Parliamentary Research Service**, 2017b. DOI: 10.2861/413185. Disponível em: <http://www.europarl.europa.eu/thinktank>.

MCTI. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. , nº 6. Brasília-DF, [s.n.], 2022.

MEDEK, D. E., SCHWARTZ, J., MYERS, S. S. "Estimated Effects of Future Atmospheric CO₂ Concentrations on Protein Intake and the Risk of Protein Deficiency by Country and Region", **Environmental Health Perspectives**, v. 125, n. 8, p. 087002, 16 ago. 2017. DOI: 10.1289/EHP41. Disponível em: <https://doi.org/10.1289/EHP41>. Acesso em: 22 mar. 2023.

MENGUAL, E. S. **Sustainability assessment of urban rooftop farming using an interdisciplinary approach**. 2015. 285 f. Universitat Autònoma de Barcelona, 2015.

MESSINA, M., SIEVENPIPER, J. L., WILLIAMSON, P., *et al.* "Perspective: Soy-based Meat and Dairy Alternatives, Despite Classification as Ultra-processed Foods, Deliver High-quality Nutrition on Par with Unprocessed or Minimally Processed Animal-based Counterparts", **Advances in Nutrition**, v. 13, n. 3, p. 726–738, 1 maio 2022. DOI: 10.1093/advances/nmac026. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2161831322000370>. Acesso em: 23 abr. 2023.

MIELE, M., MARTIONS, F. M. "Panorama da Suinocultura", 2022. .

MIRANDA, M. E. R. de, REINALDI, M. A. de A., FREITAS, C. C. G. "Custos na produção de gado de corte: pastagem versus confinamento", **Research, Society and Development**, v. 10, n. 14, p. e209101421923, 31 out. 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i14.21923. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/21923>.

MIRZABAEV, A., OLSSON, L., KERR, R. B., *et al.* "Climate Change and Food Systems", **Annual Review of Environment and Resources**, v. 37, n. 1, p. 195–222, 21 nov. 2012. DOI: 10.1146/annurev-environ-020411-130608. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-environ-020411-130608>.

MOHAREB, E., HELLER, M., NOVAK, P., *et al.* "Considerations for reducing food system energy demand while scaling up urban agriculture", **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 12, p. 125004, 1 dez. 2017. DOI: 10.1088/1748-9326/aa889b. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa889b>.

MOK, H.-F., WILLIAMSON, V. G., GROVE, J. R., *et al.* "Strawberry fields forever? Urban agriculture in developed countries: a review", **Agronomy for Sustainable Development**, v. 34, n. 1, p. 21–43, 30 jan. 2014. DOI: 10.1007/s13593-013-0156-7. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s13593-013-0156-7>.

MONTEIRO, R. B. N. C. **Desenvolvimento de um modelo para estimativas da produção de gases de efeito estufa em diferentes sistemas de produção de bovinos de corte**. 2009. 1–39 f. 2009.

MORAIS, T. N. **Aproveitamento Energético De Resíduos Agropecuários No Modelo De Análise Integrada Brasileiro**. 2021. UFRJ, 2021.

MORRONE, S., DIMAURO, C., GAMBELLA, F., *et al.* "Industry 4.0 and Precision Livestock Farming (PLF): An up to Date Overview across Animal Productions", **Sensors**, v. 22, n. 12, p. 4319, 7 jun. 2022. DOI: 10.3390/s22124319. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/12/4319>.

MOTA, R. G., MARÇAL, W. S. "Behavior and animal welfare of confined cattle: Alternatives for efficient, cost-effective and quality production: Literature Review", **Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal**, v. 13, n. 1, p. 125–141, 2019. DOI: 10.5935/1981-2965.20190010. .

MÜLLER-CASSERES, E., CARVALHO, F., NOGUEIRA, T., *et al.* "Production of alternative marine fuels in Brazil: An integrated assessment perspective", **Energy**, v. 219, p. 119444, 15 mar. 2021. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119444. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544220325512>. Acesso em: 19 set. 2022.

MULLER, A., SCHADER, C., EL-HAGE SCIALABBA, N., *et al.* "Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture", **Nature Communications**, v. 8, n. 1, p. 1290, 14 nov. 2017. DOI: 10.1038/s41467-017-01410-w. Disponível em: www.nature.com/naturecommunications. Acesso em: 22 mar. 2023.

MUNZ FERNANDES, A., TEIXEIRA COSTA, L., ROZANE LEAL DE SOUZA, Â., *et al.* **Publicações científicas sobre carne cultivada: onde, quando e por quem? Scientific Publishing about cultured meat: where, when and by whom? .** Porto Alegre, [s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/cienagro/wp-content/uploads/2018/10/Publicações-científicas-sobre-carne-cultivada-onde-quando-e-por-quem.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2023.

MUTH, M. K., BIRNEY, C., CUÉLLAR, A., *et al.* "A systems approach to assessing environmental and economic effects of food loss and waste interventions in the United States", **Science of The Total Environment**, v. 685, p. 1240–1254, out. 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.230. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.230>.

MYERS, S. S., SMITH, M. R., GUTH, S., *et al.* "Climate Change and Global Food Systems: Potential Impacts on Food Security and Undernutrition", **Annual Review of Public Health**, v. 38, n. 1, p. 259–277, 20 mar. 2017. DOI: 10.1146/annurev-publhealth-031816-044356. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-031816-044356>. Acesso em: 22 mar. 2023.

MYERS, S. S., ZANOBETTI, A., KLOOG, I., *et al.* "Increasing CO2 threatens human nutrition", **Nature**, v. 510, n. 7503, p. 139–142, 5 jun. 2014. DOI: 10.1038/nature13179. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/nature13179>. Acesso em: 22 mar. 2023.

NABUURS, G.-J., AOKI, L., HUMPENÖDER, F., *et al.* **Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU). In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.). . Cambridge, UK and New York, NY, USA, [s.n.], 2022.**

NEOENERGIA. **Transição energética e os 5Ds**. 2022. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/transicao-energetica.aspx>. Acesso em: 22 abr. 2023.

NETO, J. L. A. **Em novo patamar da engorda intensiva, pecuaristas combinam semi e confinamento; veja como funciona**. 2021a. Giro do BOi. Disponível em: <https://www.girodoboio.com.br/destaques/em-novo-patamar-da-engorda-intensiva-pecuaristas-combinam-semi-e-confinamento-veja-como-funciona/>. Acesso em: 12 maio 2023.

NETO, J. L. A. **Pecuária leiteira 4.0: colar de comportamento emite alertas ao produtor via app**. 2021b. Giro do Boi. Disponível em: <https://www.girodoboio.com.br/noticias/pecuaria-leiteira-4-0-colar-de-comportamento-emite-alertas-ao-produtor-via-app/>. Acesso em: 18 maio 2023.

NOBRE, M. M., DE OLIVEIRA, I. R., ZIMMER, A. H., *et al.* **Agricultura de baixo carbono: tecnologias e estratégias de implantação**. Brasília, [s.n.], 2018. v. 37.

NOGUEIRA, A. K. da S., RODRIGUES, R. de A. R., SILVA, J. J. N. da, *et al.* "Fluxos de óxido nitroso em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta", **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1156–1162, set. 2016. DOI: 10.1590/s0100-204x2016000900015. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2016000901156&lng=pt&tlng=pt.

NOONAN, E., BARREAU, M.-S. **Urban farming: A gateway to greater food security?** 2021. European Parliamentary Research Service. Disponível em: <https://epthinktank.eu/2021/10/25/urban-farming-a-gateway-to-greater-food-security/>.

NUNES, M. de A. **Políticas Econômicas Anticíclicas e seus Efeitos Regionais e Setoriais Utilizando um Modelo de Equilíbrio Geral Computável Inter-Regional.** 2015. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre, 2015. Disponível em: [https://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/6020/2/468837-Texto Completo.pdf](https://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/6020/2/468837-Texto%20Completo.pdf). Acesso em: 17 abr. 2023.

