

CIÊNCIA PARA O CLIMA **e soluções da agricultura brasileira**

**Estratégias,
tecnologias
e indicadores
de adaptação
à mudança
climática e
de controle
de emissões
de gases de
efeito estufa
na agricultura
tropical**

Embrapa

Patrocínio Master



Sistema **OCB**
ORGANIZAÇÃO DA CULTURA BRASILEIRA

Parceria Institucional



Apoio Institucional

MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO
AGRÁRIO E
AGRICULTURA FAMILIAR



Patrocínio Diamante



Gates Foundation



A close-up photograph of a hand holding a single wheat stalk. The hand is positioned in the lower-left foreground, with fingers gently gripping the base of the grain. The wheat stalk is light golden-brown, showing the individual grains and the long, thin awns. The background is a soft-focus field of similar wheat stalks, creating a sense of depth and agricultural context. The overall lighting is warm and natural, suggesting a sunny day in a field.

Ciência para o clima e soluções da agricultura brasileira

Estratégias, tecnologias e indicadores de adaptação à mudança climática e de controle de emissões de gases de efeito estufa na agricultura tropical



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Ministério da Agricultura e Pecuária

Ciência para o clima e soluções da agricultura brasileira

Estratégias, tecnologias e
indicadores de adaptação
à mudança climática e
de controle de emissões
de gases de efeito estufa
na agricultura tropical

Embrapa
Brasília, DF
2025

Embrapa

Parque Estação Biológica (PqEB)
Av. W3 Norte (Final)
70770-901 Brasília, DF
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Responsável pela editoração

Gerência-Geral de Governança Corporativa e Informação

Coordenação editorial

Osley Hugo de Borba Brito
Alessandra Rodrigues da Silva
Juliana Meireles Fortaleza

Edição executiva

Cristiane Pereira de Assis

Revisão de texto

Francisca Elijani do Nascimento
Maria Cristina Ramos Jubé

Normalização bibliográfica

Iara Del Fiaco Rocha
Márcia Maria Pereira de Souza
Maria do Socorro Gonçalves de Souza Monzane
Riquelma de Sousa de Jesus

Projeto gráfico, diagramação

Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Capa

Paula Cristina Rodrigues Franco
Jorge Antonio Menna Duarte

Imagem da capa

Ataallaart (Freepik)

Impressão e acabamento

Rona editora

1ª edição

1ª impressão (2025): 2.000 exemplares

Publicação digital (2025): PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa, Gerência-Geral de Governança Corporativa e Informação

Ciência para o clima e soluções da agricultura brasileira : estratégias, tecnologias e indicadores de adaptação à mudança climática e de controle de emissões de gases de efeito estufa na agricultura tropical = Science for climate and solutions from Brazilian agriculture : strategies, technologies and indicators for adaptation to climate change and for greenhouse gas emission control in tropical agriculture / Giampaolo Queiroz Pellegrino ... [et al.], editores técnicos. — Brasília, DF : Embrapa, 2025.
PDF (285 p.) : il. color.

ISBN 978-65-5467-124-8 (digital). – ISBN 978-65-5467-119-4 (impressa)

1. Climatologia. 2. Impacto ambiental. 3. Transferência de tecnologia. 4. Adoção de inovações. I. Título: Science for climate and solutions from Brazilian agriculture : strategies, technologies and indicators for adaptation to climate change and for greenhouse gas emission control in tropical agriculture. II. Pellegrino, Giampaolo Queiroz. III. Mozzer, Gustavo Barbosa. IV. Angelotti, Francislene. V. Macário, Carla Geovana do Nascimento. VI. Zanatta, Josiléia Acordi. VII. Martin-Neto, Lasdislau. VIII. Madari, Beata Eموke. IX. Silva, Mellissa Ananias Soler da. X. Folegatti, Marília Ieda da Silveira. XI. Duarte, Jorge Antonio Menna.

CDD (21. ed.) 551.6

Editores técnicos

Giampaolo Queiroz Pellegrino

Engenheiro florestal, doutor em Água e Solo, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Gustavo Barbosa Mozzer

Biólogo, doutor em Ambiente e Sociedade, pesquisador da Embrapa, Assessoria de Relações Internacionais, Brasília, DF

Francislene Angelotti

Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, pesquisadora da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

Carla Geovana do Nascimento Macário

Tecnóloga em Processamento de Dados, doutora em Ciência da Computação, pesquisadora da Embrapa, Gerência-Adjunta de Gestão da Informação e Planejamento de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação, Brasília, DF

Josiléia Acordi Zanatta

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Ladislau Martin-Neto

Físico, doutor em Física Aplicada, pesquisador da Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP

Beata Eموke Madari

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciências Agrárias, pesquisadora da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO

Mellissa Ananias Soler da Silva

Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, pesquisadora da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO

Marília Ieda da Silveira Folegatti

Zootecnista, doutora em Tecnologia de Alimentos, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

Jorge Antonio Menna Duarte

Jornalista e Relações Públicas, doutor em Comunicação Social, analista da Embrapa, Assessoria de Comunicação, Brasília, DF

Autores

Ademir Fontana

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Alexandre Berndt

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ecologia Aplicada, pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP

Alvaro Augusto Dossa

Administrador, Ph.D. em Administração, analista da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS

Ana Paula Contador Packer

Engenheira-agrônoma, doutora em Química Analítica, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

Anderson Santi

Engenheiro-agrônomo, mestre em Mudanças Climáticas, pesquisador da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS

André Marcelo de Souza

Químico, doutor em Química, analista da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Anna Leticia Montenegro Turtelli Pighinelli

Engenheira agrícola, doutora em Engenharia Agrícola, analista da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

Aryeverton Fortes de Oliveira

Economista, doutor em Economia Aplicada, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Beata Eموke Madari

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciências Agrárias, pesquisadora da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO

Bruno José Rodrigues Alves

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências do Solo, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ

Carla Geovana do Nascimento Macário

Tecnóloga em Processamento de Dados, doutora em Ciência da Computação, pesquisadora da Embrapa, Gerência-Adjunta de Gestão da Informação e Planejamento de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação, Brasília, DF

Carlos Eduardo Pacheco Lima

Engenheiro ambiental, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Hortaliças, Brasília, DF

Carlos Manoel Pedro Vaz

Físico, doutor em Ciências, pesquisador da Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos, SP

Celso Vainer Manzatto

Engenheiro-agrônomo, doutor em Produção Vegetal, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

Claudia Pozzi Jantalia

Engenheira-agrônoma, doutora em Fitotecnia, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Daniel de Castro Victoria

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Danilton Luiz Flumignan

Engenheiro-agrônomo, doutor em Irrigação e Drenagem, pesquisador da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, MS

Debora Pignatari Drucker

Engenheira florestal, doutora em Ambiente e Sociedade, analista da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Débora Marcondes Bastos Pereira Milori

Física, doutora em Física Aplicada, pesquisadora da Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP

Etelvino Henrique Novotny

Engenheiro-agrônomo, doutor em Físico-Química, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Fábia de Mello Pereira

Engenheira-agrônoma, doutora em Zootecnia, pesquisadora da Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI

Francislene Angelotti

Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, pesquisadora da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

Giampaolo Queiroz Pellegrino

Engenheiro florestal, doutor em Água e Solo, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Gustavo Barbosa Mozzer

Biólogo, doutor em Ambiente e Sociedade, pesquisador da Embrapa, Assessoria de Relações Internacionais, Brasília, DF

Gustavo de Mattos Vasques

Engenheiro florestal, Ph.D. em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Jorge Antonio Menna Duarte

Jornalista e Relações Públicas, doutor em Comunicação Social, analista da Embrapa, Assessoria de Comunicação, Brasília, DF

José Ricardo Macedo Pezzopane

Engenheiro-agrônomo, doutor em Física do Ambiente Agrícola, pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP

Josiléia Acordi Zanatta

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Ladislau Araújo Skorupa

Engenheiro florestal, doutor em Ciências Biológicas, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

Ladislau Martin-Neto

Físico, doutor em Física Aplicada, pesquisador da Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP

Luis Gustavo Barioni

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência Animal e Pastagens, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Livia Pereira Junqueira

Engenheira-agrônoma, doutora em Produção Sustentável, analista da Embrapa, Gerência-Geral de Inovação, Negócios e Transferência de Tecnologia, Brasília, DF

Marcos Cezar Visoli

Cientista da Computação, mestre em Informática e Sistemas, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Marcos Cláudio Pinheiro Rogério

Médico-veterinário, doutor em Ciência Animal, pesquisador da Embrapa Caprinos e Ovinos, Sobral, CE

Margareth Gonçalves Simões

Engenheira, doutora em Geografia, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Maria Cléa Brito de Figueirêdo

Analista de sistemas, doutora em Engenharia Civil – Saneamento Ambiental, pesquisadora da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE

Marília Ieda da Silveira Folegatti

Zootecnista, doutora em Tecnologia de Alimentos, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

Márcia Thaís de Melo Carvalho

Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, pesquisadora da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO

Nilza Patrícia Ramos

Engenheira-agrônoma, doutora em Produção Vegetal, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

Patrícia Perondi Anchão Oliveira

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciências, pesquisadora da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP

Priscila Brochado Gomes

Bióloga, doutora em Ciências, analista da Embrapa, Gerência-Geral de Inovação, Negócios e Transferência de Tecnologia, Brasília, DF

Renan Milagres Lage Novaes

Biólogo, especialista em Gestão de Projetos, analista da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

Roberto Giolo de Almeida

Engenheiro-agrônomo, doutor em Zootecnia, pesquisador da Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS

Rubens Sonsol Gondim

Engenheiro-agrônomo, doutor em Recursos Hídricos, pesquisador da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE

Silvio Barge Bhering

Engenheiro-agrônomo, doutor em Geografia, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Vanderlise Giongo

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS

Vanessa Romário de Paula

Administradora de empresas, mestre em Ambiente Construído, analista da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG

Vinicius de Melo Benites

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Wagner Bettiol

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitopatologia, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

Walkyria Bueno Scivittaro

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciências, pesquisadora da Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS

Wilson Anderson Holler

Engenheiro cartógrafo, mestre em Desenvolvimento de Tecnologia, analista da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Apresentação

A humanidade vive uma ameaça climática que a desafia a rever seus modelos de desenvolvimento, sistemas produtivos e formas de ocupação dos territórios. A agricultura está no centro desse desafio: é uma das atividades mais vulneráveis aos impactos do clima e, ao mesmo tempo, uma das mais decisivas para a construção de soluções sustentáveis, inclusivas e eficazes para a segurança alimentar nacional e global.

Este livro, lançado pelo Governo do Brasil durante a *COP30* — que o país tem a honra de sediar em 2025 —, representa uma contribuição direta da pesquisa agropecuária brasileira ao enfrentamento da mudança climática. Resultado do trabalho coletivo de pesquisadores da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e de instituições parceiras de todo o Brasil, organiza, de forma sistematizada e acessível, um conjunto robusto de soluções, tecnologias, evidências e métricas capazes de apoiar uma transição efetiva para sistemas agroalimentares mais resilientes e de baixa emissão de carbono.

Trata-se aqui de temas prioritários para a adaptação e a mitigação na agricultura, com foco nas especificidades da produção tropical e subtropical. O conteúdo explora desde a coleta e organização de dados em campo, o desenvolvimento de protocolos e modelos nacionais, até aplicações práticas para a quantificação de emissões e remoções de gases de efeito estufa e para adaptação dos sistemas agrícolas. Também propõe caminhos para avanços, com base em lacunas e em experiências de sucesso já implementadas.

Com presença em todas as regiões do país, a agricultura brasileira se destaca por sua diversidade, qualidade e capacidade de produção de alimentos, tanto em sistemas de produção familiar como em produção em larga escala. Com natural dependência de condições climáticas, ela é simultaneamente vulnerável e protagonista, com papel decisivo na agenda climática e alimentar global. O livro mostra que já dispomos de soluções eficazes para reduzir emissões, conservar biomas, recuperar áreas degradadas e aumentar a eficiência produtiva e adaptar nossos sistemas às novas condições climáticas. Tecnologias como a integração lavoura-pecuária-floresta,

Foto: Saulo Coelho (Embrapa)





Foto: Ottiki / Adobe Stock

a fixação biológica de nitrogênio, o uso de bioinsumos, a agricultura de precisão e os sistemas agroecológicos estão entre as alternativas detalhadas nesta obra.

Esse conhecimento extrapola os limites da produção nacional e fortalece o que se convencionou chamar de diplomacia climática. Ao subsidiar os inventários nacionais de emissões, apoiar o cumprimento das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) e embasar a posição brasileira nas negociações internacionais sobre agricultura no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), a Embrapa se fortalece como referência estratégica em ciência tropical. Em cinco décadas, liderando um robusto sistema de inovação agropecuária, a Embrapa contribuiu decisivamente para transformar o Brasil de importador de alimentos em potência global na produção agroalimentar. Sua atuação tem sido decisiva na adaptação de metodologias internacionais à realidade tropical, na correção de distorções nos modelos globais de mensuração e na geração de informações baseadas em evidências e voltadas à busca de consensos em justiça climática.

Nas páginas seguintes, há, também, uma visão de país. O Brasil defende que a transição climática deve ser baseada em justiça, cooperação internacional e reconhecimento das contribuições positivas das agriculturas do Sul Global. A experiência brasileira, com seus sistemas produtivos integrados, sua ciência pública robusta e o protagonismo dos agricultores, demonstra que é possível aumentar a produtividade com menos impacto ambiental e maior segurança alimentar. Essa contribuição ganha ainda mais relevância diante dos alarmantes dados globais sobre insegurança alimentar: em 2024, mais de 295 milhões de pessoas em 53 países enfrentaram níveis agudos de fome, um aumento de quase 14 milhões em relação a 2023¹.

Além de reunir soluções já adotáveis, a presente publicação busca influenciar políticas públicas e contribuir com os compromissos internacionais assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris e nos fóruns da *Conferência das Partes*. A ciência brasileira tem desempenhado papel essencial na tropicalização de metodologias, no avanço de métricas mais justas e na construção de uma diplomacia científica respeitada globalmente. Trata-se de uma obra com valor técnico, estratégico e di-

¹ 2025 GLOBAL report on food crises: joint analysis for better decisions. Rome, 2025. Disponível em: <https://www.fsplatform.org/report/global-report-food-crises-2025>. Acesso em: 30 set. 2025.



plomático, que busca ampliar a adoção de práticas sustentáveis e dar visibilidade ao protagonismo da agricultura tropical no enfrentamento da mudança climática.

A realidade do planeta evidencia a urgência de ações coordenadas que integrem segurança alimentar e ação climática. As soluções fundamentadas em ciência tropical são exemplos de como o conhecimento pode gerar impacto social, ambiental e econômico em escala. Ao propor sistemas produtivos mais adaptados à mudança do clima, sustentados por métricas robustas e tecnologias já disponíveis, o Brasil demonstra que é possível produzir mais e melhor, reduzindo emissões, conservando recursos naturais e garantindo acesso a alimentos. Nesse sentido, a pesquisa agropecuária e os agricultores brasileiros não apenas reagem aos desafios globais, mas também lideram uma resposta inovadora e solidária à emergência climática e à fome.

Esses são dois temas de relevância global, e são o foco de pelo menos dois dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) constantes da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, da Organização das Nações Unidas (ONU), que estimula ações em áreas cruciais para a humanidade, sejam elas, pessoas, planeta, prosperidade, paz e parcerias. Especificamente nesses temas, este livro oferece contribuições relevantes para o cumprimento do “ODS13 - Tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos” e do “ODS02 - Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável”. Contribui ainda para o “ODS12 - Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis”.

OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL



Esta obra destina-se a cientistas, tomadores de decisão, produtores rurais, negociadores, organismos internacionais e todos os interessados em compreender como a agricultura pode ser parte da solução climática. Apresenta não apenas tecnologias, mas também estratégias de política pública, experiências de território, modelos de cooperação e caminhos para o futuro.

Ao apresentar este livro, reafirmamos o compromisso do Brasil com uma agricultura regenerativa, inovadora e baseada em evidências científicas. Que esta publicação contribua para fortalecer alianças, compartilhar soluções e acelerar a transformação necessária para um futuro mais justo, seguro e sustentável num ambiente cada vez mais desafiador.

Carlos Henrique Baqueta Fávaro
Ministro da Agricultura e Pecuária

Silvia Maria Fonseca Silveira Massruhá
Presidente da Embrapa



Prefácio

Este livro reflete décadas de dedicação da pesquisa agropecuária brasileira, em um esforço liderado pela Embrapa para compreender e enfrentar os impactos da mudança climática na agricultura. Trata-se de um registro do conhecimento construído e das soluções desenvolvidas para sustentar a produção de alimentos e a preservação ambiental.

Para além do aumento da produtividade das lavouras, do desempenho animal e do crescimento das florestas plantadas, o Brasil superou os imensos desafios dos trópicos e consolidou-se como referência global em agricultura. Com base em contribuições inéditas da pesquisa agropecuária e na ampla incorporação de práticas conservacionistas, o País viabilizou uma verdadeira “segunda safra” para o mundo.

De uma situação de insegurança alimentar na década de 1970, o Brasil alcançou, em 2025, a marca de 330 milhões de toneladas de grãos, garantindo segurança alimentar para seus mais de 210 milhões de habitantes. Além disso, tornou-se o segundo maior exportador de alimentos do planeta, contribuindo de forma decisiva para a segurança alimentar global.

A prática conservacionista do plantio direto é adotada em mais de 40 milhões de hectares de grãos. Em área semelhante, aplica-se a fixação biológica de nitrogênio em leguminosas, por meio da inoculação de sementes com bactérias do gênero *Rhizobium* — técnica que, no caso da soja, principal grão produzido no País, assegura produtividade com menor dependência de insumos químicos.

Além de aumentar a produtividade e reduzir custos de produção, os dois exemplos geram impactos econômicos expressivos. O plantio direto contribui para o aumento

do estoque de carbono orgânico no solo; já a fixação biológica de nitrogênio, ao substituir fertilizantes sintéticos, reduz emissões de óxido nitroso e contribui para a remoção de gás carbônico da atmosfera. São práticas emblemáticas que traduzem a força da ciência no desenvolvimento de uma agricultura sustentável — foco principal deste livro — e altamente relevantes no contexto da *COP30*, a ser realizada no Brasil.



Procurou-se, nesta obra, adotar uma linguagem clara e objetiva, acessível a um público amplo — nacional e internacional — interessado na relação entre agricultura e mudança climática e nas soluções de inovação com bases científicas, mesmo que não seja especializado no tema ou na realidade brasileira.

Para isso, o livro foi estruturado de modo a oferecer, em seu primeiro capítulo, uma visão geral: dos princípios físicos que explicam o aquecimento global e sua conexão com a agricultura, ao percurso das negociações internacionais em busca de soluções, até como a Embrapa e seus parceiros se organizaram para oferecer respostas ao setor e enfrentar os principais desafios. Esse capítulo prepara o terreno para os demais, que aprofundam aspectos específicos no contexto da ciência para o clima e das soluções da agricultura brasileira, abordando estratégias, tecnologias e métricas de adaptação à mudança climática e de controle de emissões.

Todos os capítulos seguintes possuem uma estrutura padronizada em quatro partes: introdução ao tema, panorama atual, soluções de inovação e perspectivas futuras. Essa organização estabelece uma linha temporal de passado, presente e futuro, evidenciando como a ciência tem contribuído para a evolução de cada tema, bem como as oportunidades e os desafios que ainda se apresentam.

Optou-se por organizar os capítulos a partir de tipos de ferramentas ou enfoques, de modo a agrupar as soluções. São eles:

- Monitoramento de risco, adaptação e sustentabilidade da agricultura nacional.
- Gestão da informação: bases de dados, funcionalidades e métricas sobre o balanço de carbono em sistemas agrícolas.
- Técnicas e instrumental acessíveis e escaláveis para o monitoramento de dados de campo relativos a carbono e gases de efeito estufa.



Foto: jcomp (freepik)

- Balanço de carbono dos principais sistemas agrícolas nacionais, protocolos e representações.
- Contabilidade de carbono e avaliação do ciclo de vida de produtos agropecuários brasileiros.
- Monitoramento e inventário agrícola no Acordo de Paris: desafios em médio e longo prazo

Com esse propósito, e graças a um esforço coordenado do Comitê Permanente sobre Dinâmica de Carbono, Gases de Efeito Estufa e Adaptação na Agricultura, em articulação com a Assessoria de Comunicação, e com o respaldo do Comitê Gestor do Portfólio Clima, Recursos Naturais e Transformação Ecológica, todos da Embrapa, foi possível concretizar essa iniciativa.

O trabalho nasceu de uma demanda da Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento, conduzida pelo diretor Clênio Nailto Pillon, e contou com o engajamento de toda a diretoria da Embrapa, sob a liderança da presidente Silvia Massruhá. O resultado é a reunião de contribuições relevantes, agora disponíveis para serem conhecidas, adaptadas e incorporadas tanto no Brasil quanto em outros países, de acordo com suas circunstâncias e necessidades nacionais.

Espera-se, com esta obra, contribuir para o entendimento da relação da agricultura brasileira com a mudança do clima, bem como para a criação de capacidades e a transferência de tecnologia para os sistemas agrícolas brasileiros e para outros países que considerem viável sua adaptação e adoção.

Desejamos uma frutífera leitura a todos!

Os Editores Técnicos





Sumário

- 17 **CAPÍTULO 1**
Mudança climática e agricultura:
recursos naturais, geopolítica e ciência
- 49 **CAPÍTULO 2**
Monitoramento de risco, adaptação e
sustentabilidade da agricultura nacional
- 83 **CAPÍTULO 3**
Gestão da informação: bases de dados,
funcionalidades e métricas sobre o balanço
de carbono em sistemas agrícolas
- 115 **CAPÍTULO 4**
Técnicas e instrumental acessíveis e escaláveis
para monitoramento de dados de campo
relativos a carbono e gases de efeito estufa
- 153 **CAPÍTULO 5**
Balanço de carbono dos principais sistemas
agrícolas nacionais, protocolos e representações
- 205 **CAPÍTULO 6**
Contabilidade de carbono e avaliação de ciclo
de vida de produtos agropecuários brasileiros
- 241 **CAPÍTULO 7**
Monitoramento e inventário agrícola no
Acordo de Paris: desafios em médio e longo prazo



CAPÍTULO 1

Mudança climática e agricultura

Recursos naturais, geopolítica e ciência

Giampaolo Queiroz Pellegrino – Gustavo Barbosa Mozzer – Priscila Brochado Gomes – Livia Pereira Junqueira – Francislene Angelotti – Jorge Antonio Menna Duarte

Mudança climática e o modelo de desenvolvimento

“Tudo começou numa grande bola de fogo [...]”. Assim se referia, em tom de brincadeira, uma amiga pesquisadora já aposentada, a todo palestrante ou autor que insistia em explicar seu tema partindo do início do universo ou de um passado muito remoto, demorando a chegar ao ponto central. Peço licença a ela — e também aos mais familiarizados com o assunto —, pois é importante compreender a origem do aquecimento global e da mudança climática. Por isso, começa-se aqui a partir de uma “grande bola de fogo”: o Sol, a principal fonte de energia para praticamente tudo o que acontece na Terra (Figura 1.1).

A energia natural que nos mantém aquecidos

Essa energia do Sol, transmitida na forma de ondas curtas, alcança o topo da atmosfera terrestre, a cerca de mil quilômetros de altitude. Uma parte significativa dessa radiação já é refletida pelos gases das camadas superiores da atmosfera e continua sendo refletida e absorvida pelas diferentes camadas, ao longo de sua trajetória, até chegar à superfície da Terra. Ao longo desse caminho, a concentração de gases na atmosfera vai aumentando até a última camada, chamada troposfera. A troposfera se estende da superfície até cerca de 12 km de altitude (Figura 1.2) e é nela que se encontra a maior concentração de gases, chegando a mais de 80% da quantidade de gases da atmosfera toda. E é nela também que ocorrem praticamente todos os fenômenos meteorológicos.

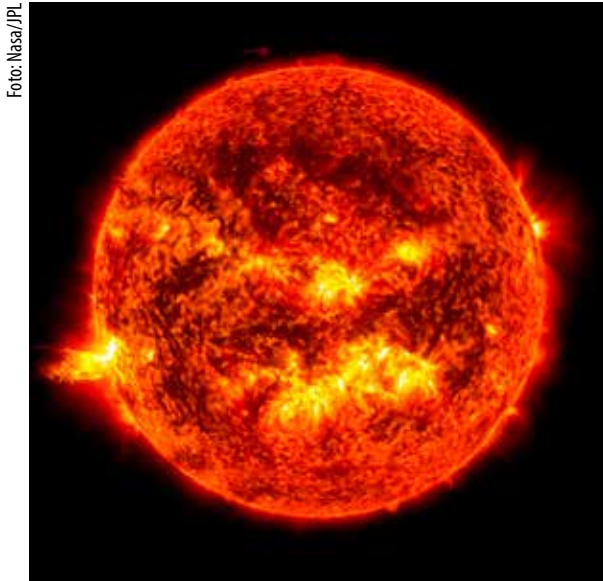


Figura 1.1. Uma “grande bola de fogo”: o Sol, a principal fonte de energia para praticamente tudo o que acontece na Terra.

Para compreender o aquecimento global, é importante destacar que é a energia absorvida pelos gases da atmosfera que a faz se aquecer. Além disso, a proporção dessa energia que é refletida, absorvida ou transmitida na forma de luz solar ao longo das camadas atmosféricas depende tanto do comprimento de onda da radiação quanto do tamanho e da estrutura das moléculas dos gases com os quais ela interage.

Voltando à luz do Sol, ela chega à superfície da Terra na forma de onda curta. Ao ser absorvida pela Terra, aquece-a e é retransmitida para a atmosfera na forma de onda longa. Porém, quando retorna nessa nova forma, a energia interage de forma diferente com os mesmos gases da troposfera que antes permitiram sua passagem como onda curta. Essa energia irradiada pela Terra é parcialmente absorvida por esses gases,

provocando um aquecimento natural dessa camada próxima à superfície, onde vivemos. Sem esse aquecimento, estima-se que a temperatura média da superfície da Terra seria em torno de 15 °C mais baixa.

Por se assemelhar ao que ocorre em uma estufa, onde o vidro permite a entrada da luz do Sol, mas retém parte do calor irradiado pela superfície aquecida, criando condições favoráveis ao desenvolvimento das plantas, esse fenômeno natural é conhecido como efeito estufa. As Figuras 1.3 e 1.4 apresentam, respectivamente, a interação da radiação solar com a atmosfera e o comportamento dessa radiação no interior de uma estufa de vidro.

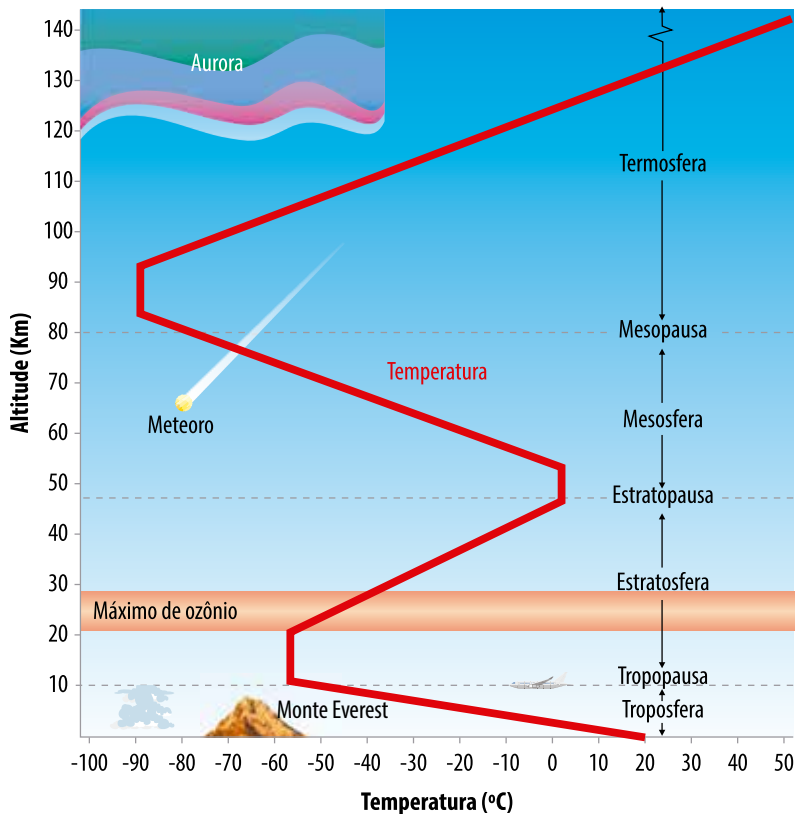


Figura 1.2. Camadas da atmosfera e comportamento da temperatura em função da interação da radiação solar com os gases que a compõem.

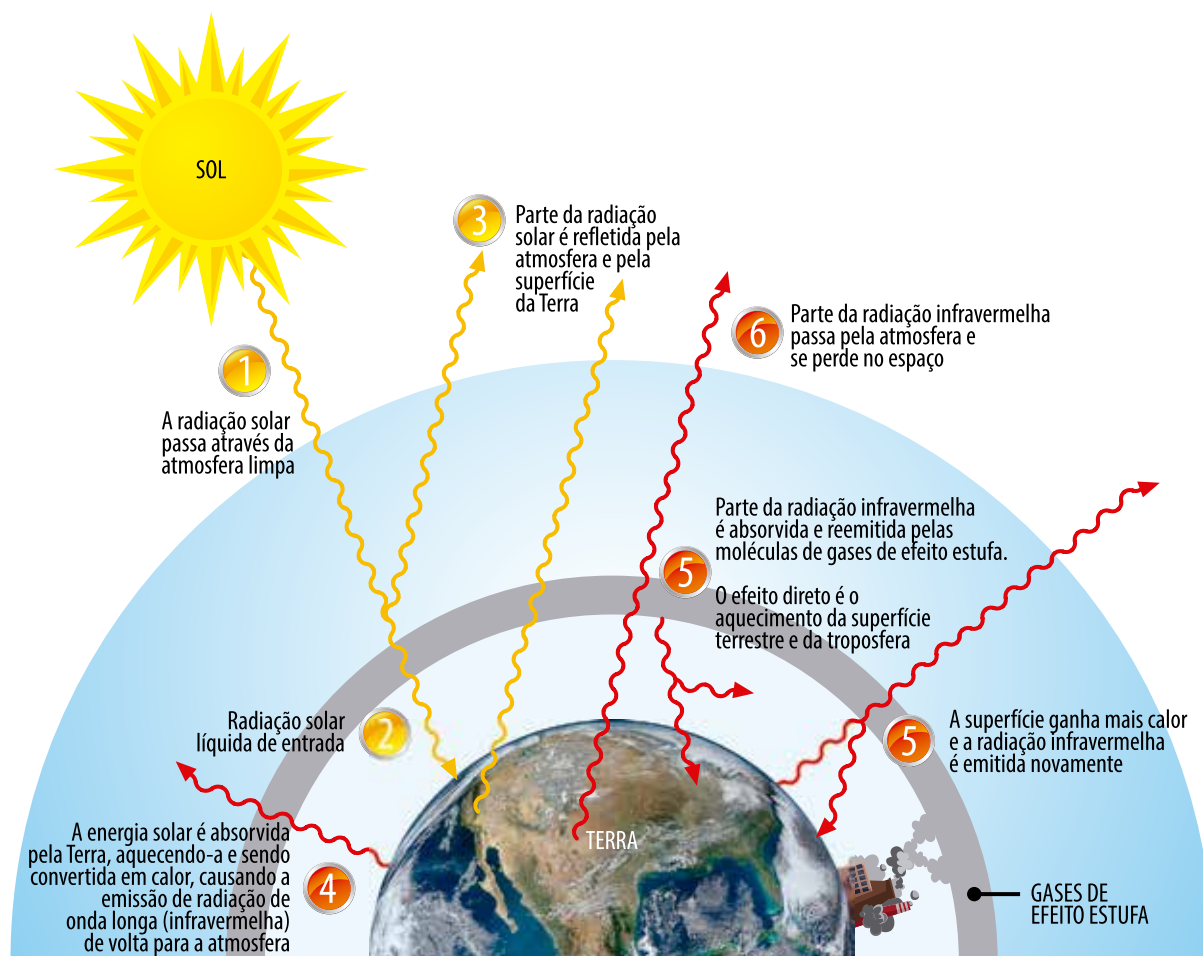


Figura 1.3. Interação da radiação solar com a atmosfera e o efeito estufa natural.

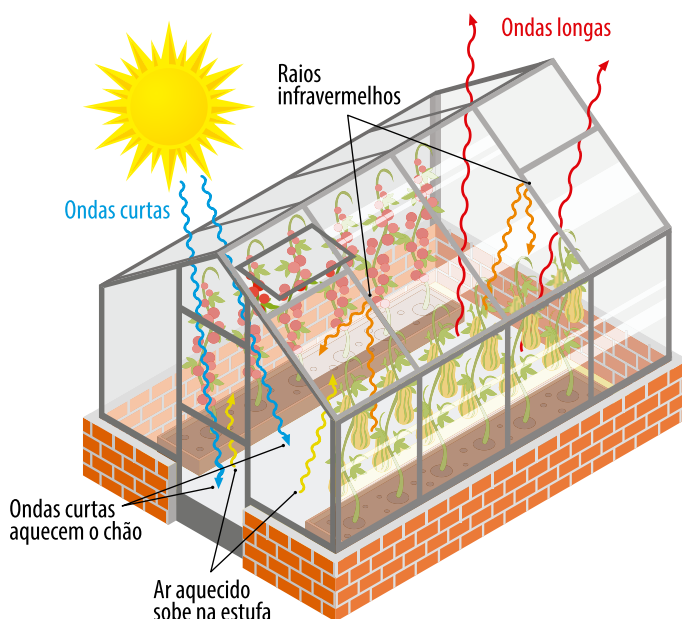


Figura 1.4. Interação da radiação e aquecimento interno de uma estufa de vidro.

A humanidade seria capaz de alterar um processo natural global?

Até muito recentemente, pouco se imaginava que a ação humana pudesse interferir em grandes fenômenos naturais. O modelo de desenvolvimento econômico e social vigente considerava os recursos naturais como infinitos e acreditava ser possível usá-los quase indiscriminadamente, sem grandes impactos, muito menos globais. Porém, a partir da Revolução Industrial e da descoberta de fontes fósseis de energia, como o carvão mineral, o gás natural e o petróleo, esse panorama começou a mudar profundamente.

Esses hidrocarbonetos combustíveis haviam sido gerados a partir de matéria orgânica estocada geologicamente, soterrada a altas pressões e temperaturas em eras passadas até que as placas tectônicas se acomodassem e estabelecessem os continentes e oceanos com seus relevos, como se conhece hoje. Eles já não faziam parte e não influenciavam esse ciclo de energia da superfície da Terra. Mas sua descoberta e uso, ao mesmo tempo em que permitiram a Revolução Industrial e o rápido desenvolvimento tecnológico que se alcançou até hoje, passou a lançar gases derivados desses hidrocarbonetos na atmosfera, aumentando a sua concentração. E, na interação da onda longa com esses gases em maior concentração, aumenta significativamente a absorção da energia irradiada, provocando um aumento na temperatura média da superfície da Terra, ou seja, o aquecimento global. Por isso, esses gases são conhecidos como gases de efeito estufa (GEE) e o aquecimento que provocam é resultado direto da ação humana e do modelo de desenvolvimento baseado no uso intensivo de energia fóssil. Portanto, como concluem os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC, 2014, 2023), esse aquecimento global é antropogênico, pois é majoritariamente provocado por gases gerados pela ação humana, provocando mudança no padrão climático normal, a mudança climática.

O clima mudou! E agora?

Fica claro, portanto, o nexos ou conexão da mudança climática com os modelos de desenvolvimento e como se vive em sociedade e se geram produtos e serviços nos diversos setores da economia global. É de vital importância, que se compreenda quais são os efeitos que esses modelos causam sobre o clima, como contribuem para o aquecimento global, quais gases emitem e quanto, quais as formas viáveis de retirada desses gases da atmosfera via processos naturais ou não. E, por consequência, é essencial identificar ou desenvolver formas de entender o impacto da mudança do clima sobre os ambientes naturais e sobre a vida no planeta, inclusive a humana, e de estar adaptado ao que não for possível mitigar do aquecimento global.

Embora seja um fenômeno de larga escala espacial e temporal, que só é perceptível como mudança do clima, ou seja, ao longo de décadas ou mesmo de um século, seus impactos foram se tornando cada vez mais presentes, se avolumando e intensificando, aumentando sua frequência (IPCC, 2023), a ponto de se passar a referir a ele, não mais como mudança climática, mas sim como crise climática ou urgência climática. Esses termos “clima” ou “climática” se referem ao comportamento normal dos fenômenos que ocorrem na troposfera, os fenômenos meteorológicos, comportamento este que se observa e se define ao longo de décadas em torno de um ciclo médio de temperaturas mensais e anuais, que se repetem considerando-se sua variabilidade normal. Quando esse ciclo médio de longo prazo se altera é o que se chama de mudança climática, termo de uso preferido neste livro.

Os termos “crise” e “urgência” são antagônicos em sua origem (etimologia) ao termo “climática”. Apesar desse antagonismo etimológico, o significado usado nos tempos atuais, semântico, é de necessidade de ação rápida. Dada a dificuldade de mudar nossos modelos de desenvolvimento, isto é, a inércia do comportamento da sociedade e da economia, o problema se agravou a tal ponto de se

tornar urgente. Isso quer dizer que não há muito mais tempo para se tomar decisões e implementar ações para evitar o agravamento do aquecimento global de forma a minimizar seus impactos sobre os diversos setores – o que se chama de mitigação – e, ao mesmo tempo, reduzir a vulnerabilidade e a exposição dos sistemas produtivos, frente ao que não será possível evitar – o que se chama de adaptação. A Figura 1.5 mostra a vulnerabilidade, a exposição e o perigo como fatores que determinam o risco e o impacto associado à mudança climática. Ela também apresenta a relação entre esses fatores e o modelo e os processos socioeconômicos, as emissões de GEE, a governança dessas dinâmicas e as ações de adaptação e mitigação capazes de reduzir riscos e impactos.

Como a agricultura se relaciona com tudo isso?

Além dos setores como a indústria e o transporte, claramente vinculados ao uso primário e primor-

dial do carvão mineral, do gás natural e do petróleo, a agricultura¹ – pelo uso de insumos derivados dessas fontes de origem fóssil, pela conversão de áreas naturais em área agricultáveis e a consequente perda de biodiversidade, pelo manejo do solo e dos rebanhos e outras atividades intrínsecas aos modelos de produção –, em maior ou menor grau, também contribui para o aquecimento global e a mudança climática. Por outro lado, por ser o setor mais vinculado ao ambiente natural e dependente dele, é diretamente afetado ou impactado pela mudança climática. Além disso, por possuir nexo com os demais setores da economia, esse impacto se reflete tanto na produção de alimentos, e sua própria vinculação com o bem-estar, qualidade de vida e saúde da população, como na produção de fibras e energia, usadas diretamente ou como insumo para processos industriais.

Obviamente, além dos nexos da agricultura e da produção de alimento com esses e outros setores, há a relação com os outros países, demandas por

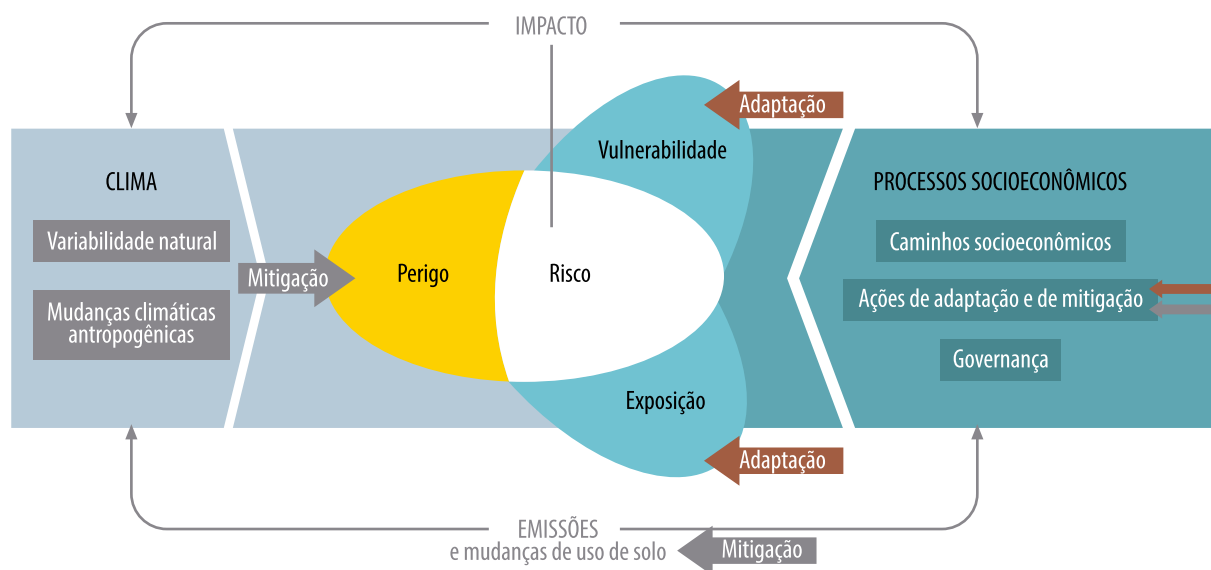


Figura 1.5. Incidência dos esforços de mitigação e adaptação à mudança do clima — Componentes do risco e a necessidade de ações de adaptação e mitigação de acordo com os caminhos socioeconômicos ou modelos de desenvolvimento adotados.

¹ Considerada aqui no seu sentido amplo e relativo às atividades produtivas no ecossistema rural, sejam elas, para a produção de culturas vegetais/agrícolas propriamente ditas, para a pecuária ou produção de animais, para a silvicultura ou produção florestal e suas integrações em sistemas mais complexos.

alimentos e outros produtos, concorrências de produtos comerciais e a negociação em âmbito global de seus múltiplos interesses, muitas vezes conflitantes, o que dificulta que se avance na solução do problema.

Mas, antes de analisar o contexto geopolítico, é importante voltar a atenção ao processo que acontece com as culturas agrícolas, florestais e animais ou mesmo com o ambiente de produção e com o meio natural. Esse enfoque é fundamental para compreender o que será tratado, ainda neste capítulo e nos demais, sobre as ações de adaptação e mitigação propriamente ditas e sobre a negociação de seu regramento internacional.

Sendo assim, cabe ainda analisar como se dá esse impacto da mudança do clima ao qual a agricultura deve se adaptar. O próprio aumento da temperatura pode provocar alterações fisiológicas da planta e dos animais, afetando diretamente os processos pelos quais absorvem nutrientes, crescem, se reproduzem e geram frutos e sementes, e, em última instância, completam seu ciclo de vida. Para a planta, por exemplo, esse aumento pode fazer com que ela passe a crescer menos ou deixar de produzir ou abortar flores e frutos pelo fato de a faixa entre a temperatura mínima e máxima do dia estar fora dos limites ótimos para o seu desenvolvimento. Animais podem ter problemas de conforto térmico e passarem a se alimentar mal, perder peso, abortar, por exemplo.

O aumento da temperatura também aumenta a demanda de água pelas plantas e animais, além de aumentar a evaporação da água das superfícies das plantas e do solo, fenômeno que, em conjunto com a transpiração, é chamado de evapotranspiração. E ao mesmo tempo em que o aquecimento da atmosfera aumenta a demanda de água do solo para realizar a evapotranspiração, para várias regiões do planeta e para a maioria das regiões brasileiras também se projetam cenários de redução da precipitação, ou sua concentração em períodos menores, reduzindo a disponibilidade hídrica. Como numa conta de banco onde

se gasta mais do que se recebe, o balanço hídrico fica negativo, ocorrendo o déficit hídrico. Assim, não há água suficiente para que a planta satisfaça suas necessidades para crescer e produzir adequadamente.

Fica evidente, portanto, o risco de se caracterizar um cenário de escassez hídrica, com reflexos graves de redução ou até quebras de safras inteiras no âmbito da propriedade ou mesmo regional. Isso sem considerar o aumento da frequência de eventos extremos como tempestades, granizo, ondas de calor, secas prolongadas, como os que ocorreram em 2024 no estado do Rio Grande do Sul, com a inundação e perdas em boa parte do estado, ou no Centro-Oeste, com o prolongamento do período de secas com atrasos nos plantios e redução de safras.

Adaptação e mitigação da agricultura

Na agricultura, a solução para esses problemas relacionados aos estresses provocados pelo aumento da temperatura e menor disponibilidade de água para o desenvolvimento da planta e dos animais passa pelo melhoramento genético e desenvolvimento de cultivares resistentes e ou tolerantes. O avanço tecnológico na agricultura também tem possibilitado a adoção de práticas de manejo mais eficientes, aliadas ao uso de insumos adaptados a condições adversas, o que ajuda a atenuar, em certa medida, os impactos das mudanças climáticas.

Podem-se usar técnicas de cobertura vegetal, com palhada ou com plantas vivas, reduzindo a temperatura da superfície do solo e do ambiente. O uso de práticas que aumentem a quantidade de matéria orgânica na camada superficial do solo permite uma maior infiltração e armazenamento de água. Técnicas de irrigação de precisão otimizam o uso da água. O plantio direto com rotação de cultura e cobertura do solo em todo o ciclo, a diversificação e integração de sistemas, a agricultura regenerativa da saúde do solo e da biodiver-

sidade – incluindo a recuperação de áreas degradadas –, assim como as técnicas de intensificação sustentável da produção, permitem que se produza mais anualmente em uma mesma área.

Nesse contexto da intensificação sustentável, isso significa não só aumentar a produtividade de um cultivo, mas, principalmente, diversificar a produção nessa mesma área por meio de cultivos consorciados ou integrados, como na integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e suas variações, e ainda produzir duas ou até três safras ao ano. São formas de promover a sustentabilidade, desde que se adotem insumos e práticas de manejo que não aumentem a pegada de carbono dos produtos gerados. A intensificação sustentável é também uma maneira de reduzir a pressão sobre os biomas e seus ecossistemas naturais e de reduzir a perda de biodiversidade.

A biodiversidade dos ecossistemas, desde os seres microscópicos até seus animais e plantas, é fonte de recursos de origem biológica que promovem a manutenção da microbiologia do solo agrícola e a disponibilização de nutrientes, além da fixação biológica de nitrogênio (FBN). O uso desses bioinsumos em um modelo de produção que promova a saúde do solo é imprescindível para a mitigação e a adaptação da agricultura. Desenvolver formas de manejo sustentável e recomposição da floresta e de geração de recursos florestais não madeireiros, gerando valor para a floresta em pé, é necessário para que se reduza a pressão da sociedade sobre os biomas naturais, que também precisam se adaptar à mudança climática.