NUNES, M. L. A., MIRANDA, K. O. da S. "Alternativas para a redução da emissão de gases de efeito estufa pela suinocultura", **Thesis, São Paulo, ano IV**, v. 1º semestr, n. 19, p. 48–62, 2013. .

O'REILLY, É. de M. **Agricultura Urbana – Um Estudo de Caso do Projeto Hortas Cariocas em Manguinhos, Rio de Janeiro.** 2014. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10009377.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2023.

OECD-FAO. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031.** [S.l.], OECD, 2022. Disponível em: https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2022-2031_f1b0b29c-en. Acesso em: 22 mar. 2023. (OECD-FAO Agricultural Outlook).

OECD/FAO. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031.** Paris, OECD, 2022. Disponível em: https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2022-2031_f1b0b29c-en. Acesso em: 19 set. 2022. (OECD-FAO Agricultural Outlook).

OECD. **BOOSTING INNOVATION FOR SUSTAINABLE PRODUCTIVE AND RESILIENT AGRICULTURE AND FOOD SYSTEMS**. . [S.l: s.n.], 2022. Disponível em: [https://www.oecd.org/agriculture/ministerial/documents/Boosting Innovation for Sustainable Productive and Resilient Agriculture and Food Systems.pdf](https://www.oecd.org/agriculture/ministerial/documents/Boosting%20Innovation%20for%20Sustainable%20Productive%20and%20Resilient%20Agriculture%20and%20Food%20Systems.pdf).

OECD. **Gender and the Environment: Building Evidence and Policies to Achieve the SDGs**. Paris, OECD Publishing, 2021. Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/35ec6754-en/index.html?itemId=/content/component/35ec6754-en#section-d1e15565>.

OKEREKE, C. "Moral Foundations for Global Environmental and Climate Justice", **Royal Institute of Philosophy Supplement**, v. 69, p. 117–135, 22 out. 2011. DOI: 10.1017/S1358246111000245. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/product/identifiser/S1358246111000245/type/journal_article. Acesso em: 31 jul. 2023.

OLIVEIRA, P. P. A., MACEDO, J. R., PEZZOPANE, *et al.* **Balço e emissões de gases de efeito estufa em sistemas integrados. Congresso Brasileiro de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária**. [S.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1082580/balanco-e-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-em-sistemas-integrados>. Acesso em: 19 set. 2022. , 2017

OLIVEIRA, U., SOARES-FILHO, B., RODRIGUES, H., *et al.* "A near real-time web-system for predicting fire spread across the Cerrado biome", **Scientific Reports** **2023 13:1**, v. 13, n. 1, p. 1–12, 24 mar. 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-30560-9. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-30560-9>. Acesso em: 17 abr. 2023.

ORESQUES, N. "The Scientific Consensus on Climate Change", **Science**, v. 306, n. 5702, p. 1686–1686, 3 dez. 2004. DOI: 10.1126/science.1103618. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1103618>. Acesso em: 22 maio 2023.

ORSINI, F., KAHANE, R., NONO-WOMDIM, R., *et al.* "Urban agriculture in the developing world: a review", **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, n. 4, p. 695–720, 9 out. 2013. DOI: 10.1007/s13593-013-0143-z. Disponível em:

<http://link.springer.com/10.1007/s13593-013-0143-z>.

PALERMO, G. C. **Emissões De Gases De Efeito Estufa (Gee) E Medidas Mitigatórias Da Pecuária: Potencialidades Da Intensificação E Do Confinamento Do Gado Bovino De Corte Brasileiro**. 2011. 254 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

PALERMO, G. C., D'AVIGNON, A. L. de A., FREITAS, M. A. V. "Reduction of emissions from Brazilian cattle raising and the generation of energy: Intensification and confinement potentials", **Energy Policy**, v. 68, p. 28–38, maio 2014. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.01.041. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421514000780>.

PANESCU, P., CARTER, M., COHEN, M., *et al.* "2022 State of the Industry Report - Plant-based meat, seafood, eggs, and dairy", **GFI - Good Food Institute**, p. 111, 2023. Disponível em: <https://gfi.org/wp-content/uploads/2023/01/2022-Plant-Based-State-of-the-Industry-Report-1-1.pdf>.

PEDREIRA, B. C., DOMICIANO, L. F., RODRIGUES, R. R. de A., *et al.*, "Integração lavoura-pecuária: novas tendências". In: MEDEIROS, F. H. V., AL., E. (Org.), **Novos sistemas de produção**, Lavras, UFLA, 2017. p. 128–160.

PEDREIRA, M. dos S., BERCHIELLI, T. T., DE OLIVEIRA, S. G., *et al.* "PRODUÇÃO DE METANO E CONCENTRAÇÃO DE ACIDOS GRÁXOS VOLÁTEIS RUMINAL EM BOVINOS ALIMENTADOS COM DIFERENTES RELAÇÕES DE VOLUMOSO:CONCENTRADO1 AUTORES". 2004. **Anais [...]** Campo Grande, [s.n.], 2004.

PEDREIRA, M. dos S., PRIMAVESI, O., LIMA, M. A., *et al.* "Ruminal methane emission by dairy cattle in Southeast Brazil", **Scientia Agricola**, v. 66, n. 6, p. 742–750, dez. 2009. DOI: 10.1590/S0103-90162009000600004. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/sa/a/Y5NLRjvPVVDLHBsD5YJFm9h/?lang=en>. Acesso em: 23 jan. 2023.

PEREIRA, M. A. "Avaliação econômica de sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: as experiências da Embrapa", **Documentos**, n. 268, p. 90, 2019. .

PINGALI, P. L. "Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead", **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 31, p. 12302–12308, 31 jul. 2012. DOI: 10.1073/pnas.0912953109. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.0912953109>. Acesso em: 22 mar. 2023.

PINTO, L. F. G., DE FARIA, V. G., SPAROVEK, G., *et al.* "QUEM SÃO OS POUCOS DONOS DAS TERRAS AGRÍCOLAS NO BRASIL-O MAPA DA DESIGUALDADE", **Sustentabilidade em Debate**, v. 10, p. 21, 2020. Disponível em: https://www.imaflora.org/public/media/biblioteca/1588006460-sustentabilidade_terras_agricolas.pdf. Acesso em: 16 maio 2023.

PIPER, K. **Impossible Foods' plant-based meat just got closer to the price of regular meat.** 2021. Disponível em: <https://www.vox.com/future-perfect/2021/2/2/22260454/impossible-foods-burger-plant-based-meat>. Acesso em: 22 fev. 2023.

POLIDORO, J. C., DE FREITAS, P. L., HERNANI, L. C., *et al.* "Potential impact of plans and policies based on the principles of conservation agriculture on the control of soil erosion in Brazil", **Land Degradation and Development**, v. 32, n. 12, p. 3457–3468, 21 abr. 2021. DOI: 10.1002/ldr.3876. Disponível em: <https://www.authorea.com/doi/full/10.22541/au.158750264.42640167?commit=8ec3ada4c79b971cdae8146043d59676c3bc3e6d>. Acesso em: 15 set. 2022.

POLIDORO, J. C., FREITAS, P. L. De, HERNANI, L., *et al.* "The impact of plans, policies, practices and technologies based on the principles of conservation agriculture in the control of soil erosion in Brazil", **Authorea**, p. 1–16, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.22541/au.158750264.42640167>.

POPE, J., ANNANDALE, D., MORRISON-SAUNDERS, A. "Conceptualising sustainability assessment", **Environmental Impact Assessment Review**, v. 24, n. 6, p. 595–616, 1 ago. 2004. DOI: 10.1016/j.eiar.2004.03.001. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0195925504000447>. Acesso em: 31 jul. 2023.

PORTO, L. M., BERTI, F. V. **Carne cultivada: perspectivas e oportunidades para o Brasil.** [S.l.], TikiBooks, 2022. Disponível em: <http://gfi.org.br/wp->

content/uploads/2022/10/GFI-2022-Carne-Cultivada-no-Brasil-2.pdf.

PORTUGAL, T. B. **Sistemas integrados de produção agropecuária : desempenho animal, emissão de metano e controle de ectoparasitos em bovinos.** 2020. 1–98 f. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/74689>. Acesso em: 1 ago. 2023.

POTENZA, R. F., QUINTANA, G. O., CARDOSO, A. M., *et al.* **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020.** SEEG. [S.l.], SEEG, 2021. Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf.

PRADHAN, P., FISCHER, G., VAN VELTHUIZEN, H., *et al.* "Closing Yield Gaps: How Sustainable Can We Be?", **PLOS ONE**, v. 10, n. 6, p. e0129487, 17 jun. 2015. DOI: 10.1371/journal.pone.0129487. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0129487>.

PRADHAN, P., KRIEWALD, S., COSTA, L., *et al.* "Urban Food Systems: How Regionalization Can Contribute to Climate Change Mitigation", **Environmental Science & Technology**, v. 54, n. 17, p. 10551–10560, 1 set. 2020. DOI: 10.1021/acs.est.0c02739. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.0c02739>.

PRAUSE, L. "Digital Agriculture and Labor: A Few Challenges for Social Sustainability", **Sustainability**, v. 13, n. 11, p. 5980, 26 maio 2021. DOI: 10.3390/su13115980. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/5980>.

PRECEDENCE RESEARCH. **Vertical Farming Market Size Worth Around USD 31.15 Bn by 2030.** 2021. Disponível em: <https://www.precedenceresearch.com/vertical-farming-market>. Acesso em: 10 maio 2023.

PSR-LA. **Danger Ahead: The Public Health Disaster That Awaits From Carbon Capture and Sequestration (CCS).** 2022. Physicians for Social Responsibility Los Angeles. Disponível em: <https://www.psr-la.org/danger-ahead-the-public-health-disaster-that-awaits-from-carbon-capture-and-sequestration-ccs/>.

PULIDINDI, K., PRAKASH, A. **Vertical Farming Market Size, Growth Statistics - 2027 Report**. 2021. Global Market Insight. Disponível em: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/vertical-farming-market>. Acesso em: 10 maio 2023.

QUDDUS, A. "Rooftop gardening in the globe: advantages and challenges", **Horticulture International Journal**, v. 6, n. 3, p. 120–124, 22 jul. 2022. DOI: 10.15406/hij.2022.06.00253. Disponível em: <http://medcraveonline.com>. Acesso em: 22 abr. 2023.

R.M., F., L.C.V., S., N. C., M., *et al.* "AGRICULTURA ORGÂNICA E A PARTICIPAÇÃO DAS MULHERES NO SISTEMA DE PRODUÇÃO NO ANO DE 2019: UMA ABORDAGEM NACIONAL". 2019. **Anais [...]** [S.l.], Instituto Internacional Despertando Vocações, 2019. DOI: 10.31692/2526-7701.IVCOINTERPDVAgro.2019.0055.

RAÍZEN. **Transição energética: o que é, como ela ocorre no Brasil e os 5Ds**. 2022. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/transicao-energetica>. Acesso em: 22 abr. 2023.

RAJÃO, R., SOARES-FILHO, B., NUNES, F., *et al.* "The rotten apples of Brazil's agribusiness", **Science**, v. 369, n. 6501, p. 246–248, 17 jul. 2020. DOI: 10.1126/science.aba6646. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aba6646>. Acesso em: 19 set. 2022.

REARDON, T., TSCHIRLEY, D., LIVERPOOL-TASIE, L. S. O., *et al.* "The processed food revolution in African food systems and the double burden of malnutrition", **Global Food Security**, v. 28, p. 100466, 1 mar. 2021. DOI: 10.1016/j.gfs.2020.100466. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211912420301206>. Acesso em: 22 mar. 2023.

REDE ILPF. "ILPF em números: Safra 2020/21", p. 13, 2021. Disponível em: https://www.redeilpf.org.br/images/ILPF_em_Numeros-Safra.pdf.

REDE ILPF. **Rede ILPF**. 2022. Embrapa. Disponível em: <https://redeilpf.org.br/>. Acesso em: 15 set. 2022.

REGAN, H. **Brazil's beef and soy exports to the EU linked to illegal deforestation, study finds.** 2020. Disponível em: <https://edition.cnn.com/2020/07/16/americas/brazil-deforestation-soy-beef-eu-intl-hnk/index.html>.

REISCH, L., EBERLE, U., LOREK, S. "Sustainable food consumption: an overview of contemporary issues and policies", **Sustainability: Science, Practice and Policy**, v. 9, n. 2, p. 7–25, 5 out. 2013. DOI: 10.1080/15487733.2013.11908111. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15487733.2013.11908111>. Acesso em: 22 mar. 2023.

RENZAHO, A. M. N., KAMARA, J. K., TOOLE, M. "Biofuel production and its impact on food security in low and middle income countries : Implications for the post-2015 sustainable development goals", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, n. April, p. 503–516, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.04.072. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.072>.

REVISTA RURAL. **Recuperação de pastagens é estratégica para expansão pecuária – Revista Rural.** 2021. Revista Rural. Disponível em: <https://www.revistarural.com.br/2021/07/07/recuperacao-de-pastagens-e-estrategica-para-expansao-da-atividade/>. Acesso em: 12 maio 2023.

RIBEIRO, F. J., ANDRADE, G. G., CECHIN, A. "NT - 65 - Dinte - Impactos regionais e setoriais da redução das tarifas de importação no Brasil", **Notas Técnicas**, p. 1–24, 14 fev. 2023. DOI: 10.38116/ntdinte65. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11755/1/NT_65_Dinte_Impactos_Regio nais.pdf. Acesso em: 17 abr. 2023.

RIZZO, G., BORRELLO, M., DARA GUCCIONE, G., *et al.* "Organic Food Consumption: The Relevance of the Health Attribute", **Sustainability**, v. 12, n. 2, p. 595, 13 jan. 2020. DOI: 10.3390/su12020595. Disponível em: www.mdpi.com/journal/sustainability. Acesso em: 22 mar. 2023.

ROCHEDO, Pedro R.R., SOARES-FILHO, B., SCHAEFFER, R., *et al.* **The threat of political bargaining to climate mitigation in Brazil.** *Nature Climate*

Change. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0213-y>. , 2018

ROCHEDO, Pedro Rua Rodriguez. **Development of a Global Integrated Energy Model to Evaluate the Brazilian Role in Climate Change Mitigation Scenarios**. 2016. 280 f. PPE-COPPE/UFRJ, 2016.

ROE, S., STRECK, C., BEACH, R., *et al.* "Land-based measures to mitigate climate change: Potential and feasibility by country", **Global Change Biology**, v. 27, n. 23, p. 6025–6058, 11 dez. 2021. DOI: 10.1111/gcb.15873. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.15873>. Acesso em: 9 maio 2023.

ROE, S., STRECK, C., OBERSTEINER, M., *et al.* "Contribution of the land sector to a 1.5 °C world", **Nature Climate Change**, v. 9, n. 11, p. 817–828, 21 nov. 2019. DOI: 10.1038/s41558-019-0591-9. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/s41558-019-0591-9>. Acesso em: 9 maio 2023.

RUBIO, N. R., XIANG, N., KAPLAN, D. L. "Plant-based and cell-based approaches to meat production", **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p. 6276, 8 dez. 2020. DOI: 10.1038/s41467-020-20061-y. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-020-20061-y>.

SALTON, J. C., KICHEL, A. N., ATANTES, M., *et al.* "Sistema São Mateus - Sistema de Integração Lavoura-Pecuária para a região do Bolsão Sul-Mato-Grossense", **Comunicado Técnico 186**, n. 6, p. 1–6, 2013. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/84887/1/COT2013186.pdf>. Acesso em: 19 set. 2022.