Indo para além do insumo biológico para a produção sustentável, são essenciais tecnologias e infraestrutura para o armazenamento, reservação, uso eficiente da água e técnicas de irrigação que evitem perdas e desperdícios. O desenvolvimento de máquinas e de novas técnicas de mecanização, capazes de prevenir a compactação do solo ou viabilizar obras de conservação da água e do solo, também colabora nesse sentido. Cultivos à sombra ou mesmo em estruturas de cultivo pro-

tegidos, indo até estruturas industrializadas independentes do ambiente rural, podem ser usadas como alternativas, desde que estudados seus impactos ambientais e seus efeitos sobre a segurança alimentar e nutricional. Enfim, há uma ampla diversidade de equipamentos, técnicas e boas práticas já desenvolvidas dos quais já se pode lançar mão. E também há ainda a possibilidade de desenvolvimento de novas técnicas e métodos que reduzam esse impacto e aumentem a capacidade adaptativa dos sistemas agrícolas.

Do ponto de vista da mitigação, pode-se lançar mão de muitas dessas mesmas técnicas que, em geral, são tanto adaptadoras quanto mitigadoras, como a incorporação de cobertura vegetal, de matéria orgânica, de bioinsumos ou a FBN, além de outras técnicas específicas para a redução das emissões da agricultura. O foco, neste caso, é evitar emissões de GEE, reduzindo o uso direto de combustíveis fósseis e de insumos deles derivados, reduzir o desmatamento e a conversão de áreas naturais e evitar o revolvimento do solo, que libera boa parte do carbono nele armazenado. Por outro lado, pode-se aumentar o uso de técnicas que promovam a remoção dos GEE da atmosfera e o armazenamento de carbono nos elementos do ecossistema agrícola, sobretudo no solo ou na vegetação arbórea.

Muitas dessas técnicas ou soluções de inovação, sejam mais focadas em adaptação sejam em mitigação, bem como métricas e indicadores para monitorar ou inventariar sua evolução, serão detalhadas nos capítulos deste livro.

Ligando os pontos

Fica claro, portanto, que o efeito estufa, o mesmo processo natural que mantém a temperatura da superfície terrestre em níveis médios adequados para a sobrevivência das espécies vegetais e animais, incluindo a humana, pode ser alterado pelo modelo de desenvolvido baseado no uso de combustíveis fósseis.

Segundo o último relatório do IPCC (2023), essa é a principal causa do aquecimento global, com impacto sobre os diversos setores da economia. O relatório também aponta que a temperatura média global já atingiu 1,1 °C acima da média do período pré-industrial e que, quando se consideram somente as regiões continentais, esse valor sobe para 1,6 °C. O Resumo Anual sobre o Clima – Destaques do Clima Global 2024 – do instituto europeu Copernicus (Global Climate Highlights, 2025) aponta que 2024 foi o primeiro ano em que a média da temperatura global claramente excedeu o limite de 1,5 °C, ficando entre 1,57 e 1,60 °C acima dos níveis pré-industriais.

Esse aumento da temperatura conta com a contribuição de praticamente todos os setores da economia e, ao mesmo tempo, impacta diretamente a todos eles. No contexto global, a agricultura colabora com 11,7% das emissões². Ainda neste contexto, o Brasil representa 2,1% das emissões globais e nossa agricultura, cerca de 1% (Ge et al., 2024). Porém, no contexto nacional, a agricultura colabora com 30,5% das emissões³ e a mudança do uso da terra com 39,5% (Brasil, 2024). E para se reduzir o impacto dessas emissões, em âmbito global ou nacional, é necessário buscar um novo modelo de desenvolvimento, tendo em conta que se trata de um fenômeno global de múltiplas dimensões — ambiental, econômica, social e política — e que há a necessidade urgente de transição para sistemas produtivos mais sustentáveis, resilientes e tecnologicamente adaptados, em todos os setores.

Esse fenômeno também afeta significativamente a agricultura e, conseqüentemente, a segurança alimentar. Estudo coordenado em parceria entre Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) já apontava em 2008 (Deconto, 2008)

redução de áreas de baixo risco potencial da ordem de 35 a 40% para a soja em 2070, a depender do cenário do IPCC que se adotasse na projeção, “otimista” ou “pessimista” respectivamente, segundo os autores. À exceção da cana-de-açúcar e da mandioca, reduções pouco menores foram projetadas para as principais culturas alimentares usadas no Brasil. Embora a mandioca tivesse aumento de área de baixo risco potencial em âmbito nacional, no Nordeste, haveria redução de área.

O estudo Brasil 2040, coordenado pela Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (Brasil, 2015), aponta tendências das culturas agrícolas para 2040 e que foram acopladas a modelo econômico para a estimativa da mudança do uso da terra para a produção agrícola em função dos cenários climáticos projetados. As tendências são de redução do potencial produtivo de baixo risco agroclimático para o período projetado, até 2040, e impactos mais relevantes sobre a cultura de soja em todos os cenários apresentados até 2040, inclusive, com previsão de alguns municípios deixarem de produzir soja por serem classificados como alto risco climático.

Fica claro, a partir desses estudos, que tanto a tendência média de aumento da temperatura quanto os eventos extremos projetados pelo IPCC (2023), aliados ao manejo inadequado do agroecossistema e dos ecossistemas naturais e sem a adequação das técnicas de produção à nova realidade climática, podem levar a consequências graves, como a escassez hídrica, inundações, degradação dos solos, queimadas e incêndios e perda de biodiversidade e à insegurança alimentar.

A relação da agricultura com essa nova realidade é tanto de vítima quanto de importante vetor para intensificar o fenômeno do aquecimento global e a conseqüente mudança climática. Implementar uma agricultura integralmente de baixa emissão de carbono, com reduzida ou nenhuma dependência de insumos de origem fóssil, dissociada do desmatamento e que desenvolva e adote formas de manejo sustentável e de re-

² Este valor se refere a um total de emissões globais que não incluem as emissões por mudança do uso da terra.

³ Este valor se refere a um total de emissões globais que incluem as emissões por mudança do uso da terra.

composição da floresta e de geração de recursos florestais não madeireiros, gerando valor para a floresta em pé e reduzindo a pressão sobre a biodiversidade, é provavelmente a forma mais eficaz de reduzir sua contribuição para a intensificação desse fenômeno.

Nexos entre saúde, clima e produção de alimentos

Por outro lado, o impacto sobre a agricultura, por ser o setor mais vinculado ao ambiente natural e dependente dele, evidencia o nexo ou conexão da mudança climática com a segurança alimentar e nutricional e também com a soberania alimentar. Esse vínculo se reflete na capacidade de produção de alimentos, sobretudo em países como o Brasil, cuja agricultura é um dos maiores setores produtivos e um dos pilares de sua economia, respondendo o agronegócio por 23,5% de seu produto interno bruto (PIB) em 2024 (Cepea, 2025). Visando garantir a segurança alimentar e nutricional, inclusive de maneira preventiva diante de um futuro indesejado, deve-se planejar o investimento em adaptação e em mitigação, conforme exemplificado aqui e nos demais capítulos deste livro.

Quando se refere à segurança alimentar e nutricional e à soberania alimentar — ou seja, a capacidade de o país decidir sobre como garantir à sua população independência para produzir, distribuir e garantir acesso a alimento com a qualidade e quantidade adequada para sua boa nutrição —, esse investimento se desdobra em benefícios em outros setores, pois fica evidente seu nexo, por exemplo, com a saúde, bem-estar e qualidade de vida da população. Relaciona-se com o conceito de saúde única ou integral. O nexo com a saúde integral ou única abrange desde espécies vegetais e animais, inclusive a humana, até ecossistemas e o próprio planeta, promovendo a qualidade de vida, uso de alimentos nutritivos e funcionais e interação saudável entre essas espécies e o ambiente, envolvendo o conceito amplo de ecofisiologia, ou funciona-

mento do ecossistema, nas diversas vertentes e fatores intervenientes em sua saúde.

E, obviamente, dada a complexidade dos modelos de desenvolvimento das diversas regiões do globo e das suas relações comerciais, políticas e sociais, há forte conexão ou nexo entre a segurança alimentar com a biodiversidade e uso dos recursos naturais, sobretudo o solo e a água de forma ambientalmente eficiente e sustentável. A competição pelo uso da água entre os setores urbanos, industriais e rurais exige que se equacionem alternativas para a reservação da água e o seu uso eficiente, nas diversas escalas da produção agrícola.

No setor de energia, a busca por alternativas renováveis, visando à transição para uma economia com baixa ou nenhuma dependência dos combustíveis fósseis, é essencial o papel da agricultura. Destacam-se nesse contexto a produção de bioenergia a partir de biomassa e de biocombustíveis e a utilização de áreas rurais para a geração de energia eólica, solar e hidráulica. E, ainda, há o nexo com a logística de armazenamento e distribuição, com os modais de transportes e com os processos industriais que utilizam fibras e outros insumos biológicos.

Os aspectos culturais e de inclusão socioprodutiva e digital devem permear e estar presentes em todos esses nexos, buscando-se alternativas para a definição de novos modelos de desenvolvimento sustentável, na concepção mais ampla do termo, ou seja, envolvendo as vertentes econômicas, sociais, ambientais, institucionais, geopolíticas.

Por fim, a integração do suporte científico à formulação de política pública, como uma forma de exercer a diplomacia científica⁴, e para o monitoramento de sua efetividade, é essencial para que a transição ecológica para um modelo de desenvolvimento cada vez menos emissor de GEE, mais baseado em recursos renováveis, bioeconomia e economia circular, seja tanto viável quanto eficiente.

⁴ O conceito da diplomacia científica será tratado com mais detalhe na subseção Diplomacia Científica deste capítulo.

Precisamos conversar

As evidências científicas, baseadas em levantamentos sobre os avanços do conhecimento internacional no tema e coordenados pelo IPCC em ciclos aproximados de sete anos, ressaltam a necessidade urgente de um esforço global de transição para sistemas produtivos mais sustentáveis, resilientes e tecnologicamente adaptados à nova realidade climática e às suas projeções.

Historicamente, diante desse contexto internacional complexo, marcado pelo aquecimento global e pela necessidade de um esforço global de mitigação dos efeitos da mudança climática, já na sua convenção ocorrida no Rio de Janeiro em 1992, a *Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento* (Rio 92), promovida pela Organização das Nações Unidas (ONU), estabeleceu três Convenções-Quadro em temas que demandavam, e ainda demandam, atenção e esforço global: a Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação (UNCCD, da sigla em inglês), a Convenção sobre Biodiversidade Biológica (UNCBD) e a Convenção sobre Mudança Climática (UNFCCC). O histórico e detalhamento desta última é relatado a seguir, sobretudo no que se refere ao setor agrícola e à contribuição da Embrapa e parceiros, tema foco deste livro.

Geopolítica climática no âmbito da Convenção

Os primórdios da Convenção

No cerne da UNFCCC, há uma meta relativamente simples de colocar em palavras, mas que representa um desafio extremamente complicado de colocar em prática: entender como os países individualmente contribuem para as emissões de GEE e identificar as fontes dessas emissões dentro do processo econômico e das atividades peculiares da matriz de cada país.

Para alcançar esse objetivo, nos estágios iniciais do processo de negociação internacional, a UNFCCC delegou ao IPCC o mandato de elaborar um estudo sobre como tornar essa meta realidade. O IPCC surgiu visando criar um esquema abrangente que contabilizasse, de forma transparente, acurada, completa, consistente e comparável, as emissões de GEE em cada país.

O conjunto de metodologias elaboradas pelo IPCC foi adaptado para permitir que todas as nações relatassem suas emissões com base em dados de atividade específicos para setores econômicos e em fatores de emissão projetados de acordo com circunstâncias geográficas e econômicas. Esse conjunto primário de métodos adotados pela UNFCCC é a base para a elaboração do Inventário Nacional de GEE e da Comunicação Nacional, usando a metodologia mais básica proposta pelo IPCC.

No entanto, apenas identificar a origem das emissões estava longe de ser suficiente para abranger a ambição definida pela UNFCCC, conforme apresentado em seu art. 2º (Convenção sobre Mudança do Clima, 1992), transcrito a seguir:

ARTIGO 2

OBJETIVO

O objetivo final desta Convenção e de quaisquer instrumentos jurídicos com ela relacionados que adote a Conferência das Partes é o de alcançar, em conformidade com as disposições pertinentes desta Convenção, a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera num nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático. Esse nível deverá ser alcançado num prazo suficiente que permita aos ecossistemas adaptarem-se naturalmente à mudança do clima, que assegure que a produção de alimentos não seja ameaçada e que permita ao desenvolvimento econômico prosseguir de maneira sustentável.

Para isso, logo na primeira *Conferência das Partes* (COP1), realizada em Berlim, de 28 de março a 7 de abril de 1995, ficou evidente que a linguagem

da Convenção recém-adotada estava longe de ser suficiente para enfrentar o desafio de estabilizar a concentração de GEE na atmosfera em um nível que evitaria interferência antropogênica perigosa no sistema climático. Na verdade, muitas eram as variáveis ainda desconhecidas naquela época, mas havia uma certeza. A certeza que levou todos aqueles países a adotarem universalmente a Convenção era que muito tinha que ser feito para viabilizar a transição de uma economia intensiva em combustíveis fósseis para um futuro mais verde e sustentável.

Embora a Convenção tenha estabelecido as bases para que uma mudança no modelo econômico mundial pudesse prosperar – energeticamente independente de combustíveis fósseis, ambientalmente mais sustentável, socialmente relevante e economicamente eficiente –, caberia a cada país o desenvolvimento de suas estratégias nacionais e o desenho de seus processos científicos e tecnológicos. O que, em 1995, era apenas um planejamento de futuro, precisaria ser implementado por cada país na forma de políticas públicas domésticas.

Naquela época, ainda havia incerteza sobre qual seria o chamado “nível que evitaria interferência antropogênica perigosa no sistema climático”. Então, a decisão primária da COP 1 foi estabelecer um processo de discussão, com duração de dois anos, que resultaria na elaboração de um protocolo no âmbito da Convenção, destinado a ajudar os países a entender e desenvolver estratégias para mudar suas economias em direção ao futuro mais verde que foi previsto pela sociedade.

Desse processo resultou, após alguns anos de discussões globais sobre a questão da mudança climática, o Protocolo de Quioto, o primeiro acordo internacional firmado no âmbito da UNFCCC. Esse acordo possui, em seu Anexo I, uma lista de “partes”, ou seja, de países ou blocos de países (por exemplo, a União Europeia) desenvolvidos e comprometidos com metas de redução de emissões, os chamados “países do Anexo I”.

Induzindo uma nova percepção e novos parâmetros para a economia global

Discussões e acordos dessa natureza despertaram, ao menos entre os países mais atentos, a percepção de que a capacidade de relatar dados aderentes à realidade nacional poderia significar um diferencial competitivo. Porém, isso requer investimentos em novas tecnologias, pesquisa e infraestrutura, todos dependentes de um essencial e urgente planejamento.

Portanto, com a sua estruturação, a UNFCCC intrinsecamente também passou a fomentar o desenvolvimento de novos indicadores de sustentabilidade e competitividade para políticas domésticas e a sensibilização da população acerca da questão da mudança do clima, por meio de registros estruturados em um processo global de inventário de emissões de GEE. Com esse marco, a avaliação de riscos associada ao planejamento, a adequação da infraestrutura instalada e a gestão estratégica da informação passam a ser elementos fundamentais e trazem novos desafios, ao passo que a cooperação entre países ou regiões em redes e mercados, cada vez mais interconectados, é pressionada a se alinhar a indicadores de sustentabilidade ambiental e social. Trata-se de um processo irreversível e inerente à transformação social e econômica rumo à era pós-petróleo, que deverá privilegiar aqueles países melhor equipados, tanto do ponto de vista tecnológico quanto em sua capacidade de se organizar para definir e implementar indicadores de sustentabilidade reveladores da convergência dos padrões internacionais, nacionais e subnacionais.

Certamente, investimentos em estratégias próprias para caracterização das emissões e remoções nacionais em setores sensíveis e estratégicos da economia sempre foram prioritários para países que já tinham metas de redução de emissões estabelecidas. Tomando a União Europeia como exemplo para deixar claro esse contexto: o bloco

tem sinalizado, inclusive por meio da negociação de instrumentos comerciais, a preocupação com a chamada “fuga de carbono”, provocada pela importação de produtos cuja fabricação envolve intenso uso de carbono.

Países que exportam para a União Europeia devem estar atentos às novas diretrizes e se preparados para manter investimentos no monitoramento e quantificação da pegada de carbono de seus produtos, além de assegurar que outros aspectos e indicadores que possam conferir qualidade e valor agregado aos produtos sejam visíveis e perceptíveis ao consumidor. O conjunto dessas medidas e atenções à percepção internacional quanto aos parâmetros de “justo, saudável e ecológico” serão relevantes para a manutenção da competitividade no mercado internacional, não só em relação às exportações para a Europa, mas também para as regiões sob sua influência.

A visão europeia tentará reforçar a diferença relativa de emissões do bloco frente aos competidores internacionais, minimizando a importância de sua participação nas emissões globais de GEE (menos de 10%) e dando relevância às conquistas obtidas ao longo das últimas décadas no esforço de reduzir a quantidade absoluta de emissões, posicionando-se como líder na transição global para uma economia com zero emissões líquidas. Contudo, o bloco europeu é o quarto maior emissor de GEE do mundo, atrás apenas da China, dos Estados Unidos e da Índia (Friedrich et al., 2023), sendo o setor energético responsável por 75,7% de suas emissões.

Contribuindo para o posicionamento do Brasil

O Brasil figura na sétima posição entre os maiores emissores de GEE, segundo avaliação do World Resources Institute (Friedrich et al., 2023), com base em dados de 2019. Pelo menos, desde 2009, a Embrapa tem participado desse processo de discussão e tem assumido papel de protagonista na ge-

ração de informação e inteligência estratégica no que diz respeito ao acompanhamento dos processos que envolvem a agricultura e a ambição climática em âmbito internacional, particularmente com foco em mercados competidores. O Brasil não é um “país do Anexo I”. No entanto, as discussões e negociações realizadas após o Protocolo de Quioto, com o objetivo de construir um modelo mais transparente e eficaz, culminaram no Acordo de Paris e em sua nova regulamentação. Nesse contexto, as partes que assinaram a Convenção comprometeram-se com o esforço global de redução de emissões, estabelecendo de forma voluntária suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC, na sigla em inglês). A regulamentação europeia apresenta 10 critérios para orientar as políticas e ações rumo à neutralidade climática, sendo os quatro primeiros de caráter econômico/de competitividade, o que demonstra a relevância de questões econômicas no tratamento de temas ambientais:

- Relação benefício-custo e eficiência econômica.
- Competitividade da economia da União.
- Melhor tecnologia disponível.
- Eficiência energética, acessibilidade energética e segurança do abastecimento.
- Justiça e solidariedade entre e dentro dos estados-membro.
- A necessidade de garantir a eficácia ambiental e a progressão ao longo do tempo.
- Necessidades e oportunidades de investimento.
- A necessidade de garantir uma transição justa e socialmente aceitável.
- Desenvolvimentos e esforços internacionais empreendidos para alcançar os objetivos de longo prazo do Acordo de Paris e o objetivo final da UNFCCC.
- As melhores evidências científicas disponíveis e mais recentes, incluindo os últimos relatórios do IPCC.

A competitividade de cada um dos blocos e países ao longo das próximas décadas será, contudo, um resultado dos efetivos investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação, atrelados à capacidade de identificar vulnerabilidades e efetivamente implementar um sistemático plano de adaptação capaz de reduzir os impactos da mudança do clima na economia, ao mesmo tempo em que planejamento e investimentos estratégicos sejam realizados para reposicionar as respectivas economias em novos modelos de desenvolvimento independentes dos combustíveis fósseis, numa era “pós-petróleo”, baseada em fontes renováveis de energia. Nesse sentido, é inegável o fato de que a União Europeia está em condição avançada de planejamento, uma vez que dispõe de estratégia e definição de prioridades estruturadas na forma do Acordo Verde Europeu (*European Green Deal*, no termo original em inglês).

Cabe aos setores relevantes da economia brasileira compreenderem a vulnerabilidade inerente à falta de planejamento e metas de longo prazo, que poderiam alavancar a competitividade, baseada em dados científicos robustos e reconhecidos internacionalmente que possam potencializar diferenciais competitivos sintonizados com as questões ambientais emergentes da sustentabilidade.

O papel do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática na estimativa de emissões

Conforme apresentou-se até aqui, as emissões de GEEs são uma consequência de toda atividade econômica desenvolvida em um país. Com base nas discussões sobre essa relação entre atividades econômicas e emissões de GEE, ocorridas nas COPs que assinaram e aderiram à UNFCCC, estabeleceu-se o primeiro compromisso acordado pelos países na Convenção, um marco crucial, conforme apresentado no art. 4º (Convenção sobre Mudança do Clima, 1992):

ARTIGO 4

OBRIGAÇÕES

1. Todas as Partes, levando em conta suas responsabilidades comuns, mas diferenciadas, e suas prioridades de desenvolvimento, objetivos e circunstâncias específicos, nacionais e regionais, devem:

a) Elaborar, atualizar periodicamente, publicar e pôr à disposição da Conferência das Partes, em conformidade com o Artigo 12, inventários nacionais de emissões antrópicas por fontes e das remoções por sumidouros de todos os gases de efeito Editado e traduzido pelo Ministério da Ciência e Tecnologia com o apoio do Ministério das Relações Exteriores da República Federativa do Brasil estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal, empregando metodologias comparáveis a serem acordadas pela Conferência das Partes;

Com base nessa decisão, delegou-se ao Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC) a competência para desenvolver o conjunto de metodologias que, posteriormente, foram acordadas na COP e que hoje balizam o processo de elaboração de inventários nacionais e são a base dos Relatórios Bienais de Transparência (BTR, na sigla em inglês), no Acordo de Paris.

É importante notar que a contribuição do IPCC para o desenvolvimento da metodologia de inventário para a UNFCCC data de 1994, quando as diretrizes originais para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa foram disponibilizadas. Essas diretrizes foram revisadas em 1996, constituindo um conjunto comum e amplamente adotado de orientações metodológicas, que formam as bases para o Inventário Nacional de todos os países, desenvolvidos e em desenvolvimento, até muito recentemente. Durante todo esse período inicial de desenvolvimento dos processos internacionais, a Embrapa esteve apoiando o Ministério da Ciência e Tecnologia no desenvolvimento do Inventário Nacional, utilizando originalmente as metodologias do IPCC de 1996 (IPCC, 1996).

Esse conjunto metodológico foi disponibilizado tanto em formato digital quanto impresso, dividido em três volumes. Algumas atualizações relevantes foram feitas após as diretrizes de 1996, mas uma grande revisão metodológica só foi publicada dez anos depois, na forma do guia metodológico de 2006 (IPCC, 2006), desta vez em cinco volumes digitais. Posteriormente, uma nova atualização foi lançada em 2019 (IPCC, 2019), que poderá ser adotada já nas novas submissões dos BTRs.

O Brasil foi o primeiro país a assinar a UNFCCC, resultado da *Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento*, realizada no Rio de Janeiro, em junho de 1992, a qual foi ratificada pelo Congresso Nacional em 1994. Igualmente, foi o primeiro país a estabelecer uma Autoridade Nacional Designada para a Convenção – o então Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC). Atualmente, compete ao MCTI a estruturação das fontes de dados de atividades e de fatores de emissões utilizados para o desenvolvimento e a compilação do inventário para o ciclo corrente de atualização da Comunicação Nacional (CN) e para os BTRs, seguindo as regras válidas da UNFCCC e do Acordo de Paris.

O Brasil sempre deu importância estratégica ao compromisso de apresentar suas CNs, e já submeteu quatro delas (2004, 2010, 2016 e 2020), tendo o Inventário Nacional como anexo e quatro Relatórios Bienais de Atualização (BUR, na sigla em inglês), apresentados em 2014, 2017, 2019 e 2020, ainda na vigência das regras do Protocolo de Quioto. Em 2024, o país submeteu seu primeiro BTR, já nas regras do Acordo de Paris. Esses documentos, ainda que considerando as limitações metodológicas atuais, compilam fontes oficiais de informação e estruturam os dados disponíveis para as estimativas das emissões e remoções de GEE que caracterizam os sistemas de produção nacionais.

As estimativas de emissões e remoções de GEEs do setor agrícola baseiam-se em métodos que podem usar: a) fatores padrão do IPCC (primeira aproximação ou *Tier 1*, no jargão em inglês); b) dados sobre as

atividades emissoras de GEE no país (comumente chamados de “dados de atividades”) combinados a fatores de emissão estimados com base em fontes oficiais nacionais (*Tier 2*); ou modelos de estimativa de emissões desenvolvidos nacionalmente, que incorporam dados de atividades e fatores de emissão mais adequados às realidades dos sistemas de produção nacionais (*Tier 3*). Essa última abordagem ainda não é usada para a estimativa das emissões oficiais do setor agrícola no Brasil, porém há esforços em andamento para o desenvolvimento de modelos capazes de representar mais adequadamente a realidade dos sistemas nacionais de produção em ambiente tropical e subtropical.

Atualmente, as Diretrizes do IPCC de 2006 são o conjunto mais recente e acordado de regras para a estimativa da emissão de GEE e a elaboração de Inventários Nacionais. Elas são adotadas como padrão para a Estrutura Aprimorada de Transparência (*Enhanced Transparency Framework*, ETF, na sigla em inglês) do Acordo de Paris. A atualização de 2019 é, provavelmente, a revisão mais relevante e sensível, por complementar lacunas das diretrizes de 2006, especialmente no que se refere às emissões de metano provenientes de gases fugitivos nos setores de energia e de indústria, bem como às emissões de efluentes líquidos no setor industrial.

Além das diretrizes metodológicas, o IPCC também é responsável pelo desenvolvimento do *Inventory Software*, ferramenta que apoia os países na elaboração de inventários nacionais, e pela elaboração do Formato de Relatório Comum (*Common Report Format*, CRF). Na UNFCCC, há um secretariado responsável pela manutenção e disponibilização dos dados de GEE em uma plataforma web abrangente e dinâmica, que reúne bancos de dados e diferentes funcionalidades para consulta. Essa estrutura compõe o arcabouço de ferramentas da Convenção para entender e avaliar as emissões de GEE tanto de países do Anexo I quanto dos não pertencentes ao Anexo I.

É importante esclarecer que o Anexo I é essencialmente composto por países desenvolvidos,

enquanto o grupo dos países não Anexo I abrangem um conjunto muito mais diverso, formado pelos demais países signatários.

Ciência e Inovação para uma agricultura adaptada à mudança climática

Já se vislumbra, a partir das subseções anteriores, que a ciência agrícola — com grande predominância de instituições nas esferas públicas — teve e continuará a ter um papel central para a evolução para um modelo de desenvolvimento que permita vencer o desafio da mitigação do aquecimento global e o da adaptação aos efeitos da mudança climática que não se puder evitar.

Diplomacia científica

Como instituição nacional de pesquisa agrícola, a Embrapa tem dado grande destaque à sustentabilidade, ao enfrentamento dos efeitos da mudança climática e à redução das emissões de GEE na agricultura em documentos gerenciais, como o *Visão 2030*, e os Planos Diretores da Embrapa (PDE) VI e VII, com seus Objetivos Estratégicos (OE) (Embrapa, 2015, 2020). O PDE 2024–2030 (Embrapa, 2024), mais recente, apresenta um de seus nove OE finalísticos especificamente voltados aos Recursos Naturais e à Mudança do Clima.

Na Apresentação do documento *Visão 2030 – O Futuro da Agricultura Brasileira* (Embrapa, 2018), já consta que

As análises geradas neste documento contribuem para a tomada de decisões estratégicas da Embrapa e dos diversos agentes e atores de todos os elos das cadeias produtivas agrícolas, com vistas ao contínuo desenvolvimento sustentável do Brasil.

O documento também apresenta um capítulo integralmente dedicado à mudança do clima, cujas subseções são: Vulnerabilidade, Adaptação e Miti-

gação; Compromissos Internacionais; Fomento à Ciência e Tecnologia; e Desafios.

Nesse contexto, a Embrapa contribui para a transição em direção a um modelo de desenvolvimento mais sustentável, que pressupõe transformação social e econômica, maior equilíbrio com a vertente ambiental e avanços na qualidade de vida e saúde integral. Esse processo busca uma menor dependência ou mesmo total restrição do uso de combustíveis de origem fóssil, em favor de formas de energia renováveis e com redução ou mesmo neutralização do balanço entre emissões e remoções de GEE.

A contribuição científica é elemento basilar para a negociação nacional e internacional de acordos de colaboração e para a definição de políticas públicas e tomada de decisão para o setor agrícola nacional. Nesse contexto da geopolítica global, a Embrapa também tem contribuído de maneira muito ativa, oferecendo suporte às negociações internacionais, desde que o tema agricultura passou a ser discutido pela UNFCCC, em 2009, em Copenhague, ainda como abordagens setoriais, num item da convenção onde alguns setores foram agrupados e, posteriormente, discutidos separadamente. Essa atuação se enquadra bem no que se tem definido como Diplomacia Científica.

A diplomacia científica é uma abordagem que utiliza a ciência para resolver problemas globais, promover colaboração e dar apoio às decisões de políticas públicas. Segundo The Royal Society (2010), ela combina ciência, tecnologia e política externa para enfrentar desafios como as mudanças climáticas. Em síntese, foca no uso da ciência para fortalecer a cooperação entre instituições, países e setores, ajudando a criar políticas públicas e soluções para desafios globais.

No caso da agricultura brasileira, a Embrapa aplica a diplomacia científica para apoiar a definição de políticas públicas e a participação em acordos internacionais que permitam promover práticas agrícolas sustentáveis, reduzir os impactos do cli-

ma e apoiar decisões que equilibram o crescimento econômico, a proteção ambiental e a qualidade de vida. Na prática, isso significa usar dados e pesquisas para apoiar iniciativas que conectam cientistas, governos e comunidades para a tomada de decisão que permita desenvolver e ampliar a adoção de soluções inovadoras, como tecnologias agrícolas que emitem menos GEE ou sistemas que ajudam governo e agricultores a planejar suas safras em meio a condições climáticas instáveis. Portanto, a diplomacia científica praticada pela Embrapa tem impactos diretos na agricultura brasileira e no cenário internacional.

Dentre os diversos exemplos de apoio à definição de políticas públicas apresentados ao longo deste capítulo e de todo este livro, pode-se dispor aqui de dois casos claros dessa atuação: o sistema Agri-tempo⁵ e o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc)⁶ (Monteiro et al., 2024). Ambos contribuem para o Brasil se adaptar ao clima e planejar uma agricultura mais resiliente. Ao desenvolver ferramentas como o Agri-tempo e o Zarc, a Embrapa ajuda o Brasil a cumprir compromissos globais, como o Acordo de Paris, que busca reduzir as emissões de GEE e promover a adaptação à mudança climática. Além disso, essas iniciativas fortalecem a colaboração entre cientistas, governos e produtores, criando um modelo de agricultura mais sustentável.

A ciência desenvolvida pela Embrapa também é usada para negociar parcerias internacionais, compartilhar tecnologias e promover práticas agrícolas que respeitem o meio ambiente. Por exemplo, o Brasil pode compartilhar suas experiências com o Zarc com outros países que enfrentam desafios climáticos semelhantes, fortalecendo a cooperação global.

Apesar dos avanços, há desafios a enfrentar. A mudança climática está tornando o clima mais desafiador, exigindo que sistemas de produção e de mo-

nitoramento sejam constantemente atualizados com novas tecnologias e dados. Além disso, é preciso investir na formação de agricultores e na comunicação para que essas ferramentas cheguem a todos, especialmente aos pequenos produtores.

Diante do que se projeta para o futuro, é essencial que a Embrapa continue usando a diplomacia científica para desenvolver e garantir a adoção de soluções inovadoras, como tecnologias que reduzam ainda mais as emissões de GEE e promovam o uso de energias renováveis na agricultura. Esses esforços ajudarão o Brasil a alcançar um modelo de desenvolvimento mais equilibrado, com benefícios para a economia, o meio ambiente e a sociedade.

Estruturando a pesquisa em mudança climática e agricultura

Essa atuação, com destaque à sustentabilidade, ao enfrentamento dos efeitos da mudança climática e ao controle das emissões de GEE na agricultura, tem se apoiado nas redes de pesquisadores e na infraestrutura física e organizacional que a Embrapa construiu ao longo das últimas décadas.

A partir de 2006, com a contratação de mais de 30 pesquisadores, especificamente para a área de mudança climática e agricultura, a Embrapa implementou, em 2007, a Plataforma de Pesquisa em Mudança Climática e Agricultura (Figura 1.6). Trata-se de um esforço corporativo que permitiu viabilizar soluções de pesquisa, desenvolvimento e inovação para a adaptação da agricultura aos efeitos da mudança climática e para a redução das emissões de GEE pelas atividades agrícolas. Definiram-se quatro pilares ou vertentes estruturantes: simulação de cenários futuros para as culturas agrícolas; simulação de cenários futuros para pragas, doenças e plantas espontâneas; balanço de carbono e controle de emissões de GEE nos sistemas produtivos; e adaptação dos sistemas produtivos aos impactos da mudança do clima.

Durante o período de 2009 até 2013, foram implementados seis projetos nacionais, contando com

⁵ Disponível em: <https://www.agritempo.gov.br/br>.

⁶ Disponível em: <https://www.embrapa.br/rede-zarc-embrapa>.

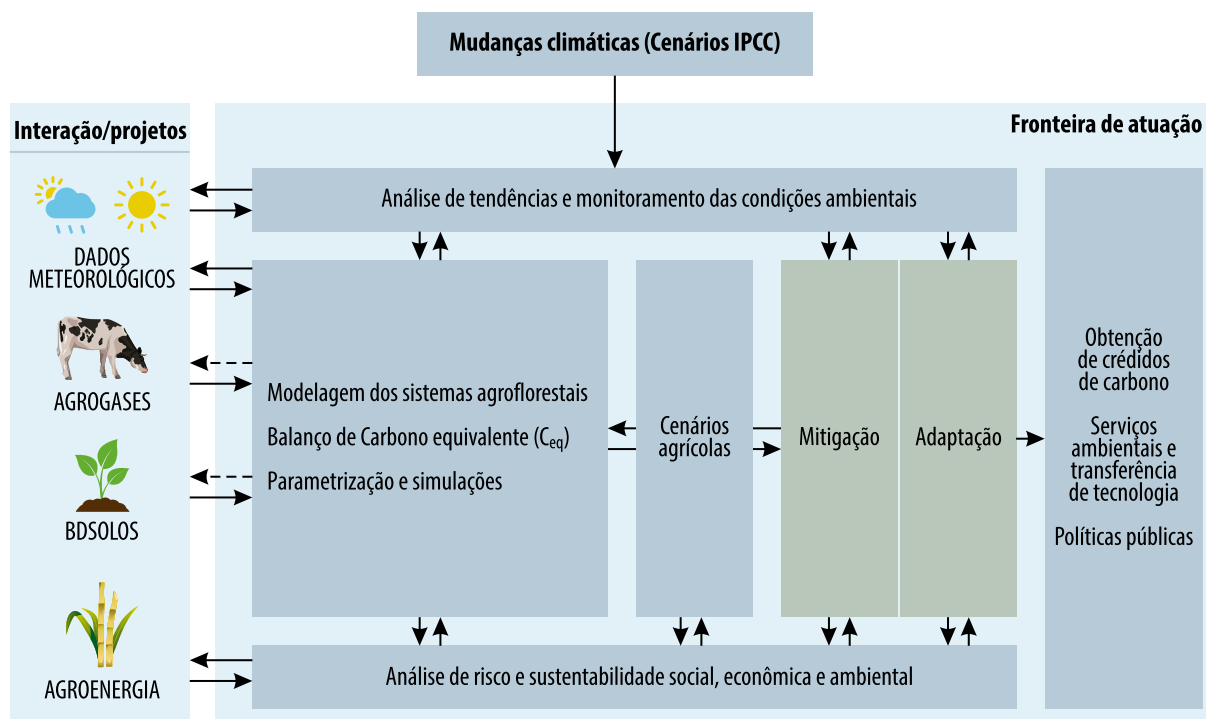


Figura 1.6. Plataforma de Mudança Climática da Embrapa: estrutura, principais elementos e interação entre eles.

redes de até mais de 100 pesquisadores cada, em todos os biomas brasileiros (Figura 1.7). Três desses projetos focaram na análise de vulnerabilidade e alternativas de adaptação: dois voltados à simulação de cenários e análise de vulnerabilidades para os cultivos (Simulação de Cenários Agrícolas Futuros – SCAF) e ocorrência de problemas fitossanitários (ClimaPest); e um terceiro, focado no tripé Agricultura-Recursos Hídricos-Mudança Climática (AgroHidro). Outros três projetos concen-

traram-se na terceira vertente, de balanço de carbono e mitigação para espécies florestais (Saltus), pecuária (Pecus) e culturas agrícolas (Fluxus).

A quarta vertente definida pela Plataforma se constituiu com outro arranjo. Em vez de um grande projeto integrador para os diversos biomas nacionais, foram desenvolvidos vários projetos específicos por cultura e foco de melhoramento genético. Nesse contexto, ainda no século passado, houve a tropicalização da soja e do trigo; e mais recentemente, o desenvolvimento de cultivares de arroz irrigado, café, uva e alface adaptados às condições tropicais do Norte do país, resistentes a doenças comuns nessas regiões, ou mais tolerantes a altas temperaturas e déficits hídricos. Esses são apenas alguns exemplos de produtos comerciais adaptados a condições climáticas mais severas, desenvolvidos a partir do melhoramento genético tradicional, bem como por técnicas genômicas avançadas. Além disso, diversas técnicas adaptadoras citadas no início deste capítulo têm sido aplicadas como alternativas de adaptação



Figura 1.7. Projetos de abrangência nacional vinculados à Plataforma de Mudança Climática da Embrapa.

aos impactos da mudança do clima, seja em projetos com foco mais específico, seja em grandes redes nacionais de pesquisa.

Os estudos e resultados dessas redes nacionais de pesquisa, bem como a colaboração com pesquisadores das áreas de relações internacionais e assessoria parlamentar da Embrapa, subsidiaram uma forte ação da Plataforma no suporte à definição de políticas públicas e à participação do Brasil nas negociações internacionais sobre a agricultura e mudança do clima no âmbito da UNFCCC, lastreadas pela ciência, como preconiza a diplomacia científica.

Além do Zarc, exemplos de políticas públicas no tema da mudança climática e agricultura que contaram com esse suporte incluem a Política Nacional sobre Mudança Climática (PNMC) e o Plano Setorial para a Agricultura de Baixa Emissão de Carbono e o Programa ABC, o Plano Nacional de Adaptação (PNA), no seu capítulo sobre agropecuária e respectivas metas, além da elaboração de diversas notas técnicas sobre projetos de lei relacionados ao tema. Mais recentemente, a Embrapa tem dado suporte à análise e definição de temas e legislação vinculados a outros setores, como mercado de carbono, serviços ambientais, florestas e biodiversidade, saúde única e ao Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas (PNCPD).

Uma nova figura institucional focada nos grandes desafios nacionais

A partir de 2012, foram instituídos os Portfólios de Pesquisa como instrumento institucional de apoio estratégico e tático para orientar a programação de pesquisa voltada a temas de grande interesse nacional. A Plataforma foi o embrião desse modelo e se converteu em um deles: o Portfólio sobre Mudança Climática da Embrapa (Figura 1.8), que definiu Desafios de Inovação a serem solu-

cionados por projetos de pesquisa. O objetivo expresso do Portfólio foi definido como

[... promover] a adaptação e a sustentabilidade da agricultura brasileira frente aos desafios impostos pela mudança do clima, contribuindo para a segurança alimentar nacional e global e para o controle das emissões nacionais de gases de efeito estufa. (Pellegrino et al., 2018, p. 17).

Com esse enfoque estratégico do Portfólio, as redes instituídas pelos projetos de âmbito nacional da plataforma continuam a executar, até hoje, de forma evolutiva, projetos que geram soluções de adaptação e mitigação da agricultura e dão suporte a políticas públicas. Muitos desses resultados serão destacados como Soluções de Inovação nos capítulos deste livro e, como apresentado a seguir, um conjunto maior pode ser consultado no portal de ativos da Embrapa, onde estão organizados segundo os principais subtemas da mudança climática e agricultura, bem como em consonância com as abordagens e prioridades da COP30, que ocorrerá no Brasil em novembro de 2025.

Soluções tecnológicas pelo clima

Sintetizando o que já se apresentou até aqui, nas últimas décadas, os investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) têm consolidado a Embrapa como um agente estratégico na promoção da transição dos sistemas alimentares rumo a modelos mais sustentáveis, resilientes e inclusivos, em consonância com os desafios contemporâneos. Nessa perspectiva, a empresa e seus parceiros têm promovido o desenvolvimento de tecnologias e práticas voltadas à adaptação à mudança climática, ao controle das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e à conservação, manejo e restauração de agroecossistemas. Essas ações visam fomentar uma produção sustentável, saudável e socialmente inclusiva em diferentes territórios.

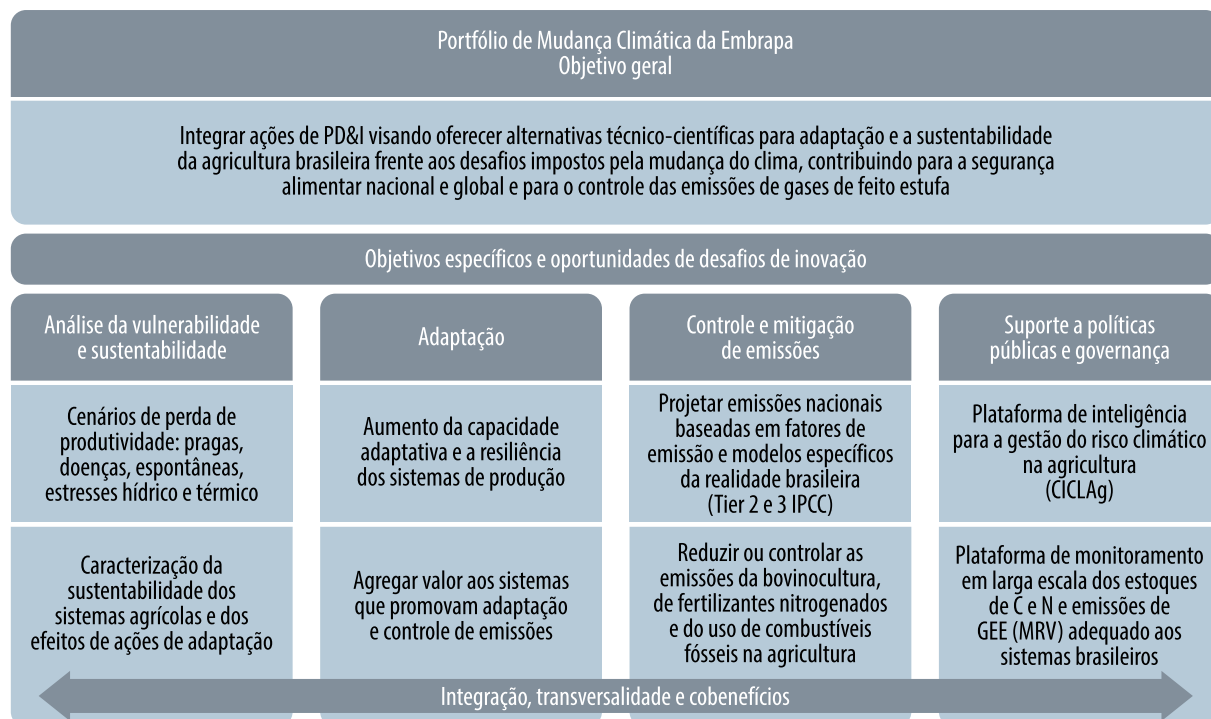


Figura 1.8. Representação do objetivo e principais vertentes e características do Portfólio de Mudança Climática da Embrapa.

Fonte: Pellegrino et al. (2018).

A abordagem sistêmica para adaptar a agropecuária aos efeitos adversos da mudança do clima, combinada com estratégias de mitigação e controle das emissões de GEE, revela-se indispensável. A adaptação se faz necessária não apenas para responder aos desafios imediatos impostos pelas alterações climáticas, mas também para antecipar impactos futuros, como modificações nos regimes de precipitação, ocorrência de eventos extremos e elevação das temperaturas. A mitigação, por sua vez, é vital para diminuir a pegada de carbono do setor agropecuário, com destaque para o manejo sustentável do solo e da água e a adoção de tecnologias agrícolas de baixa emissão, que fomentam práticas mais sustentáveis.

Com base nesse direcionamento, a Embrapa concentra seus esforços inovadores no aumento da eficiência produtiva, no desenvolvimento de tecnologias ambientalmente sustentáveis, na preservação de recursos genéticos, bem como na cria-

ção de bioinsumos destinados à nutrição vegetal, ao controle biológico de pragas e à adaptação a estresses abióticos, como a tolerância a seca, por exemplo. Além disso, investe na pesquisa de fontes alternativas para combustíveis renováveis, no aprimoramento de modelos e algoritmos que ampliem a previsibilidade climática — especialmente em relação a padrões de precipitação e temperatura —, e na elaboração de sistemas e práticas agrícolas que fortaleçam a resiliência climática e a conservação da biodiversidade.

Outra linha de atuação em PD&I da Embrapa envolve o avanço na quantificação das emissões e remoções de GEE associadas às práticas agropecuárias, levando em conta as especificidades dos sistemas de produção em ambientes tropicais. Nesse âmbito, destacam-se o desenvolvimento de métricas, protocolos e métodos de mensuração no nível *Tier 3* do IPCC, alinhados às exigências internacionais para o setor.

A Empresa também prioriza a promoção da inovação social, com foco na transformação dos sistemas alimentares, buscando ampliar a segurança alimentar e nutricional, fortalecer a adaptação e a resiliência dos sistemas produtivos e contribuir para a redução da pegada de carbono dos produtos agrícolas. Além disso, valoriza a agricultura familiar, a agroecologia, o desenvolvimento de tecnologias sociais e a valorização dos saberes tradicionais, fundamentais para a sustentabilidade e a inclusão social no meio rural.

Abordagens para enfrentar a emergência climática

Procurando sistematizar melhor sua contribuição para o contexto da COP30, no que se refere à mudança climática e sua relação com a agricultura, a Embrapa adotou seis Abordagens para enfrentar a emergência climática (Embrapa, 2025a), que são caminhos estratégicos e prioritários que orientam

a resposta da agropecuária à mudança do clima para enfrentar os desafios com inteligência e responsabilidade (Figura 1.9). Cada um deles orienta o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias com foco na sustentabilidade, inclusão e resiliência dos sistemas agropecuários:

Adaptação e resiliência climática: ajustes em sistemas econômicos, ecológicos e sociais para lidarem melhor com a mudança do clima, reduzindo danos potenciais e aproveitando oportunidades. Na agricultura, são inovações, práticas e ferramentas que ajudam os agricultores a enfrentarem os efeitos das mudanças climáticas, minimizando impactos negativos e garantindo a sustentabilidade da produção agrícola. Essas tecnologias visam aumentar a capacidade de adaptação dos sistemas agroalimentares e florestais às variações de temperatura e disponibilidade hídrica e, também, torná-los mais resilientes diante de fenômenos climáticos extremos, como secas e inundações severas.