SANTOS DE LIMA, L., MERRY, F., SOARES-FILHO, B., *et al.* "Illegal logging as a disincentive to the establishment of a sustainable forest sector in the Amazon", **PLOS ONE**, v. 13, n. 12, p. e0207855, 5 dez. 2018. DOI: 10.1371/journal.pone.0207855. Disponível em: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0207855>. Acesso em: 9 maio 2023.

SANTOS, C. V. dos. **Política tributária, nível de atividade econômica e bem-estar: lições de um modelo de equilíbrio geral inter-regional**. 2006. 140 f. ESALQ-USP, 2006. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11132/tde-10052006-152813/publico/CarlitonSantos.pdf>. Acesso em: 20 maio 2023.

SANTOS, C. V. dos, OLIVEIRA, A. F. de, FERREIRA FILHO, J. B. de S. "Potential impacts of climate change on agriculture and the economy in different regions of Brazil", **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 60, n. 1, 2022. DOI: 10.1590/1806-9479.2021.220611. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/dQyfDcgDFZdqPZGZm6j5tdJ/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 17 abr. 2023.

SANTOS, K. A. dos. **Curvas de Custos Marginais de Abatimento de Gases de Efeito Estufa: Oportunidades de Mitigação para Pecuária de Corte**. 2016. 104 f. Universidade Federal da Grande Dourados, 2016. Disponível em: <http://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/1365>. Acesso em: 19 set. 2022.

SATO, J. H., DE FIGUEIREDO, C. C., MARCHÃO, R. L., *et al.* "Understanding the relations between soil organic matter fractions and N₂O emissions in a long-term integrated crop–livestock system", **European Journal of Soil Science**, v. 70, n. 6, p. 1183–1196, 1 nov. 2019. DOI: 10.1111/ejss.12819. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ejss.12819>. Acesso em: 19 set. 2022.

SCANLON, B. R., RUDELL, B. L., REED, P. M., *et al.* "The food-energy-water nexus: Transforming science for society", **Water Resources Research**, v. 53, n. 5, p. 3550–3556, 2017. DOI: 10.1002/2017WR020889. .

SCHAEFFER, R., SZKLO, A., LUCENA, A., *et al.* **Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de termelétricas e termonucleares**. Brasília, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente, 2017.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA, O. do C. **Emissões GEE**. 2023. Disponível em: <https://seeg.eco.br>. Acesso em: 6 mar. 2023.

SILVA, E. C. R., FONSECA, A. B. "Hortas em escolas urbanas , Complexidade e transdisciplinaridade : Contribuições para a Educação Ambiental e para a Educação em Saúde", **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências Vol.**, v. 11, n. 3, p. 35–53, 2011. .

SILVA JUNIOR, C. H. L., PESSÔA, A. C. M., CARVALHO, N. S., *et al.* "The

Brazilian Amazon deforestation rate in 2020 is the greatest of the decade", **Nature Ecology & Evolution**, v. 5, n. 2, p. 144–145, 21 dez. 2020. DOI: 10.1038/s41559-020-01368-x. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41559-020-01368-x>. Acesso em: 9 maio 2023.

SINKE, P., ODEGARD, I. **LCA of cultivated meat: Future projections for different scenarios**. . [S.l.: s.n.], 2021a. Disponível em: www.cedelft.eu.

SINKE, P., ODEGARD, I. **LCA of cultivated meat Future projections for different scenarios**. [S.l.], CE Delft, 2021b. Disponível em: https://gfi.europa.org/wp-content/uploads/2022/04/CE_Delft_190107_LCA_of_cultivated_meat_Def.pdf. Acesso em: 22 mar. 2023.

SINKE, P., SWARTZ, E., SANCTORUM, H., *et al.* "Ex-ante life cycle assessment of commercial-scale cultivated meat production in 2030", **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 28, n. 3, p. 234–254, 12 mar. 2023. DOI: 10.1007/s11367-022-02128-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02128-8>.

SIQUEIRA-GAY, J., METZGER, J. P., SÁNCHEZ, L. E., *et al.* "Strategic planning to mitigate mining impacts on protected areas in the Brazilian Amazon", **Nature Sustainability** **2022 5:10**, v. 5, n. 10, p. 853–860, 28 jul. 2022. DOI: 10.1038/s41893-022-00921-9. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41893-022-00921-9>. Acesso em: 17 abr. 2023.

SKAWIŃSKA, E., ZALEWSKI, R. I. **Combining the Water–Energy–Food and Food Waste–Food Loss–Food Security Nexuses to Reduce Resource Waste**. [S.l.: s.n.], 2022. v. 15. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/16/5866>.

SMITH, M. R., MYERS, S. S. "Impact of anthropogenic CO2 emissions on global human nutrition", **Nature Climate Change**, v. 8, n. 9, p. 834–839, 27 set. 2018. DOI: 10.1038/s41558-018-0253-3. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0253-3>. Acesso em: 22 mar. 2023.

SMITH, Mitch. "A Different Kind of Pipeline Project Scrambles Midwest Politics - The New York Times". **The New York Times**, NY, 2023. Disponível em: <https://www.nytimes.com/2023/03/20/us/carbon-dioxide-ethanol-underground->

midwest.html.

SMITH, P., GREGORY, P. J., VAN VUUREN, D., *et al.* "Competition for land", **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 365, n. 1554, p. 2941–2957, 27 set. 2010. DOI: 10.1098/rstb.2010.0127. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2010.0127>. Acesso em: 22 mar. 2023.

SMITH, P., HABERL, H., POPP, A., *et al.* "How much land-based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and environmental goals?", **Global Change Biology**, v. 19, n. 8, p. 2285–2302, ago. 2013. DOI: 10.1111/gcb.12160. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12160><http://researchrepository.murdoch.edu.au/16577/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

SNEDDON, C., HOWARTH, R. B., NORGAARD, R. B. "Sustainable development in a post-Brundtland world", **Ecological Economics**, v. 57, n. 2, p. 253–268, 1 maio 2006. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2005.04.013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921800905002053>. Acesso em: 31 jul. 2023.

SOARES-FILHO, B. S., CAMPOS, A., KOBERLE, A. de C., *et al.* **Modelagem setorial de opções de baixo carbono para agricultura, florestas e outros usos do solo (AFOLU)**. Brasília, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/arquivos/opcoes-de-mitigacao-de-emissoes-de-gee-em-setores-chave/modelagem-setorial-de-opcoes-de-baixo-carbono-para-agricultura-floresta-e-outros-usos-do-solo-afolu.pdf/view>.

SOARES-FILHO, B. S., COUTINHO CERQUEIRA, G., LOPES PENNACHIN, C. "dinamica—a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier", **Ecological Modelling**, v. 154, n. 3, p. 217–235, 1 set. 2002. DOI: 10.1016/S0304-3800(02)00059-5. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304380002000595>. Acesso em: 23 fev. 2023.

SOENDERGAARD, N., DE SÁ, C. D., JANK, M. S., *et al.* **Decoupling Soy and Beef from Illegal Amazon Deforestation : Brazilian Private Sector Initiatives.** [S.l: s.n.], 2021. Disponível em: https://www.insper.edu.br/wp-content/uploads/2021/03/Relatorio_CEBRI-Insper_22mar.pdf.

SORAGHAN, Mike, ANCHONDO, Carlos. "Biden releases plan to avoid “dangerous” CO2 pipeline failures". **E&E News**, 27 maio 2022. Disponível em: <https://www.eenews.net/articles/biden-releases-plan-to-avoid-dangerous-co2-pipeline-failures/>.

SOUZA, K. W. De, PULROLNIK, K., VILELA, L., *et al.* **Integração lavoura-pecuária- floresta como estratégia para compensação das emissões de gases de efeito estufa.** [S.l: s.n.], 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199810/1/Circ-39.pdf>.