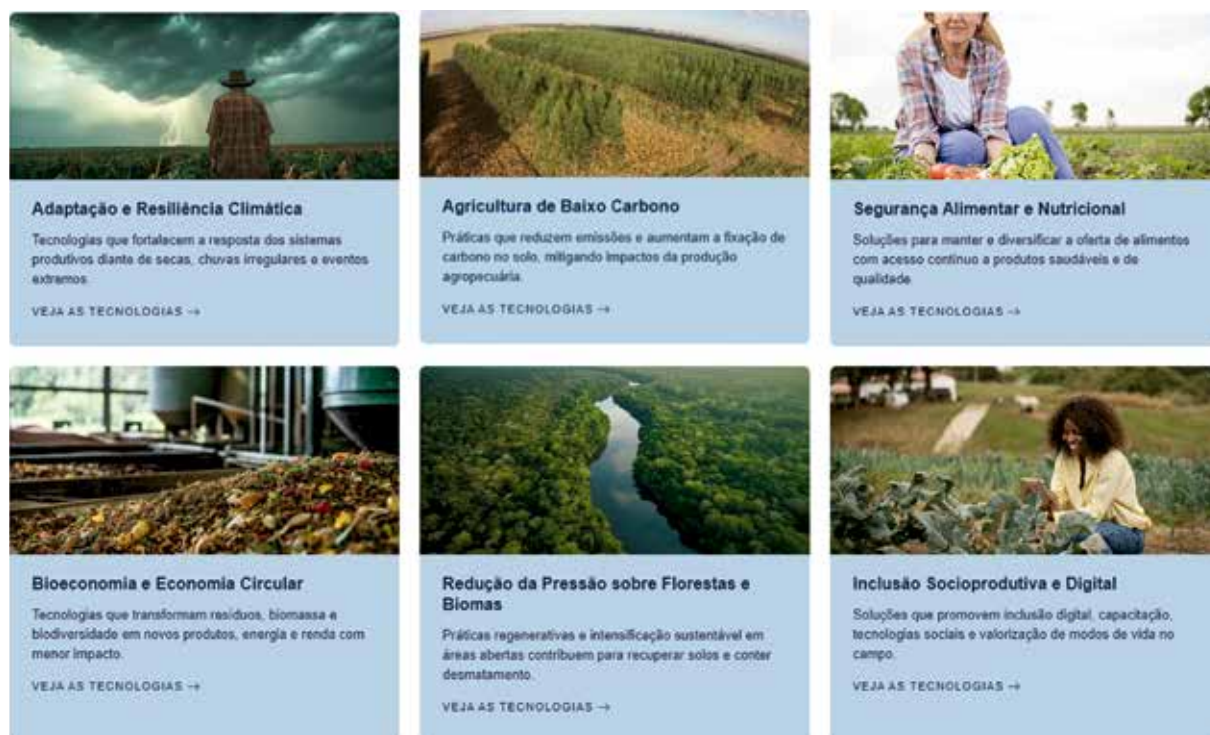


Figura 1.9. Imagem ilustrativa do portal da Embrapa onde são apresentadas as abordagens adotadas.

Fonte: Embrapa (2025a).

Agricultura de baixo carbono: Práticas, métodos e inovações que visam reduzir as emissões de GEE provenientes das atividades agrícolas, promovendo uma produção mais sustentável e com menor impacto ambiental. O objetivo é diminuir a pegada de carbono do setor agrícola, contribuindo para a adaptação dos sistemas produtivos aos efeitos da mudança climática.

Segurança alimentar e nutricional: Produtos, processos, práticas e sistemas que garantam a produção, distribuição, disponibilidade e acesso a alimentos de forma adequada para atender às demandas da população e a autossuficiência nacional para alimentos básicos, em quantidades suficientes e permanentes, com qualidade nutricional e sanitária para manter a saúde.

Bioeconomia e economia circular: Modelo econômico caracterizado por baixa emissão de carbono, eficiência no uso de recursos de origem biológica e promoção da inclusão social. Tem foco em promover crescimento econômico com geração de empregos e renda a partir de produtos de origem biológica em arranjos que também apresentem uma gestão eficiente dos recursos naturais e resultem em redução de emissões de carbono, da poluição e da geração de resíduos. A economia circular, especificamente, tem como bases a reutilização, reparação, renovação e reciclagem de materiais e produtos, a melhoria da eficiência energética e a preservação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos.

Redução da pressão sobre florestas e biomas: Tecnologias e políticas públicas que viabilizem sócio, econômica e ambientalmente o aumento da produção agropecuária de forma sustentável, com base na premissa de que a floresta em pé tem mais valor do que derrubada. Foco em conciliar produtividade e conservação, melhorar a eficiência produtiva em áreas já utilizadas e incentivos ao plantio de florestas comerciais.

Inclusão socioprodutiva e digital: Processo amplo que visa garantir renda e participação so-

cial, considerando aspectos econômicos, sociais e culturais. Na agricultura familiar e outros grupos prioritários (jovens, mulheres, comunidades tradicionais, etc.), isso envolve soberania alimentar, sustentabilidade e valorização de saberes. Os principais componentes são acesso a recursos e conhecimento, autonomia e participação ativa. A inclusão digital é crucial para melhorar a comunicação, a produção e o compartilhamento de conhecimentos e também para proporcionar incremento na produção, além de acesso a mercados e a políticas públicas para o campo.

Contribuições em pesquisa, desenvolvimento e inovação

Além das abordagens estratégicas, a Embrapa reúne 19 temas de Contribuições em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (Embrapa, 2025b), que mostram como a ciência pode oferecer respostas concretas para o enfrentamento da mudança do clima (Figura 1.10). Elas apontam onde a ciência brasileira deve investir para fortalecer uma agropecuária resiliente e alinhada ao futuro climático. As contribuições da Embrapa conectadas pelo objetivo de transformar o presente e preparar o futuro da agropecuária estão relacionadas a:

Abordagem sistêmica na paisagem

Une diferentes áreas de conhecimento para criar novas soluções. Ela olha para os aspectos econômicos, sociais e ambientais de uma área (geralmente uma bacia hidrográfica) de forma integrada. Isso significa entender como as diferentes partes da paisagem (natureza, economia, sociedade) se conectam e planejar um manejo que vá além das propriedades individuais. O objetivo é manter os processos naturais funcionando bem, proteger a biodiversidade, garantir serviços ecossistêmicos múltiplos, produzir de forma sustentável, atrair turismo, gerar mais renda para os produtores e promover a saúde de todos. É cuidar da paisagem como um todo, pensando em todos os seus aspectos e conexões.

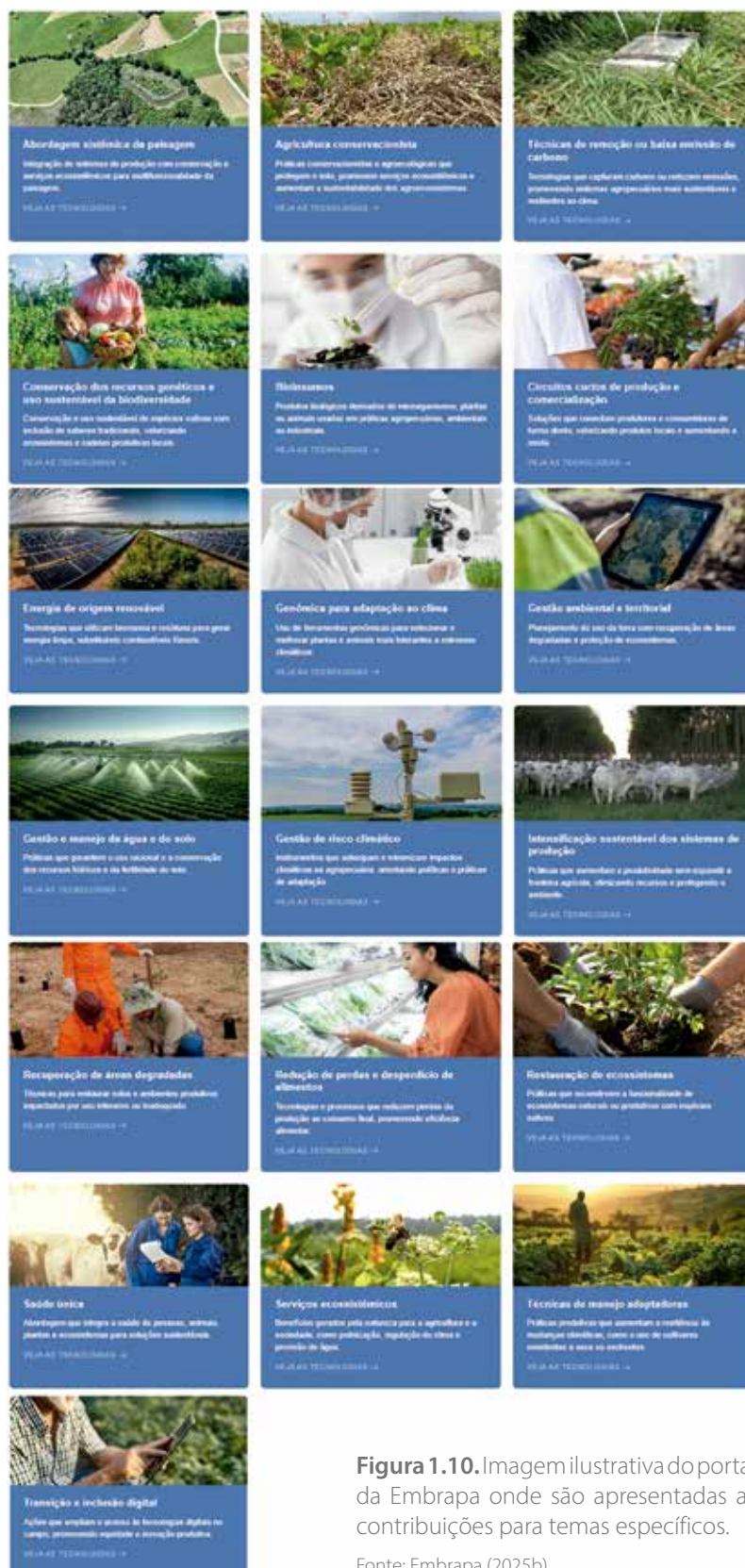


Figura 1.10. Imagem ilustrativa do portal da Embrapa onde são apresentadas as contribuições para temas específicos.

Fonte: Embrapa (2025b).

Agricultura conservacionista

Conjunto de práticas agrícolas que visa à produção sustentável, com preservação e restauração dos recursos naturais. Isso inclui técnicas como plantio direto, rotação de culturas, uso de coberturas do solo e manejo integrado de pragas e doenças, entre outras. Essas práticas têm como objetivo aumentar a produtividade a longo prazo, melhorar a saúde do solo, reduzir a erosão e conservar a água, além de considerar a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos. Foco no uso sustentável dos recursos naturais para garantir sua disponibilidade para as gerações futuras.

Bioinsumos

Insumo ou produto de origem animal, vegetal ou microbiana, destinado ao uso em prática, processo ou tecnologia, com aplicação agropecuária, ambiental e/ou industrial.

Circuitos curtos de produção e comercialização

Tecnologias que implicam em produção mais distribuída localmente, redução ou eliminação dos intermediários nas relações entre produtores e consumidores, assim como na diminuição dos locais de passagem interna de uma cadeia de valor, com a redução de etapas dentro de um processo, reconectando produtores e consumidores, socializando, valorizando o alimento e produtos não alimentares nas escalas local ou regional, e viabilizando melhoria na renda do agricultor e da qualidade de vida da população atendida.

Conservação dos recursos genéticos e uso sustentável da biodiversidade

A conservação dos recursos genéticos apresenta-se sob diferentes estratégias, como *ex situ* (fora dos ambientes naturais), *in situ* (em ambientes naturais) e *on farm* (conservação e manutenção, em geral, por agricultores familiares e povos e comunidades tradicionais). O uso sus-

tentável da biodiversidade está relacionado ao uso dos recursos naturais sem o comprometimento de sua diversidade genética e biológica, assegurando a manutenção das populações das espécies exploradas e as associadas, seus habitats e os mecanismos e processos ecológicos envolvidos. Possui relação direta com a inclusão socioprodutiva. Significa ainda conhecer, coletar, processar e agregar valor aos produtos advindos das espécies nativas da biodiversidade (fauna, flora e microrganismos), respeitando a capacidade de renovação dos ecossistemas, incluindo e valorizando o conhecimento tradicional nas cadeias de produção, praticando o manejo sustentável do solo, da água e respeitando o Código Florestal. Também são importantes nesse contexto o manejo integrado do fogo, transição agroecológica, uso racional da água, dentre outras práticas sustentáveis.

Energia de origem renovável

Energia obtida a partir de fontes eólicas, solares, hidráulicas, geotérmicas e de biomassas diversas, incluindo desde culturas agrícolas até resíduos urbanos. A inovação nesse campo envolvendo a agricultura está voltada à ampliação da produção de bioenergia e à implementação de tecnologias que substituem os combustíveis fósseis tradicionais. Além da geração hidroelétrica, queima direta de resíduos de biomassa e a geração de vapor, por exemplo, estão contemplados os biocombustíveis (etanol de primeira e segunda geração, biodiesel, biogás e combustíveis avançados).

Genômica para adaptação ao clima

Ferramentas e métodos de análises genéticas e de genomas, integração de dados e inteligência artificial para a compreensão e a manipulação de sistemas biológicos e identificação de genes, proteínas e rotas metabólicas com o objetivo de gerar ativos sustentáveis para a agropecuária e promover o melhoramento genético de plantas e animais para aumentar a produção, a tolerância a estresses bióticos (ameaças ao equilíbrio do ecos-

sistema apresentadas por quaisquer seres vivos) e abióticos (ameaças a equilíbrio de componentes ambientais não vivos, como solo, água, ar) e a resiliência às mudanças climáticas.

Gestão ambiental e territorial

Envolve o planejamento do uso da terra, a preservação de áreas protegidas e a recuperação de áreas degradadas, aumentando a eficiência do uso e a saúde do solo e contribuindo para a sustentabilidade da produção agrícola. Envolve também a análise do conjunto de informações sociais, econômicas e ambientais sobre o território, para seu adequado manejo e uso sustentável.

Gestão e manejo da água e do solo

Tecnologias que auxiliam no planejamento do uso da terra e do manejo do solo e da água, com a adoção de práticas e sistemas de produção que conservam e protegem esses recursos hídricos e edáficos, de forma a garantir a sustentabilidade ambiental, social e econômica. Inclui o fornecimento de água potável, a irrigação agrícola, o tratamento de águas residuais e a prevenção de inundações, práticas que minimizem o desperdício e a contaminação da água. Implica ainda em práticas que busquem a conservação e a manutenção da qualidade física, química e biológica do solo, promovendo sua fertilidade, evitando a degradação e melhorando a sua capacidade de suportar atividades produtivas de forma sustentável, sem comprometer os ecossistemas naturais.

Gestão de risco climático

Conjunto de ações coordenadas com o objetivo de reduzir probabilidades ou a magnitude dos impactos adversos de eventos climáticos a bens materiais, à sociedade, ao ecossistema e à atividade agropecuária. Envolve a identificação e a avaliação do risco, a prevenção, tratamento e transferência desse risco, além do monitoramento dos resultados na redução de perdas e danos, maximizando

os impactos benéficos e minimizando os efeitos negativos das respostas à mudança do clima.

Intensificação sustentável dos sistemas de produção

Estratégia para melhorar as práticas agrícolas, pecuárias e industriais e reduzir a pressão sobre áreas naturais, otimizando recursos e aumentando a produtividade sem expandir a fronteira agrícola. Compreende o uso de tecnologias, processos e produtos mais eficientes, focados em aumentar a produção por área e/ou produzir em menos tempo, com otimização/racionalização do uso dos insumos, emitindo menor quantidade de carbono equivalente por unidade de área, e/ou por um período de tempo menor.

Recuperação de áreas degradadas

Conjunto de técnicas e práticas aplicadas para restaurar áreas de terra que foram danificadas ou perdidas em sua capacidade produtiva devido a atividades agrícolas, pecuárias e de mineração. Essa degradação pode ser causada por diversos fatores, como erosão do solo, perda de matéria orgânica, compactação, salinização, contaminação por agrotóxicos e desmatamento.

Redução de perdas e desperdício de alimentos

Tecnologias e processos que visam minimizar perdas em todas as etapas da cadeia que vai desde a produção até o consumo final. Isso inclui a adoção de boas práticas agrícolas, melhorias no manuseio pós-colheita, armazenamento adequado, processamento eficiente, infraestrutura e logística adequadas, distribuição eficaz e conscientização sobre o desperdício.

Restauração de ecossistemas

Sistemas, processos ou práticas de recuperação de ecossistemas compostos por espécies nativas, em consórcio ou não com espécies exóticas,

que visem restabelecer ecossistemas naturais ou o uso econômico sustentável dos recursos naturais de imóvel rural. São exemplos os sistemas agroflorestais, os sistemas silvipastoris e a silvicultura de espécies nativas.

Saúde única

Abordagem integrada e unificadora que visa equilibrar e otimizar de forma sustentável a saúde de humanos, animais, plantas e ecossistemas. Reconhece que a saúde do ser humano, de animais domésticos e selvagens, plantas e ambiente e todos os ecossistemas estão intimamente ligados e são interdependentes.

Serviços ecossistêmicos

Benefícios que os ecossistemas naturais fornecem à humanidade, que são indispensáveis à sua sobrevivência e essenciais para o desenvolvimento socioeconômico e a conservação ambiental. No contexto agrícola, esses serviços desempenham um papel crucial na sustentabilidade dos agroecossistemas, proporcionando suporte à produção sustentável, regulação no uso de recursos e preservação ambiental. São exemplos, serviços de suporte (manutenção da biodiversidade, formação do solo etc.), serviços de provisão (alimentos, recursos genéticos etc.), serviços de regulação (da qualidade do ar, do clima etc.) e serviços culturais (valores estéticos, turismo etc.).

Técnicas de manejo adaptadoras

Ferramentas, métodos e práticas agropecuárias mais eficientes que permitem que os sistemas produtivos suportem eventos climáticos extremos com menor perda, mantendo ou mesmo aumentando sua produtividade. Abarcam um amplo leque de opções de manejo de sistemas produtivos cujo foco é em aumentar sua adaptação e resiliência aos efeitos da mudança climática. São exemplos: conservação da água e do solo, manutenção da cobertura do solo com matéria orgânica viva ou morta, rotação de culturas, uso eficiente e/ou

reúso da água, aumento da capacidade de infiltração do solo, diversificação da produção, cultivos protegidos e/ou sombreados, desenvolvimento e adoção de variedades e raças mais resistentes a ameaças biológicas ou do ambiente, entre outras.

Técnicas de remoção ou baixa emissão de carbono

As tecnologias de remoção de carbono do ambiente capturam e armazenam carbono da atmosfera, contrabalançando as emissões dos sistemas agropecuários, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. As tecnologias para baixa emissão de carbono visam produzir alimentos, fibras e energia minimizando a emissão líquida de gases de efeito estufa dos sistemas agrícolas.

Transição e inclusão digital

No contexto da agropecuária, a transição digital refere-se à incorporação de tecnologias digitais para transformar a produção agrícola, tornando-a mais eficiente, sustentável e competitiva. Para que essa transformação seja efetiva, é fundamental garantir a inclusão digital, democratizando o acesso dos produtores rurais a inovações. Esse processo exige uma abordagem ampla, que englobe infraestrutura, como a expansão da conectividade no campo; capacitação, por meio de treinamentos para o uso de tecnologias; soluções acessíveis, como aplicativos simplificados; e políticas públicas que reduzam desigualdades e promovam a digitalização do setor.

Soluções para todos os biomas brasileiros

Em cada bioma, tecnologias adaptadas à realidade local ajudam a tornar a produção agropecuária mais eficiente, resiliente e integrada à conservação ambiental. A riqueza das soluções desenvolvidas pela Embrapa reflete a diversidade do próprio Brasil (Figura 1.11). Em um país de dimensões continentais, com diferentes biomas, climas, solos,

Um olhar para o futuro

O contexto atual e um olhar para o futuro — onde se projeta a necessidade de produzir sob condições de mudança climática gradativamente mais severas e com maior frequência de eventos extremos, reduzindo a pressão sobre os biomas naturais que poderão amenizar os impactos sobre a própria agricultura ao mesmo tempo em que se precisa garantir a soberania alimentar e a segurança alimentar e nutricional — trazem desafios relevantes no que se refere a:

- **Continuar** aumentando a produtividade das culturas agrícolas.
- **Manter** a competitividade das cadeias produtivas.
- **Conhecer, gerir e reduzir** os riscos de produção, sobretudo o climático.
- **Promover** a resiliência e a adaptação dos sistemas de produção tropicais e nacionais aos efeitos da mudança climática.
- **Promover** a sustentabilidade dos sistemas de produção nas suas vertentes social, econômica, ambiental e institucional.
- **Contribuir** para o aumento da saudabilidade⁷ e para saúde única ou integral.
- **Promover** avanços tecnológicos rumo à independência de insumos importados e à produção de alimentos em quantidade e qualidade suficientes, em busca da soberania alimentar do país.

⁷ O conceito de saudabilidade se refere à qualidade de ser saudável ou benéfico para a saúde, ou a práticas que melhoram ou mantêm a saúde e a qualidade de vida. Está relacionada também ao conceito de saúde única ou integral, que busca promover a conexão entre a saúde animal, inclusive a humana, a vegetal e dos ecossistemas, ou seja, busca promover a saúde ambiental como um todo, em que se interconectam e se inter-relacionam os sistemas específicos de saúde dos elementos do sistema ambiental.

- **Contribuir** para o fornecimento de bioenergia, fibras e outros bioinsumos para processos de produção não alimentares e industriais.
- **Garantir** a inclusão socioprodutiva e digital na agricultura.

A despeito de toda a contribuição já oferecida pela Embrapa e parceiros, esses desafios se desdobram em oportunidades e ainda há muito a se desenvolver para promover a adaptação à mudança climática e a redução do aquecimento global. Há oportunidades para se avançar nos diversos temas e abordagens apresentados no item anterior, podendo se destacar, de forma não exaustiva, alguns tópicos específicos, como:

- Práticas conservacionistas.
- Manejo do solo e da água.
- Reservação, uso eficiente da água e da irrigação, reúso da água.
- Diversificação.
- Rotação de culturas.
- Cultivos protegidos, sombreados.
- Gestão de riscos de produção.
- Agricultura urbana e periurbana.
- Bioeconomia e economia circular.
- Redução de desmatamento e REDD+ (sigla para redução de emissões por desmatamento e degradação florestal).
- Restauração de ecossistemas.
- Biodiversidade, microbiomas e bioinsumos.
- Serviços ambientais ou ecossistêmicos.
- Conservação dos recursos naturais no agroecossistema.
- Intensificação sustentável da agricultura e agricultura regenerativa.
- Aprimoramento genético de cultivares e genômica avançada.

- Agrofloresta e sistemas integrados.
- Adaptação baseada nas comunidades e seus saberes.
- Produção de alimentos de forma mais distribuída e local, encurtando cadeias.
- Inclusão socioproductiva.
- Infraestrutura logística, armazenamento e estoques reguladores.
- Planejamento do espaço urbano e rural.
- Prontidão (*preparedness*) e sistemas de alerta.

Nova plataforma de pesquisa: estrutura, vertentes e enfoques

Para o planejamento desse avanço num futuro de médio e longo prazo, além da figura programática para a gestão da programação de pesquisa, o novo Portfólio Clima, Recursos Naturais e Transformação Ecológica (Portfólio EcoClima), a Embrapa lançou em 2024 a Iniciativa Integra Carbono Embrapa. Ela é composta por:

- Comitê Diretivo, focado nas questões de governança e estratégia corporativa, recursos e interação institucional.
- Comitê Permanente da Plataforma sobre Dinâmica de Carbono, Gases de Efeito Estufa e Adaptação na Agricultura (Plataforma CarbGEEAAg), que visa definir o planejamento das ações de pesquisa de forma mais integrada corporativamente, envolvendo suas redes de pesquisa no tema, reduzindo a pulverização e duplicidade de esforços, com um enfoque estruturante e de longo prazo, que permita o desenvolvimento de soluções integradas e completas de maior envergadura e impacto, num ambiente de colaboração e alianças interinstitucionais.
- Subcomitês temáticos, que têm foco no planejamento e implementação de ações corporativas com enfoques específicos.

- Redes de pesquisa envolvidas em projetos nos temas relacionados à adaptação e mitigação na agricultura, de acordo com as prioridades definidas conjuntamente aos Comitês e Subcomitês da Plataforma.

A Figura 1.13 representa a Iniciativa Integra Carbono Embrapa, o relacionamento entre seus comitês, a estrutura hierárquica da plataforma, e detalha os subcomitês e seus enfoques.

Sempre lastreada pelas suas redes de pesquisa, de comunicação e transferência de tecnologias e com um horizonte de longo prazo, a Plataforma CarbGEEAAg (Figura 1.13) possui quatro vertentes prioritárias para a sua governança voltadas à:

- Atualização de sua programação de pesquisa.
- Gestão da informação e conhecimento corporativo por meio de plataforma computacional no tema.
- Gestão da estrutura e de protocolos experimentais e analíticos para experimentos de longa duração.
- Desenvolvimento de métodos e técnicas de quantificação em diferentes escalas e propósitos.

Com essa concepção, a Embrapa planeja gerar soluções mais integradas e de impacto com os seguintes enfoques prioritizados:

- Monitoramento de risco, adaptação e sustentabilidade da agricultura nacional.
- Gestão da informação: bases de dados, funcionalidades e métricas sobre o balanço de carbono em sistemas agrícolas.
- Técnicas e instrumental acessíveis e escaláveis para monitoramento de dados de campo relativos a carbono e gases de efeito estufa.
- Balanço de carbono dos principais sistemas agrícolas nacionais, protocolos e representações.

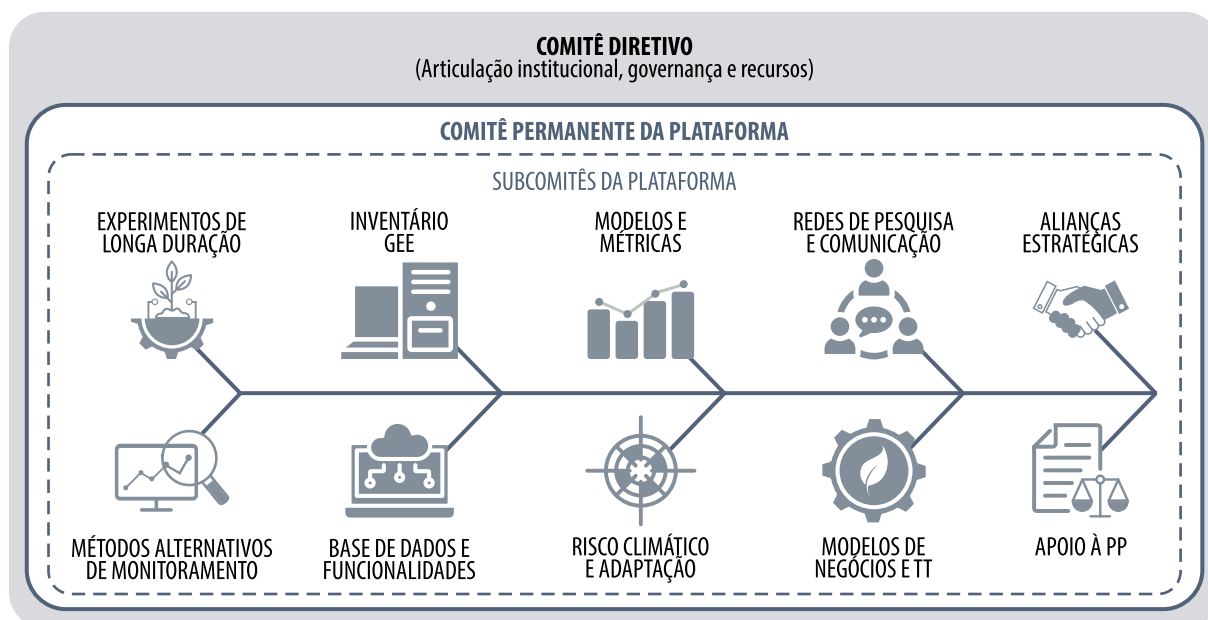


Figura 1.13. Relacionamento entre o Comitê Diretivo, o Comitê Permanente e os Subcomitês da Plataforma da Embrapa sobre Dinâmica de Carbono, Gases de Efeito Estufa e Adaptação na Agricultura (Plataforma CarbGEEAa), na lógica da Iniciativa Integra Carbono Embrapa. Ao lado, em quatro níveis, a estrutura hierárquica da governança da Iniciativa Integra Carbono Embrapa.



- Contabilidade de carbono e avaliação de ciclo de vida de produtos agropecuários brasileiros.
- Monitoramento e inventário agrícola no Acordo de Paris, desafios no médio e longo prazo.

Esses enfoques priorizados correspondem aos temas específicos analisados com mais detalhe nos capítulos deste livro, que sempre apresentam em sua estrutura uma introdução e descrevem o panorama atual dos seus respectivos temas. Apresentam ainda as Soluções de Inovação já oferecidas pela Embrapa e parceiros e as perspectivas futuras específicas para cada um deles.

A implementação de ações e de geração de resultados impactantes, partindo das soluções já desenvolvidas e disponibilizadas e apresentando o olhar para o futuro nesses respectivos enfoques ou temas, baseia-se numa lógica de evolução contínua e acumulativa da Plataforma CarbGEEAa, porém sempre com uma visão de entregas frequentes ao longo dessa evolução e que atendam a demandas específicas do setor agrícola. Na Figura 1.14 observa-se que uma gradativa evolução da plataforma ampliando e integrando conjuntos de bases de dados e funcionalidades (indicadores, métodos, modelos...) que permitam a geração de entregáveis que atendam a demandas da sociedade, fortalecendo e garantindo a sustentabilidade do processo e sua estruturação evolutiva ao longo dos anos.

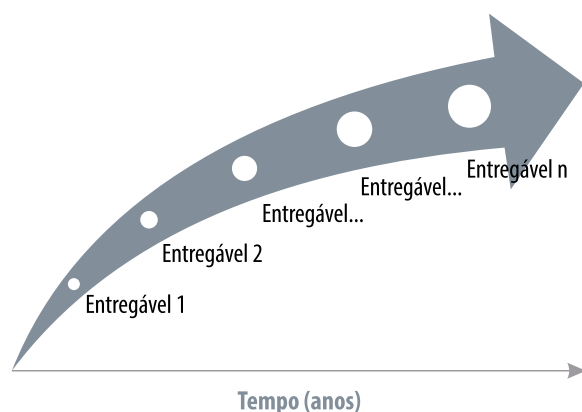


Figura 1.14. Representação da lógica evolutiva e integradora da Plataforma CarGEEAAg com a geração de entregáveis ao longo do tempo.

Com essa visão de futuro de médio e longo prazo, prevê-se uma abordagem corporativa mais integradora de esforços, estruturante, de longo prazo e que traga mais eficiência e impacto por meio de soluções inovadoras mais integradas e consistentes diante dos grandes desafios no tema da mudança climática e agricultura, apresentados ao longo deste capítulo.

A síntese de tudo

Caso se quisesse sintetizar em uma só frase a principal mensagem que este capítulo pretende passar — talvez este livro como um todo — seria algo como: o modelo de desenvolvimento, baseado em fontes fósseis de energia, provocou a mudança climática e a humanidade precisa urgentemente de alternativas baseadas em ciência para adotar um modelo sustentável — inclusive de agricultura — que permita reverter esse processo e que ela esteja adaptada aos cenários atuais e futuros que já se vislumbram como inevitáveis, garantindo a segurança alimentar, hídrica, energética e a saúde integral do planeta.

Sim, uma frase longa, provavelmente incompleta, para uma questão bastante complexa. Mas ela pode sintetizar a linha lógica que se traçou ao longo deste capítulo, abordando a discussão sobre: a fonte de energia natural que sustentou a vida na terra

ao longo das eras geológicas; como a descoberta humana da energia fóssil e o modelo de desenvolvimento de nossa sociedade global alterou esse balanço provocando a mudança do clima; como a agricultura e a segurança alimentar são afetadas por essa mudança; quais os nexos entre a agricultura e os demais setores afetados; como se dá a negociação internacional de acordos e de regras de estimativas comparáveis para o monitoramento do problema e como são internalizados pelos países; e, por fim, quais as soluções científicas já disponíveis e quais ainda se precisam encontrar para garantir a sustentabilidade e a saúde integral do planeta.

É preciso avançar como uma sociedade que produz conhecimento e que se apropria dele com sabedoria para promover a transição para um modelo de desenvolvimento em que haja real equilíbrio entre as vertentes econômica, social e ambiental, em que os recursos financeiros não suplantem em importância os recursos naturais ou os humanos e sociais. Sabedoria para resolver com responsabilidade e sinceridade os problemas que afligem a humanidade. Claro que ainda há muito a se fazer, mas em sendo capaz de dar maior adoção às soluções das quais se dispõe, já se dariam passos significativos na redução do problema, tanto no que se refere à adaptação quanto à mitigação.

Como reforça este capítulo, soluções há. Só resta algo que se pode sintetizar em uma única palavra: agir!

Referências

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.

Relatório do inventário nacional das emissões antrópicas por fontes e das remoções por sumidouros de gases de efeito estufa do Brasil: primeiro relatório bienal de transparência à convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima. Brasília, DF, 2024. 640 p.

BRASIL. Presidência da República. Secretaria de Assuntos Estratégicos. **Brasil 2040:** resumo executivo. Brasília, DF, 2015. 58 p. Disponível em: [https://www.agroicone.com.br/\\$res/arquivos/pdf/160727143013_BRASIL-2040-Resumo-Executivo.pdf](https://www.agroicone.com.br/$res/arquivos/pdf/160727143013_BRASIL-2040-Resumo-Executivo.pdf). Acesso em: 27 jun. 2025.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **PIB do agronegócio brasileiro**. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://www.cepea.org.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em: 27 jun. 2025.

CONVENÇÃO SOBRE MUDANÇA DO CLIMA, 1992, Nova York. [Brasília, DF]: Ministério da Ciência e Tecnologia, 1992. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/08/convencaomudancadoclima.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2025.

DECONTO, J. G. (coord.). **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. [Brasília, DF]: Embrapa, 2008. 82 p.

EMBRAPA. **Jornada pelo clima**: vitrine de tecnologias pelo clima: ciência e agricultura são partes da resposta à mudança climática. Disponível em: <https://www.embrapa.br/cop30/tecnologias/abordagens>. Acesso em: 3 set. 2025a.

EMBRAPA. **Jornada pelo clima**: vitrine de tecnologias pelo clima: como a Embrapa enfrenta a mudança do clima. Disponível em: <https://www.embrapa.br/cop30/tecnologias/contribuicoes>. Acesso em: 3 set. 2025b.

EMBRAPA. **Jornada pelo clima**: vitrine de tecnologias pelo clima: tecnologias para todos os biomas brasileiros. Disponível em: <https://www.embrapa.br/cop30/tecnologias/biomas>. Acesso em: 3 set. 2025c.

EMBRAPA. **Plano diretor da Embrapa**: 2024-2030. Brasília, DF, 2024. 45 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1163372/1/PDE-2024-2030.pdf>. Acesso em: 3 set. 2025.

EMBRAPA. **VI Plano diretor da Embrapa**: 2014-2034. Brasília, DF, 2015. 24 p.

EMBRAPA. **VII Plano diretor da Embrapa**: 2020-2030. Brasília, DF, 2020.

EMBRAPA. **Visão 2030**: o futuro da agricultura brasileira. Brasília, DF, 2018. 212 p.

FRIEDRICH, J.; GE, M.; PICKENS, A.; VIGNA, L. **This interactive chart shows changes in the world's top 10 emitters**. Washington, DC: World Resources Institute, 2023. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/interactive-chart-shows-changes-worlds-top-10-emitters>. Acesso em: 1º jul. 2025.

GE, M.; FRIEDRICH, J.; VIGNA, L. **Where do emissions come from?** 4 charts explain greenhouse gas emissions by sector. Washington, DC: World Resources Institute, 2024. Disponível

em: <https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>. Acesso em: 1º jul. 2025.

GLOBAL CLIMATE HIGHLIGHTS. **The 2024 annual climate summary**. 17 jan. 2025. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/custom-uploads/GCH-2024/GCH2024-PDF-1.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2025.

IPCC. **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Geneva, 2006.

IPCC. **2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Genebra, 2019.

IPCC. **Climate change 2014**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2014. 151 p.

IPCC. **Climate change 2023**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2023. 184 p. DOI: [10.59327/IPCC/AR6-9789291691647](https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647).

IPCC. **Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Geneva, 1996.

MONTEIRO, J. E. B. A.; BENDER, F.; BLIKSTAD, N. M. D.; CONCEIÇÃO, M. A. F.; STEINMETZ, S.; REISSER JÚNIOR, C.; FARIAS, J. R. B.; FRANCHINI, J. C.; SANTOS, P. M.; EVANGELISTA, B. A.; CUADRA, S. V.; ANDRADE, C. L. T. A.; FLUMIGNAN, D. L.; BRAGA, M.; SILVA, F. A. M.; OLIVEIRA, A. F.; MOURA, M. S. B.; VICTORIA, D. C.; ANDRADE, R. G.; CUNHA, G. R. **Gestão de riscos climáticos na agricultura**. Campinas: Embrapa Agricultura Digital, 2024. 67 p. (Embrapa Agricultura Digital. Documentos, 192). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1172189>. Acesso em: 11 jul. 2025.

PELLEGRINO, G. Q.; MATSUURA, M. I. S. F.; NASCIMENTO, A. F.; LIMA, C. E. P.; SANTI, A.; ZANATTA, J. A.; MADARI, B. E.; ZACHARIAS, A. O.; GUARDA, V. D. A. **Contexto de atuação do portfólio de mudanças climáticas da Embrapa**: oportunidades e desafios de inovação. [Brasília, DF: Embrapa, 2018]. 31 p. Disponível em: <file:///C:/Users/m335688/Downloads/Estado%20da%20arte%20e%20an%C3%A1lise%20t%C3%A9cnica%20-%20Portf%C3%B3lio%20MudClim.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2025.

THE ROYAL SOCIETY. **Science and diplomacy**. London, 2010.



CAPÍTULO 2

Monitoramento de risco, adaptação e sustentabilidade da agricultura nacional

Francislene Angelotti – Vanderlise Giongo – Carlos Eduardo Pacheco Lima – Danilton Luiz Flumignan – Rubens Sonsol Gondim – José Ricardo Macedo Pezzopane. – Patrícia Perondi Anchão Oliveira – Wagner Bettiol – Giampaolo Queiroz Pellegrino – Fabia de Mello Pereira

Introdução

Os cenários de mudança do clima apontam que o aumento de 1,5 °C na temperatura média global é inevitável (IPCC, 2022). No Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), os cientistas reforçaram que, mesmo com os compromissos climáticos atuais, é provável que o aquecimento global ultrapasse 1,5 °C nas próximas décadas. Além do aumento da temperatura, prevê-se maior frequência de eventos extremos, como secas severas, chuvas torrenciais e ciclones tropicais, que podem provocar queda da produtividade, redução das áreas aptas ao cultivo agrícola e aumento na ocorrência de pragas e doenças.

Nas regiões tropicais, em cenários de médias e altas emissões de gases de efeito estufa (GEE), projeta-se que o aquecimento global resultará em condições climáticas sem precedentes até meados ou final do século XXI, com impacto direto no rendimento das culturas tropicais. Assim, o aumento na frequência de eventos climáticos extremos no Brasil evidencia a necessidade urgente de planejamento estratégico e de investimentos em ações que reduzam a vulnerabilidade dos sistemas de produção no presente e assegurem a competitividade da economia no futuro.

O impacto da mudança do clima nesses sistemas dependerá da capacidade de implementar estratégias de adaptação eficazes. Diante do elevado grau de vulnerabilidade do setor agropecuário, é imprescindível



identificar gargalos, fomentar investimentos em pesquisa e desenvolvimento e gerar dados que possam apoiar um planejamento estruturado e estratégico. Agir com rapidez e clareza na adoção de medidas que aumentem a capacidade adaptativa dos sistemas de cultivo, fortalecendo sua resiliência diante das condições climáticas adversas, será imperativo.

Além disso, é essencial promover uma atuação em rede, assegurando que os atores envolvidos no processo de tomada de decisão estejam bem informados e compreendam a complexidade dos desafios. Essa abordagem deve ser transversal, indo além dos limites da propriedade agrícola e abrangendo a infraestrutura de transporte, logística, energia e a definição de indicadores de eficiência e performance, criando um ambiente favorável para a sustentabilidade da agricultura nacional.

Nesse sentido, a pesquisa agropecuária brasileira tem avançado no enfrentamento das mudanças do clima, por meio do desenvolvimento e implementação de medidas de adaptação que promovem uma produção sustentável. Essas pesquisas estão voltadas para identificação de lacunas de informação e do conhecimento, desenvolvimento de modelos regionais e cenários de risco climático, uso sustentável dos recursos naturais, redução da pressão sobre os biomas, proteção da biodiversidade, recuperação de áreas degradadas e restauração de ecossistemas em apoio à sustentabilidade dos sistemas produtivos. Também têm sido desenvolvidas novas estratégias e soluções tecnológicas de produção compatíveis com os cenários de riscos climáticos futuros, incluindo o apoio ao desenvolvimento de pesquisa genética, conservação de recursos hídricos e do solo, capacitação e manejo dos serviços ecossistêmicos.

Os riscos climáticos inerentes ao ambiente tropical exigem do Brasil uma postura estratégica, assegurando que o desenvolvimento tecnológico, o diálogo e a capacitação dos tomadores de decisão envolvidos ocorram de forma coordenada e integrada. A adaptação aos impactos da mudan-

ça do clima é uma ação estratégica de desenvolvimento econômico e crucial para a manutenção da competitividade do País. Para isso, é necessário adotar uma abordagem multifuncional, caracterizada por uma produção que promova a conservação dos solos, da água, da biodiversidade e dos processos ecossistêmicos, considerando as especificidades locais e regionais. Essas ações também devem contribuir para o controle das emissões dos GEE, por meio da adoção de sistemas agropecuários regenerativos (Brasil, 2023).

Entre as estratégias prioritárias, destacam-se o melhoramento genético para o desenvolvimento de cultivares tolerantes a estresses abióticos e bióticos decorrentes da mudança do clima, a melhoria da ambiência por meio de sistemas que reduzam a temperatura interna, a proteção contra chuvas intensas e o aumento da disponibilidade hídrica também. São exemplos dessas estratégias o uso de cultivo protegido, os cultivos indoor, o manejo racional da irrigação, o uso de mulchings (plásticos ou de resíduos vegetais), o reúso e a reservação de água, bem como sistemas de cultivo sem solo, como a hidroponia e a aeroponia, entre outros.

O primeiro passo para adaptação consiste em entender a vulnerabilidade e o risco dos sistemas de produção tanto frente ao clima corrente quanto ao clima projetado para o futuro, identificando, por exemplo, a melhor época de plantio das culturas e a ocorrência de problemas fitossanitários. A partir da análise de risco, medidas preventivas de curto, médio e longo prazo precisarão ser implementadas. Essas medidas devem contemplar a integração de tecnologias, incluindo o uso combinado de cultivares tolerantes ao aumento da temperatura e ao déficit hídrico, práticas de conservação do solo (como uso de cobertura morta, rotação de culturas e do plantio direto), manejo racional da água e de insumos, uso de microrganismos promotores de crescimento e agentes de controle biológico e diversificação e integração de cultivos.

Práticas que priorizem a conservação do ecossistema contribuem para o enfrentamento da mudança

do clima. A adoção coordenada dessas tecnologias pode potencializar a capacidade adaptativa dos sistemas de produção, promovendo a segurança alimentar e sustentabilidade (Figura 2.1).

Entretanto, o processo de adaptação é contínuo, e as soluções propostas precisarão ser realizadas e aprimoradas dentro do contexto local e regional, bem como em função do cultivo, o que reforça o papel da pesquisa agropecuária.

Panorama atual – risco climático na agropecuária

A exposição dos cultivos aos riscos climáticos é uma realidade inerente à própria atividade agrícola, portanto é notório que o setor agrícola figure entre os mais vulneráveis aos impactos cor-

rentes e futuros da mudança do clima. Por si só, essa condição já imputa ao setor a necessidade de investimento significativo em capacitação e na compreensão dos desafios inerentes não só à variabilidade natural do clima, mas também das transformações já provocadas pela mudança do clima nas dinâmicas no campo – e que continuarão impactando de forma importante o setor agrícola ao longo das próximas décadas. Assim faz-se necessário a incorporação de conhecimentos e tecnologias na prática diária, a fim de conviver com esses riscos e reduzir seus efeitos.