SOUZA, O. J. O. **Uso Da Tecnologia Bolockchain Na Rastreabilidade Do Agronegócio.** 2021. 51 f. UnB, 2021. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/29567>.

SPERA, S. A., GALFORD, G. L., COE, M. T., *et al.* "Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier", **Global Change Biology**, v. 22, n. 10, p. 3405–3413, 1 out. 2016. DOI: 10.1111/gcb.13298. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.13298>. Acesso em: 25 jul. 2023.

STEFFEN, W., RICHARDSON, K., ROCKSTRÖM, J., *et al.* "Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet", **Science**, v. 347, n. 6223, p. 1259855, 13 fev. 2015. DOI: 10.1126/science.1259855. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1259855>. Acesso em: 22 mar. 2023.

STEVENSON, J. R., VILLORIA, N., BYERLEE, D., *et al.* "Green Revolution research saved an estimated 18 to 27 million hectares from being brought into agricultural production", **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 21, p. 8363–8368, 21 maio 2013. DOI: 10.1073/pnas.1208065110. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1208065110>. Acesso em: 22 mar. 2023.

STOCKHOLM RESILIENCE CENTRE. **The SDGs wedding cake - Stockholm Resilience Centre.** 2016. Disponível em:

<https://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2016-06-14-how-food-connects-all-the-sdgs.html>. Acesso em: 22 mar. 2023.

STONESTROM, D. A., SCANLON, B. R., ZHANG, L. "Introduction to special section on Impacts of Land Use Change on Water Resources", **Water Resources Research**, v. 45, n. 7, p. 0–00, 1 jul. 2009. DOI: 10.1029/2009WR007937. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2009WR007937>. Acesso em: 25 jul. 2023.

STRASSBURG, B. B. N., LATAWIEC, A. E., BARIONI, L. G., *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, set. 2014. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2014.06.001. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959378014001046>. Acesso em: 23 abr. 2023.

TAGOMORI, I., DAI OGLOU, V., ROCHEDO, P., *et al.* "BLOEM: A spatially explicit model of bioenergy and carbon capture and storage, applied to Brazil", **GCB Bioenergy**, v. 15, n. 2, p. 116–127, 8 fev. 2023. DOI: 10.1111/gcbb.13008. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcbb.13008>.

TEEB. **TEEB for Agriculture & Food: Scientific and Economic Foundations**. Geneva, UN Environment, 2018.

TEIXEIRA, R. R. **VIABILIDADE ECONÔMICA DA RECRIA DE BEZERROS NELORE EM CONFINAMENTO NO MUNICÍPIO DE DOIS IRMÃOS**. 2019. 50 f. Centro Universitário Luterano de Palma, 2019.

TILMAN, D., CLARK, M. "Global diets link environmental sustainability and human health", **Nature**, v. 515, n. 7528, p. 518–522, 12 nov. 2014. DOI: 10.1038/nature13959. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/nature13959>. Acesso em: 22 mar. 2023.

TREICH, N. "Cultured Meat: Promises and Challenges", **Environmental and Resource Economics**, v. 79, n. 1, p. 33–61, 19 maio 2021. DOI: 10.1007/s10640-021-00551-3. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10640-021-00551-3>. Acesso em: 18 jul. 2023.

TRINDADE, C. S. da, ALVIM, A. M. "O acordo de Paris e as emissões de gases : impactos sobre a produção de suínos no Brasil", **Revista Planejamento e Políticas Públicas**, n. 61, p. 71–109, 30 mar. 2022. DOI: 10.38116/ppp61art3. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11432/1/ppp_n61_o_Acordo_de_Paris.pdf.

TUNES, S. "Bife de laboratório", **Revista Pesquisa Fapesp**, 2019. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/bife-de-laboratorio-2/>. Acesso em: 22 fev. 2023.

TUOMISTO, H. L. "The eco-friendly burger", **EMBO reports**, v. 20, n. 1, 14 jan. 2019. DOI: 10.15252/embr.201847395. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.15252/embr.201847395>. Acesso em: 12 maio 2023.

TUOMISTO, H. L., ELLIS, M. J., HAASTRUP, P. "Environmental impacts of cultured meat: alternative production scenarios". 2014. **Anais [...]** Vashon, JRC Publications, 2014. p. 1360–1366. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC91013>. Acesso em: 22 fev. 2023.

TUOMISTO, H. L., TEIXEIRA DE MATTOS, M. J. "Environmental Impacts of Cultured Meat Production", **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 14, p. 6117–6123, 15 jul. 2011. DOI: 10.1021/es200130u. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es200130u>.

UNEP. **Assessing Global Land Use: Balancing Consumption with Sustainable Supply. A Report of the Working Group on Land and Soils of the International Resource Panel**. [S.l.], UNEP, 2014. Disponível em: <http://www.unep.org/>. Acesso em: 22 mar. 2023.

UNEP. **Índice de Desperdício Alimentar: Relatório 2021**. [S.l.: s.n.], 2021.

UNITED NATIONS. **The Sustainable Development Goals Report 2022**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/%0Ahttps://www.un->
[library.org/content/books/9789210018098%0Ahttps://www.un-](https://www.un-)
[library.org/content/books/9789210478878](https://www.un-).

UNITED NATIONS. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. [S.l: s.n.], 2015.

URBAN, D. W., SHEFFIELD, J., LOBELL, D. B. "Historical effects of CO₂ and climate trends on global crop water demand", **Nature Climate Change**, v. 7, n. 12, p. 901–905, 27 dez. 2017. DOI: 10.1038/s41558-017-0011-y. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0011-y>. Acesso em: 22 mar. 2023.

VAN BAAL, K., STIEL, S., SCHULTE, P. "Public Perceptions of Climate Change and Health—A Cross-Sectional Survey Study", **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 2, p. 1464, 13 jan. 2023. DOI: 10.3390/ijerph20021464. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/20/2/1464/htm>. Acesso em: 22 maio 2023.

VAN VLIET, S., BAIN, J. R., MUEHLBAUER, M. J., *et al.* "A metabolomics comparison of plant-based meat and grass-fed meat indicates large nutritional differences despite comparable Nutrition Facts panels", **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 13828, 5 jul. 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-93100-3. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-93100-3>.

VAN VUUREN, D. P., KOK, M., LUCAS, P. L., *et al.* "Pathways to achieve a set of ambitious global sustainability objectives by 2050: Explorations using the IMAGE integrated assessment model", 2015. DOI: 10.1016/j.techfore.2015.03.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2015.03.005>.

VAN VUUREN, D. P., STEHFEST, E., GERNAAT, D. E. H. J., *et al.* "Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm", **Global Environmental Change**, v. 42, p. 237–250, 1 jan. 2017. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095937801630067X>. Acesso em: 23 abr. 2023.

VÁSQUES-ARROYO, E. M. **Incorporação do Nexo Energia-Água em um Modelo de Otimização da Expansão do Sistema Energético Brasileiro**. 2018. UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 2018.

VERGEER, R., SINKE, P., ODEGARD, I. **TEA of cultivated meat – Future**

projections for different scenarios. [S.l.], CE Delft, 2021. Disponível em: https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/02/CE_Delft_190254_TEA_of_Cultivated_Meat_FINAL_corrigendum.pdf. Acesso em: 22 mar. 2023.

VERGEER, Robert, PELLE, S., ODEGARD, I. "TEA of cultivated meat TEA of cultivated meat", p. 44, 2021. Disponível em: <https://cedelft.eu/publications/tea-of-cultivated-meat/>.

VOLPATO, A. R., FRAZEN, R. M., PATRÍCIA, W., *et al.* "Custos de produção da bovinocultura de corte no sistema de semiconfinamento : Estudo de caso na fazenda Ômega", p. 1–28, 2021. .

WERNER, F., BALBINOT JUNIOR, A. A., FRANCHINI, J. C., *et al.* "Agronomic performance of soybean cultivars in an agroforestry system", **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 3, p. 279–285, 1 jul. 2017. DOI: 10.1590/1983-40632016V4745937. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/pat/a/bDL8pGkFg4DghR6xwJwZHsv/?lang=en>. Acesso em: 19 set. 2022.

WEYANT, J. "Some Contributions of Integrated Assessment Models of Global Climate Change", **Review of Environmental Economics and Policy**, v. 11, n. 1, p. 115–137, 1 jan. 2017. DOI: 10.1093/reep/rew018. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1093/reep/rew018>. Acesso em: 1 ago. 2023.

WILSON, C., GUIVARCH, C., KRIEGLER, E., *et al.* "Evaluating process-based integrated assessment models of climate change mitigation", **Climatic Change**, v. 166, n. 1–2, p. 3, 4 maio 2021. DOI: 10.1007/s10584-021-03099-9. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-021-03099-9>. Acesso em: 23 abr. 2023.

WINDFUHR, M., JONSÉN, J. **Food Sovereignty Towards democracy in localized food systems.** [S.l: s.n.], 2005. Disponível em: www.itdgpublishing.org.uk. Acesso em: 20 maio 2023.

WRI, W. R. I. **Uma nova economia para uma nova era: elementos para a construção de uma economia mais eficiente e resiliente para o Brasil.** [S.l: s.n.], 2020. Disponível em:

https://wribrasil.org.br/sites/default/files/af_neb_synthesisreport_digital.pdf.

YANO, I. H., SANTOS, E. H. dos, CASTRO, A. de, *et al.* **Modelo de rastreamento bovino via Smart Contracts com tecnologia Blockchain.** , Comunicado Técnico., n° 130. Campinas, [s.n.], 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/188315/1/Modelo-rastreamento-CT-130.pdf>.

ZHAI, F. Y., DU, S. F., WANG, Z. H., *et al.* "Dynamics of the Chinese diet and the role of urbanicity, 1991-2011", **Obesity Reviews**, v. 15, n. 0 1, p. 16–26, jan. 2014. DOI: 10.1111/obr.12124. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/obr.12124>. Acesso em: 22 mar. 2023.

ZHANG, G., ZHAO, X., LI, X., *et al.* "Challenges and possibilities for bio-manufacturing cultured meat", **Trends in Food Science & Technology**, v. 97, p. 443–450, 1 mar. 2020. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.01.026. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924224419307897>. Acesso em: 12 maio 2023.

ZIERO, H. D., BERNI, M. D., BULLER, L. S., *et al.* "Foresight for corn-to-ethanol mills in the Southern Brazilian Amazon: Energy, economic and environmental analysis", **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 6, p. 106740, dez. 2021. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106740. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213343721017176>.

ZSCHORNACK, T. **Emissões de Metano e de Óxido Nitroso em Sistemas de Produção de Arroz Irrigado no Sul do Brasil e Potencial de Mitigação por Práticas de Manejo.** 2011. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2011.

ANEXO

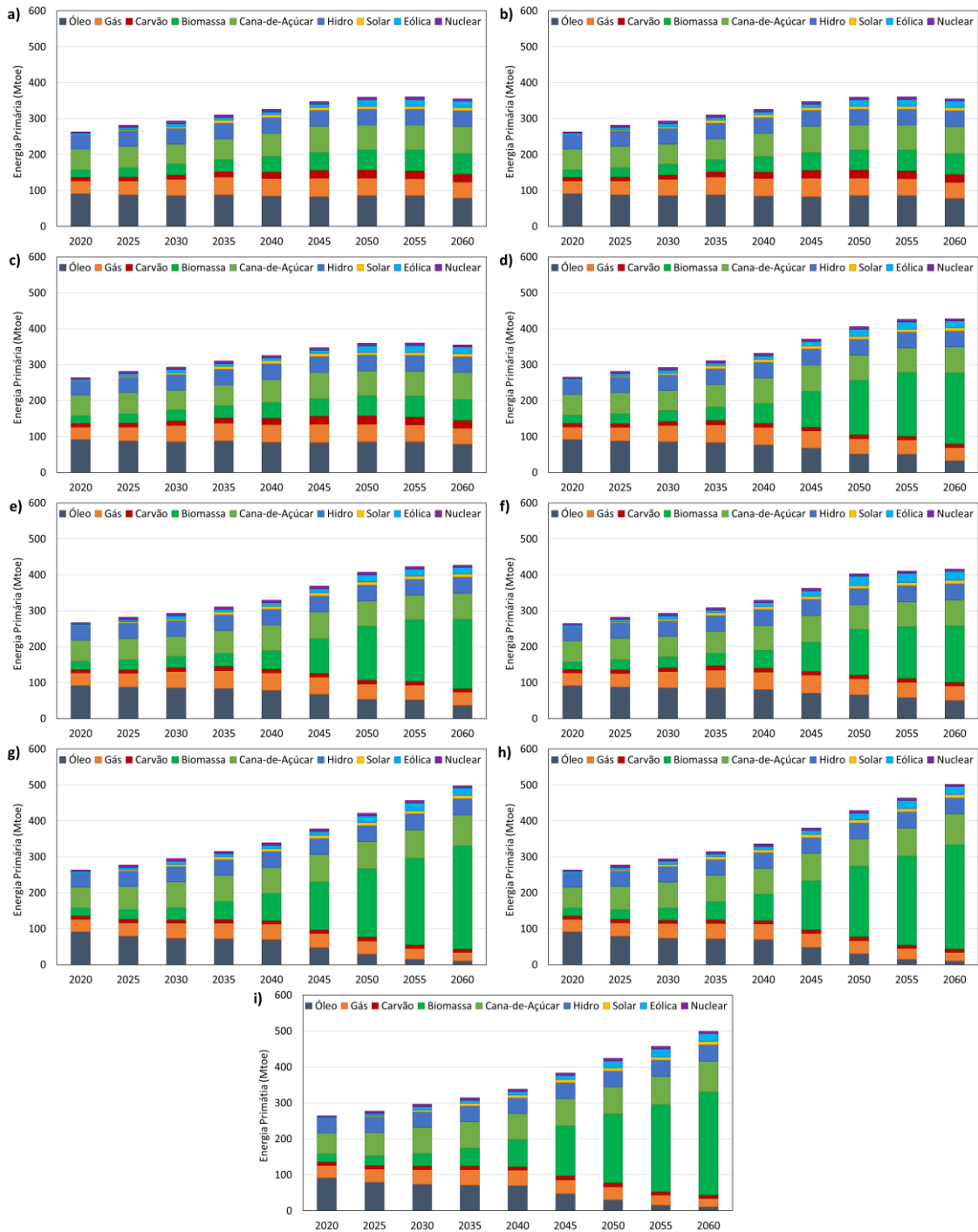


Figura S1: Evolução da energia primária dos cenários analisados entre 2020 e 2060 em Mtoe/ano. a) Cenário BAU; b) Cenário BAU_Agri; c) Cenário BAU_Comp; d) Cenário NDC; e) Cenário NDC_Agri; f) Cenário NDC_Comp; g) Cenário 1.5; h) Cenário 1.5_Agri; i) Cenário 1.5_Comp.

Fonte: Elaboração própria



Figura S2: Evolução da geração elétrica dos cenários analisados entre 2020 e 2060 em TWh/ano. a) Cenário BAU; b) Cenário BAU_Agri; c) Cenário BAU_Comp; d) Cenário NDC; e) Cenário NDC_Agri; f) Cenário NDC_Comp; g) Cenário 1.5; h) Cenário 1.5_Agri; i) Cenário 1.5_Comp.