Ray et al. (2015) estudaram, ao longo de três décadas (1979–2008), a influência da variabilidade interanual das condições climáticas sobre a produção nas principais regiões produtoras do mundo de milho (*Zea mays*), arroz (*Oryza sativa*), trigo (*Triticum aestivum*) e soja (*Glycine max*). Segundo

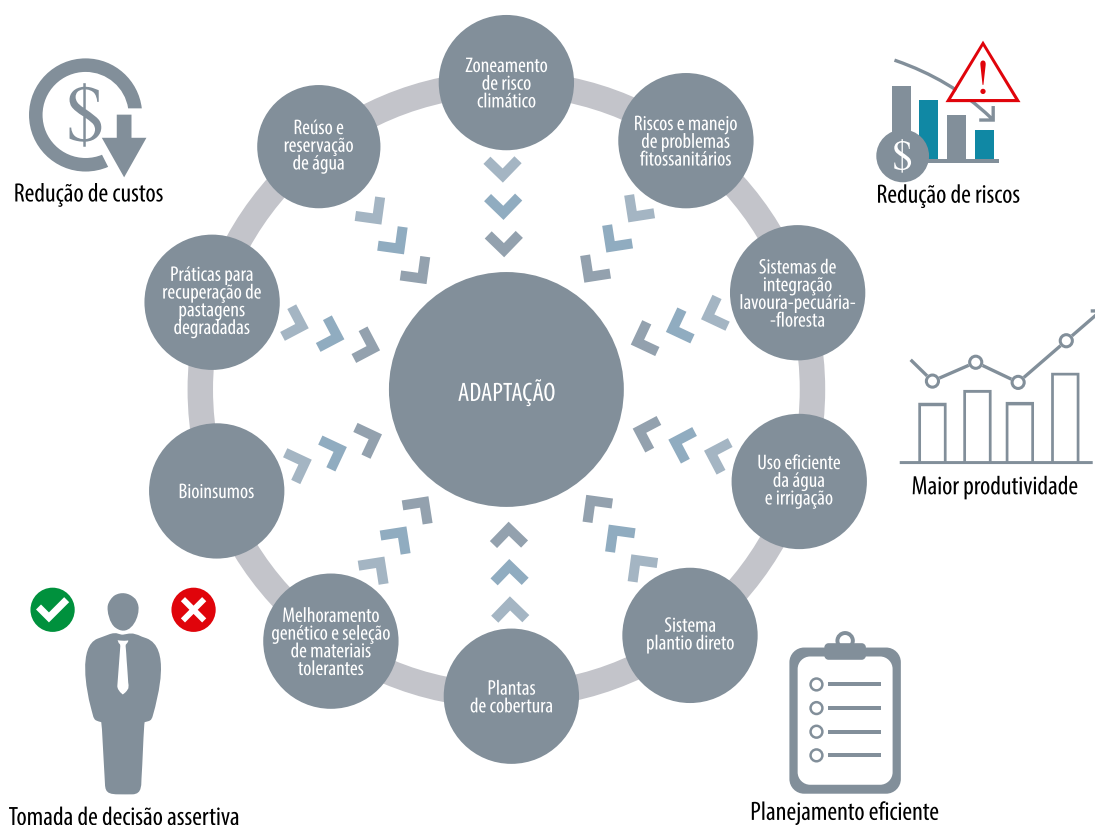


Figura 2.1. Vantagens da adoção de medidas de adaptação para a produção agropecuária.

os autores, embora nem todas as regiões tenham sofrido influência significativa do clima, foram identificadas áreas em que mais de 60% da variabilidade da produção era explicada por variação das condições meteorológicas ano a ano. Essa relação de causa (variabilidade climática) e efeito (variabilidade na produção) foi evidenciada na grande maioria das regiões produtoras de milho (70%), arroz (53%), trigo (79%) e soja (67%). Nessas regiões, concentravam-se 78% da produção mundial de milho, 52% de arroz, 75% de trigo e 67% de soja. O estudo demonstrou que, na maioria das regiões produtoras, a variabilidade do clima é responsável por 32 a 39% da variabilidade na produção desses cultivos.

Diante da crescente mudança do clima, que já altera padrões e produz impactos negativos na vida no campo, torna-se cada vez mais difícil planejar estratégias eficazes para lidar com os riscos climáticos. Essa dificuldade é particularmente potencializada em comunidades com baixo nível de compreensão das dimensões e complexidades associadas ao processo de mudança do clima, o que resulta em pouca adesão a tecnologias e práticas que poderiam reduzir os riscos. Como consequência, observa-se aumento da imprevisibilidade, elevação dos custos com seguro agrícola, perdas econômicas, sociais e ambientais e a insegurança alimentar em diversas escalas, em função da incerteza do clima. Esse cenário evidencia a importância estratégica do desenvolvimento científico e o papel da academia em amplo diálogo com a sociedade. A construção de pontes de entendimento entre ciência e sociedade acerca dos desafios e impactos impostos pela mudança do clima é uma estratégia fundamental de adaptação no setor agrícola. A decisão de priorizar investimentos estratégicos e estruturantes em pesquisa de longo prazo torna-se cada vez mais necessária como forma de antecipar riscos e gerar tecnologias adequadas para enfrentá-los.

No Brasil, o impacto da mudança do clima sobre o setor agrícola tem sido estudado há déca-

das, com particular atenção a partir de 2018 (Fiorini et al., 2024). As principais variáveis climáticas consideradas nesses estudos foram a temperatura do ar e a precipitação. As culturas mais investigadas incluem o milho, a soja e a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), embora também existam análises envolvendo culturas como o cacau (*Theobroma cacao*), arroz, feijão (*Phaseolus vulgaris*), trigo, mandioca (*Manihot esculenta*) e outras. Segundo Fiorini et al. (2024), dentre os estudos avaliados, 67% reportaram impactos negativos aos sistemas de produção em decorrência da mudança do clima, 15% reportaram tanto impactos negativos quanto positivos, 11% reportaram neutralidade e somente 7% reportaram impactos exclusivamente positivos.

Conforme dados do Banco Central do Brasil, o principal fator de risco climático na agricultura são os eventos de seca, responsáveis pela maior parte das perdas econômicas cobertas pelo Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (Proagro), entre os anos de 2013 a 2021. No caso da soja e do milho, por exemplo, as perdas associadas às secas contabilizaram 86,8 e 75% das indenizações pagas pelo programa, respectivamente. Por outro lado, para o trigo a seca é menos relevante (16%), se comparada à chuva excessiva (37%) e às geadas (39,4%) (Banco Central do Brasil, 2025).

Para a pecuária, o problema mais crítico é a estacionalidade da produção de forragem (sazonalidade), caracterizada pela oferta inconstante de alimento ao longo do ano. No período das águas, as condições ambientais são favoráveis e a oferta de alimento é abundante. Mas, no período da seca, com a diminuição da temperatura, da luminosidade e da precipitação, há escassez de forragem, ocasionando queda na produção e na taxa de reprodução dos animais (Oliveira, 2024a). Essa situação ainda se agrava pela degradação das pastagens, que facilita a perda de água e a erosão, pela presença de solo exposto, e, mais recentemente pelos eventos climáticos extremos decorrentes da mudança do clima, como secas mais prolongadas

e geadas na época de escassez de alimentos (Oliveira et al., 2022a).

Os cenários futuros para pastagem no Brasil até 2070 mostram que, embora possa haver aumento de produtividade decorrente do aumento de temperatura, também haverá variações na produção entre anos e estações. A estacionalidade da produção de forragem será acentuada, com maior produção na época das águas e menor na época de déficit hídrico — especialmente em solos com baixa capacidade de armazenamento de água, como os arenosos (Pezzopane et al., 2019) e os degradados. Esses cenários tornam o planejamento forrageiro imprescindível.

Embora o Brasil disponha de 12% da água doce superficial do planeta (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2022), essa disponibilidade é distribuída de modo desigual ao longo do território nacional, com regiões que enfrentam excesso hídrico e outras que sofrem escassez crônica, como o Semiárido brasileiro.

Em geral, as projeções de mudança do clima indicam aumentos de até 1 mm/dia na evapotranspiração de referência (ET_0), principalmente nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste (Monteiro et al., 2024a). Esses aumentos evidenciam maior pressão sobre o balanço hídrico e a tendência de intensificação da deficiência hídrica na agricultura. O crescimento populacional também deve gerar pressão sobre os múltiplos usos dos recursos hídricos, tornando a situação ainda mais difícil.

Relatos de Coutinho e Cataldi (2023) mostram tendências de redução da disponibilidade hídrica entre 2020 e 2100, bem como aumento da magnitude e da frequência de eventos extremos nas bacias hidrográficas dos rios Parnaíba e São Francisco, na região Nordeste, e dos rios Iguaçu e Uruguai na região Sul. As projeções baseadas nos cenários do IPCC também apontam uma maior intensidade desses eventos nos cenários caracterizados por um maior uso de energia, combustí-

vel fóssil e outras demandas relacionadas ao atual modelo de desenvolvimento.

Especificamente no bioma Cerrado, projeta-se que a água armazenada em reservatórios deverá diminuir no futuro, resultando em maiores riscos de falha no abastecimento, especialmente de reservatórios de menor porte. Espera-se que o aumento da evaporação reduza a disponibilidade de água em pequenos reservatórios durante a estação seca, podendo chegar a uma perda de até 10,4% nos cenários mais severos do IPCC (Althoff et al., 2020). Além disso, a recarga média mensal de águas subterrâneas pode diminuir em 21% no cenário intermediário e em 29,4% no cenário mais severo, o que comprometeria a disponibilidade hídrica e acentuaria os conflitos entre os usuários, especialmente durante a estação seca (Cambaia Neto et al., 2021).

No Nordeste brasileiro, segundo Medeiros e Oliveira (2022), os modelos climáticos projetam um aumento do número de dias secos ao longo do ano em todos os cenários, ampliando a seca da região, sobretudo no cenário mais severo do IPCC. Os modelos também sugerem uma maior intensidade da precipitação no verão, ou seja, o mesmo volume de chuvas ocorrendo em menor número de eventos, o que pode dificultar o manejo e impactar negativamente o rendimento das culturas. Por outro lado, a vazão de água que flui para os reservatórios e, conseqüentemente, a disponibilidade hídrica para a agricultura irrigada e outros usuários, depende dessa chuva. Portanto, a segurança hídrica no Nordeste brasileiro poderá depender fortemente da capacidade de armazenamento e gestão dos recursos hídricos na região.

Além disso, com a evapotranspiração mais elevada, causada por temperaturas mais altas devido à mudança do clima, deverá haver maior demanda de água pelas culturas agrícolas. Dessa forma, mudanças climáticas e aumento da demanda por alimentos configuram-se como importantes elementos de pressão sobre os recursos hídricos, especialmente no que se refere à agricultura ir-

rigada. Diante disso, torna-se fundamental a implementação de políticas públicas com foco em medidas adaptativas que promovam a segurança hídrica e a resiliência dos sistemas de produção.

Soluções

Zoneamento agrícola de risco climático

Dada a importância de minimizar as perdas da produção agrícola no Brasil em função dos elementos climáticos, na década de 1990, a Embrapa e o Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) deram início ao Projeto de Redução de Riscos Climáticos (Rosseti, 1998), que foi o ponto de partida para a consolidação da tecnologia Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc). O Zarc visa à avaliação de risco para os cultivos agrícolas a partir dos elementos agrometeorológicos e da estimativa da probabilidade de atendimento de requisitos climáticos das culturas agrícolas para as diferentes regiões e épocas de plantio.

O Zarc é realizado mediante o apoio técnico-científico da Embrapa, sendo mantido e atualizado pelo Mapa. Os resultados dos estudos do Zarc constituem informações oficiais e balizadoras para os entes envolvidos no setor agropecuário – como o setor produtivo, instituições de crédito e seguro rural e o poder público – na tomada de decisão acerca de práticas que minimizam o risco climático para a produção agropecuária. Logo, o Zarc atua como um forte indutor de boas práticas agrícolas que resultam em maior resiliência dos sistemas de produção de alimentos, fibras e energia.

As informações geradas pelo Zarc são formalizadas por meio de portarias publicadas pelo Mapa e servem como indicadores para elaboração de contratos no âmbito do Proagro, do Programa de Subvenção ao Prêmio do Seguro Rural (PSR), bem como para operações do seguro e crédito rural

(Monteiro et al., 2024b; Banco Central do Brasil, 2025). Essas atividades estão atreladas à Política Agrícola Nacional (Lei nº 8.171/1991). Em 2024, o valor enquadrado nas operações do Proagro, de acordo com a Matriz de Dados do Banco Central do Brasil, foi de R\$ 22,48 bilhões (Banco Central do Brasil, 2025). Já no PSR, a importância assegurada em 2023 superou os R\$ 51,6 bilhões (Brasil, 2024).

Para a elaboração do Zarc, são utilizadas séries históricas de dados meteorológicos com cerca de 30 anos em, aproximadamente, 3,5 mil pontos de observação distribuídos no território nacional (Monteiro et al., 2024b). Esses dados são aplicados em modelos de simulação para gerarem balanços hídricos de cada cultura agrícola zoneada. Os resultados são então confrontados com as necessidades específicas de cada cultura, cujo não atendimento pode comprometer o crescimento e a produção dos cultivos.

O processo de simulação é realizado em base decenal (36 decêndios ao ano), levando em consideração ciclos de maturação das cultivares e diferentes tipos de solo. A partir das informações do balanço hídrico e da temperatura do ar, calcula-se a frequência de ocorrência de condições meteorológicas favoráveis ou desfavoráveis ao cultivo ao longo das séries históricas. De acordo com Monteiro et al. (2024a), os seguintes eventos meteorológicos adversos podem ser levados em consideração: períodos de estiagem durante fases sensíveis, como o florescimento e enchimento de grãos; ocorrência de geadas; chuvas excessivas impedindo a mecanização da colheita ou afetando a qualidade dos grãos; excesso de umidade, favorecendo doenças fúngicas; e temperaturas muito altas, causando o abortamento de flores ou a queda de frutos em fase inicial de formação.

Com base nessas simulações, o Zarc apresenta como resultado final, no espaço (regiões ou municípios) e no tempo (épocas de plantio e cultivo), o risco climático para cada combinação de cultura, comprimento de ciclo e classe de solo, permitindo identificar locais e épocas do ano com maiores

chances de sucesso, ou seja, menores chances de frustrações de safra (Monteiro et al., 2024b).

Como instrumento de avaliação de risco climático, o Zarc é uma ferramenta dinâmica do ponto de vista temporal e metodológico, sendo constantemente aprimorada por meio de atualizações no suporte técnico-científico, conduzidas pela equipe do projeto de pesquisa. Nesse sentido, destaca-se a melhor definição do conceito de água disponível para as culturas (Monteiro et al., 2022), a qual estabeleceu seis níveis de água disponíveis do solo, ao invés dos três níveis adotados anteriormente.

Outra inovação em desenvolvimento é o Zarc Níveis de Manejo (Zarc NM), que incorpora critérios que levam em consideração a qualidade do manejo do solo adotado pelos produtores (Debiasi et al., 2022). A proposta baseia-se na premissa de que a adoção de práticas conservacionistas contribui significativamente para a melhoria da resiliência dos sistemas de produção e, assim, reduz a sua vulnerabilidade aos eventos meteorológicos adversos.

Além disso, diante do contexto de um mundo que experimenta a mudança do clima, a equipe do projeto Zarc está realizando análises iniciais sobre os riscos climáticos futuros, com base em projeções do IPCC. Esses estudos utilizam os cenários climáticos desenvolvidos na 6ª fase do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP6)¹ e estão sendo aplicados nos modelos de simulação do Zarc para avaliar os impactos das mudanças projetadas no risco climático das culturas agrícolas ao longo do tempo.

Embora o Zarc seja uma ferramenta voltada prioritariamente à adaptação às mudanças climáticas, suas recomendações também incentivam práticas agrícolas mais sustentáveis, como o uso de sistemas conservacionistas e o manejo eficiente do solo e da água, o que pode resultar em contribuições indiretas para a mitigação de emissões de GEE.

Riscos e manejo de problemas fitossanitários

A nova geografia dos cultivos, devido à mudança do clima, impactará também na ocorrência de pragas e doenças. Essa é uma preocupação mundial, uma vez que 20 a 40% da produção agrícola global é perdida devido à ocorrência de problemas fitossanitários (IPCC, 2021). No Brasil, estudos de riscos ocasionados por fungos, bactérias, nematoides e vírus foram conduzidos em 32 cultivos de importância econômica. As análises indicam que, das 304 interações entre plantas e microrganismos avaliadas, 46% das doenças agrícolas tendem a apresentar aumento no risco de favorabilidade climática, o que pode intensificar a sua severidade (Angelotti et al., 2024). Esse é um sinal de alerta importante, uma vez que as estratégias de manejo precisarão ser acompanhadas, e até mesmo modificadas, para a efetividade no controle dos patógenos.

A avaliação desses riscos tem sido realizada por meio de modelagem e experimentação em campo (Angelotti et al., 2017; Araujo et al., 2019; Bissonard et al., 2020). Os avanços mais recentes destacam análises regionalizadas, como no caso das doenças da videira, cujo risco de ocorrência pode aumentar, dependendo da região produtora, uma vez que no Brasil a videira é cultivada tanto em regiões de clima temperado quanto tropical (Angelotti et al., 2017). Outro exemplo relevante é o da sigatoka-negra, doença de grande importância para a cultura da bananeira. Estima-se que o risco de infecção tende a aumentar em 44,2% nas áreas produtoras de banana da América Latina e Caribe (Bebber, 2019).

As doenças transmitidas por vírus também merecem atenção especial, uma vez que o aumento da temperatura pode impactar diretamente os vetores, como os pulgões, acelerando seus ciclos de vida e resultando no aumento da população, o que favorece a disseminação do vírus.

¹ Disponível em: <https://wcrp-cmip.org>.

Com base nas análises de risco, e considerando a interação entre o patógeno e o novo cenário climático, será necessário adotar estratégias de adaptação para a proteção fitossanitária dos cultivos. Entre as principais medidas destacam-se: a) a adoção de práticas preventivas para reduzir a disseminação de pragas e patógenos; b) o fortalecimento da vigilância fitossanitária; c) o uso de cultivares tolerantes ou resistentes a doenças; d) desenvolvimento de novas moléculas químicas ou bioquímicas; e) seleção de agentes de controle biológico adaptados ao aumento da temperatura do ar; f) a promoção de sistemas de cultivo diversificados; g) a integração de diferentes tecnologias de manejo; e h) o emprego de modelos de previsão e alerta de epidemias (Angelotti et al., 2024).

Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta

A integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) é uma estratégia de produção sustentável que integra atividades agrícolas, pecuárias e/ou florestais realizadas na mesma área, em cultivo consorciado, em sucessão ou rotacionado. A ILPF busca a diversificação da produção e os efeitos sinérgicos entre os componentes do agroecossistema em quatro modalidades de sistemas de produção: integração lavoura-pecuária – ILP (agropastoril); integração lavoura-floresta – ILF (silviagrícola); integração pecuária-floresta – IPF (silvipastoril); e integração lavoura-pecuária-floresta – ILPF (agrossilvipastoril).

A adoção de ILPF no Brasil foi estimada em 11,5 milhões de hectares na safra 2015/2016, com maior concentração nos estados do Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Rio Grande do Sul, Minas Gerais, Goiás e Distrito Federal, São Paulo e Santa Catarina. Considerando uma taxa anual média de incremento de 0,96 milhão de hectares no período de 2005 a 2015, estima-se que, no Brasil, em 2020, existiam cerca de 16,27 milhões de hectares com alguma modalidade de ILPF (Polidoro et al., 2021).

A ILPF integra as ações do Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC), instituído em 2012, e revisado em 2020, quando passou a ser denominado Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária, com vistas ao Desenvolvimento Sustentável (2020–2030) (Plano ABC+) (Brasil 2023). O Plano ABC+ prevê a expansão da área adotada em ILPF no Brasil em 9 milhões de hectares até 2030, contribuindo para o aumento de práticas agrícolas sustentáveis, a expansão da agropecuária para assegurar as demandas globais de alimento e a redução na emissão de gases de efeito estufa (GEE), sem a necessidade de abertura de novas áreas.

A ampliação das áreas cultivadas nas diversas modalidades de ILPF proporciona ao Brasil um modelo de uso sustentável da terra, com menor impacto ambiental e diversificação de renda. Esse resultado decorre de características inerentes ao sistema, como a diversificação e o aumento de produção por área, a provisão de serviços ambientais, a redução de emissão de GEE e o aumento do sequestro de carbono, além do efeito poupa-terra, que favorece a preservação ambiental (Oliveira et al., 2024b). As características positivas desses sistemas de produção determinam o elevado potencial de expansão da sua adoção no País, principalmente incorporando áreas improdutivas, incluindo as grandes extensões de pastagens degradadas.

Diversas pesquisas demonstram que sistemas de integração lavoura-pecuária aumentam o teor de matéria orgânica do solo e favorecem a formação de agregados por meio das atividades das raízes, especialmente com a presença dos capins tropicais. Esses fatores melhoram a qualidade global do solo, devido aos ciclos de rotação lavoura-pastagem, aumentando a retenção de água no solo, proporcionando aos sistemas de produção maior resiliência nos períodos de veranicos (Salton et al.,

2014; Bieluczyk et al., 2024). Além disso, quando bem manejados, com lotação animal adequada, esses sistemas mantêm a produtividade de diversas culturas e são essenciais para a manutenção da segurança alimentar em um ambiente climático cada vez mais desafiador (Nunes et al., 2021b). A diversificação de renda também contribui para reduzir riscos climáticos e flutuações do mercado (Vinholis et al., 2021).

A inclusão do componente arbóreo nos sistemas de produção (Figura 2.2), caracterizando a modali-

dade de sistemas silvipastoril ou agrossilvipastoril, representa ainda uma estratégia de adaptação à mudança do clima, em função das alterações do ambiente proporcionadas pelas árvores, que vão refletir na melhoria dos índices de conforto térmico animal (Magalhães et al., 2020). Pezzopane et al. (2019) verificaram que sistemas silvipastoris com eucalipto ou espécies nativas foram capazes de postergar o início de estresse térmico animal em até 2,2 °C na temperatura média, em comparação a sistemas sem árvores.



Fotos: José Ricardo Pezzopane

Figura 2.2. Pastagem de capim-braquiária implementado em sistema de integração lavoura-pecuária, após lavoura de soja (A) e sistema silvipastoril com pastagem de braquiária e eucalipto (B).

Uso eficiente da água e irrigação

No contexto das mudanças climáticas, o uso eficiente da água e a modernização da irrigação se apresentam como estratégias fundamentais de adaptação para garantir a resiliência e a sustentabilidade da agricultura brasileira.

Entre as soluções tecnológicas para o aumento da produção de modo sustentável usando as mesmas áreas produtivas, está a irrigação. Conforme demonstra o *Atlas Irrigação*, publicado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021), o Brasil irrigava em 2019 um total de 8,2 milhões de hectares. Nesse mesmo documento, estimou-se que o potencial para aumento da área irrigada no País era de 55,85 milhões de hectares, sendo que as áreas com condições mais favoráveis ao desenvolvimento da agricultura irrigada representavam 13,69 milhões de hectares, um potencial efetivo de 24,5% do total adicional irrigável. Esses dados evidenciam a pouca exploração da tecnologia da irrigação no Brasil e, sobretudo, seu potencial alcance e impacto diante da perspectiva de sua crescente adoção nos sistemas produtivos do agro brasileiro.

Contudo, o aumento da área irrigada implica, naturalmente, em aumento do uso dos recursos hídricos e, possivelmente, aumento nos conflitos pelo seu uso, sobretudo em regiões com menor disponibilidade hídrica. Nesse sentido, fazem-se necessárias as soluções para o uso eficiente da água, especialmente considerando os potenciais impactos da mudança do clima sobre a disponibilidade dos recursos hídricos.

A análise de sensibilidade da demanda hídrica para irrigação ao aumento da eficiência de aplicação, especialmente para sistemas com baixa eficiência, é superior aos incrementos de demanda projetados pelos efeitos das mudanças climáticas. Esse tipo de resposta indica que a eficiência dos sistemas é um importante fator operacional a ser considerado em estratégias de adaptação para a agricultura irrigada (Maia et al., 2016). Ganhos na eficiência de irrigação

podem ser capazes de compensar os incrementos projetados na demanda hídrica ocasionado pelas mudanças climáticas, conforme relatado por Gondim et al. (2008, 2012, 2018).

Uma melhor gestão da água, assim como o emprego de insumos e práticas agronômicas adequadas, poderia resultar em maior produção sob um mesmo nível de consumo de água. A maior produtividade da água de irrigação (kg/m^3) aumenta a “economia real de água”, possibilitando uma maior produção com a mesma quantidade de evapotranspiração (Van Opstal et al., 2021).

Existem opções de manejo que os agricultores podem adotar visando melhorar a produtividade da água e, ao mesmo tempo, proteger os seus rendimentos. Assim, pode-se elencar estratégias para otimizar o uso da água de irrigação, a serem adotadas no âmbito da unidade produtiva:

- Adoção preferencial pela irrigação localizada, ou seja, por gotejamento ou microaspersão, bem como avaliação da uniformidade de aplicação da água periodicamente, realizando a manutenção preventiva do sistema para reparos de possíveis vazamentos ou entupimentos, visando ao alcance de uma alta uniformidade de distribuição da água. A irrigação por gotejamento é uma tecnologia que pode melhorar significativamente a eficiência de uso da água. Pesquisas indicam que a aplicação controlada e oportuna de água por meio de irrigação por gotejamento aumenta a produção de forragem e especialmente a eficiência de uso da água durante as estações secas, levando à utilização mais eficaz da terra, fertilizantes e água disponíveis (Jha et al., 2016).
- Aplicação de cobertura morta ou plantio direto na palha (Figura 2.3) para reduzir perdas por evaporação, uma vez que a palhada, ao proteger o solo da radiação solar, diminui as perdas por evaporação, aumentando a retenção e disponibilização da água no solo.

- Aplicação de *mulch* plástico branco (Figura 2.4), que promove retenção hídrica na superfície do solo, reduzindo perdas por evaporação. Em estudo com várias coberturas de solo em cultivo de melancia, Saraiva et al. (2017) concluíram que *mulch* plástico branco resultou em maior retenção hídrica com maiores produtividades e frutos de melhor qualidade, quando comparado ao solo sem cobertura.
- Utilização de sensores de umidade no solo (Figura 2.4). Há vários tipos desses sensores no mercado, sendo os tensiômetros de água os de simples utilização. Os sensores do tipo reflectometria no domínio do tempo (TDR), embora mais caros, são úteis para monitorar grandes áreas e medem níveis de umidade que os tensiômetros não são capazes. Os sensores permitem avaliar o conteúdo de água no solo



Fotos: Sebastião José de Araújo

Figura 2.3. Cultivos de melão (A) e de feijão (B) em plantio direto na palha.



Fotos: Fabrícia da Silva Ramos

Figura 2.4. Aplicação de *mulch* plástico branco para redução das perdas por evaporação (A). Sensor TDR de umidade no solo (B).

que encontra-se disponível para as plantas. Dessa forma, é possível identificar o momento e a quantidade de água para aplicar.

- Irrigação com déficit controlado. Nessa estratégia, a irrigação é aplicada durante os estágios de crescimento da cultura sensíveis à seca. Fora desses períodos, a irrigação é limitada, ou mesmo desnecessária, quando a chuva fornece um suprimento mínimo de água. A restrição hídrica é limitada a espécies tolerantes à seca e em estágios fenológicos menos críticos. Embora isso resulte inevitavelmente em estresse hídrico para as plantas e, conseqüentemente, em perda de produção, a produtividade da água (kg/m^3) pode, de fato, aumentar. Raeisi et al. (2019) relataram aumento da produtividade física da água em trigo de $0,37 \text{ kg}/\text{m}^3$ (com irrigação total) para $0,56 \text{ kg}/\text{m}^3$ com a implementação da irrigação deficitária (50% de déficit).
- Aplicação de condicionadores de solos, como biocarvão (Figura 2.5) ou hidrogel, para aumento da retenção hídrica na zona radicular em solos

arenosos. Os hidrogéis são polímeros hidroabsorventes que ajudam a reter água no solo. Já o biocarvão é um material carbonizado de uma combustão incompleta de material orgânico que retém água na sua porosidade. Os biocarvões têm sido aplicados com o objetivo de melhorar a fertilidade do solo, mitigar os efeitos da mudança do clima, através do aumento de sequestro de carbono no solo, redução das emissões de gases de efeito estufa e aumento da capacidade de retenção de água em solo arenoso. Gondim et al. (2020) relatam uma redução do consumo hídrico em mudas de cajueiro no primeiro ano de 120 L por planta ao ano para 70 L por planta ano e 55 L por planta ao ano, utilizando biocarvão de lenha de cajueiro e hidrogel, respectivamente. Em plantas adultas de cajueiro-anão irrigado, Gondim et al. (2024) observaram redução de 14.098 L por planta ao ano para 11.962 L por planta ao ano, com máxima produtividade da água de $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$ de castanhas (tratamento controle $0,93 \text{ kg}/\text{m}^3$) e $8,9 \text{ kg}/\text{m}^3$ de pedúnculos (tratamento controle $8,1 \text{ kg}/\text{m}^3$).

- Desenvolvimento, disponibilização e adoção pelos produtores, de aplicativos para dispositivos móveis visando à disseminação da informação da evapotranspiração de referência em tempo real e do tempo de irrigação capaz de suprir as necessidades hídricas dos cultivos. Pode evoluir com uso de Internet das coisas (IoT) e inteligência artificial capaz de monitorar e prever as características climáticas, físicas, químicas e hidrológicas de um campo e, por outro, detectar, localizar e prever características biológicas dos cultivos (Bounajra et al., 2024).
- O uso eficiente de fertilizantes está associado com a eficiência de uso da água quando evita perdas de nutrientes por lixiviação. Também colabora para manter a produtividade das culturas, o que reflete na produtividade da água, uma vez que, com o aumento da produtivida-



Figura 2.5. Aplicação do condicionador de solo tipo biocarvão na cova de plantio de cajueiro.

de física da cultura, torna-se possível produzir mais com menos água.

- O reúso de água pode funcionar como uma forma de aproveitamento de nutrientes de efluentes, evitando seu descarte em corpos hídricos ou lençol freático, o que causaria poluição. Miranda et al. (2008) demonstraram que a produção de grãos obtida com o uso do efluente da carcinicultura foi semelhante àquela obtida com o uso da água de rio, quando foi utilizada na adubação uma dose de N-P-K equivalente a 100% da dose recomendada para a cultura. Já quando foi utilizada uma dose de N-P-K equivalente a 75% daquela recomendada para a cultura do arroz, o uso do efluente na irrigação proporcionou maior produção de grãos em comparação com a irrigação utilizando a água do rio.

Diante dos desafios impostos pela mudança climática, a combinação de tecnologias, boas práticas agronômicas e ferramentas de monitoramento será decisiva para ampliar a eficiência do uso da água na agricultura irrigada. Investimentos em capacitação, políticas públicas e inovação tecnológica devem caminhar juntos para garantir a segurança hídrica e alimentar no País.

Sistema plantio direto

A agricultura enfrenta desafios crescentes impostos pela mudança do clima, exigindo soluções tecnológicas de mitigação e adaptação inovadoras que garantam a sustentabilidade da produção de alimentos. O sistema plantio direto (SPD) é uma tecnologia estratégica de adaptação climática para a agricultura sustentável. No Brasil, o SPD foi adotado pela primeira vez em 1972 visando ao controle da erosão hídrica (Telles et al., 2013). Os requisitos mínimos que caracterizam o SPD envolvem o não revolvimento do solo, a rotação de culturas e a manutenção do solo coberto por plantas vivas e mortas.

Como resultado de cinco décadas de pesquisas, de observações e de experiências práticas sobre o uso e manejo sustentáveis do solo, da água e da biodiversidade, o SPD embarcou uma série de soluções tecnológicas/soluções de inovação que o viabilizam e o caracterizam como em contínuo aprimoramento. Por conseguinte, o SPD é uma tecnologia, dentre outras basilares, que torna a agricultura brasileira referência em agricultura tropical e subtropical nas três dimensões da sustentabilidade – ambiental, econômica e social.

O SPD emerge como estratégia central para mitigar impactos ambientais e aumentar a resiliência dos sistemas produtivos. No Brasil, no ano de 2023, dos 58,72 milhões de hectares cultivados com culturas temporárias (MapBiomas, 2025), aproximadamente 33,03 milhões de hectares estão sob o SPD (Federação Brasileira do Sistema Plantio Direto, 2021), contribuindo significativamente para a conservação do solo e da água e incrementando o sequestro de carbono, o que contribui para a agricultura de baixa emissão de carbono. Esses benefícios são obtidos devido ao SPD, no Brasil, seguir preceitos importantes para agricultura tropical e subtropical, tais como terraceamento, diversificação de culturas, consorciação de culturas, utilização de gramíneas de verão que aportam maior quantidade de fitomassa radicular, além do processo de colher e semear para manter o solo com cobertura vegetal e plantas vivas, simultaneamente, pelo maior período de tempo (Reichert et al., 2016; Nunes et al., 2021a; Denardin, 2024).

O sistema de plantio direto também tem sido adaptado para o cultivo de hortaliças em decorrência de sua capacidade de sequestrar carbono, reduzir a temperatura do solo em superfície e subsuperfície, promover o uso eficiente da água e proteger contra processos erosivos (Marouelli et al., 2006; Lima et al., 2018).

Por fim, importante estudo realizado por Rocha e Gonçalves (2024) avaliou o papel do SPD nas decisões de uso da terra em municípios brasileiros. Os autores encontraram evidências de que o

sistema, além de uma solução que confere sustentabilidade à agricultura brasileira por recuperar áreas degradadas e aumentar a produtividade das culturas, exerce também um efeito positivo indireto na conservação ambiental por estimular a preservação de áreas naturais.

Nesse sentido, a Embrapa aborda muitos desafios de inovação relacionados ao sistema plantio direto, com o objetivo de gerar soluções inovadoras tanto de adaptação quanto de mitigação às mudanças climáticas que cheguem ao campo e sejam percebidas positivamente pelas diferentes cadeias agrícolas de valor, que abrangem a produção de grão, frutas, proteína de origem animal, energia e fibras, integrando produtores, indústria, consumidores em escala nacional e global.

Plantas de cobertura

O cultivo de plantas de cobertura está entre as soluções tecnológicas mais promissoras para sequestrar carbono no solo, ciclar nutrientes, adicionar nitrogênio por meio da fixação biológica, enriquecer a fauna edáfica e consequentemente atribuir qualidade ao sistema solo-planta por meio da diversificação de espécies, considerando também o benefício do sistema radicular e da produtividade das culturas. Também é importante destacar os benefícios da utilização de plantas de cobertura no manejo integrado de plantas invasoras, doenças e insetos que ocorrem nos cultivos. A diversificação dos sistemas de cultivos com a utilização de plantas de cobertura é estratégia essencial, por exemplo, para a supressão de plantas invasoras, reduzindo a competição geral entre as espécies e o domínio de espécies resistentes a herbicidas (Leskovšek et al., 2025). São muitos os exemplos de manejos integrados para interromper/mitigar ciclos de pragas e doenças pelo uso de plantas de cobertura, como para nematoides (Mbiri et al., 2024) e *Fusarium* (Kadziene et al., 2020), entre outros.

Sob as condições subtropicais e tropicais brasileiras, há uma grande variedade de espécies de plantas de cobertura bem adaptadas (Figura 2.6)

que podem ser cultivadas em sistemas que produzem grãos (Bayera et al., 2016; Ensinas et al., 2016; Schulman et al., 2025); algodão (Lopes et al., 2021); olerícolas e frutícolas (Giongo et al., 2020; Deus et al., 2022; Silva et al., 2024). Os estudos focam a integração de indicadores químicos, físicos e biológicos para inferir saúde ao sistema solo-planta-atmosfera e multifuncionalidade aos agroecossistemas para aumentar a produtividade e a resiliência das culturas.

Na última década, o cultivo simultâneo de diferentes famílias botânicas, denominado de mistura de plantas de cobertura, coquetéis vegetais ou mix de adubos verdes tem agregado conceitos de multifuncionalidade, serviços ambientais e agricultura regenerativa por influenciar positivamente diferentes processos natureza química, física e biológica, levando a maiores rendimentos das culturas e resiliência a condições climáticas adversas. Um exemplo é o trabalho de Silva et al. (2024), realizado no Semiárido, no qual foram cultivadas diferentes espécies de plantas de cobertura, consorciadas e precedendo o cultivo de melão irrigado, em sistema plantio direto e cultivo convencional, num experimento de longa duração. Nesse trabalho, as práticas de manejo de solo e a integração de cultivos simultâneos de oleaginosas, gramíneas e leguminosas em SPD foram capazes de igualar o estoque de carbono do solo, na camada de 0–20 cm, ao encontrado sob vegetação da Caatinga.

Ações portadoras de futuro relacionam a utilização de espécies de plantas de cobertura com serviços de provisão, serviços de suporte e serviços de regulação que podem ser fornecidos pelos agroecossistemas com caráter de multifuncionalidade. Nessa perspectiva, os resultados obtidos por Deus et al. (2022) identificaram as espécies para cultivos solteiros e consorciados que melhor se adaptam aos serviços específicos, de acordo com as necessidades de cada ambiente de cultivo agrícola. Os autores destacaram, por exemplo, que o número de espécies em consórcio está relacionado com a produção de biomassa aérea e radicular



Figura 2.6. Espécies de plantas que podem ser cultivadas como plantas de serviço: Girassol – *Helianthus annuus* L. (A); Crotalária-juncea – *Crotalaria juncea* (B); Calopogônio – *Calopogonium mucunoide* (C); Feijão-de-porco – *Canavalia ensiformis* (D); Milheto – *Pennisetum americanum* L. (E); Sorgo – *Sorghum vulgare* Pers. (F); Crotalária-espectábilis – *Crotalaria spectabilis* (G); Guandu – *Cajanus cajan* L. (H); Mamona – *Ricinus communis* L. (I); Mucuna-cinza – *Mucuna cochininchensis* (J); Lab lab – *Dolichos lablab* L. (K); Milho – *Zea mays* (L); Mucuna-preta – *Stizolobium aterrimum* (M); e Gergelim – *Sesamum indicum* L. (E).

e o acúmulo de carbono e nitrogênio no solo, o que favorece a capacidade dos agroecossistemas fornecerem serviços de provisão e regulação.

Melhoramento genético e seleção de materiais tolerantes

Entre as medidas de adaptação à mudança do clima, inclui-se a seleção de genótipos tolerantes aos estresses impostos por ela. Essa é uma ação estratégica para a competitividade nacional, pois pode imprimir características aos cultivos que contribuam, não só para evitar a redução da produção, mas para até mesmo aumentar sua produtividade, integrando-se a técnicas de manejo já descritas anteriormente neste capítulo e permitindo atender à demanda crescente de alimentos em quantidade e qualidade para uma população mundial crescente. No Brasil, destaca-se a pesquisa com genótipos adaptados de soja, milho, sorgo, milheto, mandioca, feijão-caupi, arroz, alface e batata (Caranhato et al., 2022; Oliveira et al., 2022a, 2022b; Barros et al., 2023, 2024; Lima et al., 2024a; Silva et al., 2024).

No melhoramento genético clássico, a seleção de genótipos ocorre após o pré-melhoramento, como parte das etapas de avaliação e condução do programa de melhoramento. A seleção de materiais tolerantes se dá por meio da análise dos parâmetros genéticos, fisiológicos, bioquímicos e produtivos (Barros et al., 2021). A avaliação dessas respostas contribui para a caracterização e podem ser analisadas em ambientes relevantes como as câmaras de crescimento que simulam os cenários previstos de mudanças climáticas ou em condições de campo contrastantes (Barros et al., 2023, 2024). Sob estresses, as células vegetais ativam genes envolvidos na resposta ao aumento de temperatura e déficit hídrico, contribuindo para evitar danos celulares. A caracterização dos genes expressos em resposta aos estresses abióticos será de grande importância para o desenvolvimento de plantas tolerantes à mudança do clima, permitindo a identificação de alvos mole-

culares para programas de melhoramento genético e biotecnologia agrícola.

Atualmente, plataformas de alto rendimento para fenotipagem utilizando técnicas para capturar imagens de plantas em diferentes estágios de crescimento e desenvolvimento contribuem para o avanço do melhoramento genético (Brito et al., 2023). Alia-se a isso, a evolução de protocolos genômicos, com sequenciamento genético de plantas, disponibilizando dezenas de genes que influenciam as características agrônomicas importantes, incluindo as relacionadas aos componentes de rendimento e tolerância a estresses bióticos e abióticos (Caranhato et al., 2022; Barros et al., 2024). Com o uso da biotecnologia, é possível inserir genes específicos com características desejáveis em novos cultivares por meio de técnicas de transgenia. Um exemplo é a introdução do gene *AtAREB1* em germoplasmas-elite de soja, visando aumentar a tolerância ao déficit hídrico (Caranhato et al., 2022).

Além disso, novas tecnologias de genômica avançada, envolvendo o sistema CRISPR/Cas9, estão sendo desenvolvidas a fim de aprimorar e acelerar o melhoramento de plantas. Por meio da edição genômica via CRISPR (Repetições Palindrômicas Curtas Agrupadas e Regularmente Interespçadas ou *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*, em inglês) é feito uma quebra na fita dupla do DNA em um local pré-determinado por um sgRNA (RNA guia único), alterando uma sequência específica de um genoma. No Brasil, o melhoramento genético do milho já faz uso dessa ferramenta para aumentar a produção, a qualidade, o valor nutricional e a tolerância a estresses bióticos e abióticos (Oliveira et al., 2022b).

Uma nova abordagem que vem ganhando espaço na pesquisa científica e que complementa o melhoramento genético tradicional é o uso de microbiomas (Camargo et al., 2023). Basicamente, busca-se estudar e aproveitar as comunidades de microrganismos que vivem em plantas, animais ou no solo para ajudar a melhorar características

desejáveis, como resistência a doenças, tolerância a estresses ambientais, crescimento mais rápido ou maior produtividade. A técnica consiste em inocular plantas com microbiomas específicos para aumentar sua resistência ao calor, à seca ou a pragas, sem alterar diretamente o DNA da planta. Assim, o uso dos microbiomas aliado ao melhoramento genético representa uma fronteira inovadora para tornar a agricultura mais eficiente e sustentável.

Bioinsumos

As primeiras preocupações com os danos causados pelo uso de pesticidas químicos ou agrotóxicos na agricultura surgiram na década de 1950. No Brasil, a atenção aos impactos ambientais da agricultura aumentou a partir da década de 1980, quando as externalidades passaram a ser estudadas de forma mais sistemática. Nessa época ficou evidente que o uso intensivo de desses produtos tinha potencial de causar impacto negativo tanto dentro quanto fora dos agroecossistemas.

No interior do agroecossistema, o uso excessivo de agrotóxicos aumenta a dependência devido aos desequilíbrios biológicos, como a eliminação de inimigos naturais e de antagonistas, a ressurgência de pragas, a resistência aos princípios ativos e o surgimento de novos problemas fitossanitários causados pela eliminação dos agentes responsáveis pelo controle biológico natural. Fora dos agroecossistemas, os pesticidas químicos têm potencial de causar danos à saúde do consumidor, além de contaminar o solo, a água e o ar.

Nesse contexto, o controle biológico contribui para a restauração da biodiversidade e para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável, gerando benefícios para o meio ambiente e para a saúde das plantas. Além disso, traz vantagens significativas para a saúde dos agricultores, dos consumidores e dos animais de criação. O tripé da sustentabilidade se completa com as vantagens econômicas e sociais do controle biológico, asso-

ciadas à sua eficiência e aos benefícios ambientais e de saúde pública.

Para estimular o uso de produtos biológicos na agricultura brasileira, foi criado o Programa Bioinsumos pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa), por meio do Decreto nº 10.375/2020 (Brasil, 2020, art. 1º), “[...], com a finalidade de ampliar e de fortalecer a utilização de bioinsumos no país para beneficiar o setor agropecuário”. Nesse sentido, o termo “bioinsumos” é utilizado como sendo:

[...] o produto, o processo ou a tecnologia de origem vegetal, animal ou microbiana, destinado ao uso na produção, no armazenamento e no beneficiamento de produtos agropecuários, nos sistemas de produção aquáticos ou de florestas plantadas, que interfiram positivamente no crescimento, no desenvolvimento e no mecanismo de resposta de animais, de plantas, de microrganismos e de substâncias derivadas e que interajam com os produtos e os processos físico-químicos e biológicos. (Brasil, 2020, art. 2º).

Portanto, o incentivo não se limita apenas ao uso de controle biológico, mas abrange a utilização de produtos biológicos na agricultura brasileira. Esse programa vem sendo amplamente discutido pela sociedade, o que tem contribuído para ampliar o uso de produtos biológicos.

O controle biológico é utilizado de forma efetiva para controlar problemas sanitários (doenças, pragas e plantas invasoras) na agricultura, na pecuária e na saúde pública. Ele pode ser classificado em quatro tipos: natural, conservacionista, clássico e aumentativo.

No controle biológico natural de pragas e doenças agrícolas, as populações desses organismos são mantidas em equilíbrio por ação de antagonistas e inimigos naturais de ocorrência natural, sem qualquer intervenção humana.

No controle biológico conservacionista, as ações humanas visam proteger, estimular e preservar os agentes benéficos, favorecendo o aumento natural de suas populações.

O controle biológico clássico é baseado na coleta de inimigos naturais em uma área de ocorrência, geralmente na região de origem da praga, patógeno ou planta invasora, e na sua liberação em locais onde se deseja elevar o número de agentes de biocontrole, podendo resultar em população permanente.

Por fim, o controle biológico aumentativo é aquele em que os antagonistas, os entomopatógenos, os parasitoides e os predadores são aplicados de forma massal em uma cultura. Esse é o método mais conhecido entre os agricultores, pois tem como base a aplicação de um agente de biocontrole (fungos, bactérias, oomicetos, vírus, micovírus, bacteriófagos, predadores e parasitoides) disponível no mercado (Bueno et al., 2020).

Os fungos *Beauveria bassiana*, *Isaria fumosorosea*, *Metarhizium anisopliae*, *Paecilomyces* sp. e *Trichoderma* spp., assim como as bactérias *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus methylophilus* e *Bacillus thuringiensis*, são os agentes de controle biológico mais comercializados no Brasil. Contudo, quando considerada a área tratada, destacam-se os pertencentes às espécies dos gêneros *Trichoderma* e *Beauveria*. As espécies de *Bacillus*, que são utilizadas para o controle de nematoides e de doenças de plantas em diversas culturas, são as mais importantes quando consideradas todas as espécies de bioagentes disponíveis no mercado brasileiro (Medeiros; Bettiol, 2023).

Além do controle de pragas e doenças, os bioinsumos também envolvem a utilização de organismos visando à promoção de crescimento das plantas, à proteção aos estresses abióticos (como hídrico, salinização, aumento de temperatura, etc.), ao uso eficiente do nitrogênio, à solubilização e à liberação de nutrientes, à fixação de nitrogênio (sem dúvida os organismos mais largamente utilizados no país), entre outras aplicações.

Em relação à mitigação dos efeitos da seca nas culturas, diversos produtos vêm sendo lançados

no mercado brasileiro. Um exemplo é a utilização de *Bacillus aryabhattai*, cujo primeiro produto comercial (Auras) foi desenvolvido em parceria pela Embrapa Meio Ambiente e a empresa NOOA para essa finalidade, sendo atualmente distribuído por diversas empresas do setor. Esse microrganismo, isolado de solos da Caatinga, tem a capacidade de hidratar as raízes e atuar na fisiologia dos vegetais, permitindo que as plantas respondam melhor aos déficits hídricos. Além disso, *Bacillus aryabhattai* estimula o desenvolvimento do sistema radicular, proporcionando maior absorção de água (May et al., 2021; Fuga et al., 2023).

Um outro importante grupo de microrganismos, ainda pouco explorado no Brasil, são os fungos micorrízicos. Esses organismos, além de colaborarem com a absorção de fósforo, podem induzir resistência a fitopatógenos. Portanto, há necessidade de se desenvolver produtos à base desses fungos para as principais culturas agrícolas do País.

As ectomicorrizas são exploradas principalmente em espécies de árvores, pois muitas delas apresentam uma dependência, especialmente plantas do gênero *Pinus*. A maioria dos fungos ectomicorrízicos são basidiomicetos, como *Pisolithus*, *Thelephora* e *Boletus*, entre outros, e podem ser produzidos in vitro, simplificando a sua produção. Além de contribuir para a nutrição das plantas, essas micorrizas podem protegê-las contra pragas e doenças.

Outro grupo importante são as micorrizas arbusculares, que estão presentes na maioria das espécies vegetais. Essa simbiose é de extrema importância agrícola, pois promove absorção e troca de nutrientes, além de colaborar na proteção das plantas contra doenças e nematoides. O maior problema da exploração comercial desse grupo é a sua produção em larga escala, o que limita o mercado.