Fonte: Elaboração própria

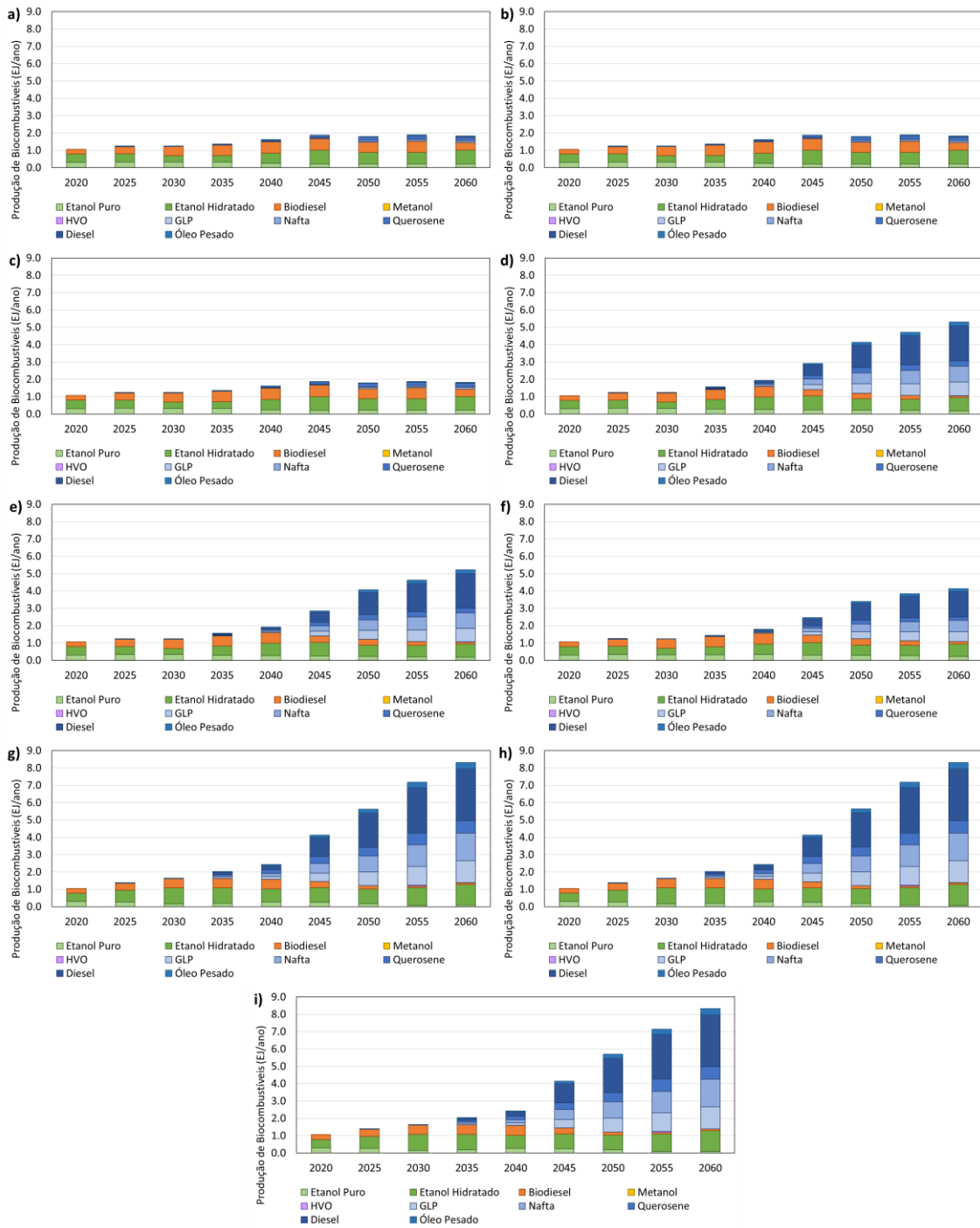


Figura S3: Evolução da produção de biocombustíveis dos cenários analisados entre 2020 e 2060 em EJ/ano. a) Cenário BAU; b) Cenário BAU_Agri; c) Cenário BAU_Comp; d) Cenário NDC; e) Cenário NDC_Agri; f) Cenário NDC_Comp; g) Cenário 1.5; h) Cenário 1.5_Agri; i) Cenário 1.5_Comp.

Fonte: Elaboração própria

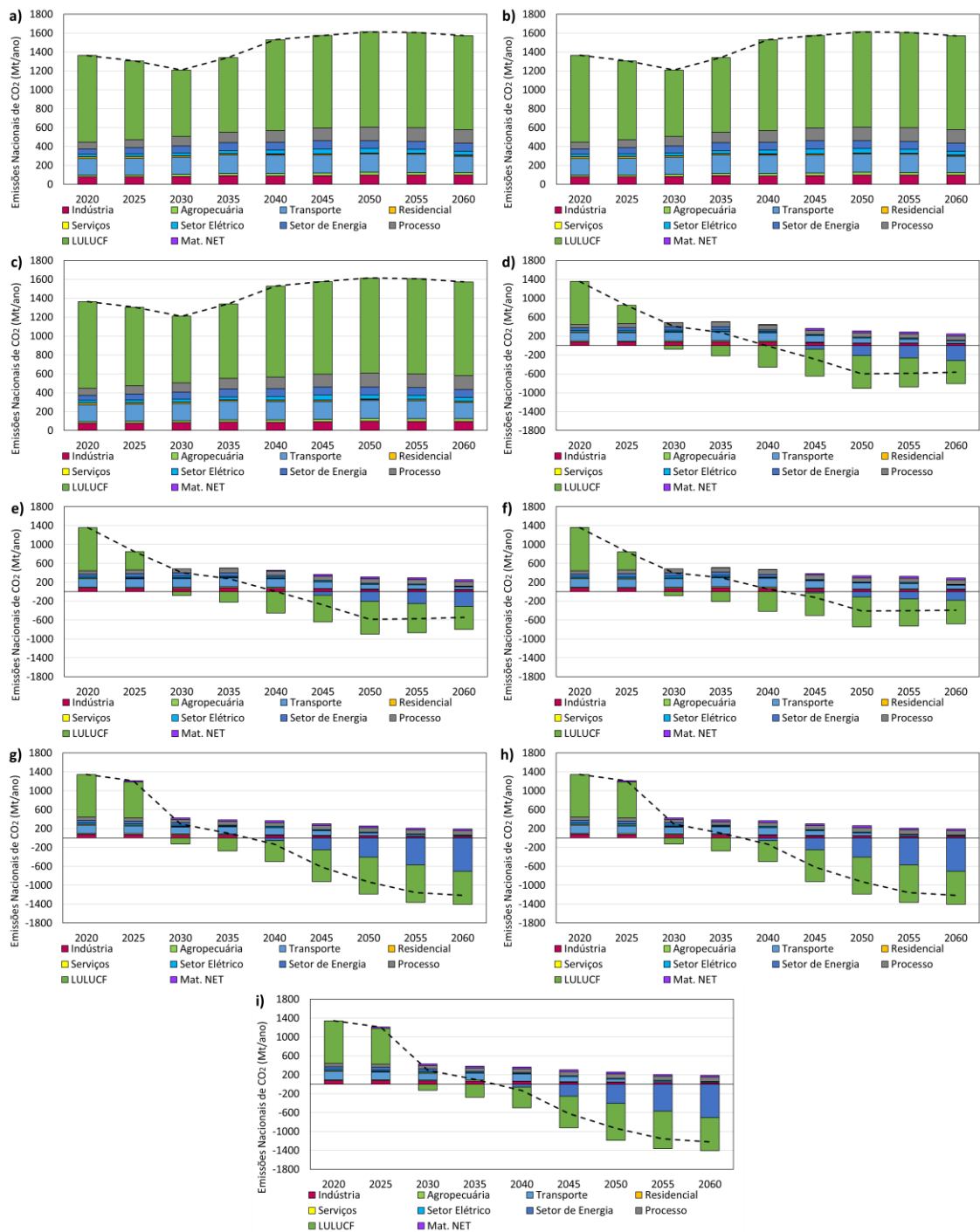


Figura S4: Trajetória das emissões de CO₂ dos cenários analisados entre 2020 e 2060 em MtCO_{2eq}/ano. a) Cenário BAU; b) Cenário BAU_Agri; c) Cenário BAU_Comp; d) Cenário NDC; e) Cenário NDC_Agri; f) Cenário NDC_Comp; g) Cenário 1.5; h) Cenário 1.5_Agri; i) Cenário 1.5_Comp.

Fonte: Elaboração própria



Figura S5: Trajetória das emissões de GEE dos cenários analisados entre 2020 e 2060 em MtCO_{2e}/ano. a) Cenário BAU; b) Cenário BAU_Agri; c) Cenário BAU_Comp; d) Cenário NDC; e) Cenário NDC_Agri; f) Cenário NDC_Comp; g) Cenário 1.5; h) Cenário 1.5_Agri; i) Cenário 1.5_Comp.

Fonte: Elaboração própria

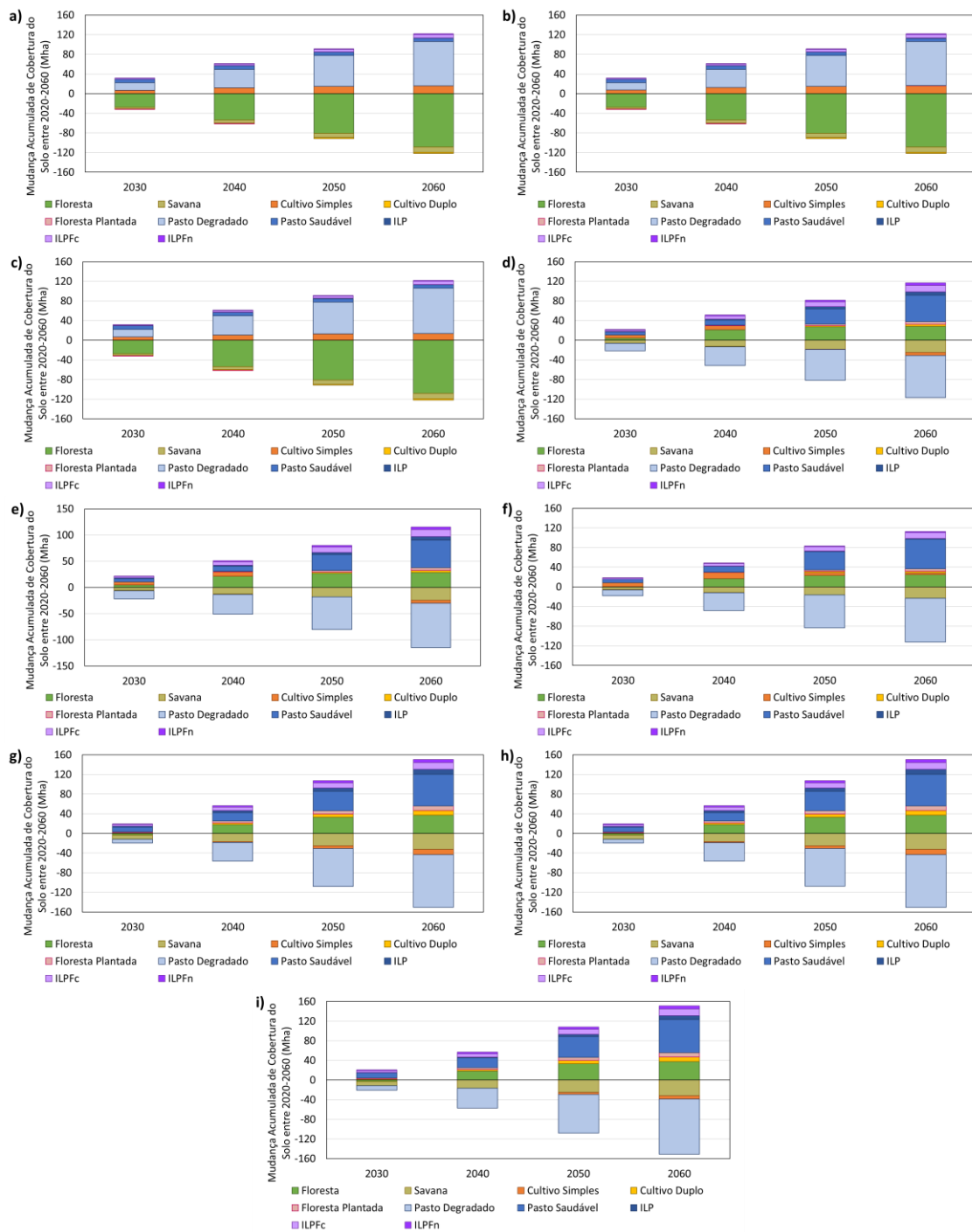


Figura S6: Evolução das mudanças acumuladas de cobertura do solo dos cenários analisados entre 2020 e 2060 em Mha. a) Cenário BAU; b) Cenário BAU_Agri; c) Cenário BAU_Comp; d) Cenário NDC; e) Cenário NDC_Agri; f) Cenário NDC_Comp; g) Cenário 1.5; h) Cenário 1.5_Agri; i) Cenário 1.5_Comp.

Fonte: Elaboração própria

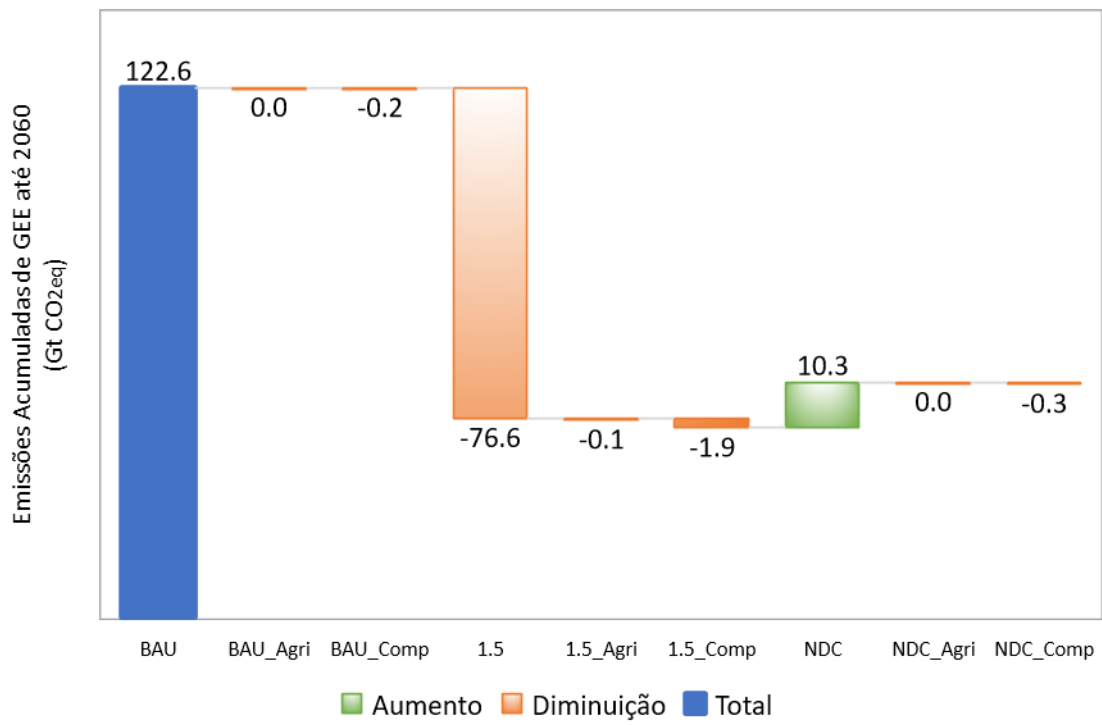


Figura S7: Emissões acumuladas de GEE até 2060 em GtCO₂eq dos cenários desenvolvidos.

Fonte: Elaboração própria