Por outro lado, a cultura da soja é uma das principais responsáveis pelo crescimento do uso de bioinsumos no Brasil. Além do uso da fixação biológica de nitrogênio, também o controle biológico

gico de pragas e doenças é utilizado em grande escala na cultura. Assim, parte da história do uso de produtos biológicos na agricultura brasileira se confunde com a história da cultura da soja no Brasil. A fixação biológica de nitrogênio e o controle biológico da lagarta-da-soja, possivelmente, sejam os dois exemplos mais significativos. Logicamente, o controle biológico do mofo-branco, causado por *Sclerotinia sclerotiorum*, na cultura, por meio de produtos à base de *Trichoderma* e de *Bacillus*, não pode ser ignorado (Faria et al., 2022).

A fixação biológica de nitrogênio por meio de bactérias constitui o grupo mais importante de inoculantes. As espécies dos gêneros *Bradyrhizobium*, *Rhizobium* e *Azospirillum* são as mais utilizadas no País, sendo que, para a cultura da soja, são utilizadas a mistura de cepas de *Bradyrhizobium elkanii* e de *Bradyrhizobium japonicum* (Hungria et al., 2006, 2015, 2020). Além desses, mais recentemente, tem crescido significativamente o uso de *Azospirillum brasilense* (Hungria et al., 2015; Santos et al., 2021). Esses microrganismos, além de reduzir os custos para os agricultores pelo não uso de fertilizantes nitrogenados na soja, trazem uma considerável redução nos impactos ambientais que o uso de nitrogênio mineral causaria, principalmente quando se analisam os dados de Rockström et al. (2009). Essa informação é de extrema importância, considerando a área cultivada pela soja na safra 2023/2024 de, aproximadamente, 46 milhões de hectares (Embrapa Soja, 2025).

A adoção do uso de inoculantes na cultura da soja no Brasil na safra 2020/2021 foi de 80%, enquanto a adoção da coinoculação *Bradyrhizobium* + *Azospirillum* foi de 26% (Globalfert, 2021). Esses números representam, para a safra 2020/2021, uma área de 30,821 milhões de hectares de soja sob uso de inoculantes e de 10,017 milhões de hectares sob coinoculação, num total de 38,526 milhões de hectares, indicando o sucesso da tecnologia desenvolvida no Brasil. Considerando a área cultivada na safra 2020/2021, a economia foi superior a US\$ 17,8 bilhões (Hungria; Nogueira, 2022). Esses dados

claramente mostram não somente a importância do uso de inoculante na cultura da soja, mas também a importância da pesquisa e desenvolvimento de bioinsumos para o País.

Essas bactérias, que, para muitas plantas, substitui a utilização de fertilizantes nitrogenados, representa uma tecnologia limpa e sustentável de grande importância principalmente para a cultura da soja no Brasil, pois bactérias do gênero *Bradyrhizobium* podem fixar até 300 kg/ha (Peoples et al., 1995). Contudo, também *Azospirillum amazonense*, *Azospirillum halopraeferans*, *Azospirillum lipoferum*, *Herbaspirillum seropedicae*, *Acetobacter diazotrophicus* e outras (Döbereiner, 1990) são reconhecidamente fixadoras de nitrogênio.

Práticas para recuperação de pastagens degradadas

As medidas para adaptação à mudança do clima consistem em aumento da resiliência dos sistemas de produção, aumento da diversificação de espécies animais e vegetais, diminuição dos riscos, além dos cobenefícios advindos da mitigação dos GEE (Oliveira et al., 2023, 2024a, 2024b; Pezzopane et al., 2024). Em sistemas pastoris, as medidas de adaptação estão relacionadas ao manejo das plantas forrageiras, melhoramento genético com novas cultivares e variedades, manejo do solo, planejamento forrageiro e novos arranjos nos sistemas de produção (Thornton; Herrero, 2014; Braga; Ramos, 2017). A maior parte dessas técnicas estão inseridas no processo da recuperação de pastagens, que está embasada em três princípios básicos, que são: o manejo adequado da planta forrageira, a recomposição da fertilidade do solo e a adoção de práticas de conservação do solo (Oliveira et al., 2003, 2005, 2007a, 2007b).

Recuperar uma pastagem consiste em utilizar a população de plantas existentes e empregar técnicas que promovam a recuperação daquela pastagem degradada, e pode ser realizada de várias formas, como a recuperação direta das pastagens,

a recuperação adotando-se o consórcio com leguminosas e a recuperação usando os vários arranjos de integração lavoura-pecuária propostos na literatura (Oliveira et al., 2003, 2005, 2007a, 2007b, 2024a) (Figura 2.7).

Devido aos resultados benéficos encontrados nos sistemas de produção e aos esforços iniciados na década de 1990 pelo setor de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), a necessidade de recuperação de pastagens passou a ganhar visibilidade, sendo inserida no contexto do Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC), elaborado em 2012, revisado e renomeado em 2020 para Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária, com vistas ao Desenvolvimento Sustentável (2020-2030) (Plano ABC+) (Brasil, 2023). Atualmente, o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis (Brasil, 2024), dentre as várias técnicas recomendadas, propõe a intensificação da pecuária de corte, que engloba a recuperação de pastagens.

A intensificação do manejo das pastagens, por meio da correção com calcário e com melhoria da fertilidade do solo, aumenta a produção de forragem na época seca do ano, oferecendo maior

quantidade de alimentos nesse período de intenso déficit hídrico. Resultados obtidos por Pasquini Neto et al. (2024, 2025), em experimentos com recuperação e intensificação de pastagens na região Sudeste brasileira, mostraram aumento de produção de matéria seca durante o outono/inverno. As pastagens degradadas (DP0) produziram 3,07 t de matéria seca por hectare nessa época, enquanto as pastagens recuperadas, corrigidas e fertilizadas, apresentaram produção de 4,57 t/ha com 200 kg de nitrogênio (N) por hectare ao ano (RP200), 9,45 t/ha com 400 kg de N por hectare ao ano (RP400) e 10,44 t/ha, quando irrigadas e sobressemeadas no outono/inverno e fertilizadas com 600 kg de N por hectare ao ano (IR600).

O aumento da produção de forragem no outono/inverno refletiu no aumento do ganho de peso, sendo 0,02; 0,54; 0,42 e 0,82 kg/dia, e da lotação animal, sendo 2,15; 2,68; 3,77; 4,99 unidade animal por hectare, fato que aumentou a produtividade (kg de peso vivo por hectare) dos sistemas de produção, sendo obtido 119; 362; 444 e 700 kg/ha, respectivamente para os sistemas DP0; RP200; RP400; IR 600.

A resiliência ao déficit hídrico na intensificação do manejo das pastagens se reflete até no rendimento de carcaça, passando de 53,3% no sistema degradado para 55,8% para os tratamentos intensifi-

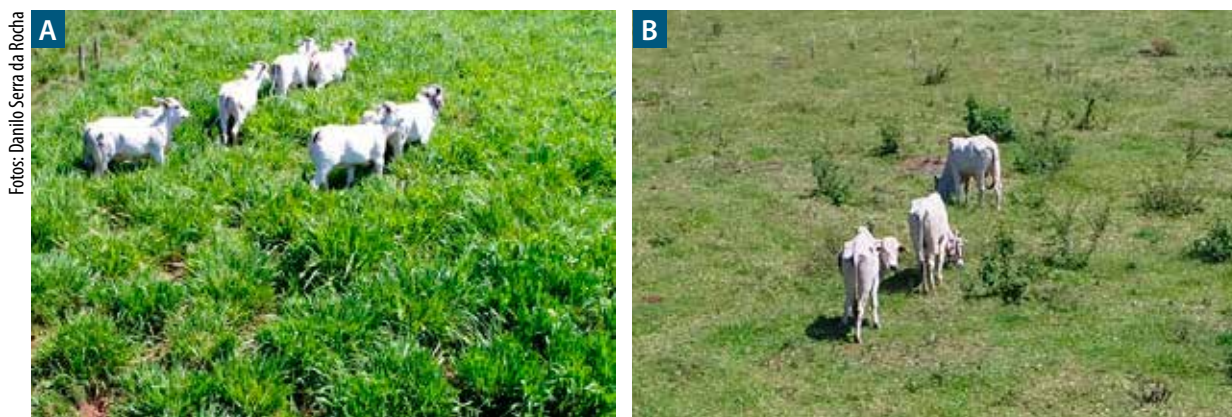


Figura 2.7. Aspecto da pastagem e dos animais em pastagens recuperadas (A) em relação às pastagens degradadas (B).

cados, aumentando a produtividade de carne por hectare (Oliveira et al., 2018).

O aumento da diversidade de espécies forrageiras é uma das alternativas para adaptação à seca (Oliveira et al., 2024b; Pezzopane et al., 2024). A consorciação de feijão-guandu com capins tropicais para a recuperação de pastagens é uma boa estratégia para a adaptação à seca, pelo fato de essa leguminosa possuir um sistema radicular pivotante e profundo e ser bastante tolerante ao déficit hídrico (Oliveira, 2022; Pezzopane et al., 2024), mantendo a produção de forragem e retenção de folhas verdes na época seca do ano, especialmente na cultivar BRS Mandarin. Esse fato proporcionou, em solos bastante arenosos com baixa retenção de água, melhor composição nutricional da dieta e ganho de peso médio diário por animal para fêmeas na época seca do ano (0,29 kg/dia), usando apenas a suplementação mineral comum, valor bastante superior ao ganho de peso (0,03 kg/dia) obtido nas pastagens fertilizadas com 200 kg de N por hectare e suplementadas com suplemento mineral proteinado. Além disso, foi observado aumento na lotação animal e no peso final das novilhas (Oliveira, 2022).

Do ponto de vista agrônomo, Pezzopane et al. (2024) também observaram benefícios significativos. A pastagem consorciada com feijão-guandu produziu 18,5 t de matéria seca por hecta-

re ao ano, sendo 7,5 t/ha de capim-braquiária e 11 t/ha de feijão-guandu. Em comparação, pastagens recuperadas e fertilizadas com 200 kg de N por hectare ao ano produziram 11,1 t/ha de capim-braquiária, enquanto as pastagens degradadas produziram apenas 5,6 t/ha de matéria seca. Como os animais consomem o feijão-guandu preferencialmente na época seca do ano, esse volume de forragem representa um importante estoque alimentar para esse período. Além disso, a presença do feijão-guandu aumentou o teor de proteína bruta do capim-braquiária de 5,8 para 7,1%, considerando a média das estações seca e chuvosa.

O consórcio com o feijão-guandu é apenas um exemplo entre as várias opções de misturas de espécies forrageiras nas pastagens com potencial de adaptação à mudança do clima (Furtado et al., 2023) (Figura 2.8). A escolha das espécies forrageiras deve considerar características complementares que aumentem a resiliência das pastagens aos estresses abióticos (Oliveira et al., 2023), como o potencial de produção e manutenção da qualidade da forragem na época seca (Valle et al., 2017). Além disso, deve contemplar o melhor aproveitamento da água por meio do levante hidráulico, habilidade de gramíneas ou leguminosas com sistemas radiculares mais profundos de reciclar a água e melhorar o ambiente hídrico no dossel forrageiro (Pezzopane et al., 2024).



Fotos: Patrícia Perondi Anhão Oliveira

Figura 2.8. Aspecto da pastagem recuperada com o consórcio com feijão-guandu (A) em relação às pastagens degradadas (B) no início da estação seca.

Os sistemas integrados de produção, como os silvipastoris, agropastoris e agrosilvipastoris, também vêm sendo adotados para a recuperação de pastagens. A integração ILP é a diversificação, rotação, consorciação ou a sucessão das atividades agrícolas ou pecuárias dentro da propriedade rural de forma harmônica, constituindo um mesmo sistema, de tal maneira que há benefícios para ambas (Alvarenga et al., 2006). Os sistemas integrados adotados como forma de recuperação de pastagens também proporcionam maior resiliência aos estresses abióticos, fornecendo, após a colheita das lavouras, forragem na época seca do ano proveniente do estande de pastagens semeadas juntamente com as culturas de grãos, como soja, milho e arroz, com qualidade superior, principalmente quanto ao teor de proteína (Brunetti et al., 2022). Os principais benefícios são aumento de produtividade, diversificação da produção, menor vulnerabilidade de efeitos climáticos, melhoria na fertilidade, na qualidade física e biológica do solo, redução de pragas e doenças e controle de erosão (Alvarenga et al., 2006), além das questões relacionadas ao melhor ambiente, com mais conforto térmico aos animais, quando a integração prevê o uso de árvores nos sistemas de produção (Pezzo-pane et al., 2019; Magalhães et al., 2020).

Reúso e reservação de água

O reúso de águas residuárias pode ser conceituado como uma prática inovadora e sustentável que envolve a utilização deliberada em processos humanos diversos como a produção agrícola (Lopes Sobrinho et al., 2024).

Embora não exista uma legislação nacional sobre reúso de águas residuárias na agricultura, algumas Unidades da Federação apresentam normativos legais para regularizar essa prática, como os estados do Rio Grande do Sul (2020) (Resolução CONSEMA nº 419/2020), Ceará (2017) (Resolução COEMA nº 02/2017), Bahia (2017) (Resolução CONERH nº 75/2010) e Minas Gerais (2020) (Deliberação Normativa CERH nº 65/2020).

Além disso, instrumentos internacionais como o da Organização Mundial da Saúde (Organização Mundial da Saúde, 2006) e do Parlamento Europeu (2020) (Regulamento nº 741/2020) também podem auxiliar na definição de parâmetros de qualidade da água para uso agrícola. A agricultura irrigada é a maior usuária de água do Brasil, consumindo 50% de toda a água distribuída no País (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024). Nesse contexto, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (Lei nº 9433/1997) Brasil (1997), estabelece como usos prioritários dos recursos hídricos o abastecimento humano e a dessedentação de animais, o que exige da agricultura a busca por alternativas para uso da água na irrigação. O reúso agrícola de águas residuárias tem-se mostrado uma alternativa viável para mitigar os impactos de eventos extremos de seca decorrentes das mudanças climáticas globais (Moura et al., 2020) e é uma prática segura, desde que respeitados os parâmetros de qualidade da água indicados, fornecendo não somente água, mas também nutrientes para os cultivos agrícolas (Lopes et al., 2024). A Embrapa tem desenvolvido alternativas para o saneamento rural e reúso de águas residuárias, como a Fossa Séptica Biodigestora (Galindo et al., 2019), o Jardim Filtrante (Leonel et al., 2013), o Bioágua Familiar (Melo et al., 2023) e o Sistema ReAqua (Lima et al., 2024a), além de produtos para melhoria da qualidade de águas residuárias pós-tratamento para irrigação (Ferreira et al., 2024).

Já a reservação de água pode ser entendida como a construção e gestão de estruturas destinadas ao armazenamento de água, como reservatórios, cisternas e barragens (Formiga-Johnsson; Britto, 2020). No Brasil, sistemas de captação e armazenamento de água para a produção de alimentos em hortas, pomares, cultivo de plantas forrageiras e dessedentação animal contribuem para a segurança hídrica de populações, como no Semiárido brasileiro (Oliveira et al., 2016; Castro et al., 2024). Entre os exemplos de tecnologias desenvolvidas

pela Embrapa, destacam-se as Barragens Subterrâneas (Melo et al., 2011), as Cisternas Domiciliares (2007) e as Barraginhas (Caranhato et al., 2022). Essas tecnologias sociais transformaram o desenvolvimento sustentável no Semiárido, uma vez que permitem o acúmulo significativo de água durante o período chuvoso para uso como reserva hídrica nos períodos de estiagens.

Serviço ecossistêmico de polinização

Os serviços ecossistêmicos também desempenham um papel estratégico no combate à mudança climática. Pode-se definir os serviços ecossistêmicos como os benefícios que o meio ambiente fornece aos seres humanos e que são essenciais para a manutenção da vida na Terra. Contudo, a população humana não é a única beneficiada por esses serviços, uma vez que os processos ecológicos garantem a sobrevivência das diferentes espécies, com fornecimento de alimentos, água, abrigo e outras necessidades.

A principal contribuição das abelhas é com o serviço ecossistêmico de polinização, que incrementa significativamente a reprodução de muitas plantas silvestres e cultivadas. A polinização é fundamental para garantir a variabilidade genética, a sobrevivência de espécies e o equilíbrio dos ecossistemas, o que tem implicações diretas e indiretas na capacidade de sistemas naturais e humanos se adaptarem aos efeitos das alterações climáticas.

A polinização é responsável por cerca de 75% da produção global de cultivos vegetais, com um valor econômico estimado entre 235 e 577 bilhões de dólares anuais (Potts et al., 2016). Uma análise de 141 culturas no Brasil demonstrou que a contribuição econômica dos polinizadores na produção agrícola equivale a aproximadamente US\$ 12 bilhões, metade desse valor é atribuída à soja (Giannini et al., 2015).

A soja é uma planta autógama e cleistogâmica, ou seja, a maior parte das flores se autopolinizam, frequentemente antes mesmo de se abrirem completamente. Isso implica que a produção de soja não depende da presença de polinizadores, contudo estudos comprovam que a presença de polinizadores na cultura da soja, principalmente abelhas, aumenta a produtividade em até 18,24%, dependendo da variedade usada, das condições ambientais e dos tratos culturais às quais a cultura foi exposta (Gazzoni; Barateiro, 2023). A polinização da flor da soja aumenta o número de grãos nas vagens e reduz a quantidade de vagens sem sementes ou com apenas um grão. O peso do grão também aumenta com a polinização, garantindo maior produtividade na mesma área, sem necessidade de aplicar mais insumos (Gazzoni; Barateiro, 2023).

No Brasil, as abelhas formam o maior grupo de polinizadores e representam 66,3% das espécies animais que realizam o serviço ecossistêmico de polinização (BPBES, 2019). Contudo, o aumento da provisão de polinizadores nas culturas, quer seja de abelhas manejadas, quer seja de abelhas silvestres, necessita de adoção de práticas de manejo que reduzam impactos negativos da agricultura nessas populações, de forma que o produtor possa se beneficiar do serviço ecossistêmico realizado por esses insetos.

A criação de paisagens mais heterogêneas e diversificadas, com proteção e restauração de áreas naturais próximas às culturas, é uma das práticas amigáveis mais recomendadas para atrair e conservar as abelhas nas lavouras. Recomenda-se aproveitar as bordaduras, entrelinhas, cercas e outros espaços para plantio de espécies vegetais, preferencialmente nativas, que possam fornecer uma alimentação diversificada e escalonada para as abelhas e local para nidificação. A substituição de áreas de monocultura por áreas com maior biodiversidade agrícola aumenta a resiliência do sistema e, em conjunto com o aumento da biodiversidade natural ao redor das áreas de cultura,

promovem os processos ecológicos sustentáveis, como a polinização realizada pelas abelhas.

Essas áreas também vão ser usadas como locais de nidificação e refúgio de outros insetos benéficos à agricultura, como as joaninhas e louva-a-Deus, que auxiliam no controle de pragas, e besouros coprófagos e algumas moscas, que atuam na decomposição de matéria orgânica e melhoram a saúde do solo. Melhorar a biodiversidade agrícola e natural beneficia o serviço ecossistêmico de polinização, mas também aumenta a resiliência do sistema de cultivo, com consequências no aumento da produção.

A adoção de práticas agrícolas sustentáveis, incluindo a transição para a agroecologia, também ajuda na preservação das abelhas. Assim, recomenda-se usar, preferencialmente, a técnica do plantio direto e evitar o revolvimento excessivo do solo. A gradagem e a aragem, além de comprometerem a saúde do solo e os serviços ecossistêmicos relacionados, diminuem a quantidade e a variedade de fontes de alimentos e de locais de nidificação para abelhas que usam o solo para construir seus ninhos (Potts et al., 2016). O sobrepastejo excessivo e a ausência de cobertura vegetal no solo também devem ser evitados, especialmente na entressafra. Essas práticas contribuem para a degradação do solo e reduzem a disponibilidade de alimento e os locais de abrigo e nidificação essenciais para a manutenção das populações de polinizadores.

Outra prática a ser evitada é o uso do fogo no preparo do solo. Essa prática agrícola convencional é extremamente prejudicial às abelhas e demais polinizadores. O fogo destrói diretamente habitats, reduz a quantidade e a variedade de alimentos e fontes de nidificação. O manejo agrícola sem uso do fogo, por outro lado, minimiza incêndios, protege ecossistemas e contribui para a conservação dos solos e dos polinizadores (Potts et al., 2016; Coutinho et al., 2020).

O aumento do fluxo de abelhas para polinização das culturas pode ser realizado, também, com a

introdução de colmeias, ninhos e colônias, especialmente de abelhas-nativas-sem-ferrão e de *Apis mellifera*. Iniciar a criação de abelhas ou incentivar a instalação de apiários e meliponários próximas às culturas são estratégias que podem ser usadas para mitigar o déficit de polinização e aumentar o número de polinizadores efetivos nas culturas.

O aluguel de colônias é uma alternativa já usada no Brasil para aumentar o fluxo de abelhas, como nas culturas de melão, café e maçã. Até mesmo a soja pode ser beneficiada pela instalação de apiários próximos e com colmeias bem distribuídas. Pesquisas indicam que, além da produtividade, a presença de colmeias na cultura da soja beneficia a taxa de germinação nas lavouras de produção de sementes, sendo os apiários considerados um insumo interessante para maximizar a produção desta cultura (Wolditsadik et al., 2023).

Diante dos múltiplos desafios impostos pela mudança climática, torna-se essencial reconhecer o papel estratégico da biodiversidade funcional nos processos de adaptação dos sistemas produtivos. Nesse contexto, as abelhas (principais agentes polinizadores da maioria das culturas alimentares e dos ecossistemas nativos) são um elemento-chave para garantir a resiliência dos sistemas agrícolas. A polinização promovida por abelhas manejadas e silvestres não apenas contribui para o aumento da produtividade e da qualidade dos alimentos, mas também reforça a estabilidade ecológica das paisagens agrícolas frente a eventos climáticos extremos.

Preservar habitats naturais, diversificar cultivos e reduzir o uso de pesticidas são práticas fundamentais não só para proteger as abelhas, mas para construir sistemas agroecológicos mais robustos e adaptáveis. Portanto, estratégias de adaptação à mudança do clima devem integrar, de forma transversal, a conservação dos polinizadores como componente essencial de segurança alimentar, saúde dos ecossistemas e sustentabilidade no campo. Essas estratégias agem de forma sinérgica e influenciam os demais serviços

ecossistêmicos, tornando o sistema agrícola ainda mais resiliente e adaptado às emergências climáticas. Valorizar e proteger as abelhas é, assim, um investimento na construção de um futuro climático mais equilibrado e produtivo.

Perspectivas futuras

À medida que o clima global se altera, mudanças nos padrões de temperatura, precipitação e ciclos sazonais afetam diretamente a produção agrícola. A fragmentação e simplificação das paisagens agrícolas é um fator limitante e pode contribuir para a vulnerabilidade da agricultura tropical. Contudo, o futuro não é necessariamente de colapso: há cenários promissores, especialmente se forem adotadas estratégias integradas de conservação da biodiversidade e do manejo sustentável do território. A criação de corredores ecológicos, o incentivo à agroecologia, a promoção da agricultura de base diversificada e a redução do uso de pesticidas são medidas que podem fortalecer a gestão integrada da paisagem, restaurando sua capacidade de prestação de serviços. O relatório sobre Mudança do Uso da Terra do IPCC publicado em 2019² aponta que medidas de gestão da paisagem são particularmente estratégicas em regiões tropicais, onde a proteção da cobertura florestal trará um efeito positivo de aumento do resfriamento do ambiente como consequência da evapotranspiração natural. O aumento da evapotranspiração preserva a ocorrência de dias mais frios durante a estação de crescimento e tem efeito protetor, reduzindo a amplitude dos eventos climáticos extremos relacionados ao calor.

Assim, diante do clima vigente e dos possíveis cenários relacionados à mudança do clima, é imprescindível o aperfeiçoamento da governança doméstica sobre o tema de mudança do clima, particularmente do fortalecimento do diálogo e investimen-

to em educação a fim de reduzir desinformações e ampliar a compreensão dos tomadores de decisão acerca dos desafios complexos associados aos processos correntes e futuros da mudança do clima. A priorização de investimento em pesquisa estratégica com foco na redução de incertezas e geração de dados com a finalidade de reduzir vazios de informação são ferramentas críticas necessárias para um processo de tomada de decisão bem informado e assim reduzir riscos de perda de competitividade nos sistemas de produção tropical.

A segurança alimentar é um desafio primordial, e os sistemas produtivos tropicais estão hoje e estarão no futuro ainda mais expostos aos desafios impostos pela mudança do clima. Dessa forma, deve haver o aprimoramento contínuo e a integração das tecnologias, como as apresentadas neste capítulo, a fim de garantir a resiliência dos sistemas agrícolas responsáveis pela produção de alimentos, fibras e energia. A agricultura baseada em ciência é a melhor ferramenta para enfrentar os desafios impostos pelo aumento da temperatura média da atmosfera, alterações no regime de chuvas e os impactos destas sobre a soberania alimentar dos povos.

Dada a complexidade da agricultura tropical, os avanços tecnológicos, por meio da fenotipagem em grande escala, da genotipagem e edição gênica serão pontos-chave para o melhoramento de culturas. Outras ferramentas como o uso de inteligência artificial (IA) para automação da determinação e mapeamento de cenários, riscos e vulnerabilidade agrícola futuros poderão apoiar as pesquisas a fim de ampliar as capacidades de adaptação de culturas ao clima.

A adoção de medidas integradas de adaptação, buscando a manutenção e a conservação da biodiversidade, pode oferecer oportunidades econômicas, por meio de pagamentos por serviços ambientais e certificações sustentáveis. Entretanto, investimentos em pesquisa e monitoramento serão imprescindíveis, uma vez que o processo de adaptação é contínuo e as soluções propostas

² Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2022/11/SRCCL_SPM.pdf

precisarão ser realizadas e aprimoradas dentro do contexto local e regional, bem como em função do cultivo.

Portanto, as perspectivas futuras para o aumento da capacidade adaptativa da agricultura dependem da pesquisa científica e de ações de inovação que irão orientar e apoiar políticas públicas para uma agricultura tropical sustentável. A integração de medidas, visando à conservação do meio ambiente, não é apenas uma necessidade ecológica, mas um pilar para um futuro agrícola mais resiliente, produtivo e sustentável diante das incertezas climáticas.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas irrigação**: uso da água na agricultura irrigada. Brasília, DF, 2021. 130 p. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/atlasirrigacao>. Acesso em: 26 ago. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021**: relatório pleno. Brasília, DF, 2022. 132 p. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_2021_pdf_final_revdirec.pdf. Acesso em: 26 ago. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2024**: informe anual. Brasília, DF, 2024. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Acervo/Detalhe/106160?returnUrl=/sophia_web/Home/Index&guid=1734307203948. Acesso em: 4 maio 2025.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. da. Impacts of climate change on the evaporation and availability of water in small reservoirs in the Brazilian savannah. **Climatic Change**, v. 159, p. 215-232, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02656-y>.
- ALVARENGA, R. C.; COBUCCI, T.; KLUTHCOUSKI, J.; WRUCK, F. J.; CRUZ, J. C.; GONTIJO NETO, M. M. **A cultura do milho na integração lavoura-pecuária**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. 12 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 80).
- ANGELOTTI, F.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. A Comprehensive Review of Climate Change and Plant Diseases in Brazil. **Plants**, v. 13, n. 17, Sept. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13172447>.
- ANGELOTTI, F.; HAMADA, E.; MAGALHÃES, E. E.; GHINI, R.; GARRIDO, L. R.; PEDRO JUNIOR, M. J. Climate change and the occurrence of downy mildew in Brazilian grapevines. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 426-434, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000600006>.
- ARAUJO, A. L. S.; ANGELOTTI, F.; RIBEIRO JUNIOR, P. M. Severity of melon powdery mildew as a function of increasing temperature and carbon dioxide concentration. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 4, e6916, 2019.
- BAHIA. Resolução CONERH nº 75 de 29 de julho de 2010. Estabelece procedimentos para disciplinar a prática de reúso direto não potável de água na modalidade agrícola e/ou florestal. **Diário Oficial do Estado**, 1 ago. 2010. disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=121578>. Acesso em 22 jan. 2025.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Matriz de Dados do Proagro**. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/proagro>. Acesso em 22 jan. 2025.
- BARROS, J. R. A.; GUIMARÃES, M. J. M.; SILVA, R. L. de O.; SILVA, J. B. da; BARROS, A. A. G. de; ANGELOTTI, F.; MELO, N. F. de. The differential expression of the P5CR and αTPS6 genes in cowpea plants increases tolerance to water deficit and high temperatures. **Environmental and Experimental Botany**, v. 224, p. 105821, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105821>.
- BARROS, J. R. A.; GUIMARÃES, M. J. M.; SILVA, R. M. E.; REGO, M. T. C.; MELO, N. F.; CHAVES, A. R. M.; ANGELOTTI, F. Selection of cowpea cultivars for high temperature tolerance: physiological, biochemical and yield aspects. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 27, n. 1, p. 29-38, Jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00919-7>.
- BARROS, J. R.; GUIMARÃES, M. J. M.; SIMOES, W. L.; MELO, N. F.; ANGELOTTI, F. Temperature: determining element for cowpea growing season. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 45, p. e56812, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.56812>.
- BAYERA, C.; GOMES, J.; ZANATTA, J. A.; VIEIRA, F. C. B.; DIECKOW, J. Mitigating greenhouse gas emissions from a subtropical Ultisol by using long-term no-tillage in combination with legume cover crops. **Soil and Tillage Research**, v. 161, p. 86-94, Aug. 2016.
- BEBBER, D. P. Climate change effects on Black Sigatoka disease of banana. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 374, n. 1775, June 2019. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0269>.
- BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M. C.; GONÇALVES, J. V. M.; PEREIRA, M. G.; LAMBAIS, G. R.; CAMARGO, P. B.; TAVARES, T. R.; GERMON, A.; BOSI, C.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; CHERUBIN, M. R.; MORAES, M. T. Fine root production and decomposition of integrated plants under intensified farming systems in Brazil. **Rhizosphere**, v. 31, p. 100930, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100930>.
- BISONARD, E. M.; ANGELOTTI, F.; HAMADA, E.; GONÇALVES, R. R. V.; RAGO, A. M. Evolução da mancha preta do amendoim nas principais regiões produtoras da Argentina e do Brasil frente às mudanças no clima. **Revista Brasileira de**

Geografia Física, v. 13, p. 1778-1791, 2020. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.4.p1778-1791>.

BOUNAJRA, A.; EL GUEMMAT, K.; MANSOURI, K.; AKEF, F. Towards efficient irrigation management at field scale using new technologies: A systematic literature review. **Agricultural Water Management**, v. 295, p.108758, Apr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108758>.

BPBES. **Relatório temático sobre polinização, polinizadores e produção de alimentos no Brasil**. São Paulo: Cubo. 2019, 184 p. Disponível em: https://www.bpb.es.net.br/wp-content/uploads/2019/03/BPBES_CompletoPolinizacao-2.pdf. Acesso em: 4 dez. 2024.

BRAGA, G. J.; RAMOS, A. C. B. Alternativas para adaptação dos sistemas de produção animal em pastagens às mudanças climáticas: planejamento da alimentação do rebanho. In: PEDREIRA, C. G. S.; SILVA, S. C. da; SANTOS, P. M.; MOURA, J. C. de (ed.). In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS, 28., 2017, Piracicaba. **Anais [...]** Piracicaba: Fealq, 2017. p. 119-162.

BRASIL. Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020. Institui o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos. **Diário oficial da união**: seção 1, p. 105, 27 maio 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/d10375.htm. Acesso em 17 jan. 2025.

BRASIL. Decreto nº 11.815, de 5 de dezembro de 2023. Institui o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis e o seu Comitê Gestor Interministerial. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 18, 6 dez. 2023. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/decreto/d11815.htm. Acesso em: 4 dez. 2024.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 471, 9 jan. 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm. Acesso em 17 jan. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Atlas do seguro rural**: Programa de subvenção ao Prêmio do Seguro Rural (PSR). Brasília, DF. Disponível em: <https://mapa-indicadores.agricultura.gov.br/publico/extensions/SSISER/SSISER.html>. Acesso em: 4 dez. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária, com vistas ao Desenvolvimento Sustentável**: ABC+ (2020-2030). Brasília, DF, 2023.

BRITO, G. G.; CAMPOS, A. D.; MELO, C. L. P.; BERTAGNOLI, P. F.; KLUMB, E. K.; PORTO, F. G. S.; MAGALHÃES JUNIOR, A. M.; FAGUNDES, P. R. R.; PARFITT, J. M. B.; THEISEN, G.; NUNES, C.

D. M. Integrating Non-photochemical Quenching (NPQ) Measurements for Identifying Flood-Tolerant Soybean Genotypes in the Era of Climate Change. **Journal of Agricultural Science**, v. 15, n. 10, p. 39, 2023.

BRUNETTI, H. B.; PEZZOPANE, J. R. M.; BONANI, W. L.; BOSI, C.; PASQUINI NETO, R.; BERNARDI, A. C. de C.; OLIVEIRA, P. P. A. de. Productive and nutritive traits of Piatã palisadegrass after thinning the forest component of a silvopastoral system in southeastern Brazil. **The Journal of Agricultural Science**, v.160, p. 338-348, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1017/S002185962200051X>.

BUENO, V. H. P.; PARRA, J. R. P.; BETTIOL, W.; LENTEREN, J. C. van. Biological control in Brazil. In: LENTEREN, J. C. van.; BUENO, V. H. P.; LUNA, M.G. **Biological control in Latin America and the Caribbean**: its rich history and bright future. Boston, MA: CAB International, 2020. p. 78-107. (CABI invasive series; 12).

CAMARGO, A. P.; SOUZA, R. S. C. de; JOSE, J.; GERHARDT, I. R.; DANTE, R. A.; MUKHERJEE, S.; HUNTEMANN, M.; KYRPIDES, N. C.; CARAZZOLLE, M. F.; ARRUDA, P. Plant microbiomes harbor potential to promote nutrient turnover in impoverished substrates of a Brazilian biodiversity hotspot. **ISME Journal**, v. 17, n. 3, p. 354-370, Mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41396-022-01345-1>.

CAMBRAIA NETO, A. J.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. da; ALTHOFF, D. Impact of climate change on groundwater recharge in a Brazilian Savannah watershed. **Theor Appl Climatol**, v. 143, p. 1425-1436, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03477-w>.

CARANHATO, A. F. H.; ANGELOTTI-MENDONÇA, J.; MERTZ-HENNING, L. M.; MARIN, S. R. R.; MELO, C. L. P.; FOLONI, J. S. S.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L. Drought tolerance of elite soybean cultivars with the introgression of transgene AtAREB1. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, p. 1-9, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02656>.

CASTRO, P. P. C.; VACHKOVA, M.; RAVENA, N.; VELOSO, N. The One Million Cisterns Programm: a viability assessment of community rainwater management in Brazil. **Frontiers in Sustainability**, v. 5, Oct. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1401440>.

CEARÁ. Superintendência Estadual do Meio Ambiente. Resolução COEMA nº 2, de 2 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, revoga as Portarias SEMACE nº154, de 22 de julho de 2002 e nº 111, de 5 de abril de 2011, e altera a Portaria SEMACE nº151, de 25 de novembro de 2002. **Diário Oficial do Estado**, 21 fev. 2017. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/46/2019/09/COEMA-02-2017.pdf>. Acesso em: 25 agos. 2025.

COUTINHO, P. E.; CATALDI, M. Evaluation of Extreme Hydroclimatic Trends in River Basins Located in the Northeast and South Regions of Brazil. **Atmosphere**, v. 14, n. 9, e1388, Aug. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos14091388>.

- COUTINHO, S. M. V.; SANTOS, D. V.; BURSZTYN, M.; MARENGO, J. A.; RODRIGUES-FILHO, S.; LUCENA, A. F. P.; RODRIGUEZ, D. A.; MAIA, S. M. F. A Abordagem Nexus+ aplicada a estudos de impactos, vulnerabilidade e adaptação à mudança do Clima no Brasil. **Sustainability in Debate**, v. 11, n. 3, p. 40-56, dez. 2020.
- DEBIASI, H.; MONTEIRO, J. E. B. A.; FRANCHINI, J. C.; FARIAS, J. R. B.; CONTE, O.; CUNHA, G. R.; MORAES, M. T. de.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; SILVA, F. A. M.; EVANGELISTA, B. A.; MARAFON, A. C. **Níveis de manejo do solo para avaliação de riscos climáticos na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2022. 137 p. (Embrapa Soja. Documentos, 447).
- DENARDIN, J. E. Ante as oscilações pluviais, o sistema plantio direto requer tecnologias de cunho hidráulico. **Revista da AEAPA**, v. 3, p. 40-45, 2024.
- DEUS, T. R. V. de; GIONGO, V.; SALVIANO, A. M.; SANTANA, M. da S.; SILVA, V. C. da; SANTOS, T. C. dos. Selection of green manures to provide ecosystem services in a semi-arid environment. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 57, n. 3, p. 409-421, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781268>.
- DEUS, T. R. V. **Seleção de adubos verdes para prestação de serviços ecossistêmicos em ambiente Semiárido**. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Pernambuco, Petrolina.
- DÖBEREINER, J. Avanços recentes na pesquisa em fixação biológica de nitrogênio no Brasil. **Estudos Avançados**, v.4, n. 8, p.144-152, abr. 1990. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-40141990000100011>.
- EMBRAPA SOJA. **Soja em números (safra 2024/25)**. 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 26 ago. 2025.
- ENSINAS, S. C.; SERRA, A. P.; MARCHETTI, M. E.; SILVA, E. F. da; PRADO, E. A. F. do; LOURENTE, E. R. P.; ALTOMAR, P. H.; POTRICH, D. C.; MARTINEZ, M. A.; CONRAD, V. do A.; JESUS, M. V.; EL KADRI, T. C. Cover crops affect on soil organic matter fractions under no till system. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 4, p. 503-512, 2016.
- FARIA, A. F.; SCHULMAN, P.; MEYER, M. C.; CAMPOS, H. D.; CRUZ MAGALHÃES, V.; GODOY, C. V.; GUIMARÃES, R. A.; SILVA, L. H. C. P.; GOUSSAIN, M. M.; MARTINS, M. C.; NUNES JUNIOR, J.; VENANCIO, W. S.; FANTIN, L.; BRUSTOLIN, R.; JACCOUD FILHO, D. S.; CARNEIRO, L. C.; JULIATTI, F. C.; MEDEIROS, F. H. V. Seven years of white mold biocontrol product's performance efficacy on *Sclerotinia sclerotiorum* carpogenic germination in Brazil: a meta-analysis. **Biological Control**, v. 176, 105080, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105080>.
- FEDERAÇÃO BRASILEIRA DO SISTEMA PLANTIO DIRETO. FEBRAPDP. **Área sob Plantio Direto**. 2021. Disponível em: <https://plantiodireto.org.br/area-de-pd>. Acesso em: 21 mar. 2025.
- FERREIRA, J. G.; LIMA, C. E. P.; FONTENELLE, M. R.; BRAGA, M. B.; FÁVARO, S. P.; GAMBETA, R. Potencial de uso de carvão ativado de endocarpo de macaúba como pós-tratamento de efluente em protótipo de ETE descentralizada para remoção de nutrientes. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 12, p. 251-265, 2024. DOI: <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n12-251>.
- FIORINI, A. C. O.; ANGELKORTE, G.; BAKMAN, T.; CRUZ, L. B. T.; DIUANA, F. A.; MORAIS, T. N.; RATHMANN, R.; SILVA, F. T. F. da; TOGOMORI, I.; ZANON-ZOTIN, M.; LUCENA, A. F. P.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R.; PORTUGAL-PEREIRA, J. How climate change is impacting the Brazilian agricultural sector: evidence from a systematic literature review. **Environmental Research Letters**, v. 19, n. 8, 083001, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad5f4>.
- FORMIGA-JOHNSON, R. M.; BRITTO, A. L. Segurança hídrica, abastecimento metropolitano e mudanças climáticas: considerações sobre o caso do Rio de Janeiro. **Ambiente & Sociedade**, v. 23, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200110vu2020L3AO>.
- FUGA, C. A. G.; CAIXETA, G. A. N.; CAIXETA, C. F.; MELO, I. S. de. Growth promotion in maize (*Zea mays* L.) by *Bacillus aryabhattai* strain CMAA 1363. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 18, n. 3, e3340, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v18i3a3340>.
- FURTADO, A. J.; ABDALLA FILHO, A. L.; BRUNO, J. F.; PASQUINI NETO, R.; LOBO, A. A. G.; SILVA, G. V. da; PERNA JUNIOR, F.; ALVES, T. C.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. de F.; MEDEIROS, S. R. de.; OLIVEIRA, P. P. A.; RODRIGUES, P. H. M. Pigeon Pea Intercropped with Tropical Pasture as a Mitigation Strategy for Enteric Methane Emissions of Nellore Steers. **Animals**, v. 13, 1323, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani13081323>.
- GAZZONI, D. L.; BARATEIRO, J. V. G. R. P. Soybean yield is increased through complementary pollination by honey bees. **Journal of Apicultural Research**, v. 63, n. 4, p. 801-812, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/00218839.2022.2161219>.
- GIANNINI, T. C.; CORDEIRO, G. D.; FREITAS, B. M.; SARAIVA, A. M.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L. The dependence of crops for pollinators and the economic value of pollination in Brazil. **Journal of Economic Entomology**, v. 108, n. 3, p. 839-848, June 2015. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/tov093>.
- GIONGO, V.; COLEMAN, K.; SANTANA, M. da S.; SALVIANO, A. M.; OLSZVESKI, N.; SILVA, D. J.; CUNHA, T. J. F.; PARENTE, A.; WHITMORE, A. P.; RICHTER, G. M. Optimizing multifunctional agroecosystems in irrigated dryland agriculture to restore soil carbon - experiments and modelling. **Science of the Total Environment**, v. 725, July 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138072>.
- GLOBALFERT. **Outlook GlobalFert**. 2021. Disponível em: <https://www.globalfert.com.br/OGFposEvento/arquivo/Outlook-GlobalFert-2021.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2021.
- GONDIM, R. S.; CASTRO, M. A. H. de; EVANGELISTA, S. R. de M.; TEIXEIRA, A. S.; FUCK JÚNIOR, S.C. de F. Mudanças climáticas e impactos na necessidade hídrica das culturas perenes na Bacia do Jaguaribe, no Estado do Ceará. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 12, p.1657-1664, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008001200003>.

- GONDIM, R. S.; CASTRO, MARCO A.H. de; MAIA, A. de H. N.; EVANGELISTA, S. R. M.; FUCK JUNIOR, S. C. de F. Climate Change Impacts on Irrigation Water Needs in the jaguaribe River Basin1. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 48, p. 355-365, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00620.x>.
- GONDIM, R. S.; SERRANO, L. A. L.; MAIA, A. de H. N.; SILVA, J. P. da. Hydrophilic polymer changes the water demand in the implementation of a dwarf cashew orchard. **Engenharia Agrícola**, v. 40, p. 344-351, 2020.
- GONDIM, R. S.; SILVEIRA, C.; SOUZA FILHO, F. de; VASCONCELOS, F.; CID, D. Climate change impacts on water demand and availability using CMIP5 models in the Jaguaribe basin, semi-arid Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, p. 550, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7723-9>.
- GONDIM, R. S.; TANIGUCHI, C. A. K.; SERRANO, L. A. L.; MOURA, C. F. H. Cashew Clones Water Productivity and Production Responses to Different Biochar Levels. **AgriEngineering**, v. 6, n. 4, p. 3768-3784, Oct. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering6040215>.
- HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; CAMPO, R. J.; CRISPINO, C. C.; MORAES, J. Z.; SIBALDELLI, R. N. R.; MENDES, I. C.; ARIHARA, J. Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: contributions of biological N₂ fixation and of N fertilizer to grain yield. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 86, n. 4, p. 927-939, 2006. DOI: <https://doi.org/10.4141/P05-098>.
- HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Soybean seed co-inoculation with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense*: A new biotechnological tool to improve yield and sustainability. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, p. 811-817, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4236/ajps.2015.66087>.
- HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; CAMPOS, L. J. M.; MENNA, P.; BRANDI, F.; RAMOS, Y. G. Seed pre-inoculation with *Bradyrhizobium* as time-optimizing option for large-scale soybean cropping systems. **Agronomy Journal**, v. 112, p. 5222-5236, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20392>.
- HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. Fixação biológica do nitrogênio. In: MEYER, M. C.; BUENO, A. F.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. **Bioinsumos na cultura da soja**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. p. 141-162.
- IPCC. **Climate change 2022: impacts, adaptation, and vulnerability**. contribution of working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge: Cambridge University Press 2022. 3056 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- IPCC. **Scientific review of the impact of climate change on plant pests**: a global challenge to prevent and mitigate plant pest risks in agriculture, forestry and ecosystems. Rome. FAO, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb4769en>.
- JHA, A. K.; MALLA, R.; SHARMA, M.; PANTHI, J.; LAKHANKAR, T.; KRAKAUER, N. Y.; PRADHANANG, S. M.; DAHAL, P.; SHRESTHA, M. L. Impact of Irrigation Method on Water Use Efficiency and Productivity of Fodder Crops in Nepal. **Climate**, v. 4, n. 1, Jan. 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/cli4010004>.
- KADZIENE, G.; SUPRONIENE, S.; AUSKALNIENE, O. PRANAITIENE, S. SVEGZDA, P. VERSULIENE, A. CESEVICIENE, J.; JANASAUKAITE, D. FEIZA, V. Tillage and cover crop influence on weed pressure and *Fusarium* infection in spring cereals. **Crop Protection**. 127, 104966, Jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104966>.
- LIMA, C. E. P.; CAJAMARCA, S. M. N.; TRINDADE, D. M.; FONTENELLE, M. R.; SUINAGA, F. A.; FONSECA, M. E. N.; BOITEUX, L. S.; PILON, L.; BRAGA, M. B.; GUEDES, I. M. R.; SILVA, J. Adaptation of Lettuce Cultivars to High Temperatures and Different Types of Fertilization: Anticipating Management Strategies to Mitigate the Adverse Effects of Global Climate Change. **Global Research in Environment and Sustainability**, v. 2, n. 9. p. 32-51, 2024.
- LIMA, C. E. P.; GUEDES, I. M. R.; SILVA, J.; ALCANTARA, F. A.; MADEIRA, N. R.; CARVALHO, A. D.; FONTENELLE, M. R. Effects of Five Years Adoption of No-Tillage Systems for Vegetables Crops in Soil Organic Matter Contents. **Agricultural Sciences**, v. 9, p. 117-128, Jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4236/as.2018.91009>.
- LEONEL, L. F.; MARTELLI, L. F. A.; SILVA, W. T. L. Avaliação do efluente de fossa séptica biodigestora e jardim filtrante. In: SYMPOSIUM ON AGRICULTURAL AND AGROINDUSTRIAL WASTE MANAGEMENT, 3., 2013, São Pedro. **Anais [...]** São Pedro, SP: Embrapa Instrumentação, 2013.
- LOPES, A. A. de C.; BOGIANI, J. C.; FIGUEIREDO, C. C. de; REIS JUNIOR, F. B. dos; SOUSA, D. M. G. de; MALAQUIAS, J. V.; MENDES, I. de C. Enzyme activities in a sandy soil of Western Bahia under cotton production systems: short-term effects, temporal variability, and the FERTBIO sample concept. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 52, p. 2193-2204, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42770-021-00606-z>.
- LOPES SOBRINHO, O. P.; SANTOS, J.; TEIXEIRA, R.; SOARES, C. Tendências globais de pesquisas sobre o reúso de águas residuárias na agricultura a partir da análise bibliométrica. **Revista Geo UERJ**, n. 45, 2024. DOI: 10.12957/geouerj.2024.80390.
- LESKOVŠEK, R.; ELER, K.; LESKOVŠEK, S. A. Weed suppression and maize yield 14 influenced by cover crop mixture diversity and tillage. **Agriculture, Ecosystems & 15 Environment**, v. 383, May 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109530>.
- MAGALHÃES, C. A. S.; ZOLIN, C. A.; LULU, J.; LOPES, L. B.; FURTINI, I. V.; VENDRUSCULO, L. G.; ZAIATZ, A. P. S. R.; PEDREIRA, B. C.; PEZZOPANE, J. R. M. Improvement of thermal comfort indices in agroforestry systems in the southern Brazilian Amazon. **Journal of Thermal Biology**, v. 91, 102636, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102636>.
- MAIA, A. de H. N.; GONDIM, R. S.; CASTRO, M. A. H. de. **Sensibilidade da demanda de água para irrigação a mudanças climáticas e fatores operacionais dos sistemas de produção**. Jaguariúna: Embrapa Meio

Ambiente, 2016. 25 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 70).

MAPBIOMAS. **Coleção 10 do Mapbiomas da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org>. Acesso em: 27 mar. 2025

MARQUELLI, W. A.; SILVA, H. R.; MADEIRA, N. R. Uso de água e produção de tomateiro para processamento em sistema de plantio direto com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n.9, p. 1399-1404, set. 2006.

MAY, A.; SANTOS, M. de S. dos; SILVA, E. H. F. M. da; VIANA, R. da S.; VIEIRA JUNIOR, N. A.; RAMOS, N. P.; MELO, I. S. de. Effect of *Bacillus aryabhattai* on the initial establishment of pre-sprouted seedlings of sugarcane varieties. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, e11510212337, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12337>.

MBIRO, A.; KELBESSA, B. G.; WESEMAEL, W. W. L. Host plant status of different cover crops for *Pratylenchus penetrans* and *Meloidogyne chitwoodi*. **Journal of Asia Pacific Entomology**, v. 27, n. 3, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2024.102272>.

MEDEIROS, F. J.; OLIVEIRA, C. P. de. Assessment of dry and heavy rainfall days and their projected changes over Northeast Brazil in Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 models. **International Journal of Climatology**, v. 42, p. 8665-8686, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.7759>.

MEDEIROS, F. H. V.; BETTIOL, W. How has Brazil turned into the largest producer and consumer of biocontrol products? **IOBC-WPRS Bulletin**, v. 165, p. 110-114, 2023.

MELO, R. F.; ANJOS, J. B. dos; PEREIRA, L. A.; BRITO, L. T. de L.; SILVA, M. S. L. da. **Barragem subterrânea**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011. 16 p.

MELO, R. F.; SILVA, P. T. S.; LIMA, J. R. F. **Bioágua familiar**: reúso de águas cinzas para produção de alimentos. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2023. 1 Folder.

MIRANDA, F. R.; SOUZA, FRANCISCO E. A.; LIMA, R. N.; SOUSA, C. C. M.; SANTANA, M. G. S.; COSTA, C. A. G. Uso de efluentes da carcinicultura de águas interiores na irrigação do arroz. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 380-386, Dez. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522008000400006>.

MONTEIRO, A. F. M.; TORRES, R. R.; MARTINS, F.B.; MARRAFON, V. H. de A. Climate change impacts on evapotranspiration in Brazil: a multi-model assessment. **Theoretical and Applied Climatology**, 155, p. 5363-5373, 2024a. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04942-6>.

MONTEIRO, J. E. B. A.; BENDER, F.; BLIKSTAD, N. M. D.; CONCEIÇÃO, M. A. F.; STEINMETZ, S.; REISSER JUNIOR, C.; FARIAS, J. R. B.; FRANCHINI, J. C.; SANTOS, P. M.; EVANGELISTA, B. A.; CUADRA, S. V.; ANDRADE, C. L. T.; FLUMIGNAN, D. L.; BRAGA, M.; SILVA, F. A. M.; OLIVEIRA, A. F.; MOURA, M. S. B.; VICTORIA, D. C.; ANDRADE, R. G.; CUNHA, G. R. **Gestão de riscos climáticos na agricultura**. Campinas: Embrapa

Agricultura Digital, 2024b. 67 p. (Embrapa Agricultura Digital. Documentos, 192).

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa CERH-MG nº 65, de 18 de junho de 2020**. Estabelece diretrizes, modalidades e procedimentos para o reúso direto de água não potável, proveniente de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários (ETE) de sistemas públicos e privados e dá outras providências. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=52040>. Acesso em: 25 ago. 2025.

MONTEIRO, J. E. B. A.; VICTORIA, D. C.; FARIAS, J. R. B.; BARROS, A. H. C.; LIMA, E.P.; ARAUJO FILHO, J. C.; SILVA, F. A. M.; EVANGELISTA, B. A.; TEIXEIRA, W. G. **Classes de água disponível do solo para uso no Zoneamento Agrícola de Risco Climático**. Campinas: Embrapa Agricultura Digital, 2022. 5 p. (Embrapa Agricultura Digital. Comunicado técnico, 135).

MOURA, P. G.; ARANHA, F. N.; HANDAM, N. B.; MARTIN, L. E.; SALLES, M. J.; CARVAJAL, E.; JARDIM, R. Água de reúso: uma alternativa sustentável para o Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 6, p. 791-808, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180201>.

NUNES, M. R.; VAZ, C. M. P.; PESSOA, T. N.; DENARDIN, J. E.; KARLEN, D. L.; GIAROLA, N. F. B.; LIBARDI, P. L. Inherent and dynamic effects on the structural stability of Brazilian Oxisols. **Geoderma Regional**, v. 27, e0042, p. 1-8, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00426>.

NUNES, P. A. A.; LACA, E. A.; CARVALHO, P. C. F.; LI, M.; SOUZA FILHO, W.; KUNRATH T.R.; MARTINS, A. P.; GAUDIN, A. Livestock integration into soybean systems improves long-term system stability and profits without compromising crop yields. **Scientific Reports**, v. 11, 16492, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81270-z>.

OLIVEIRA, A. R. de; MELO, R. F. de; SANTOS, J. M. R. dos; TARDIN, F. D. Desempenho produtivo de sorgo sacarino cultivado em barragem subterrânea. **Revista Científica Intellecto**, v. 2, n. 1, p. 103-111, 2016.

OLIVEIRA, B. A.; LÓPEZ, I. F.; CRANSTON, L. M.; KEMP, P. D.; DONAGHY, D.J.; DÖRNER, J.; LÓPEZ- VILLALOBOS, N.; GARCÍA-FAVRE, J.; ORDÓÑEZ, I. P.; VAN HALE, R. 18O isotopic labelling and soil water content fluctuations validate the hydraulic lift phenomena for C3 grass species in drought conditions. **Plant Stress**, v. 11, p.1-15. 2024a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100414>.

OLIVEIRA, E. J. de; MORGANTE, C. V.; AIDAR, S. T.; CHAVES, A. R. M.; ANTONIO, R. P.; CRUZ, J. L.; FILHO, M. A. C. Evaluation of cassava germplasm for drought tolerance under field conditions. **Euphytica**, v. 213, article number 188, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-017-1972-7>.

OLIVEIRA, G. M.; SANTOS, J. O.; SANTOS, C. B.; VOLTOLINI, T. V.; ANTONIO, R. P.; ANGELOTTI, F. Rise in temperature increases growth and yield of Manihot sp. plants. **Research, Society and Development**, v. 11, e15611929891, 2022a.

OLIVEIRA, K. E. S.; RIBEIRO, C.; ALMEIDA C. A.; PORTILHO, C.N. Editing genomes via CRISPR/CAS9 and applications in maize

improvement. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 21, e1284, 2022b.

OLIVEIRA, O. B.; LOPEZ, I.; CRANSTON, L.; KEMP, P.; DONAGHY, D. Using leaf regrowth stage to define defoliation interval for diverse pastures of complementary species (*Lolium perenne* L., *Bromus valdivianus* Phil., *Dactylis glomerata* L. and *Trifolium repens* L.). **Journal of New Zealand Grasslands**, 85, p. 311-322, 2023. DOI: <https://doi.org/10.33584/jnzg.2023.85.3642>.

OLIVEIRA, P. P. A. Uso de leguminosas forrageiras na época seca. In: SANTOS, M. E. R.; MARTUSCELLO, J. A. (org.). **Todo ano tem seca! Está preparado?: estratégias para produção e uso do pasto na época seca**. São Paulo: Reino Editorial, 2022. p. 257-289.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; PERNA JÚNIOR, F.; TADINI, A. M.; MARTIN-NETO, L.; RODRIGUES, P. H. M. Potential of integrated trees-pasture-based systems for GHG emission mitigation and improving soil carbon dynamics in the Atlantic forest biome, Southeastern of Brazil. **EUROPEAN Journal of Agronomy**, v. 158, 127219, 2024b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127219>

OLIVEIRA, P. P. A.; BOARETTO, A. E.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, W. S.; CORSI, M. Liming and fertilization for restoring degraded *Brachiaria decumbens* pasture on sandy soil. **Scientia agricola**, v.60, n.1, p. 125-131, 2003.

OLIVEIRA, P. P. A.; CORTE, R. R. S.; SILVA, S. L.; RODRIGUEZ, P. H. M.; SAKAMOTO, L. S.; PEDROSO, A. F.; TULLIO R. R.; BERNDT, A. The effect of grazing system intensification on the growth and meat quality of beef cattle in the Brazilian Atlantic Forest biome. **Meat Science**, v. 139, p. 157-161, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.01.019>.

OLIVEIRA, P. P. A.; OLIVEIRA, W. S. de; CORSI, M. Efeito residual de fertilizantes fosfatados solúveis na recuperação de pastagem de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu em Neossolo Quartzarênico. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 36, n. 6, p. 1715-1728, 2007a.

OLIVEIRA, P. P. A.; TREVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, W. S. de; CORSI, M. Fertilização com N e S na recuperação de pastagem *Brachiaria brizantha* cv. Marandu em Neossolo quartzarênico. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, n. 4, p. 1121-1129, 2005.

OLIVEIRA, P. P. A.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, W. S. de. Balanço do nitrogênio (15N) da ureia nos componentes de uma pastagem de capim-marandu sob recuperação em diferentes épocas de calagem. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 36, p. 1982-1989, 2007b.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Relatório Mundial de Saúde 2006**. Brasília, DF, 2007. 210 p. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/i_inicio.pdf. Acesso em: 25 ago. 2025.

PARLAMENTO EUROPEU. Regulamento (UE) 2020/741 do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de maio de 2020 relativo aos requisitos mínimos para a reutilização da água (Texto relevante para efeitos do EEE). **Jornal Oficial da União Europeia**, 5 jun. 2020. Disponível

em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0741>. Acesso em: 25 ago. 2025.

PASQUINI NETO, R.; FURTADO, A. J.; SILVA, G. V. da; LOBO, A. A. G.; ABDALLA FILHO, A. L.; PERNA JÚNIOR, F.; BERNDT, A.; MEDEIROS, S. R. de; PEDROSO, A. de F.; OLIVEIRA, P. P. A.; RODRIGUES, P. H. M. Performance and feed intake of Nellore steers in extensive, intensive, and integrated pasture-based beef cattle production systems. **Livestock Science**, v. 294, 105667, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2025.105667>.

PASQUINI NETO, R.; FURTADO, A. J.; SILVA, G. V. da; LOBO, A. A. G.; ABDALLA FILHO, A. L.; BRUNETTI, H. B.; BOSI, C.; PEDROSO, A. de F.; PEZZOPANE, J. R. C.; OLIVEIRA, P. C. A.; RODRIGUES, P. H. M. Forage accumulation and nutritive value in extensive, intensive, and integrated pasture-based beef cattle production systems. **Crop & Pasture Science**, v. 75, n. 5, May 2024. DOI: <https://doi.org/10.1071/CP24043>.

PEOPLES, M. B.; HERRIDGE, D. F.; LADHA, J. K. Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production. **Plant Soil**, v. 174, n. 1, p. 3-28, 1995.

PEZZOPANE, J. R. M.; NICODEMO, M. L. F.; BOSI, C.; GARCIA, A. R.; LULU, J. Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. **Journal of Thermal Biology**, v. 79, p.103-111, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015>.

PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. de F.; BONANI, W. L.; BOSI, C.; BRUNETTI, H.; PASQUINI NETO, R.; FURTADO, A. J.; RODRIGUES, P. H. M. Intercropping of tropical grassland and pigeon pea: Impact on microclimate, soil water, and forage production. **Rangelands Ecology & Management**, v. 95, p. 1-10, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rama.2024.04.005>.

POTTS, S. G.; IMPERATIZ-FONSECA, V.; NEGÓ, H. (ed.). **The assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production**. Bonn, Germany, 2016. 55.6 p.. Disponível em: <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/519227/>. Acesso em: 26 ago. 2025.

POLIDORO, J. C.; FREITAS, P. L.; HERNANI, L. C.; ANJOS, L. H. C. dos; RODRIGUES, R. de A. R.; CESARIO, F. V.; ANDRADE, A. G.; RIBEIRO, J. L. Potential impact of plans and policies based on the principles of Conservation Agriculture on the control of soil erosion in Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 32, p. 1-6, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3876>.

RAEISI, L. G.; MORID, S.; DELAVAR, M. Effect and side-effect assessment of different agricultural water saving measures in an integrated framework. **Agricultural Water Management**, v. 223, 105685, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105685>.

RAY, D. K.; GERBER, J. S.; MACDONALD, G. K.; WEST, P. C. Climate variation explains a third of global crop yield variability. **Nature Communications**, v. 6, 5989, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms6989>.

REICHERT, J. M.; ROSA, V. T. da; VOGELMANN, E. S.; ROSA, D. P. da; HORN, R.; REINERT, D. J.; SATTLER, A.; DENARDIN, J. E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil & Tillage Research**, v. 158, p. 123-136, 2016.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. Resolução nº 419/2020. Estabelece critérios e procedimentos para a utilização de água de reúso para fins urbanos, industriais, agrícolas e florestais no Estado do Rio Grande do Sul. **Diário Oficial do Estado**, 21, jan. 2020. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/202006/24135755-419-2020-estabelece-criterios-e-procedimentos-para-a-utilizacao-de-agua-de-reuso.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2025.

ROCHA, A.; GONÇALVES, E. Measuring the causal effect of no-till system adoption on Brazilian natural areas. **Soil and Tillage Research**, v. 239, 106053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106053>.

ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, A.; CHAPIN III, F. S.; LAMBIN, E. F.; LENTON, T. M.; FOLKE, C.; SHELLNHUBER, H. J.; NYKVIST, B.; WIT, C. A.; HUGHES, T.; LEEUW, S. van der; RODHE, H.; SÖRLIN, S.; SNYDER, P. K.; COSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORREL, R. W.; FABRY, V. J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.; RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P.; FOLEY, J. A. A safe operating space for humanity. **Nature**, v.461, p.472-475, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1038/461472a>.

ROSSETTI, L. A. Seguro rural e zoneamento agrícola no Brasil: novos rumos. **Revista de Política Agrícola**, v.7, n.4, p. 33-43, 1998.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 70-79, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.023>.

SANTOS, J. O.; ANGELOTTI, F.; COSTA-LIMA, T. C. Does elevated CO2 affect the biological aspects of *Liriomyza sativae* in melon plants? **Semina: Ciências Agrárias**, v. 42, n. 4, p. 2151-2162, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n4p2151>.

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Outstanding impact of *Azospirillum brasilense* strains Ab-V5 and Ab-V6 on the Brazilian agriculture: Lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e.0200128, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200128>.

SARAIVA, K. R.; VIANA, T. V. A.; BEZERRA, F. M. L.; COSTA, S. C.; GONDIM, R. S. Regulated deficit irrigation and different mulch types on fruit quality and yield of watermelon. **Revista Caatinga**, v. 30, p. 437-446, 2017.

SCHULMAN, P.; LOPES FILHO, L. C.; BASÍLIO, J. P.; BARBOSA, E. T.; TORMEN, N.; NUNES, R. de S.; ALTMANN, N.; MOURA, J. B. de; LOBO JUNIOR, M. Cover crops as a strategy for root rot management in common beans: effects on crop performance and root microbial dynamics in a Cerrado soil. **Rhizosphere**, v. 33, 101015, 2025.

SILVA, V. C. da; SANTANA, M. da S.; PARENTE, A. G.; GONDIM, R. S.; SILVEIRA, C. da S.; SALVIANO, A. M.; DEUS, T. R. V. de; VALLADARES, G. S.; GIONGO, V. Modeling future carbon stock in melon cultivation agroecosystems under different climate scenarios. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 59, e1729, 2024.

SILVA, W. O.; BARROS, J. R. A.; SIMÕES, W. L.; OLIVEIRA, A. R.; NASCIMENTO, L. A.; ANGELOTTI, F. Water availability and growing season temperature on the performance of sorghum cultivars. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 19, p. 1-8, 2024.

TELLES T. S.; DECHEN S. C. F.; GUIMARÃES, M. F. Institutional landmarks in Brazilian research on soil erosion: a historical overview. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 37, p.1431-1440, 2013.

THORNTON, P. K.; HERRERO, M. Climate change adaptation in mixed crop-livestock systems in developing countries. **Global Food Security**, v. 3, p. 99-107, 2014.

VALLE, C. B. DO; JANK, L.; BARRIOS, S. C. L.; SANTOS, M. F. Melhoramento genético de gramíneas forrageiras tropicais com foco nas mudanças climáticas. In: PEDREIRA, C. G. S.; SILVA, S. C. da; SANTOS, P. M.; MOURA, J. C. de (ed.). In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS, 28., 2017, Piracicaba. **Anais [...]** Piracicaba: Fealq, 2017. p. 119-162.

VAN OPSTAL, J.; DROOGERS, P.; KAUNE, A.; STEDUTO, P.; PERRY, C. **Guidance on realizing real water savings with crop water productivity interventions**. Wageningen: FAO: FutureWater, 2021.

VINHOLIS, M. M. B.; SOUZA FILHO, H. M.; SHIMATA, I.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. F. Economic viability of a crop-livestock integration system. **Ciência Rural**, v. 51, 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190538>.

WOLDITSADIK, M.; BEYENE, T.; ABI, D. Investigating the Role of Honeybee (*Apis mellifera* L.) Pollination on Seed Yield of Soybean (*Glycine max* L. Merril). **American Journal of BioScience**, v. 11, n. 4, p. 88-91, 2023. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ajbio.20231104.12>.

Zoneamento Agrícola de Risco Climático

Um diferencial poderoso na **gestão de riscos** da agricultura brasileira

O Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc) é uma ferramenta de apoio aos instrumentos de política agrícola e de gestão de riscos na agricultura. Trata-se de um estudo cujo objetivo é minimizar a exposição dos recursos públicos a riscos relacionados a fenômenos climáticos, já que permite a identificação, em cada município, da melhor época de plantio das culturas agrícolas, nas diferentes classes texturais de solo e ciclos dessas culturas.

Sua implementação se dá por meio da publicação de portarias da Secretaria de Política Agrícola (SPA) do Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa). Nelas, são indicadas as datas de plantio atreladas a níveis de risco de 20, 30 e 40% de insucesso, com base no histórico climático. Anualmente, são publicadas novas portarias, envolvendo tanto culturas e localidades já zoneadas quanto novos arranjos de culturas e localidades. No ano-safra 2024/2025, essas portarias abrangeram um total de 55 culturas, contemplando todos os 26 estados da Federação, além do Distrito Federal.

O Zarc, após mais de 20 anos de operação, constitui-se atualmente em um importante balizador do uso de recursos previstos na Política Agrícola Nacional (Lei nº 8.171/1991), na medida em que subsidia as decisões de alguns programas, funcionando como um pilar de orientação ao crédito e ao seguro agrícola. Para fazer jus ao Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (Proagro) e à subvenção ao Prêmio do Seguro Rural (PSR), o produtor deve seguir as recomendações do Zarc. No caso do Programa de Garantia da Atividade Agropecuária da Agricultura Familiar (Proagro Mais),

não há essa obrigatoriedade, mas uma forte recomendação. Assim, o Zarc intermedeia e dá segurança técnica às relações, promovendo benefícios mútuos, já que ajuda a minimizar os riscos para ambos os lados da operação, ou seja, os agentes financiadores e os tomadores de crédito.

O Zarc apresenta também efeitos diretos sobre a produtividade e a geração de renda, com consequente favorecimento da competitividade da agricultura brasileira. Além disso, por ter seu uso restrito às áreas prioritárias para uso agrícola, evita conflitos com a conservação de recursos naturais, tornando-se um instrumento essencial para a sustentabilidade econômica.

Dentro de uma perspectiva conservadora, acredita-se que a produção brasileira tenha aumentado em, pelo menos, 20% a partir da utilização do Zarc. Assumindo esse referencial para cálculo, estima-se que, no período entre 2006 e 2024, o valor bruto da produção (VBP) das áreas contratadas com auxílio do PSR tenha alcançado um impacto positivo de R\$ 187,95 bilhões. No caso do Proagro, tomando-se como base o período de 2013 a 2024, o impacto estimado do Zarc é da ordem de R\$ 83,66 bilhões. Conjuntamente, esses dois ganhos são bastante significativos, acumulando R\$ 271,61 bilhões. Esses resultados foram obtidos em comparação a um baixo custo de operacionalização do Zarc. Em sua análise de rentabilidade, no período de 1994 a 2023, o Zarc apresenta uma relação benefício/custo de 285,69, indicando a grande viabilidade do projeto, já que, para cada R\$ 1,00 investido, colhe-se o retorno de R\$ 285,69.

Foto: Gessi Ceccon



Consórcio milho-braquiária: na ocorrência de geada o milho protege a braquiária.



CAPÍTULO 3

Gestão da informação

Bases de dados, funcionalidades e métricas sobre o balanço de carbono em sistemas agrícolas

Carla Geovana do Nascimento Macário – Luis Gustavo Barioni – Vanessa Romário de Paula – Daniel de Castro Victoria – Silvio Barge Bhering – Margareth Gonçalves Simões – Gustavo de Mattos Vasques – Marcos Cezar Visoli – Debora Pignatari Drucker – Aryeverton Fortes de Oliveira

Introdução

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a sustentabilidade do uso dos recursos naturais criam demandas por decisões racionais mais eficientes por parte do governo, de instituições e organizações responsáveis pelas cadeias de produção e dos próprios consumidores. Esse processo decisório acaba por envolver e impactar toda a sociedade.

Decisões eficientes requerem informação. A informação tem como característica permitir a interpretação e a compreensão, sendo, portanto, útil para reduzir as incertezas na avaliação de diferentes alternativas, apoiando o processo decisório. Ela é produzida a partir do processamento, da estruturação e da interpretação de dados, que são a matéria-prima para melhores decisões. Quanto menor for a incerteza associada à informação, mais assertiva será a decisão e maiores serão as probabilidades de se alcançar os objetivos traçados. Alguns métodos permitem, inclusive, quantificar o valor econômico da informação por meio da modelagem do problema de decisão (Gruijter et al., 2016). Dessa forma, a gestão eficiente da informação é fundamental para possibilitar eficiência nos processos de tomada de decisões racionais, no planejamento e na inovação tecnológica.

Este capítulo examina como a gestão da informação e as soluções associadas se aplicam aos esforços de mitigação e adaptação da agricultura às mudanças climáticas, considerando o balanço de carbono.

Serão apresentadas bases de dados essenciais, funcionalidades dos sistemas de gestão da informação e as métricas relevantes para o monitoramento e a avaliação do balanço de carbono em sistemas agrícolas, com o objetivo de fornecer um panorama abrangente para pesquisadores, produtores e formuladores de políticas públicas.

Contextualização

Antes de se debruçar sobre o desenvolvimento e a aplicação de métodos quantitativos para a estimativa e a projeção do balanço de carbono e de outras métricas de sustentabilidade nas atividades rurais, faz-se necessária a contextualização da interface entre os diferentes processos associados à produção vegetal e animal e às emissões e remoções de gases de efeito estufa (GEE) da atmosfera. Esse contexto servirá para identificar como dados, informações e conhecimento podem gerar benefícios tanto para os agricultores quanto para a sociedade, no cenário das mudanças climáticas.

Apesar do aumento da produção de energia limpa, globalmente a geração de energia é ainda muito dependente de combustíveis fósseis: gás natural, petróleo e carvão que, somados, foram responsáveis, em 2023, por aproximadamente 77% da produção de energia consumida no planeta (Our World in Data, 2025). As emissões de dióxido de carbono (CO_2) provenientes da queima desses combustíveis também apresentaram crescimento na última década.

A agricultura, além de sua função primordial de garantir a segurança alimentar, desempenha um importante papel nos ciclos do carbono e do nitrogênio, diretamente associados ao equilíbrio climático do planeta e pode contribuir para o controle da mudança climática. As plantas, utilizando a energia solar por meio do processo de fotossíntese, absorvem o CO_2 atmosférico e, ao combiná-lo com a água, produzem carboidratos (açúcares) para seu crescimento, armazenando o carbono

em sua biomassa (folhas, caules, raízes, grãos, frutos) em diversas moléculas, como lignina, celulose e amido. As plantas também respiram e emitem CO_2 para gerar energia para seus processos metabólicos. A diferença entre os fluxos de carbono gerados pela fotossíntese e pela respiração é chamada de produtividade primária líquida (PPL).

A morte da biomassa vegetal, ao longo do ciclo das culturas ou ao seu final, gera material orgânico morto (ex. palha, folhas e raízes). Esse material orgânico, denominado liteira, pode ser depositado acima do nível do solo ou diretamente no perfil do solo (principalmente pelas raízes), bem como pelas raízes das plantas vivas, por meio de um processo conhecido como exsudação radicular. A decomposição da liteira e da matéria orgânica do solo por microrganismos, como fungos, archaea e bactérias, também gera emissão de CO_2 para a atmosfera. A velocidade dessa decomposição é influenciada por fatores como temperatura, umidade e aeração do solo (Bhattacharjya et al., 2024).

A taxa de variação dos estoques de carbono orgânico do solo (COS) é, portanto, determinada principalmente pelos fluxos de entrada de carbono via decomposição da liteira e fertilização orgânica, e pelos fluxos de saída (perdas) de carbono, associados à decomposição do COS, à erosão e à lixiviação. No manejo do solo, práticas intensivas de preparo do solo, como a aração e a gradagem, podem aumentar as taxas de decomposição da matéria orgânica em razão do aumento da aeração quanto da ruptura de agregados do solo. O aumento da PPL, obtido por meio da diversificação de culturas no ciclo agrícola ou do uso de culturas de cobertura, assim como a redução das taxas de decomposição do COS pelo menor revolvimento do solo, como no sistema plantio direto, podem levar ao aumento dos estoques de COS, um carbono anteriormente capturado da atmosfera na forma de CO_2 .

O sequestro de COS é reconhecido como uma importante solução baseada na natureza para a mitigação das mudanças climáticas. O estoque de carbono no solo, em todo o globo, é estimado em

aproximadamente três vezes o carbono presente na atmosfera, o que representa uma enorme oportunidade de usar o solo como sumidouro. Essa solução também traz diversos cobenefícios, como o aumento da resiliência dos sistemas agrícolas, devido ao aumento do armazenamento de água e nutrientes para as plantas, contribuindo para a segurança alimentar e gerando benefícios para os agricultores. Iniciativas internacionais, como a 4p1000 (Rumpel et al., 2020) e o mapeamento do Potencial Global de Sequestro de Carbono Orgânico do Solo (GSOCseq), conduzido (FAO, 2025) pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), demonstram o crescente interesse internacional em iniciativas de sequestro de carbono na agricultura para compensar emissões de GEE para a atmosfera.

Em sistemas de produção animal, existem outras emissões e gases associados, além do CO₂. Animais, em especial ruminantes (ex. bovinos, ovinos e caprinos), produzem metano (CH₄) durante a fermentação entérica. Os dejetos dos animais, esterco e urina, também passam por um processo de decomposição, liberando metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), ambos potentes GEE. O manejo adequado desses dejetos, por meio de práticas como armazenamento em lagoas, compostagem, ou uso de biodigestores, influencia diretamente na redução de emissões.

Ainda no âmbito do estabelecimento agropecuário, a aplicação de fertilizantes nitrogenados pode levar à emissão de N₂O, outro potente gás de efeito estufa. A ureia, um fertilizante nitrogenado, emite também CO₂ durante sua decomposição. Corretivos como o calcário geram CO₂ quando adicionados ao solo, assim como a queima de pastagens ou de resíduos de culturas, que, além de CO₂, geram também outros GEE.

Além das causas diretas que geram emissões e remoções de carbono dentro do estabelecimento rural, como as listadas acima, existem também outras causas associadas às cadeias produtivas, que são indiretamente atribuídas aos produtos

agrícolas. A abordagem mais aceita e utilizada para a contabilidade das emissões e remoções ao longo da cadeia de um produto é a avaliação de ciclo de vida (ACV), a qual é tratada em um capítulo específico neste livro. Somente a título de exemplo, a ACV inclui emissões associadas à cadeia a montante, como a mineração, os processos industriais e o transporte para a produção de fertilizantes e corretivos; os GEE utilizados na produção de alimentos para os animais (dentro e fora da fazenda); e a compensação das emissões de combustíveis fósseis associadas à adição de sebo bovino ao biodiesel. Mudanças no uso da terra e os GEE resultantes da conversão da vegetação natural para a expansão agrícola (direta ou indireta) também fazem parte da contabilidade de ACV. O que se denomina balanço de carbono é, normalmente, uma abordagem simplificada da ACV, que busca quantificar a quantidade de GEE emitidos e removidos e observar como essa distribuição varia ao longo do tempo.

Muitos estudos vêm sendo conduzidos para desenvolver modelos que permitam simular as emissões e as remoções, ou sequestros, de carbono na agricultura, de maneira a subsidiar estratégias que promovam o equilíbrio climático do planeta, por exemplo, a melhoria na estimativa de estoque de carbono no solo. Além disso, métodos eficientes, com estimativas adequadas, podem substituir medições diretas em solo, evitando sua movimentação por meio de trincheiras e revolvimento, ação invasiva que, além de demandar esforço desnecessário, altera a condição natural do solo.

A pegada de carbono é uma medida que quantifica o impacto das atividades humanas sobre o meio ambiente, especificamente em relação às emissões de GEE. A adoção desses modelos tem ajudado para a mensuração da pegada de carbono nas propriedades, tornando-se cada vez mais importante para identificar ações de prevenção e de melhoria e para atender às demandas, de consumidores e mercados, por produtos com menor impacto ambiental. Os modelos simulam

as ações com base em dados fornecidos, provendo informações que auxiliam nas tomadas de decisão. Essa evolução também é o caminho para os avanços nos inventários nacionais. Para o desenvolvimento de modelos de simulação, ou mesmo para sua calibração e validação em condições nacionais, são necessários conjuntos de dados que subsidiem o entendimento dos processos simulados. Quanto melhor a qualidade dos dados utilizados na modelagem, mais assertivos serão os resultados obtidos, possibilitando uma avaliação mais precisa do balanço de carbono. Dessa forma, a estruturação de bases de dados robustas, consistentes e de qualidade, que integrem dados primários provenientes de diversas fontes, é o primeiro passo para uma gestão eficaz da informação. Infelizmente, a disponibilidade de dados sobre emissões e balanço de carbono ainda é limitada, principalmente por se tratarem de resultados oriundos de experimentos de longa duração, que exigem dados de dez ou mais anos.

Historicamente, o Brasil tem recorrido à expansão territorial para aumentar a produção agropecuária, o que gerou desmatamento, perda de biodiversidade e degradação do solo, especialmente no Cerrado e na Amazônia. A intensificação sustentável surge como uma alternativa viável, ao permitir o aumento da produtividade sem necessidade de ampliar a área cultivada, reduzindo os impactos ambientais. Nesse cenário, os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) ganham destaque como estratégia eficaz de uso sustentável do solo. Diante das mudanças climáticas, torna-se essencial o desenvolvimento de uma agricultura de baixa emissão de carbono para mitigar a emissão de GEE do setor agropecuário. O Brasil tem avançado nesse sentido por meio de políticas públicas, como o Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (Plano ABC+) (Brasil, 2021) e o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas (PNCPD) (Brasil, 2023). No entanto, a efetividade dessas políticas depende de dados atualizados sobre a adoção e a expansão dos sistemas produ-

tivos sustentáveis – informações atualmente indisponíveis com a abrangência espacial, temporal e o nível de detalhamento necessários para subsidiar adequadamente a tomada de decisão.

O impacto da agricultura no ciclo do carbono depende do balanço entre o carbono sequestrado e o carbono emitido, bem como dos processos indiretamente afetados ao longo da cadeia produtiva ou em decorrência do uso da terra. Práticas agrícolas sustentáveis visam maximizar o aumento dos estoques de carbono no solo e na biomassa vegetal, ao mesmo tempo que buscam minimizar as emissões de GEE associadas à cadeia e às mudanças no uso da terra.

Gerando informações sobre o balanço de carbono

A transformação de dados em informação, no ambiente digital, se dá por meio do processamento computacional. No contexto da agricultura, a geração de informações sobre carbono resulta em indicadores comparáveis, construídos com base em métodos, protocolos e métricas pré-estabelecidos e amplamente aceitos. O desenvolvimento de metodologias para quantificação das emissões e remoções de GEE associadas às atividades agropecuárias, o potencial de sequestro de carbono no solo e na biomassa e considerações sobre escopo e emissões indiretas são essenciais para uma visão consistente do balanço de carbono dos sistemas produtivos.

Existem diversos indicadores, métodos e métricas relacionados à avaliação do carbono, desenvolvidos para propósitos distintos por diferentes instituições. Entre as análises mais utilizadas no contexto da agricultura e agroindústria, destacam-se:

- As comunicações nacionais de **emissões e remoções de GEE**, produzidas setorialmente, considerando os padrões estabelecidos pelo

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)¹, principal órgão internacional responsável pela avaliação das mudanças climáticas.

- A **pegada de carbono** de produtos, estimada por ACV, conforme os princípios estabelecidos por diversas normas da Organização Internacional de Normalização (ISO), como ISO 14040:2006, ISO 14044:2006, ISO 14045:2012 e ISO_14064-2_2019 - parte 2 (International Standard Organization, 2006a, 2006b, 2012, 2019).
- Os projetos de **mitigação** por captura de carbono no solo e na vegetação, com padrões estabelecidos por certificadoras – entidades independentes que estabelecem e administram padrões rigorosos para a certificação de projetos que visam reduzir ou remover GEE da atmosfera (Verified Carbon Standard, 2020, 2024).
- Os projetos de **neutralização de emissões** (Net Zero), com diretrizes estabelecidas pela Science Based Targets Initiative (SBTi).
- O protocolo da FAO para **medição, monitoramento, relatório e verificação** de carbono orgânico do solo em paisagens agrícolas (FAO, 2020).

Cada uma dessas análises tem demandas específicas por dados, com diferentes modelos e algoritmos que obedecem a premissas relacionadas ao tempo (ex. dados longitudinais ou pontuais, e processamento estático ou dinâmico), às escalas geográficas (ex. talhão, fazenda, projeto, empresa ou país), além de considerações de escopo (ex. setorização das emissões, cadeias a montante e a jusante, e emissões indiretas). As comunicações nacionais de emissões e remoções de GEE são tratadas em outros capítulos deste livro. Portanto, serão exemplificados o papel dos dados e dos algoritmos de processamento na geração de informações sobre a dinâmica do carbono no solo, na agricultura.

Uma grande barreira para a contabilização e a remuneração de práticas de agricultura regenerativa para o sequestro de carbono orgânico no solo é a falta de sistemas de Medição, Relato e Verificação (MRV) adaptados às demandas do mercado de carbono. Esses sistemas são essenciais tanto para inventários nacionais de GEE quanto para mecanismos como o comércio de emissões. A redução de erros na quantificação dos estoques e das variações de carbono é crucial para atrair investimentos e conferir credibilidade suficiente às políticas públicas.

A quantificação das mudanças nos estoques de carbono no solo, sejam elas diacrônicas ou sincrônicas, pode ser realizada por meio de amostragens intercalares ao longo do tempo em uma mesma área. Porém, essa quantificação por meio de amostragens sucessivas é por vezes custosa e imprecisa, a depender da forma como é conduzida e do contexto em que se aplica. Modelos da dinâmica do carbono no solo são, portanto, ferramentas fundamentais para garantir a eficiência econômica, a precisão e a escalabilidade dos processos de MRV, também denominados Medição, Monitoramento, Relato e Verificação (MMRV) em iniciativas de remoção de carbono atmosférico em sistemas naturais e na agricultura. Esses modelos permitem prever, quantificar e validar o sequestro de carbono no solo e, em muitos casos, são reconhecidos por certificadoras internacionais, utilizados isoladamente ou em conjunto com determinações feitas a partir de amostragens de campo, bem como por organismos como a FAO e em inventários de emissões e remoções submetidos a The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Nesse contexto, esses modelos da dinâmica do carbono no solo assumem papel estratégico para países que apresentam grande potencial de mitigação das suas emissões a partir de soluções baseadas na natureza, incluindo iniciativas de agricultura de carbono (tradução livre do inglês *Carbon Farming*).

¹ Disponível em: <https://www.ipcc.ch>.

Até recentemente, os modelos da dinâmica do carbono no solo foram desenvolvidos em países de clima temperado, como ilustrado na Figura 3.1, na qual o eixo y representa os modelos, os países responsáveis por sua criação e suas derivações,

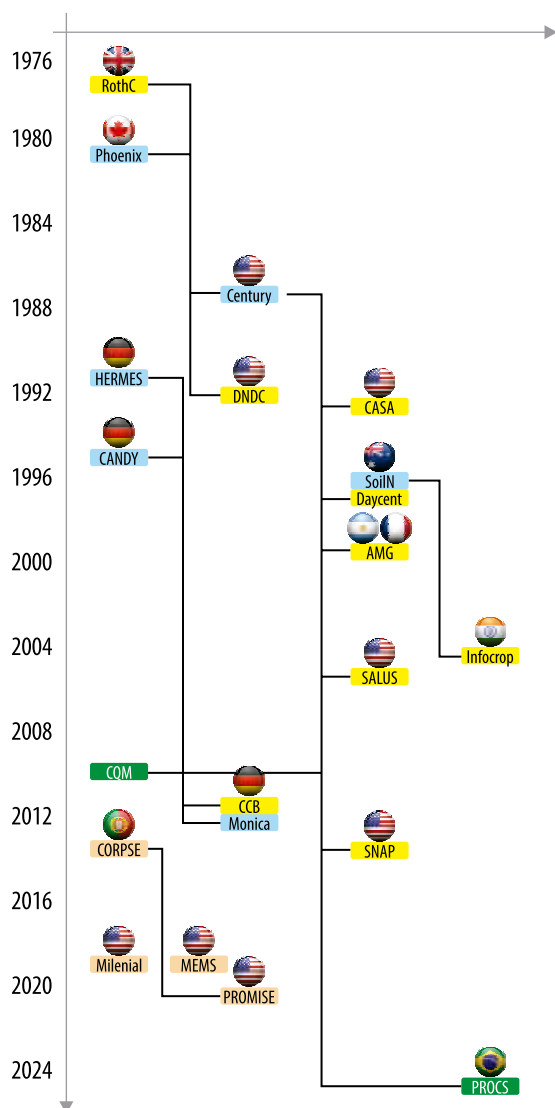


Figura 3.1. Histórico, nacionalidade e pedigree dos principais modelos da dinâmica de carbono no solo utilizados no mundo.

Nota: **Amarelo:** modelos multicompartimentais com compartimentos não mensuráveis que estão sendo usado para contabilidade em projetos de mercado de carbono (*Carbon Farming*); **Azul:** modelos multicompartimentais com compartimentos não mensuráveis que não estão sendo usados para contabilidade em projetos de mercado de carbono (*Carbon Farming*). **Salmão:** modelos multicompartimentais com estoques mensuráveis. **Verde:** modelos monocompartimentais com dinâmica contínua de qualidade.

enquanto o eixo x indica o ano de desenvolvimento. Recentemente, a Embrapa desenvolveu, em parceria público-privada com a Bayer, um novo modelo biogeoquímico, que permite avaliar e projetar as mudanças nos estoques de carbono orgânico no solo, considerando as especificidades das condições nacionais.

A relação entre os modelos da dinâmica de carbono no solo e as bases de dados possui diversas vertentes. A primeira se refere aos dados necessários para o seu desenvolvimento. Nessa etapa, os dados são fundamentais tanto para validar a estrutura do modelo, isto é, a forma funcional do conjunto de equações que o compõe, quanto para estabelecer o valor ou a distribuição de valores mais adequados para essas equações. Existe, portanto, um grande desafio para a harmonização dos dados com relação às unidades, à compatibilização de diferentes métodos de determinação e ao tratamento de tempo e espaço (inclusive com relação à profundidade das camadas), entre outros atributos. É imprescindível, portanto, a existência de bases de dados organizadas, com procedimentos robustos e transparentes para a harmonização e o controle de qualidade. A segunda vertente é relacionada aos dados necessários para a avaliação do modelo. Um modelo deve então ser avaliado com dados independentes, isto é, com dados que não foram utilizados na calibração inicial do modelo. Também é comum a aplicação de procedimentos de validação cruzada, nos quais o conjunto original de dados é dividido em múltiplas partições (ou *folds*), permitindo treinar e avaliar o modelo repetidamente, com diferentes combinações dessas partições. Esse processo visa estimar o desempenho do modelo em dados que não foram usados durante o treinamento, aumentando sua confiabilidade.

Depois de desenvolvidos, os modelos necessitam de dados para seu uso. Os dados utilizados nesse contexto são denominados dados de entrada ou inputs. Esses dados podem ser provenientes de diferentes fontes, como sensoriamento remoto e proximal, amostragens diretas do solo com

determinação laboratorial, máquinas automatizadas como colheitadeiras de grãos e dados fornecidos diretamente pelo produtor ou pelo extensionista. Esses dados também são necessários para avaliar ou “validar” o modelo. Nesse sentido, a comparação entre os resultados do modelo e as medições permite a avaliação da adequação do modelo como ferramenta para representar o sistema por meio de diversas métricas de precisão e viés. Considerando que tanto os modelos quanto as medições possuem erros associados, a validação de um modelo apenas indica que dados gerados pelo modelo ou medidos no campo não possuem diferenças estatisticamente significativas.

Em modelos dinâmicos, há a possibilidade de se utilizar medições de campo em conjunto com as trajetórias estimadas pelo modelo, com o objetivo de aperfeiçoar as estimativas em comparação ao uso isolado do modelo ou das medições. Essa associação dinâmica entre modelo e dados também permite que o modelo “aprenda” com os dados, por meio da recalibração de seus parâmetros em tempo real, resultando em melhores projeções futuras. Esses procedimentos com uso conjunto de dados e modelos para aperfeiçoamento das estimativas do valor de uma variável e o ajuste de parâmetros em tempo real (aprendizado do modelo) são comumente denominados assimilação de dados ou fusão modelo-dados. Eles têm grande potencial para reduzir os custos de monitoramento e/ou reduzir as incertezas das estimativas. A fusão modelo-dados também possibilita a recalibração contínua do modelo em tempo real para fazendas ou talhões específicos, a partir da avaliação das diferenças entre as estimativas do modelo e os dados observados.

Os modelos da dinâmica de carbono podem ser incorporados em ferramentas de ACV e, de forma mais abrangente, em sistemas de MMRV, que fazem a gestão dos dados monitorados, a alimentação do modelo com os dados provenientes de diferentes fontes, a execução do modelo e a formatação dos resultados para relatório e verificação.

Eventualmente, quando há grande quantidade de dados disponíveis, torna-se possível realizar periodicamente uma recalibração genérica do modelo e integrar modelos e ferramentas de inteligência artificial. Essa fusão entre modelos, dados e inteligência artificial tem sido denominada de aprendizado por meio de dados (do inglês *data learning*).

Apenas com dados organizados e com procedimentos transparentes em sua gestão e processamento, incluindo todo o processo de desenvolvimento de modelos, é possível alcançar a credibilidade necessária para garantir a sustentabilidade de políticas públicas e incentivos no contexto do carbono.

O uso de dados associados a modelos de qualidade permitirá o desenvolvimento de políticas e de incentivos, como a criação de mecanismos de crédito de carbono que recompensem os agricultores por práticas que sequestram carbono ou reduzem emissões, bem como o desenvolvimento, por parte de instituições públicas, de políticas eficazes para a mitigação das mudanças climáticas no setor agrícola. Nesse sentido, essas instituições devem fornecer as ferramentas para monitorar o progresso na redução de emissões e no aumento do sequestro de carbono ao longo do tempo, provendo novos meios de medir e de estimar esses impactos de forma precisa. Também é importante entender o valor dessas informações para criar soluções eficientes, escaláveis e de impacto. Essas novas tecnologias passam por processos de certificação, o que lhes garante a credibilidade das alegações de redução de emissões ou sequestro de carbono.

Como exemplos de modelos e de métodos desenvolvidos pela Embrapa, que usam esses dados, destacam-se:

- Métodos para estimativa de estoque de carbono no solo, com uso de assimilação de dados.
- Modelos de pedotransferência para estimar a densidade do solo.

- Modelos para correção de estoques de carbono (SOC/NIR) para tomada de decisão.
- Modelos para estimar o valor da informação (Vol) considerando o contexto dos mercados de crédito de carbono.

Considerando que a obtenção e validação dos referidos dados é, na maior parte das vezes, feita por grupos diversos e em diferentes circunstâncias, um dos grandes desafios é organizar os dados em bases padronizadas, de modo a facilitar seu reuso e sua integração. A Embrapa vem empreendendo esforços nesse sentido. Nos anos 2010, foram lançadas as iniciativas *Fluxus*, *Pecus* e *Saltus*, por meio das quais se constituíram redes de pesquisadores dedicadas à complexa tarefa de quantificar e compreender as emissões de GEE em sistemas de produção de grãos, pecuária e florestas, respectivamente. Os dados gerados por essas redes estão sendo usados para alimentar várias tecnologias abordadas neste livro.

Repositórios corporativos de dados próprios da Embrapa

A Embrapa, com seus 53 anos de existência, vem produzindo dados e desenvolvendo pesquisas relacionadas ao tema GEE e, em especial, ao carbono. Esses dados passam por processos de curadoria para serem disponibilizados para reuso em novas pesquisas, no desenvolvimento de novas metodologias e na geração de novos conhecimentos e informações. Um repositório de dados é uma aplicação, um local, no qual os dados são armazenados, organizados e gerenciados para acesso e uso eficientes. É por meio deles que os dados produzidos na Embrapa ficam disponíveis para acesso e uso.

Solução 1 – Repositório de dados de pesquisa da Embrapa (Redape)

O Repositório de Dados de Pesquisa da Embrapa (Redape)² é um dos repositórios corporativos da Empresa destinado à gestão adequada dos dados ao longo de todo o seu ciclo de vida, viabilizando a adoção de melhores práticas nas etapas de descrição, preservação, publicação e recuperação dos dados coletados no âmbito das atividades de pesquisa da Empresa. Organizado em nove grandes domínios de informação, o Redape contribui com a integração de dados, informação e conhecimento, facilitando o reuso de dados por diferentes interessados, promovendo a transparência do processo científico e sua reprodutibilidade. Para que o dado seja disponibilizado para acesso, ele passa por um processo de curadoria, no qual são avaliadas a descrição de seus metadados e a qualidade dos dados em si.

O Redape armazena vários tipos de dados provenientes de pesquisa. Entre eles, destacam-se os dados de experimentos relacionados ao estoque de carbono, os quais estão acessíveis aos pesquisadores da Empresa. A Figura 3.2 ilustra, de forma gráfica, a localização dos experimentos de longa duração que têm dados depositados no Redape, tanto aqueles voltados ao carbono quanto os relacionados a outros parâmetros e indicadores necessários para as estimativas de carbono. Observa-se que, na região do Distrito Federal, onde localiza-se a Unidade de pesquisa Embrapa Cerrados, estão catalogadas e disponíveis 20 coleções de dados de experimentos de longa duração.

A Figura 3.3 ilustra a descrição, por meio de metadados, de uma das coleções disponíveis no Redape, que contempla dados de pastagens e de carbono na pecuária. No exemplo, temos dados coletados desde 1996. A cada nova campanha de dados obtidos dessa área experimental, um novo conjunto de dados é depositado, formando uma coleção de dados daquele ambiente de pesquisa.

² Disponível em: <https://www.redape.dados.embrapa.br>.

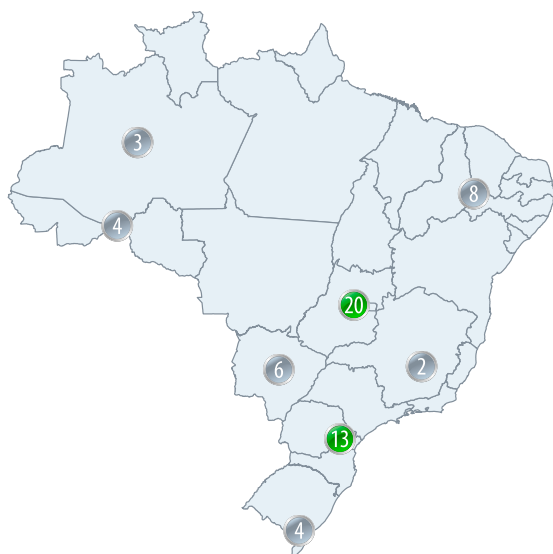


Figura 3.2. Visualização gráfica, em mapa, da localização de experimentos de longa duração que geram informações sobre carbono e outros indicadores depositados no Redape. Os números representam a quantidade de experimentos na região.

Os dados e metadados do repositório podem ser consultados por qualquer pessoa e são também facilmente encontrados por mecanismos de inteligência artificial. A combinação desses dados e a perspectiva de crescimento do acervo de dados relevantes à temática da mudança climática auxiliam na quantificação do balanço do carbono e na melhoria da acurácia dos inventários nacionais de emissões e remoções de GEE.

Ainda com relação ao ciclo do carbono, outro exemplo é a integração de dados Light Detection and Ranging (LiDAR) e de inventários florestais de campo por meio de um WebGIS, no qual é possível pesquisar dados disponíveis e seus respectivos metadados, filtrando-os por data, local e tipo de dados (Figura 3.4). Florestas tropicais estocam grandes quantidades de carbono, e um dos parâmetros mais importantes para estudar o balanço de carbono em florestas é a biomassa acima do solo.

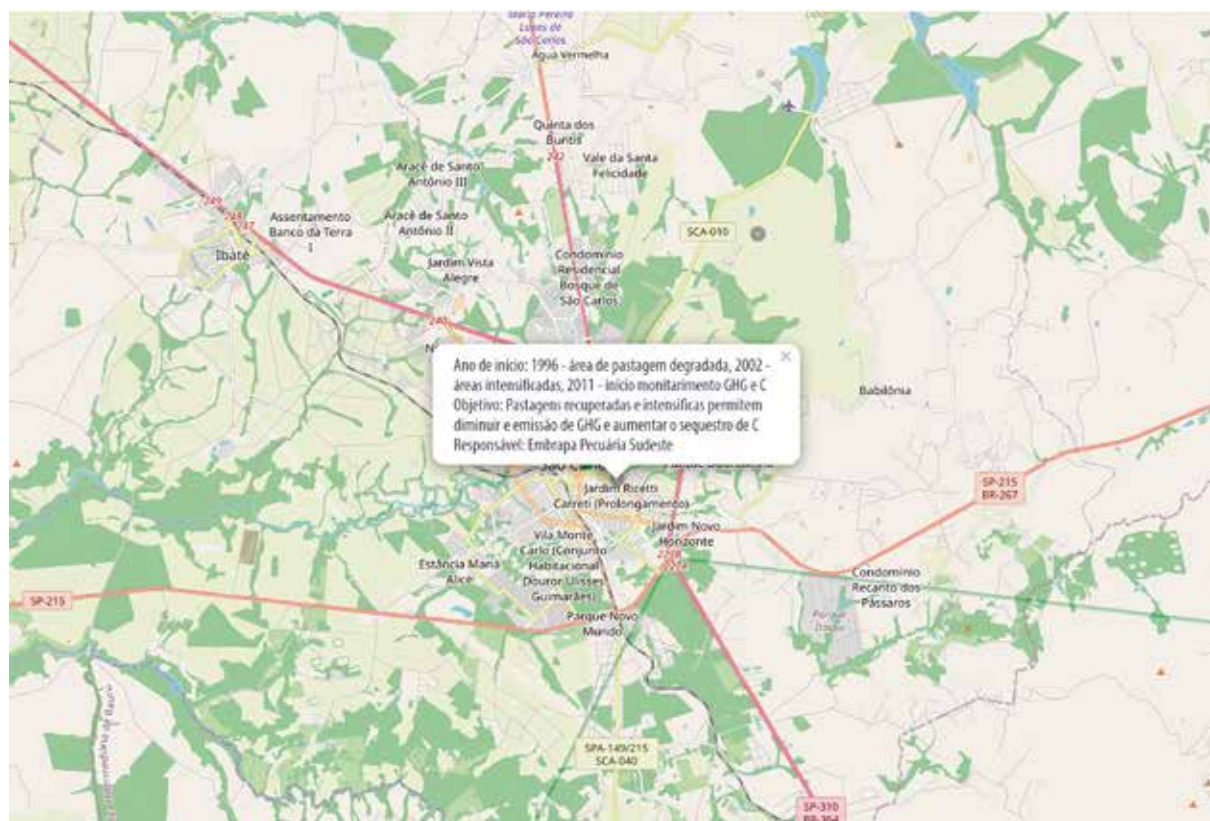


Figura 3.3. Metadados de uma das coleções de dados de carbono disponíveis no Redape, referentes a pastagens utilizadas em pesquisas sobre carbono na pecuária.

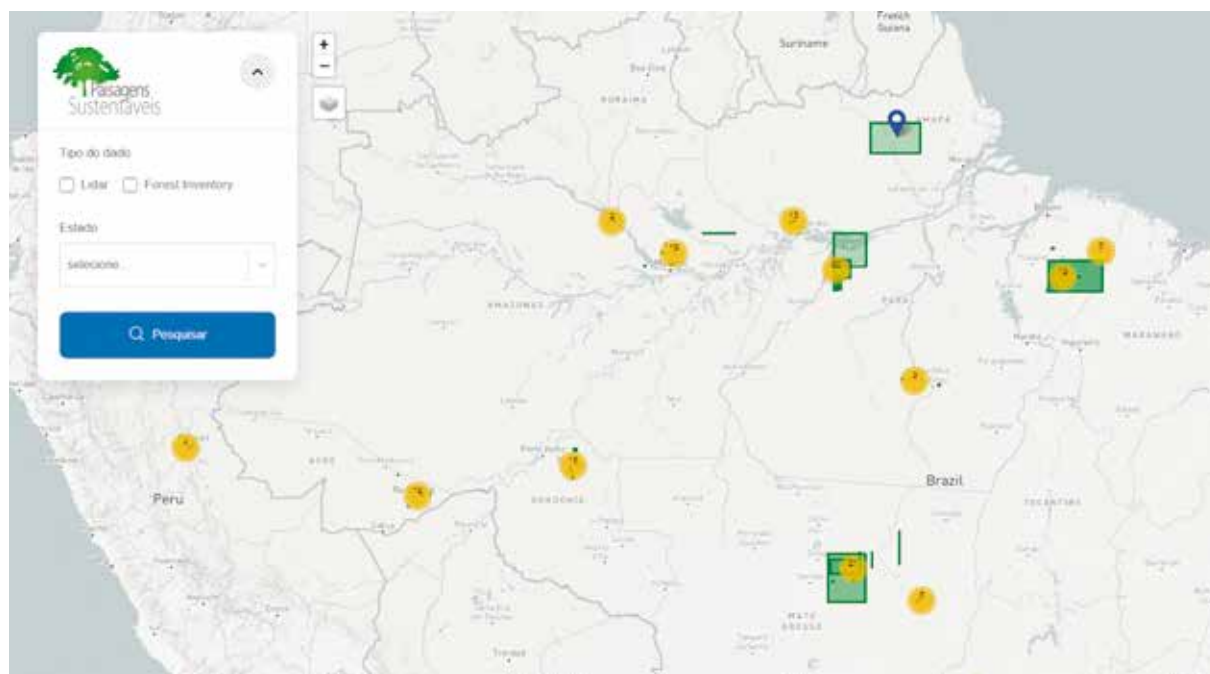


Figura 3.4. Mapa com visualização de dados de inventários florestais e de levantamentos LiDAR publicados no Redape.

Fonte: Embrapa (2025d).

A combinação de dados de inventários florestais de campo, de alto custo de obtenção, com métricas de LiDAR, mostrou-se eficaz para prover estimativas de biomassa acima do solo em diferentes formações florestais (Longo et al., 2016). Exemplos de integração de dados como esses contribuem para uma melhor compreensão do papel das florestas tanto na sustentabilidade global, em escalas relevantes para a tomada de decisão, quanto nas emissões de carbono relacionadas às mudanças no uso da terra, impactando também decisões sobre a produção de alimentos.

Solução 2 – Infraestrutura de dados espaciais da Embrapa

O Geoinfo é outro repositório corporativo da Embrapa, para acesso público a mapas e a outras informações espaciais produzidas pela Empresa. Ele conta com cerca de 1.500 mapas em formato vetorial (*shapefiles*), 500 mapas em formato matricial (*rasters*), e outros 900 documentos, entre arquivos

geoespaciais compactados para download, relatórios e layouts para impressão.

Muitos desses recursos estão organizados em conjuntos de mapas para visualização direta na plataforma, como, por exemplo, os conjuntos de mapas de estoque de carbono orgânico do solo do Brasil, nas resoluções espaciais (tamanhos de pixel) de 1 km (Figura 3.5) e 90 m (Figura 3.6).

Em escala estadual, destaca-se o mapa de estoque de carbono do solo do Rio de Janeiro, RJ (Figura 3.7), lançado em 2025.

Destacam-se, ainda, cerca de 600 zoneamentos agroecológicos para diversas culturas agrícolas em diferentes regiões, estados e municípios, disponíveis para consulta e download no Geoinfo, além de zoneamentos econômico-ecológicos e estudos locais para construção de barragens subterrâneas, entre outros. Os zoneamentos são estudos que analisam características ambientais de uma região e identificam os locais mais adequados para o plantio, promovendo o uso correto e sustentável da ter-



Figura 3.5. Mapa de estoque de carbono orgânico do solo do Brasil nas resoluções espaciais de 1 km.

Fonte: Embrapa (2025a).



Figura 3.6. Mapa de estoque de carbono orgânico do solo do Brasil nas resoluções espaciais de 90 m.

Fonte: Embrapa (2025b).

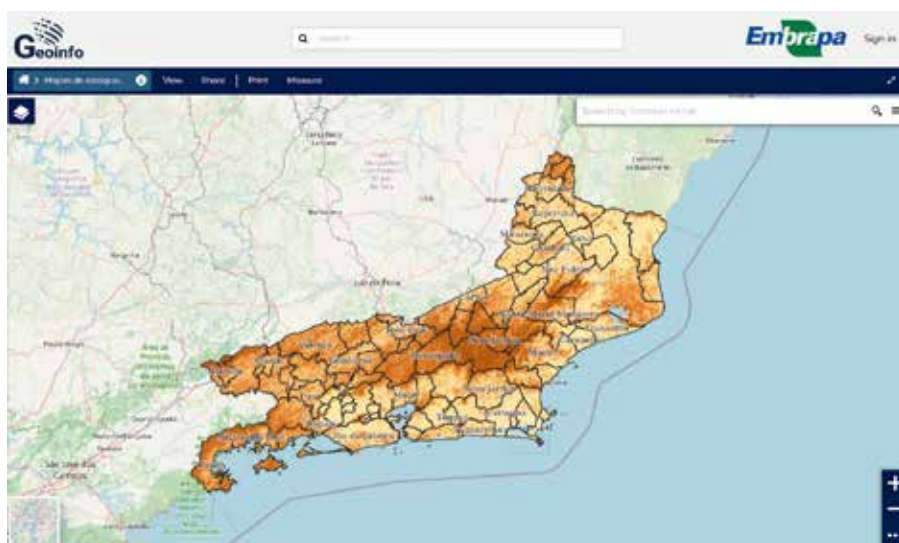


Figura 3.7. Mapa de estoque de carbono do solo da cidade do Rio de Janeiro, RJ.

Fonte: Embrapa (2025c).

ra, a segurança alimentar e a prevenção de prejuízos para a sociedade e ao meio ambiente.

Todos os mapas disponíveis são acompanhados por metadados que contêm informação detalhada sobre autoria, licença de uso, metodologia empregada, referência espacial do mapa e links para mapas e documentos associados. Também é disponibilizado o contato do responsável pelo mapa, de forma que o usuário tem acesso direto a quem produziu os dados, para eventuais dúvidas e solicitações.

O Geoinfo está vinculado à Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais, 2025), o que permite que os mapas e outros conteúdos possam ser consultados também por meio dessa plataforma. Usuários mais experientes podem acessar os mapas por meio de geoserviços para visualização (WMS) ou manipulação de dados vetoriais (WFS) ou matriciais (WCS), e até mesmo acessar os metadados por meio de uma interface de programação de aplicações (API).

Na página eletrônica do Geoinfo³, a Infraestrutura de Dados Espaciais da Embrapa pode ser acessada e estão disponíveis ferramentas de busca, visualização e download de conteúdo, além de diversos filtros que permitem realizar buscas mais refinadas por tipo de dado, palavra-chave, autor, data, localização, etc., como ilustrado na Figura 3.8. Também é possível acessar o acervo de mapas produzidos pela Embrapa por meio do QR code apresentado na Figura 3.9.

Solução 3 – Repositórios institucionais de acesso aberto da Embrapa

Os repositórios institucionais de acesso aberto da Embrapa (RIAAs), compostos pelo Repositório Acesso Livre à Informação Científica da Embrapa⁴

³ Disponível em <https://geoinfo.dados.embrapa.br>.

⁴ Disponível em www.alice.cnptia.embrapa.br.

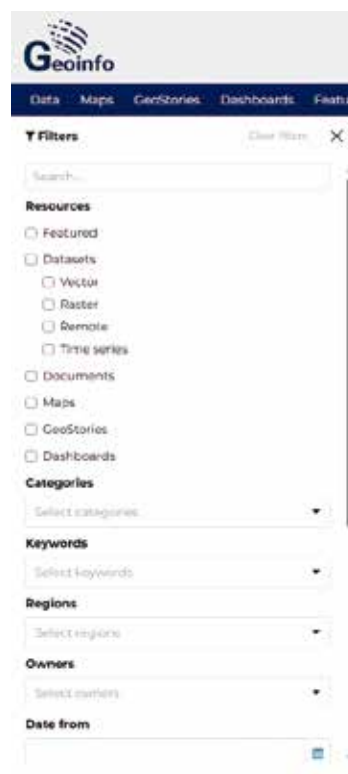


Figura 3.8. Alguns filtros disponíveis no Geoinfo.

Fonte: Embrapa (2025e).



Figura 3.9. QR code para acesso ao Geoinfo.

Fonte: Embrapa (2025e).

(Alice) e pelo Repositório de Informação Tecnológica da Embrapa⁵ (Infoteca-e), têm o objetivo de disponibilizar as publicações técnico-científicas da Embrapa, com recursos computacionais para busca, indexação, interoperabilidade e integração com outros sistemas. O repositório Alice integra informações científicas produzidas pela Embrapa e publicadas em capítulos de livros, artigos em

⁵ Disponível em www.infoteca.cnptia.embrapa.br.

periódicos indexados, anais de congressos, teses e dissertações, notas técnicas, entre outros tipos de publicações. Já o repositório Infoteca-e disponibiliza informações sobre tecnologias desenvolvidas pela Embrapa na forma de cartilhas, livros para transferência de tecnologia, programas de rádio e de televisão. Esses últimos veículos utilizam uma linguagem adaptada de modo que produtores rurais, extensionistas, técnicos agrícolas, estudantes e professores de escolas rurais, cooperativas e outros segmentos da produção agrícola possam assimilá-los com maior facilidade e, assim, apropriarem-se de tecnologias geradas pela Embrapa.

Ambos os repositórios permitem a busca por termos em campos específicos e em textos comple-

tos das publicações, facilitando a pesquisa e a recuperação dos documentos. Também oferecem recursos para obtenção de conteúdos por protocolos abertos e *Application Programming Interface* (APIs), recurso largamente utilizado para promover a interoperabilidade entre sistemas e plataformas.

Dentre as mais de 185 mil publicações disponíveis, há uma ampla variedade de conteúdos relacionados diretamente ao ciclo do carbono, compondo um corpus de alta qualidade, precisão e riqueza de informações. Isso permite a produção de respostas baseadas em fatos provenientes de pesquisas consolidadas. A Figura 3.10 ilustra parte de um resultado de busca por publicações com o termo “Carbon” no título, no repositório Alice,

Resultado 1-10 de 497		
Ano de publicação	Título	Autor(es)
1988	Carbonic anhydrase polymorphisms in Nellore, Canchim and in dairy crossbred cattle in Brazil.	PANPUCCI, L.
1991	Carbon isotope discrimination as a means to evaluating drought resistance in barley, rice and cowpeas.	AUSTIN, R. B.; CRAUFURD, P. Q.; HALL, M. A.; ACEVEDO, E.; PINHEIRO, B. da S.; NGUCI, E. C. K.
1993	Carbon isotope discrimination and drought tolerance of upland rice.	PINHEIRO, B. da S.; AUSTIN, R. B.
1994	Temperature and glucose effects on soil organic carbon: CO ₂ evolved and decomposition rate.	VASCONCELLOS, C. A.
1996	Dynamics of soil carbon, nitrogen and microbial biomass in tropical agroecosystems.	VASCONCELLOS, C. A.; FRANCA, C. G. M.; MARRIEL, I. E.
1997	Carbon and nitrogen assimilating enzymes of maize hybrids representing seven eras of breeding.	PURCINO, A. A. C.; ARELLANO, C.; ATHWAL, G. S.; HUBER, S. C.
1998	Temperature effect on carbon biomass in soils from tropical and temperate regions.	VASCONCELLOS, C. A.
1998	Impact of Amazonian termite populations on the carbon cycle of natural and managed forest systems: respiration rates in different termite food guilds.	HANNE, C.; MARTIUS, C.; FORSTER, B.; GARCIA, M.
1998	Strategies to restore sustainability of shifting cultivation focusing on carbon and nutrient balances.	VIELHAUER, K.; SÁ, T. D. de A.; DENICH, M.; VLEK, P. L. G.
1999	Correlation of sorghum and soybean shoot dry matter weight with carbon and nitrogen assimilation enzymes.	BRESSAN, W.; SIQUEIRA, J. O.; VASCONCELLOS, C. A.; PURCINO, A. A. C.
Resultado 1-10 de 497		

Figura 3.10. Parte do resultado de uma busca por publicações da Embrapa, usando a expressão de busca “Carbon”.

Fonte: Embrapa (2025g).



Figura 3.11. Uma das fases do processamento pelo Gemini, com referências aos repositórios Alice e Infoteca-e.

ilustrando a longevidade da pesquisa desenvolvida pela Empresa no tema.

Recentemente, o uso de publicações e de textos provenientes de repositórios e de plataformas confiáveis ganhou importância para os modelos de inteligência artificial (IA) generativa, como, por exemplo, o ChatGPT, o Gemini e o DeepSeek. Esses modelos, quando utilizados, e dependendo das opções acionadas, como a geração aumentada por recuperação (Retrieval-Augmented Generation – RAG), fazem referência às publicações consultadas, com seu endereço web.

A Figura 3.11 ilustra uma fase do processamento por parte do Gemini, no modo DeepResearch, na busca por informações para a pergunta “Quais os principais trabalhos da Embrapa sobre balanço de carbono em sistemas agrícolas?”.

Dessa forma, os repositórios Alice e Infoteca-e viabilizam o uso das publicações da Embrapa no treinamento dos modelos de IA generativa, para a produção de respostas informativas, precisas e contextualmente relevantes. Esse é um modelo muito importante de se promover a geração de novos conhecimentos a partir de publicações

confiáveis, revisadas por pares e mantidas por instituições reconhecidas, que podem ser utilizadas para as mais diversas aplicações, incluindo as relacionadas ao tema do carbono da agricultura.

A existência de dados de alta temporalidade e de qualidade é um dos diferenciais da Embrapa para o desenvolvimento de pesquisa em carbono, tornando a Empresa essencial para parcerias com diferentes instituições nacionais e internacionais que buscam desenvolver ações nessa área.

Ações desenvolvidas pela Embrapa que fornecem dados para apoiar políticas públicas

Ao fornecer ferramentas para monitoramento preciso e contínuo, a Embrapa contribui diretamente com o ordenamento territorial e a gestão de políticas públicas, bem como para o planejamento estratégico da agropecuária, promovendo um setor mais eficiente, resiliente e sustentável.

Solução 4 – Projeto TerraClass

O projeto TerraClass (Almeida et al., 2016) é uma parceria entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) e a Embrapa, com o objetivo de produzir, sistematicamente, mapeamentos do uso e da cobertura da terra nos biomas brasileiros. Os dados gerados por esse levantamento sistemático viabilizam o monitoramento dos impactos das ações e das políticas públicas do governo federal, voltadas tanto ao desenvolvimento e à intensificação da atividade agrícola quanto à preservação dos sistemas naturais e ao entendimento dos processos de ocupação da terra. Ele gera dados oficiais sobre a dinâmica do uso e da cobertura da terra nos biomas Amazônia e Cerrado, ampliando fundamentalmente a capacidade de gestão territorial e desempenhando um papel de fundamental relevância para a compreensão e o monitoramento do ciclo do carbono na agricultura brasileira.

Sua atuação impacta o ciclo do carbono por meio do mapeamento e da qualificação do uso e da cobertura da terra em áreas desflorestadas, identificando se a área convertida se tornou pastagem, agricultura (temporária, permanente ou semipereene), área urbana ou vegetação secundária, entre outras classes temáticas. Essa informação é crucial para entender as transições de uso e, assim, identificar as fontes de emissão de carbono decorrentes da mudança do uso da terra. A conversão de florestas nativas para agricultura ou pastagem geralmente leva à liberação significativa do carbono armazenado na biomassa vegetal e no solo.

O projeto também atua no acompanhamento da expansão agrícola sobre diferentes tipos de cobertura vegetal. Compreender se essa expansão ocorre em áreas de pastagem já estabelecidas ou sobre vegetação nativa é vital para avaliar o impacto líquido no ciclo do carbono. A expansão sobre áreas nativas potenciais para a ação da fotossíntese representa uma perda de sumidouro de carbono, passando a ser uma fonte de emissão, enquanto a intensificação da produção em áreas já antropizadas pode ter menor impacto ambiental.

O projeto identifica processos de intensificação agrícola, diferenciando áreas com cultivo de safra única daquelas com o sistema de safra e safrinha. Essa distinção é importante porque práticas agrícolas diferentes podem ter impactos distintos no sequestro e na emissão de carbono pelo solo. Áreas com maior número de safras por ano tendem a ter maior PPL, maior capacidade de fixação de carbono no solo, menor probabilidade de erosão, melhoria da atividade biológica e dos teores de matéria orgânica, entre outras vantagens que proporcionam aumento do estoque de carbono no solo.

O TerraClass também monitora áreas de vegetação secundária em diferentes estágios de regeneração, que têm um papel importante no sequestro de carbono atmosférico. O acompanhamento permite quantificar o potencial de mitigação de GEE e o controle das mudanças climáticas por meio da recuperação de áreas degradadas.

Os diferentes dados fornecidos pelo projeto subsidiam políticas públicas, como:

- Plano ABC+ (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono), ao contribuir para a quantificação do impacto das diferentes linhas do plano no sequestro de carbono e na redução de emissões.
- Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+), ao fornecer dados com precisão, contribuindo para a credibilidade dessas iniciativas.
- Planejamento Territorial e Gestão Ambiental, ao identificar áreas prioritárias para conservação, expansão agrícola sustentável e restauração ecológica, considerando os impactos no ciclo do carbono.

Os dados do projeto são acessíveis por meio do Portal WebGIS, em que é possível acessá-los em diferentes formatos. A Figura 3.12 ilustra o portal, enquanto a Figura 3.13 traz uma funcionalidade que permite a visualização da evolução do uso da terra ao longo dos anos.



Figura 3.12. Portal WebGIS TerraClass.

Fonte: TerraClass (2025).



Figura 3.13. Visualização da evolução do uso da terra ao longo dos anos para a área do bioma Amazônia.

Fonte: TerraClass (2025).

Apesar de, atualmente, estar restrito aos biomas Amazônia e Cerrado, o TerraClass produz dados do uso e da cobertura da terra em grande parte do País, incluindo importantes polos agrícolas. Ao fornecer dados confiáveis e atualizados a cada dois anos nos biomas com maior dinâmica terri-

torial, com metodologias inovadoras, o TerraClass se torna uma ferramenta relevante para o entendimento da dinâmica territorial dessas regiões, visando à construção de uma agricultura mais sustentável e com menor impacto no ciclo global do carbono.

Solução 5 – Soluções Tecnológicas GeoABC+

O Brasil ocupa uma posição de destaque na produção e exportação mundial de alimentos, sendo responsável por uma parcela significativa do abastecimento global de grãos, carnes, fibras e produtos agroindustriais. Essa relevância como grande produtor coloca o País diante de desafios complexos, como atender à crescente demanda global por produtos agropecuários de modo sustentável, com transparência e rastreabilidade, em um mercado cada vez mais exigente e competitivo, e inserido em um contexto de mudanças climáticas e suas implicações para a produção e a segurança alimentar (FAO, 2021).

Nesse cenário, o desenvolvimento de uma agricultura de baixa emissão de carbono torna-se uma estratégia essencial para a mitigação dos GEE gerados pelo setor. A recuperação de pastagens degradadas e a adoção de sistemas integrados de produção agropecuária, como os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e os sistemas agroflorestais (SAFs), emergem como prioridades, visto que se tratam de sistemas regenerativos, de baixo carbono e com maior resiliência frente aos impactos climáticos.

A intensificação do uso da terra na agropecuária nacional constitui um processo cada vez mais presente nas principais regiões agrícolas do País, especialmente naquelas vinculadas às cadeias de produção de grãos, onde tem sido observada uma vertiginosa expansão dos sistemas de duplo cultivo (safrá/safriinha) e da adoção de sistemas integrados de produção agropecuária (ILPF), processo esse que vem sendo reconhecido como intensificação sustentável do uso da terra no Brasil (Silveira et al., 2022).

Nessa perspectiva, diversos agentes do agronegócio nacional, tanto órgãos do poder público quanto do setor privado, têm fomentado a adoção dos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta como uma estratégia tecnicamente adequada para conferir maior sustentabilidade socioeconômica e

agroambiental aos sistemas produtivos. Alinhadas a essa perspectiva, destacam-se políticas públicas setoriais, como o Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (Plano ABC+) e o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis (PNCPS) (Brasil, 2021, 2023).

Nesse contexto, torna-se imperativo investir em ciência, tecnologia e inovação (CT&I) como eixo estruturante para o fortalecimento de políticas orientadas a uma agricultura de baixa emissão de carbono, não apenas como resposta às pressões externas, mas como uma estratégia nacional para assegurar a sustentabilidade e a resiliência dos sistemas de produção. Para, assim, manter a competitividade e a liderança do País na transição para modelos mais sustentáveis de produção agropecuária.

Em resposta a esses desafios, a Embrapa tem liderado esforços em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) para o desenvolvimento de tecnologias capazes de fornecer dados de real valor gerencial e estratégico sobre a realidade da agricultura nacional e a dinâmica do uso da terra no Brasil. Desta forma, para atender às demandas dos atores do agro nacional (empresas privadas, entidades setoriais e órgãos governamentais, em seus processos de planejamento e gestão) foram desenvolvidas as “Soluções Tecnológicas GeoABC+”, uma parceria entre Embrapa Solos e a Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) (Simões, 2021).

As Soluções Tecnológicas GeoABC+ constituem um conjunto de tecnologias digitais, integrando inteligência artificial ao sensoriamento remoto, que permitem o estabelecimento de um sistema de monitoramento capaz de mapear, anualmente, os sistemas de produção agropecuária de baixa emissão de carbono, como sistemas integrados lavoura-pecuária-floresta, gerando dados e informações essenciais, apresentados na forma de mapas, métricas espaciais e indicadores de expansão dos sistemas ILPF.

As soluções GeoABC+ (Kuchler et al., 2022) baseiam-se na convergência de tecnologias aplicadas nas seguintes etapas metodológicas:

- **Base de dados de aprendizagem e validação:** coleta e organização de dados de campo, referentes ao histórico dos sistemas de produção em parcelas georreferenciadas, para o treinamento e validação dos algoritmos de IA, com uso de técnicas de *machine-deep learning*.
- **Séries temporais de imagens de satélites:** obtenção e sistematização de dados satelitais — bandas espectrais e índices de vegetação (NDVI, EVI), provenientes de diferentes sensores (Sentinel2; Landsat; Planet) — que descrevem os ciclos fenológicos das diversas culturas em consórcio, sucessão ou rotação, que caracterizam os sistemas ILPF.
- **Cubo de dados:** elaboração de estruturas matriciais para armazenamento de dados geoespaciais extraídos das imagens de satélite, organizados em múltiplas dimensões, em que variáveis, bandas espectrais e índices de vegetação são referenciadas no espaço (latitude/longitude) e no tempo (anos-safra).
- **Big Earth Data:** aplicação de técnicas para análise de grandes volumes de dados geoespaciais.
- **Inteligência artificial:** aplicação de modelos de *machine* e *deep learning* (como Random Forest; SVM; CNNs, etc.) para a classificação dos sistemas de produção de baixo carbono (ILPF).
- **Processamento de alto desempenho:** utilização de plataformas de processamento paralelo nas nuvens, como o Google Earth Engine.
- **Indicadores:** extração de métricas e indicadores que descrevem a distribuição espacial e as taxas de expansão dos sistemas de produção, em qualquer unidade territorial de análise (estados, municípios, bacias).

A título de exemplo, as Figuras 3.14, 3.15 e 3.16 apresentam os resultados das soluções GeoABC+

na forma de mapas e de gráficos com indicadores de expansão dos diferentes modais da cadeia de produção da soja nos estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás, nos anos-safra 2010/2011 e 2020/2021.

Os sistemas integrados de produção agropecuária caracterizam-se por seu potencial de regeneração e de manutenção da capacidade produtiva do solo, conferindo maior sustentabilidade agroambiental e socioeconômica aos sistemas produtivos. Ademais, por serem mais resilientes a extremos climáticos, esses sistemas reduzem os riscos, conferindo maior capacidade adaptativa à agropecuária nacional.

Ao promoverem a adoção de práticas agrícolas de baixa emissão de carbono, como a ILPF, os agentes setoriais impulsionam a consolidação de uma agropecuária nacional mais sustentável.

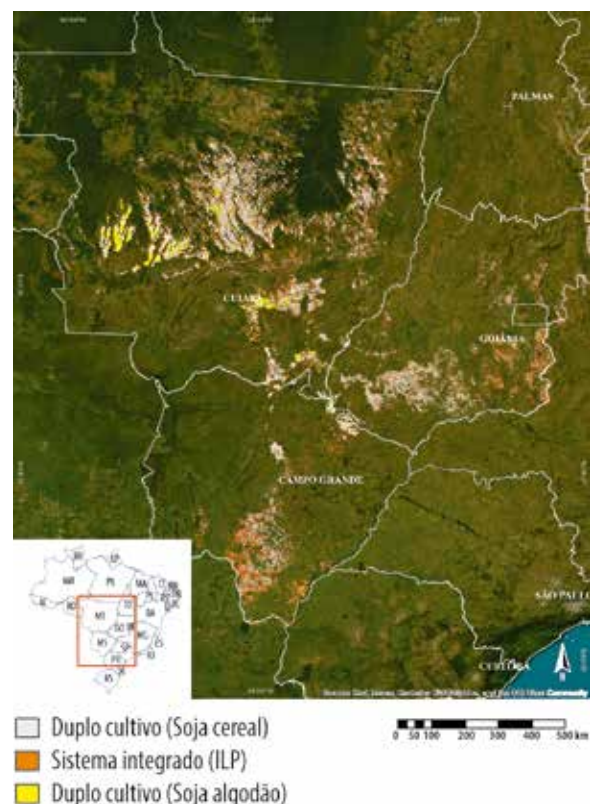


Figura 3.14. Distribuição espacial dos diferentes modais referentes à cadeia da soja para os estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás no ano-safra 2020/2021.

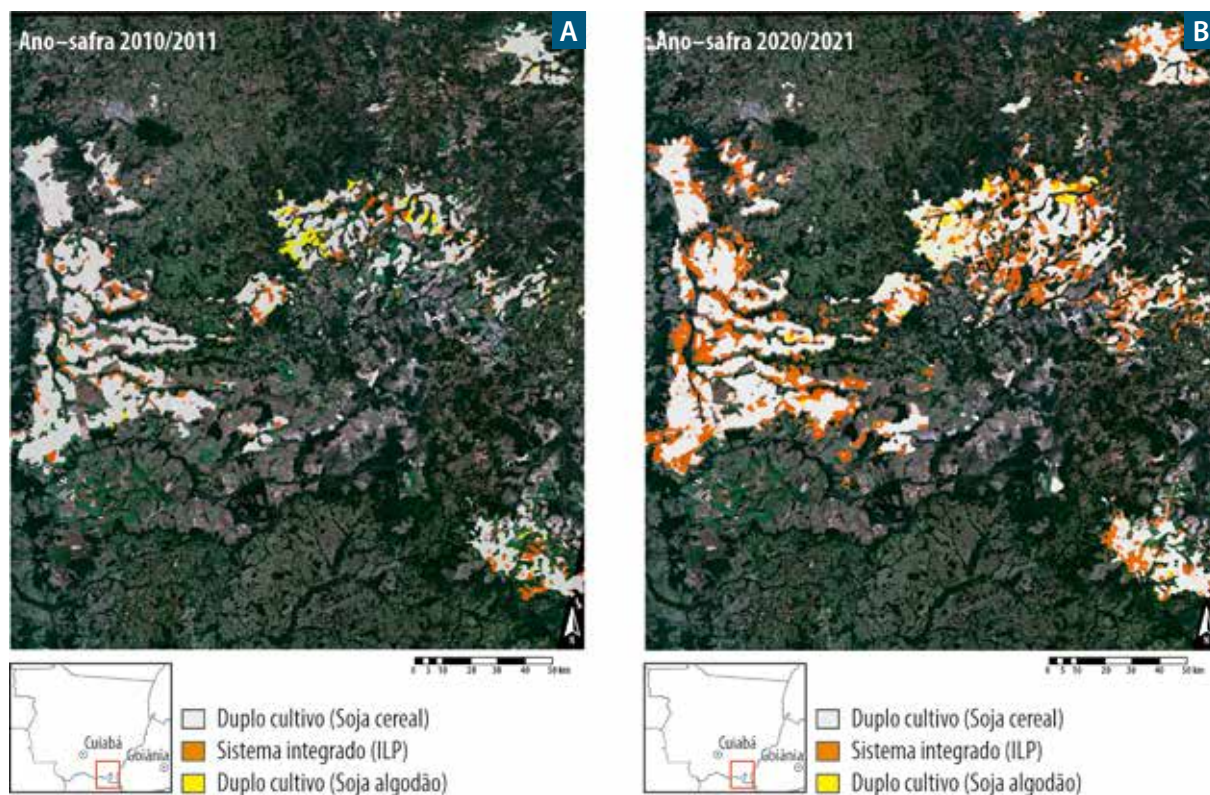


Figura 3.15. Detalhe (região sul do estado do Mato Grosso) da expansão dos sistemas modais da soja para os anos-safra: 2010/2011(A); 2020/2021(B).

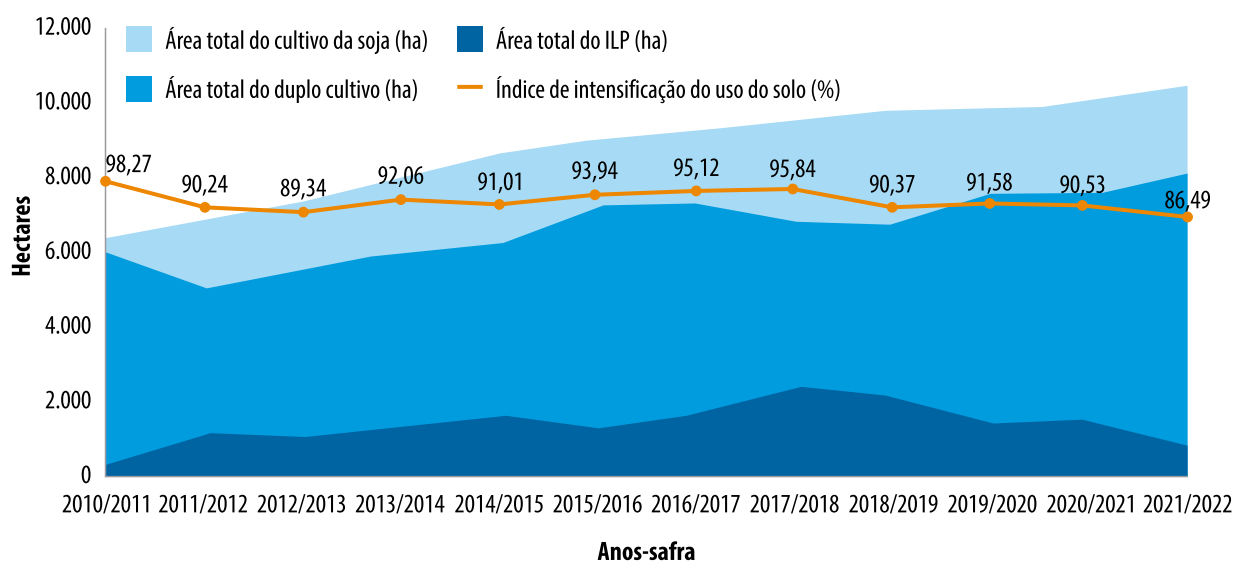


Figura 3.16. Expansão em área (ha) dos diferentes modais da cadeia da soja no estado do Mato Grosso, evidenciando a intensificação do uso do solo no período de 2010/2011 a 2021/2022.

Nesse cenário, as soluções GeoABC+ somam-se a esse esforço ao fornecer dados e informações estratégicas que permitem uma tomada de decisão mais assertiva e uma gestão territorial mais efetiva, minimizando as vulnerabilidades, aumentando a competitividade nacional e contribuindo para a sustentabilidade da agricultura nacional.

Outra questão relevante a ser destacada é a visibilidade que a agricultura nacional pode alcançar por meio da divulgação de dados confiáveis e indicadores de expansão dos sistemas de baixa emissão de carbono, permitindo que a sociedade compreenda, de forma mais clara, os avanços da agricultura brasileira em direção à sustentabilidade.

As soluções GeoABC+ estão alicerçadas em tecnologias em constante evolução, como inteligência artificial, sensoriamento remoto, big data e computação paralela de alto desempenho, o que exige a atualização contínua do sistema. Não há dúvidas de que o avanço dessas tecnologias proporcionará ganhos progressivos em precisão, eficiência e escalabilidade aos sistemas de monitoramento agrícola. Com a incorporação dessas inovações ao GeoABC+, será possível expandir ainda mais a abrangência das análises, incluindo a detecção de novos sistemas de produção agropecuária.

Por fim, ao fornecer informações estratégicas e qualificadas, as soluções GeoABC+ contribuem para o fortalecimento da competitividade do agro brasileiro, consolidando o País como líder em práticas agrícolas sustentáveis e de baixa emissão de carbono. Os mapas produzidos no âmbito do projeto estão disponíveis na Geoinfo.

Solução 6 – Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil (PronaSolos)

O Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil (PronaSolos)⁶, é uma iniciativa do Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) que visa ampliar o conhecimento sobre os

solos brasileiros em escala compatível com o uso sustentável e a preservação ambiental.

O Portal de Dados da Plataforma Tecnológica do PronaSolos é um ambiente WebGIS de acesso público a dados de mapas de solos e suas interpretações técnicas, além de temas correlatos, em apoio a melhor compreensão do território. É um ambiente de visualização que disponibiliza ferramentas para a manipulação e integração de informações espaciais, com vistas ao uso sustentável dos solos brasileiros. Atualmente, o portal conta com um amplo acervo de estudos sobre solos, diferentes interpretações técnicas, como teor e estoque de carbono nos solos, e temas ambientais correlatos, essenciais para a compreensão do território e seu uso sustentável. Também estão disponíveis dados sobre limites político-administrativos, bacias hidrográficas, biomas, geologia, redes viária e hidrográfica, bem como funcionalidades de consulta e operações espaciais sobre os dados cadastrados na base.

Como contribui para a competitividade nacional

Essa tecnologia disponibiliza um acervo de dados sobre os solos do Brasil e suas principais características, organizado por temática e por formato, vetorial ou matricial, de maneira a permitir a visualização integrada e a utilização dos diferentes operadores disponíveis, espaciais ou não, com foco em estudos de grande abrangência geográfica. Essa organização permite que a plataforma disponibilize à sociedade planos de informação que favorecem a análise integrada do território, incluindo informações de unidades de planejamento, como a divisão político-administrativa, potencializando a análise integrada da agricultura brasileira.

Como reduzir a exposição ao risco e aumentar a capacidade adaptativa

Os estudos de mapas interpretativos de solos, como o de Aptidão Agrícola das Terras, e os mapas de solos possibilitam a obtenção de informações sobre os teores de carbono, tornando-se fer-

⁶ Disponível em: <https://pronasolos.sgb.gov.br>.

ramentas estratégicas para avaliar e promover a sustentabilidade da agricultura brasileira. Eles permitem um entendimento mais preciso da qualidade do solo, de seu potencial de sequestro de carbono e da eficiência no uso da terra.

No Portal de Dados do PronaSolos⁷, a interface é amigável e oferece diferentes abas para seleção de estudos e diferentes ferramentas de consulta e integração de dados. As Figuras 3.17, 3.18 e 3.19 ilustram, respectivamente, a plataforma PronaSolos, o mapa de água disponível no solo no Brasil e o mapa de água disponível e teor de carbono no solo no Brasil.

Dessa forma, a tecnologia permite que qualquer cidadão, gestor público, professor ou produtor rural acesse essas informações, criando um ambiente de transparência e empoderamento social. Isso fortalece o uso dos mapas como instrumentos de controle social, por exemplo, no combate ao desmatamento ilegal e à ocupação de áreas vulneráveis.

Impacto na sustentabilidade da produção de alimentos no Brasil e no mundo

A tecnologia de disponibilização de mapas de solos e outros componentes ambientais (como relevo, clima, uso da terra e recursos hídricos) tem um papel transformador na sustentabilidade da produção de alimentos, tanto no Brasil quanto no mundo. Ela atua como base estratégica para decisões agrícolas mais inteligentes, eficientes e ambientalmente responsáveis.

Solução 7 – Renovamap – Sistema de análise geoespacial para avaliação de elegibilidade ao programa RenovaBio

A Política Nacional de Biocombustíveis, (RenovaBio – Lei nº 13.576/2017) (Brasil, 2017), visa promover a redução das emissões de GEE, por meio

do estímulo à produção e ao uso de biocombustíveis. Ela desempenha um papel crucial no ciclo do carbono na agricultura, principalmente pelo incentivo à produção de biocombustíveis com baixa intensidade de carbono, pela promoção de práticas agrícolas sustentáveis e pelos impactos nas mudanças no uso do solo. Seu objetivo principal é reduzir a intensidade de carbono da matriz de combustíveis de transporte, tornando os biocombustíveis mais competitivos em termos de emissões em comparação com os combustíveis fósseis. A agricultura, como fornecedora da matéria-prima, é fundamental para o alcance dessa redução. O RenovaBio reconhece e estimula a adoção de boas práticas agrícolas e ambientais, a conservação da vegetação nativa e o aproveitamento de resíduos, estimulando a adoção de sistemas de produção que minimizem o impacto ambiental e contribuam para o sequestro de carbono.

O uso da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para medir a intensidade de carbono dos biocombustíveis, desde a produção da matéria-prima agrícola até o uso do combustível (“do poço à roda”), incentiva os produtores agrícolas a adotarem práticas que reduzam as emissões de GEE em suas atividades. Já os produtores de biocombustíveis eficientes, com menor intensidade de carbono em comparação com seus equivalentes fósseis, geram créditos de descarbonização (Cbios) que são ativos financeiros negociáveis no mercado. Quanto menor a intensidade de carbono do biocombustível, maior a quantidade de Cbios gerada por unidade comercializada.

Para garantir a efetiva redução das emissões, é fundamental que a matéria-prima para a produção de biocombustíveis não seja obtida em áreas desmatadas ou de impacto ambiental significativo. Por isso, critérios específicos foram definidos para garantir o correto uso das terras pelos produtores. Nesse contexto, a Embrapa desenvolveu e mantém o Renovamap, uma plataforma de análise geoespacial voltada à verificação do cumprimento dos critérios de elegibilidade por parte dos

⁷ Disponível em: <https://geoportal.sgb.gov.br/pronasolos>.



Figura 3.17. Plataforma do Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil – PronaSolos.
Fonte: PronaSolos (2025).



Figura 3.18. Mapa de água disponível no solo, obtido do portal de dados.
Fonte: PronaSolos (2025).



Figura 3.19. Mapa de água disponível no solo e do teor de carbono, obtido do portal de dados.

Fonte: PronaSolos (2025).

produtores. A ferramenta oferece funcionalidades para que a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) possa realizar essas verificações. Para um produtor ingressar no Renovabio, ele deve comprovar que:

- Sua produção não é oriunda de área proveniente de desmatamento.
- A propriedade está regularizada no Cadastro Ambiental Rural (CAR).
- Está em conformidade com os zoneamentos agroecológicos (ZAE) vigentes.

O sistema usa informações do CAR, imagens de satélite, dados de programas de monitoramento ambiental e de mapeamentos de áreas de produção consolidadas, provenientes dos projetos TerraClass, Prodes e MapBiomias. A partir de análises geoespaciais baseadas em imagens Sentinel, de 2018 a 2024, e da geração de documentos comprobatórios, busca-se verificar os critérios de elegibilidade dos produtores de matéria-prima, redu-

zindo os custos e aumentando a transparência do processo de certificação, aplicável a todos os atores envolvidos na cadeia.

O Renovamap é um sistema que apoia a política Renovabio, facilitando a verificação das áreas e apoiando o seu monitoramento. Baseado em dados públicos, consistentes e confiáveis, o sistema fornece relatórios individualizados, com cruzamento de mapeamentos e imagens de satélite em cada imóvel, fornecendo indicativos da elegibilidade, que precisam ser confirmados. A Figura 3.20 ilustra os relatórios gerados pelo sistema na avaliação da elegibilidade de um dado produtor. No exemplo, após as devidas operações, o sistema emitiu parecer favorável, considerando que a área de produção não provém de área de desmatamento, está com seu cadastro no CAR ativo e está apta à produção da palma. Além disso, o sistema exibe uma projeção da área avaliada sobre imagens provenientes de dados públicos, para facilitar a análise visual da informação.

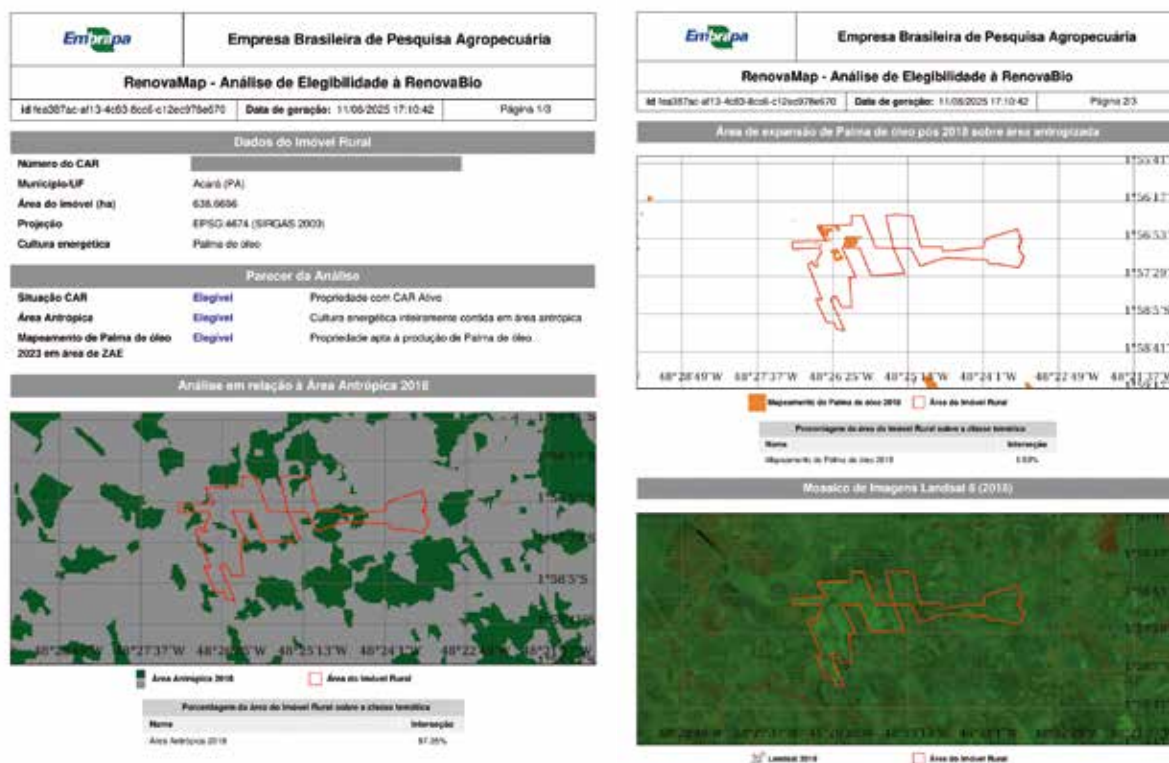


Figura 3.20. Relatório gerado pelo sistema RenovaMap.
Fonte: Embrapa (2025f).

Cabe ressaltar que, embora o RenovaBio não tenha como foco primário o sequestro de carbono no solo, suas diretrizes e mecanismos de mercado incentivam indiretamente práticas agrícolas que podem levar a esse benefício adicional, além de promover a produção de biocombustíveis com menor impacto climático.

Exemplos de ações para mitigação dos gases de efeito estufa

Solução 8 – Pegada de carbono do leite

A gestão da informação sobre a pegada de carbono vai além do simples gerenciamento de dados de pesquisa. Para garantir a integridade, a quali-

dade e a confiabilidade dos resultados, a obtenção da informação e a metodologia de cálculo são fundamentais.

A coleta de dados é o ponto de partida para a quantificação da pegada de carbono do leite. No Brasil, a extensa área territorial, a existência de seis biomas e a diversidade cultural resultaram na heterogeneidade de sistemas de produção presentes em praticamente todos os municípios do País, o que torna a coleta e a padronização dos dados mais complexas. Para que os resultados sejam válidos e confiáveis, é imprescindível que os dados sejam obtidos de maneira sistemática e rigorosa, a fim de evitar erros que possam comprometer os resultados e sua análise posterior. A Embrapa Gado de Leite vem empenhando esforços para garantir a coleta de dados padronizada e qualificada, visando reduzir incertezas dos resultados e assegurar a indicação de práticas e tecnologias mais eficientes, pautadas em pesqui-

sas científicas. A avaliação dos dados de cerca de 2 mil fazendas de leite, localizadas em diferentes regiões e biomas do Brasil, possibilitou a elaboração de um diagnóstico mais abrangente e acurado no que tange a à pegada de carbono do leite brasileiro (Paula et al., 2025).

A Embrapa Gado de Leite tem utilizado metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida preconizada pela ISO 14067 (International Standard Organization, 2018), reconhecida e adotada globalmente para quantificar a pegada de carbono do leite. Essa metodologia assegura credibilidade e comparabilidade dos resultados relacionados à pegada de carbono do leite no mundo. A pegada de carbono do leite fundamentada em pesquisas não apenas fortalece a validade dos resultados, como também contribui para o avanço do conhecimento científico, permitindo que novos estudos se baseiem em informações precisas e bem estruturadas, capazes de nortear políticas públicas e programas para redução das emissões de GEE na produção de leite.

A construção do banco de dados de pegada de carbono do leite brasileiro demonstra o compromisso com a sustentabilidade e com os milhões de produtores que integram a cadeia leiteira nacional. Ao reunir uma base científica sólida, o banco permite quantificar o impacto das práticas sustentáveis na redução das emissões, evidenciando o potencial da produção leiteira de baixo carbono. Essa iniciativa não só contribui para a mitigação das emissões de GEE, como também fortalece o desenvolvimento do setor e a segurança alimentar do País.

Esse banco de dados representa um marco para a pecuária leiteira brasileira, com perspectivas promissoras para seu avanço e consolidação. Por abranger informações detalhadas sobre as características dos diferentes sistemas de produção (intensivo, extensivo, confinado e semiconfinado) em diversas regiões do Brasil, o banco oferece uma base robusta para a validação de dados, essencial para certificações de leite de baixo carbono ou carbono zero. Esse conjunto de dados pode orientar ações

estratégicas regionais e por bioma, fortalecendo a rastreabilidade e a credibilidade, que agregam valor ao produto no mercado interno e externo.

Além disso, é uma ferramenta norteadora para a implementação de práticas e tecnologias mitigadoras. Ao identificar pontos críticos e oportunidades específicas para cada sistema produtivo, o banco de dados subsidia políticas públicas, incentivando a adoção de tecnologias de baixa emissão e o acesso a linhas de crédito verdes. Com atualizações contínuas e parcerias com o setor privado, o banco de dados da Embrapa tem o potencial de posicionar o Brasil como referência global na produção de leite sustentável, alinhando produtividade, competitividade e responsabilidade ambiental. Os primeiros resultados e a caracterização desse banco de dados podem ser vistos em (Paula et al., 2025).

Solução 9 – Zoneamento agrícola de risco climático – Base de dados

Dentre os diversos riscos a que está sujeita a produção agropecuária, a ocorrência de condições agrometeorológicas adversas, principalmente a seca, é considerada por muitos como de criticidade muito alta, em razão da elevada frequência de ocorrência e do grande potencial de perdas (Arias et al., 2015). Como forma de reduzir os riscos de eventos meteorológicos adversos, a Embrapa desenvolve, em parceria com o Mapa, o zoneamento agrícola de risco climático (Zarc) (Brasil, 2025). Esse estudo agrometeorológico vem sendo desenvolvido e aprimorado desde o final da década de 1990, identificando, para cada município brasileiro, as épocas mais adequadas de semeadura. Os zoneamentos são efetuados para diferentes culturas agrícolas de interesse, levando-se em consideração as características de cada uma. Um modelo de balanço hídrico especialmente desenvolvido avalia a disponibilidade hídrica para as diferentes culturas, considerando 36 épocas de semeadura ao longo do ano. Também são considerados diferentes comprimentos de ciclo da cultura (precoce, médio, tardio) e tipos de solo (Santos; Martins,

2016; Steinmetz; Silva, 2017). Como resultado, são identificadas as épocas de semeadura com menor risco de ocorrência de condições agrometeorológicas adversas ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura.

A execução do Zarc demanda uma grande quantidade de dados, dos mais variados tipos, além de expressiva infraestrutura computacional capaz de realizar um grande número de simulações. Para tal, a Embrapa vem investindo esforços para garantir a execução dos trabalhos de forma ágil, utilizando os melhores dados e informações disponíveis. Dentre os principais conjuntos de dados do zoneamento, destacam-se: a) base meteorológica; b) base de características agronômicas das culturas; e c) base de características dos solos.

A base de características dos solos reúne informações que descrevem as propriedades físico-hídricas dos diferentes tipos de solo do País, definindo sua capacidade de armazenamento de água. Essa informação é relevante, pois solos com maior capacidade de armazenamento permitem que as culturas agrícolas tolerem um período maior sem chuvas, impactando na análise de risco. Originalmente, o Zarc baseava-se em três tipos distintos de solo. Todavia, em 2021, uma nova base de dados com informações de 1.200 perfis de solo foi estabelecida e utilizada para gerar um novo conjunto de descrição do solo (Teixeira et al., 2021), com seis classes de água disponível (AD) (Monteiro et al., 2022).

A base das características agronômicas das culturas é utilizada para representar de forma adequada cada uma das culturas no momento da simulação do risco agrícola. Essa base contempla informações como a profundidade das raízes e a capacidade de explorar a água presente no solo, o comprimento do ciclo de crescimento das culturas e de cada uma das suas fases fenológicas, além da taxa de utilização de água das culturas em cada uma dessas fases. Usualmente, o Zarc considera três comprimentos de ciclo para cada cultura agrícola estudada. Todas essas informa-

ções são obtidas pelos especialistas das culturas da Embrapa.

A maior base de dados utilizada no Zarc refere-se às informações meteorológicas, que precisam representar adequadamente o clima das diferentes regiões do País. Para isso, é necessário um grande número de estações meteorológicas com histórico de dados consistentes. Os estudos do Zarc, conduzidos pela Embrapa a partir de 2015, utilizaram uma base com mais de 3.500 estações, com dados entre os anos de 1980 e 2013, provenientes de diferentes instituições, como o Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) e a Agência Nacional de Águas (ANA). Essa base foi minuciosamente analisada no intuito de retirar dados espúrios e prover uma fonte de informação consistente, com boa representatividade espacial. Todos os dados foram armazenados nos servidores da Embrapa, de forma a ficarem prontamente disponíveis para utilização pelo simulador.

Recentemente, a base meteorológica utilizada nos estudos de zoneamento foi atualizada, melhorando a representatividade do clima e as estimativas de risco. Esta nova base é composta por 4.128 estações, com dados de 1993 a 2022. São utilizadas informações provenientes de estações da ANA, do Inmet e de diferentes institutos estaduais, além de dados de produtos de sensoriamento remoto ou de modelos climáticos, como a base Chirps⁸ e o Nasa Power⁹. Além da base de estações, outras bases específicas para estimativas de eventos extremos (temperaturas baixas ou excessivas, precipitação excessiva) são utilizadas na contabilização dos riscos de cada época de plantio e município brasileiro.

A atualização da base meteorológica permitiu identificar alterações importantes em regiões de produção no Brasil, principalmente a redução do período apto para semeadura, com impactos sig-

⁸ Disponível em: <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>.

⁹ Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov>.

nificativos sobre a segunda safra¹⁰. Os estudos realizados com a base mais atual permitirão identificar as melhores épocas de semeadura, considerando as alterações climáticas já em marcha.

A Embrapa também tem conduzido estudos considerando os cenários futuros de mudanças climáticas, utilizando os modelos do CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6). Para isso, estão sendo empregados os resultados de seis modelos globais, três cenários de emissões e diferentes níveis de aquecimento global (*Global Warming Levels — GWL*). Todos os modelos passaram por processo de correção de viés e estão sendo utilizados para avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre os riscos agrícolas. Os resultados iniciais indicam redução da janela de baixo risco em parte considerável do território brasileiro, afetando principalmente as áreas com cultivo de segunda safra. Esse padrão é semelhante ao identificado quando se compara o Zarc realizado com a base climática mais atual (1993–2022) à versão anterior (1980–2013). Esses achados sugerem os impactos das mudanças climáticas sobre os riscos agrícolas já podem estar em curso no presente.

Todas essas bases são integradas por meio do simulador do Zarc, que avalia o risco para cada uma das 36 datas de plantio, considerando as fases fenológicas críticas de cada cultura. Assim, em cada estudo de zoneamento, são realizadas simulações nas 4.128 estações meteorológicas, considerando 36 datas de plantio, seis classes de solo e três comprimentos de ciclo, resultando em mais de 2,6 milhões de avaliações de risco. Esse grande número de análises só é possível graças à infraestrutura computacional presente na Embrapa Agricultura Digital, além de ferramentas de gestão de processamento e visualização de dados, desenvolvidas

especificamente para o Zarc, por um time de desenvolvedores dedicados.

A partir dessas bases de dados, organizadas e mantidas pela Embrapa, e com o apoio de ferramentas computacionais para a simulação do risco agroclimático, o Zarc fornece informações de grande importância sobre as épocas mais adequadas para o plantio. O produto disponibilizado¹¹ possibilita reduzir os riscos da atividade agropecuária, apoiando agricultores e agentes do seguro rural (público ou privado) e fornecendo as bases científicas para estudos dos impactos das mudanças climáticas e estratégias de adaptação.

Perspectivas futuras

Diante das mudanças climáticas globais, o desenvolvimento de uma agricultura de baixa emissão de carbono torna-se uma estratégia essencial para a mitigação dos GEE gerados pelo setor. Nesse contexto, a recuperação de pastagens degradadas e a adoção de sistemas integrados de produção agropecuária, como os sistemas ILPF e os SAFs, emergem como prioridades, visto que se tratam de sistemas regenerativos, de baixo carbono e com maior resiliência frente aos impactos climáticos.

Visando ao aumento da competitividade e da resiliência do setor agropecuário frente às iniciativas locais e globais de adaptação e mitigação às mudanças climáticas, espera-se também que as políticas públicas e os programas de incentivo à agricultura de baixo carbono sejam fortalecidos. Sendo o Brasil considerado um dos grandes celeiros do mundo, o País tem potencial para ser também um grande ator na mitigação das emissões provenientes da agricultura e da pecuária de baixo carbono.

¹⁰ Bender et al. Trend analysis of the climate database used in the Agricultural Climate Risk Zoning (Zarc). Submetido para um número especial da revista Pesquisa Agropecuária Brasileira, COP30.

¹¹ Disponível em: <https://mapa-indicadores.agricultura.gov.br/publico/extensions/Zarc/Zarc.html>.

A demanda crescente por MMRV e por indicadores de pegada de carbono relacionados à agricultura e seus produtos deve gerar uma quantidade de dados, com abrangência e controle de qualidade sem precedentes. Além disso, como já mencionado anteriormente, a construção de bases de dados históricas e atuais é essencial para estabelecer o potencial das fontes e sumidouros de carbono e GEE em diferentes compartimentos (ex. planta, animal e solo) do setor agropecuário. Entretanto, o Brasil ainda não dispõe de uma plataforma colaborativa e de acesso aberto com essa finalidade. O Brasil, em razão de sua diversidade regional, expressa em práticas de manejo, condições econômicas e logística de transporte, e de sua diversidade edafoclimática, que envolve tipo de solo, risco climático e fragilidade dos biomas, exige que a construção de uma base de dados atenda a essa variabilidade conjuntural para orientar políticas públicas. A gestão dessas bases de dados dará vantagem competitiva aos seus detentores tanto no contexto de negociações internacionais e mercados regulados, quanto no acesso a mercados mais exigentes para exportação e em mercados voluntários de créditos de carbono. Há uma grande corrida global pelo desenvolvimento de protocolos mais precisos de quantificação que permitam aperfeiçoar as estimativas com menor custo, maior generalidade geográfica e menor dependência de insumos e práticas específicas. Essas demandas têm gerado desafios e oportunidades em todo o espectro de procedimentos associados à estimação, abrangendo técnicas de amostragem, sensoriamento remoto e proximal (imagens de satélite), drones, veículos com sensores embarcados, sondas, análises laboratoriais, controle de qualidade dos dados, modelagem, simulação, otimização e novos algoritmos, incluindo aplicações de inteligência artificial e ciência de dados, além da rastreabilidade. O avanço dessas técnicas é fundamental para apoiar o mercado de carbono na agricultura, possibilitando a redução das incertezas nos resultados de projetos.

Espera-se que, em curto prazo, sejam desenvolvidas plataformas digitais capazes de integrar dados de produção, qualidade e outros elementos de sustentabilidade, além das informações relacionadas ao carbono. Essas ferramentas deverão integrar modelos, inteligência artificial e técnicas avançadas de ciência de dados. Elas serão elementos-chave para o sucesso e a vantagem competitiva de programas de agricultura regenerativa e de baixa emissão de carbono. Sua função será garantir a integração adequada de dados multidimensionais e apoiar diversos processos de quantificação, análise de dados, transparência, tomada de decisões, planejamento e auditoria. A expectativa é que tais plataformas evoluam para abranger também outros aspectos da sustentabilidade agrícola, como recursos hídricos, saúde do solo e biodiversidade.

Referências

- ALMEIDA, C. A. de; COUTINHO, A. C.; ESQUERDO, J. C. D. M.; ADAMI, M.; VENTURIERI, A.; DINIZ, C. G.; DESSAY, N.; DURIEUX, L.; GOMES, A. R. High spatial resolution land use and land covermapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. **Acta Amazonica**, v. 46, n. 3, p. 291-302, July/Sept. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392201505504>.
- ARIAS, D.; MENDES, P.; ABEL, P. **Revisão rápida e integrada da gestão de riscos agropecuários no Brasil**: caminhos para uma visão integrada. Brasília, DF: Banco Mundial, 2015. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1044224>. Acesso em: 21 maio 2025.
- BHATTACHARJYA, S.; SAHU, A.; SINGH, S.; SINGH, A. B. Factors affecting carbon sequestration and greenhouse gas emission in agroecosystems. In: MOHANTY, S. R.; KOLLAH, B. (ed.). **Greenhouse gas regulating microorganisms in soil ecosystems**. Cham: Springer, 2024. p. 107-126. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-70569-4_6.
- BRASIL. Lei nº 11.815, de 5 de dezembro 2023. Institui o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis e o seu Comitê Gestor Interministerial. **Diário Oficial da União**: seção 1, ano 161, n. 231, p. 18, 6 dez. 2023.
- BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, ano 154, n. 247, p. 4-5, 27 dez. 2017.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Plano ABC e ABC+:** Plano Setorial de Adaptação e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária – 2020-2030. Brasília, DF: Mapa, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc>. Acesso em: 14 maio 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Programa Nacional de Zoneamento Agrícola de Risco Climático.** Brasília, DF: Mapa, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico>. Acesso em: 23 jun. 2025.

EMBRAPA. **Geoinfo.** Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/#/>. Acesso em: 14 maio 2025e.

EMBRAPA. Mapas de estoque de carbono orgânico do solo do Brasil na resolução espacial de 1 km : Versão 2021 [CNPS]. **Geoinfo.** Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/map/4735>. Acesso em: 21 maio 2025a.

EMBRAPA. Mapas de estoque de carbono orgânico do solo do Brasil na resolução espacial de 90 m : Versão 2021 [CNPS]. **Geoinfo.** Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/map/6700>. Acesso em: 21 maio 2025b.

EMBRAPA. Mapas de estoque de carbono orgânico do solo do estado do Rio de Janeiro na resolução espacial de 30 m [CNPS]. **Geoinfo.** Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/map/6769>. Acesso em: 21 maio 2025c.

EMBRAPA. **Paisagens sustentáveis.** Disponível em: <https://www.paisagenslidar.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 21 maio 2025d.

EMBRAPA. **RenovaMap.** Disponível em: <https://www.renovamap.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 21 maio 2025f.

EMBRAPA. **Repositório Alice:** acesso livre à informação científica da Embrapa. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 21 maio 2025g.

FAO. **Global Soil Sequestration potential (GSOCseq) map.** Rome, 2025. Disponível em: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/global-soil-organic-carbon-sequestration-potential-map-gsocseq/en/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

FAO. **GSOC MRV protocol:** a protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes. Rome, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb0509en>.

FAO. **The state of food and agriculture 2021:** making food systems more resilient to climate change. Rome, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb4476en>.

GRUIJTER, J.J. de; MCBRATNEY, ALEX, B.; MINASNY, B.; WHEELER, I.; MALONE, B. P.; STOCKMANN, U.; Farm-Scale Soil Carbon Auditing. **Geoderma** v. 265, p. 120-130, Mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.010>

INFRAESTRUTURA NACIONAL DE DADOS ESPACIAIS. **INDE.** 2025. Disponível em: <https://inde.gov.br/>. Acesso em: 21 maio 2025.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 14040:2006:** environmental management: life cycle assessment: principles and framework. 2. ed. [S.l.], 2006a.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 14044:2006:** environmental management: life cycle assessment: requirements and guidelines. 1. ed. [S.l.], 2006b.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 14045:2012:** environmental management: eco-efficiency assessment of product systems: principles, requirements and guidelines. 1. ed. [S.l.], 2012.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 14064:2019:** greenhouse gases: part 2: specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements. 2. ed. [S.l.], 2019.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 14067:2018:** greenhouse gases: carbon footprint of products: requirements and guidelines for quantification. [S.l.], 2018.

KUCHLER, P. C.; SIMÕES, M.; FERRAZ, R. P. D.; ARVOR, D.; MACHADO, P. L. O. de A.; ROSA, M.; GAETANO, R.; BÉGUÉ, A. Monitoring complex integrated crop-livestock systems at regional scale in Brazil: a big earth observation data approach. **Remote Sensing**, v. 14, n. 7, 1648, Apr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14071648>.

LONGO, M.; KELLER, M.; SANTOS, M. N. dos; LEITOLD, V.; PINAGÉ, E. R.; BACCINI, A.; SAATCHI, S.; NOGUEIRA, E. M.; BATISTELLA, M.; MORTON, D. C.. Aboveground biomass variability across intact and degraded forests in the Brazilian Amazon. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 30, n. 11, p. 1639-1660, Nov. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016GB005465>.

MONTEIRO, J. E. B. de A.; VICTORIA, D. de C.; FARIAS, J. R. B.; BARROS, A. H. C.; LIMA, E. de P.; ARAUJO FILHO, J. C. de; SILVA, F. A. M. da; EVANGELISTA, B. A.; TEIXEIRA, W. G. 2022. **Classes de água disponível do solo para uso no Zoneamento Agrícola de Risco Climático.** Campinas: Embrapa Agricultura Digital, 2022. 6 p. (Embrapa Agricultura Digital. Comunicado técnico, 135). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1144396/1/Com135-2022.pdf>. Acesso em: 21 maio 2025.

OUR WORLD IN DATA. **Annual CO₂ emissions from oil.** Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-oil>. Acesso em: 21 maio 2025.

PAULA, V. R. de; CARVALHO, B. C. de; MOREIRA, E. de A.; STOCK, L. A.; TONUCCI, R. G.; MIRANDA, T. de S.; TOMICH, T. R.; BENHAMI, V. M. L. **Pegada de carbono do leite brasileiro.** Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2025. 9 p. (Embrapa Gado de Leite. Documentos, 293). ODS 2, ODS 12, ODS 13, ODS 15. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1174976/1/Pegada-de-carbono-do-leite-brasileiro.pdf>. Acesso em: 21 maio 2025.

PRONASOLOS. **Programa Nacional de Solos do Brasil.** Disponível em: <https://geoportal.sgb.gov.br/pronasolos/>. Acesso em: 21 maio 2025.

RUMPEL, C.; AMIRASLANI, F.; CHENU, C.; GARCIA CARDENAS, M.; KAONGA, M.; KOUTIKA, L. S.; LADHA, J.; MADARI, B.; SHIRATO, Y.; SMITH, P.; SOUDI, B.; SOUSSANA, J. F.; WHITEHEAD, WOLLENBERG, E. The 4p1000 initiative: opportunities, limitations and challenges for implementing soil organic carbon sequestration as a sustainable development strategy. *Ambio: a Journal of Environment and Society*, v. 49, n.1, p. 350-360, Jan. 2020 DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01165-2>

SANTOS, W. G. dos; MARTINS, J. I. F. O Zoneamento Agrícola de Risco Climático e sua contribuição à agricultura brasileira. *Revista de Política Agrícola*, ano 25, n. 3, p. 73-94, jul./ago./set. 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/152623/1/O-zoneamento-agricola-de-risco-climatico.pdf>. Acesso em: 21 maio 2025.

SILVEIRA, J. G. da; OLIVEIRA NETO, S. N. de; CANTO, A. C. B. do; LEITE, F. F. G. D.; CORDEIRO, F. R.; ASSAD, L. T.; SILVA, G. C. C.; MARQUES, R. de O.; DALARME, M. S. L.; FERREIRA, I. G. M.; CONCEIÇÃO, M. C. G. da; RODRIGUES, R. de A. R. Land use, land cover change and sustainable intensification of agriculture and livestock in the Amazon and the Atlantic Forest in Brazil. *Sustainability*, v. 14, n. 5, 2563, Mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14052563>.

SIMÕES, M. G. **Monitoramento dos sistemas de integração lavoura-pecuária no estado do Mato Grosso do Sul a partir da metodologia GeoABC**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2021. Projeto finalizado.

STEINMETZ, S.; SILVA, S. C. da. **Início dos estudos sobre Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2017. 27 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 312).

Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1064577/1/CNPAF2017doc312.pdf>. Acesso em: 21 maio 2025.

TEIXEIRA, W. G.; VICTORIA, D. de C.; BARROS, A. H. C.; LUMBRERAS, J. F.; ARAUJO FILHO, J. C.; SILVA, F. A. M. da; LIMA, E. de P.; BUENO FILHO, J. S. de S.; MONTEIRO, J. E. B. de A. **Predição da água disponível no solo em função da granulometria para uso nas análises de risco no Zoneamento Agrícola de Risco Climático**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2021. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 272). Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/224270/1/CNPS-BPD-272-2021.epub>. Acesso em: 21 maio 2025.

TERRACCLASS. Disponível em: <https://www.terraclass.gov.br/webgis>. Acesso em: 21 maio 2025.

VERIFIED CARBON STANDARD. **VM0042**: improved agricultural land management: version 2.1: sectoral scope 14. [Washington, D.C.], 2024. VCS methodology. Disponível em: https://verra.org/wp-content/uploads/2024/09/VM0042v2.1_ImprovedALM_corrected_21Jan2025.pdf May 30, 2023. Acesso em: 11 jun. 2025.

VERIFIED CARBON STANDARD. **VMD0053**: model calibration, validation, and uncertainty guidance for the methodology for improved agricultural land management projects: version 1.0: sectoral scope 14. [Washington, D.C.], 2020. VCS module. Disponível em: https://www.verra.org/wp-content/uploads/imported/methodologies/VMD0053_Model-Calibration-Validation-and-Uncertainty-Guidance-for-the-Methodology-for-Improved-Agricultural-Land-Management.pdf. Acesso em: 11 jun. 2025.

Do campo ao clima

Como o **leite brasileiro** está reduzindo suas emissões

Diante do cenário global das mudanças climáticas, reduzir as emissões de gases de efeito estufa tornou-se um dos maiores desafios do nosso tempo. A agropecuária, essencial para a segurança alimentar e o desenvolvimento econômico, também precisa lidar com essa urgência. Um país de dimensões continentais, onde as paisagens mudam radicalmente de norte a sul e de leste a oeste. Há serras, planícies, florestas, cerrado, com um mosaico de culturas, sotaques e modos de viver. Nesse contexto diverso, milhares de famílias vivem da produção de leite.

Com o aumento da atenção aos impactos ambientais da produção de alimentos, uma pergunta passou a ecoar com mais força: qual é, afinal, a pegada de carbono do leite brasileiro?

O Brasil não é exatamente um país de médias ou de valor específico. É um país de contrastes e de realidades diversas. Entender e quantificar com precisão a pegada de carbono do leite é um passo essencial para avançar rumo a sistemas mais sustentáveis. A jornada começou com o desenvolvimento de inventários do ciclo de vida do leite, etapa fundamental para identificar as fontes de emissão ao longo da cadeia produtiva. Esse esforço abriu caminho para algo ainda mais amplo e relevante: parcerias com os principais laticínios do País. Produtores, pesquisadores e empresas passaram a mapear, região por região, sistema por sistema, o que acontece em cada bacia leiteira brasileira.

Foi nesse cenário que a Embrapa Gado de Leite iniciou uma articulação pioneira com grandes empresas do setor, focada na coleta sistemática de informações de campo e na geração de conhecimento técnico qualificado. O resultado foi a construção do maior e mais representativo banco de dados sobre pegada de carbono do leite no Brasil, alimentado por dados reais, colhidos diretamente em propriedades de todas as regiões. Essa abordagem permite captar as variabilidades locais (de clima, geografia, sistema produtivo e cultura) e oferece um retrato realista da produção leiteira nacional.

Esse banco de dados segue crescendo e se consolidando como referência. Mais do que um repositório de números, tornou-se uma ferramenta estratégica, constantemente atualizada pelas parcerias em curso. Novas coletas e revisitas a dados antigos permitem acompanhar a evolução das práticas e identificar, com precisão, onde há espaço para avanços. O acompanhamento contínuo permite planejar o futuro com base em evidências concretas.

Ao longo desse processo, algo poderoso aconteceu: os dados deixaram de ser apenas estatísticas ou números em planilhas de computador e passaram a provocar mudanças reais. Produtores que antes desconheciam o impacto ambiental de suas atividades agora enxergam com clareza onde estão seus gargalos — e, sobretudo, suas oportunidades. Muitos adotaram práticas mais eficientes, reduziram desperdícios e emissões, e se sentiram parte do processo, valorizados por terem acesso a informações que dialogam com sua realidade, seu sistema, seu modo de produzir.

As empresas, por sua vez, encontraram no banco de dados uma bússola para orientar investimentos e estratégias. E os formuladores de políticas públicas passaram a contar com uma base sólida, capaz de sustentar decisões mais justas, eficazes e sensíveis às especificidades regionais. Cada dado representa uma possibilidade de ação — e de transformação.

Hoje, esse banco de dados é uma referência nacional e internacional. Serve para fundamentar políticas públicas, orientar pesquisas e mostrar, com clareza, que não existe uma única pegada de carbono do leite brasileiro. Existem muitas — tantas quantas forem as histórias, práticas e paisagens que compõem essa produção. Este caso é exemplo de como ciência, dados e colaboração podem transformar a agropecuária, adaptando-a às exigências contemporâneas de segurança alimentar, resiliência e sustentabilidade.





CAPÍTULO 4

Técnicas e instrumental acessíveis e escaláveis para monitoramento de dados de campo relativos a carbono e gases de efeito estufa

Josiléia Acordi Zanatta – Ladislau Martin-Neto – Débora Marcondes Bastos Pereira Milori – Ademir Fontana – Wilson Anderson Holler – Marcos Claudio Pinheiro Rogério – Claudia Pozzi Jantalia – Bruno José Rodrigues Alves – Andre Marcelo de Souza – Carlos Manoel Pedro Vaz

Introdução

A mudança do clima, intensificada pela emissão de gases de efeito estufa (GEE), é um dos maiores desafios enfrentados pela humanidade neste século, principalmente por seus efeitos sobre a produção de alimentos e a disponibilidade de água. Os impactos social, ambiental e econômico tendem a se tornar cada vez mais intensos, caso não haja redução significativa de emissões de GEE. A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática (UNFCCC) estabeleceu um ambiente regulatório, universalmente acordado, para a quantificação das emissões de GEE pelos países. Recentemente, o Acordo de Paris avançou no estabelecimento de um instrumento periódico de ampliação internacional da ambição, visando à estabilização do incremento da temperatura média global em até 1,5 °C, preferencialmente, ou 2,0 °C.

Nesse contexto, o Brasil assumiu, durante a 26ª Conferência das Partes (COP 26) da UNFCCC, realizada em Glasgow, o compromisso de neutralizar suas emissões até 2050. Esse compromisso está descrito nas Ações Nacionalmente Determinadas (NDC). Muitas organizações, igualmente engajadas nesse compromisso – e possivelmente pressionadas pelos mercados con-

sumidores mais exigentes – também apresentaram suas ambições de reduzir emissões de GEE nos próximos 30 ou 40 anos, antecipando-se aos debates e às políticas regulatórias que deverão ser implementadas para assegurar a consecução de medidas pelos agentes econômicos responsáveis por emissões. Ao mesmo tempo, mercados consumidores exigirão cada vez mais produtos e serviços com menor intensidade de emissões (emissão de GEE por unidade de produto) ou ambientalmente mais favoráveis. Por isso, é crescente a iniciativa de organizações para conhecerem suas contribuições em termos de emissões e remoções de GEE, com o objetivo de planejar uma transição rumo à neutralidade ou à redução significativa dessas emissões.

A busca das instituições por maneiras de reduzir e compensar as suas emissões de GEE, com o objetivo de alcançar o “net zero” – ou seja, zerar o impacto das suas emissões –, tem levado a uma crescente procura por informações sobre como medir o carbono presente no meio ambiente, calcular a quantidade de gases poluentes emitidos e definir metas para diminuir essas emissões ao longo do tempo. A clara definição de estratégias de monitoramento e controle de emissões de GEE tem se tornado um importante aspecto na conquista de mercados, na diferenciação de preços e na valorização de marcas e empresas, fazendo hoje parte da agenda ambiental e econômica das organizações. A crescente proliferação de iniciativas corporativas, associada à indução regulatória estabelecida pelo Acordo de Paris, tem impulsionado a criação de instrumentos voltados à melhoria do desempenho climático e da sustentabilidade ambiental corporativa, como mercados voluntários, títulos verdes e climáticos e o movimento ESG (*environmental, social and governance*). Esse novo e dinâmico panorama traz oportunidades e desafios para os gestores, conferindo prioridade à gestão climática como estratégia de minimização e compensação das emissões. Todo esse processo, no entanto, exige práticas sistemáticas de monitoramento, relato e verificação, conhecida pela sigla MRV.

Em projetos de desempenho climático, a etapa de monitoramento consiste em gerar informações sobre as emissões, remoções e outros indicadores relacionados a critérios de mitigação ou adaptação às mudanças do clima. A coleta de dados para esse monitoramento pode ocorrer por meio de inventários, estimativas baseadas em cenários de emissão (com o uso de modelagens matemáticas) ou pela medição direta de metas e métricas relacionadas ao clima, de forma pontual ou periódica. A etapa de relato consiste na divulgação transparente e acessível dessas informações ao público interessado. Já a etapa de verificação corresponde à análise das informações divulgadas, assegurando sua confiabilidade por meio de auditorias de rastreabilidade e de replicação da metodologia, de acordo com o propósito.

Como signatário da Convenção e do Acordo de Paris, o Brasil – assim como os demais países signatários – assumiu o compromisso de inventariar periodicamente suas emissões segundo os métodos e princípios reconhecidos pela transparência, comparabilidade, acurácia, consistência, integridade e monitoramento sistemático (*transparency, accuracy, consistency, compatibility and completeness* – TACCC, em inglês) e estabelecidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (*Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC, em inglês). Essa ação deve utilizar o conjunto metodológico acordado internacionalmente, e reconhecido pela Convenção das Partes. Compete ao Brasil, como signatário do Acordo de Paris, determinar o conjunto de medidas nacionalmente adequadas para fomentar uma transição econômica para bases menos intensivas de emissões de GEE, conforme previsto em sua NDC. O País já realizou cinco inventários nacionais (2004, 2010, 2016, 2020 como Comunicação Nacional; e 2024 como Relatório Bianual de Transparência), ainda com forte dependência de informações baseadas em coeficientes técnicos e fatores de emissão pontuais, uma vez que ainda não dispõe de indicadores mensurados em escala nacional (Brasil, 2021, 2024a).

Com a vigência do Acordo de Paris, o Brasil inicia uma nova fase, na qual será exigida a elaboração de inventários de GEE bianuais, além da demonstração do cumprimento das metas de redução de emissões previstas em suas NDCs. A ausência de informações sobre o potencial mitigador de sistemas e atividades agrícolas também afeta o setor produtivo, que necessita comprovar o atingimento de suas metas corporativas de desempenho climático. As emissões brasileiras de GEE estão concentradas, principalmente, no setor mudança do uso da terra (associada ao desmatamento e às queimadas) e no setor agropecuário (Brasil, 2024b). Ambos geram emissões difusas, o que, considerando a dimensão territorial do País, representa um grande desafio para o monitoramento abrangente e eficaz das emissões e remoções.

A coleta de dados é a espinha dorsal de qualquer estratégia de análise, tomada de decisões e orientação de rumos. Para um país de dimensões continentais como o Brasil, representar com precisão todos os ambientes e modelos produtivos, com custos viáveis e num prazo satisfatório, é um desafio adicional. Por isso, o aprimoramento das técnicas de monitoramento, relato e verificação tem se tornado uma prioridade dentro da atuação da Embrapa. O propósito é gerar e adaptar técnicas e instrumentais que tornem os métodos de coleta e monitoramento mais acessíveis e escaláveis, viabilizando seu uso em larga escala e com frequência adequada, tanto para atender os compromissos nacionais quanto para suprir as necessidades do setor produtivo. Muitas técnicas e avaliações de campo podem fornecer subsídios importantes para analisar a mitigação de GEE e a adaptação de sistemas produtivos à mudança do clima.

Neste capítulo, serão destacadas as técnicas de coleta e monitoramento adaptadas ou desenvolvidas pela Embrapa para obter coeficientes técnicos de culturas, estimar estoques de carbono nos diferentes compartimentos dos ecossistemas, mensurar as emissões de GEE liberados pelo solo e por animais em sistemas produtivos, bem como

aferir atributos do ambiente e do solo que são essenciais para as estimativas de emissões e remoções, ou mesmo para o entendimento dos padrões de emissões e remoções de GEE. Uma das premissas adotadas é que essas técnicas devem ser comparadas e validadas com métodos tradicionais de coleta de dados de campo, que geralmente são mais onerosos, demandam mais mão de obra ou qualificação especializada e, em muitos casos, são demasiadamente invasivos, por alterarem o local de coleta ou destruírem a amostra. Portanto, as técnicas alternativas devem ter como vantagens a acessibilidade, agilidade e menor custo, além da facilidade de aplicação em larga escala.

Estado da arte

Ao longo de sua história, a Embrapa vem contribuindo efetivamente para o contínuo crescimento da produção e produtividade da agropecuária do país, para o aumento da competitividade dos produtos brasileiros nos mercados internacionais, para a segurança alimentar da sociedade brasileira e mundial, para a conservação dos recursos naturais, para a preservação do meio ambiente e, enfim, para a construção e consolidação de competência e liderança técnico-científica para uma agropecuária tropical conservacionista (Hungria; Vargas, 2000). Um dos principais desafios que se impõe hoje, e para o horizonte dos próximos 10 a 20 anos, é oferecer estratégias para a transformação ecológica da economia, viabilizando tecnologias inovadoras que garantam a produção de alimentos, fibras e energia em um cenário global de mudança climática, com forte pressão sobre os recursos água, solo e biodiversidade, e exigências crescentes para a redução de impactos ambientais e sociais do processo produtivo.

O protagonismo da Embrapa no tema mudança climática é bastante amplo, apoiando desde a definição de estratégias de mitigação e adaptação climática até a realização de estimativas domésti-

cas de emissões e remoções de GEE, desde a primeira edição do inventário nacional. Sua atuação inclui o aprimoramento de coeficientes técnicos de culturas, a estimativa de taxas de sequestro e estoques de carbono em decorrência de mudanças no uso do solo e de práticas de manejo, bem como a definição de fatores de emissão adaptados às condições nacionais (Brasil, 2020).

Nos últimos anos, a Embrapa tem sido cada vez mais demandada pelo setor privado para apoiar na realização da contabilidade das emissões, principalmente nos cálculos de balanço e pegada de carbono, estimativas de emissões de GEE e caracterização de perfil ambiental de produtos. O balanço de carbono, assim como outras métricas relacionadas, têm se tornado um importante aspecto na aferição do alcance de metas corporativas de redução de emissões de GEE. Essa mensuração é fundamental para a conquista de mercado, a diferenciação de preços e a valorização de marcas, compondo, atualmente, a agenda ambiental e econômica das organizações.

Diante do crescente número de iniciativas corporativas, associadas à indução regulatória estabelecida pelo Acordo de Paris, cresce também a necessidade de aprimorar as técnicas de coleta e monitoramento de emissões de GEE nos setores da agricultura e de mudança do uso da terra. A coleta e o monitoramento de dados de campo podem ser executados com o uso de diferentes tecnologias. A técnica mais adequada depende da escala e da variável que se pretende monitorar. Nesse contexto, a Embrapa vem desenvolvendo e adaptando técnicas e instrumentação que permitem o reduzir custos, ampliar a escalabilidade e a agilizar o levantamento de dados relacionados ao fluxo de GEE, ao carbono presente em vários compartimentos, inclusive no solo, além de outros aspectos ambientais igualmente importantes.

O investimento na ampliação da infraestrutura de coleta e na padronização metodológica de alternativas aos métodos tradicionais oferecerá alto impacto na viabilidade do monitoramento, por aumen-

tar a eficiência e acurácia nos dados gerados. Esses avanços são relevantes tanto para o inventário nacional de GEE, quanto para certificações, programas de incentivos e os compromissos assumidos por empreendimentos de menor escala, voltados ao alcance de metas de desempenho climático.

O setor agropecuário tem grande importância econômica para o Brasil e ocupa 32% do território nacional. No entanto, a maior parte da área do país é coberta por florestas nativas, que representam 59% do total e estão em diferentes estados de conservação (Tabela 4.1). Além disso, há mais 10 milhões de hectares de plantios florestais, o que corresponde a 1% do território nacional. As florestas nativas do Brasil possuem alta biodiversidade e variadas formações vegetais, o que dificulta a medição representativa de carbono e emissões de GEE. Apesar dos desafios, elas são essenciais para o cumprimento das metas assumidas no Acordo de Paris e, na NDC nacional, destacam-se como o setor mais relevante para a mitigação das emissões de GEE.

Tabela 4.1. Área destinada a cada uso do solo e detalhamento da agropecuária nos seus setores principais, com base nos dados do MapBiomass (2024).

Uso do solo	Área (ha)	Área (%)
Floresta	502.572.052	59,0
Vegetação arbustiva e herbácea	46.450.811	5,5
Área não vegetada	6.773.077	0,8
Corpos da água	18.298.211	2,2
Agropecuária	276.671.946	32,5
Pastagem	164.574.066	59,5
Agricultura	60.992.647	22,1
Silvicultura	8.940.366	3,2
Outros usos	42.164.867	15,2

O método tradicional para estimar os estoques de carbono na biomassa vegetal das florestas baseia-se em inventários de campo. Nesses levantamen-

tos, são coletadas informações como diâmetro e altura de árvores, identificação das espécies e famílias botânicas. Esses dados permitem avaliar a quantidade e a qualidade dos recursos florestais, bem como acompanhar a mortalidade e o crescimento das árvores ao longo do tempo, proporcionando uma visão mais precisa da dinâmica da área estudada. O estoque de carbono é estimado a partir de equações alométricas, que relacionam as dimensões das árvores com a biomassa. Essas equações podem ser específicas para uma espécie vegetal, ou genéricas, aplicadas a grupos para os quais não há modelos próprios.

O método de amostragem é o mais utilizado, no qual parte da área é avaliada e considerada representativa do todo. Os inventários de campo são fundamentais para estimar os estoques de carbono da biomassa vegetal, mas apresentam desafios significativos: requerem equipes treinadas, demandam tempo extenso e são bastante trabalhosos. Além disso, o processamento posterior dos dados pode ser tão demorado quanto a coleta em campo, dificultando revisões em caso de erros ou dúvidas. Devido à laboriosidade, sua eficiência na geração de dados em larga escala é limitada, sobretudo diante dos compromissos assumidos em escala nacional.

Métodos indiretos, baseados em tecnologias não destrutivas, têm-se mostrado promissores para ampliar a capacidade de geração de informações e complementar os inventários nacionais. Com a evolução das geotecnologias, a cada dia surgem novas ferramentas e métodos, o que tem beneficiado em grandes proporções o planejamento e a execução de inventários florestais, colocando a atividade sob uma nova ótica. Assim, o inventário de campo ganha novas ferramentas como sensoriamento remoto, através das suas muitas técnicas, com o uso de imagens de satélites (VANTs ou drones) e varredura por LiDAR (Sousa et al., 2020; Santos et al., 2021; Ferreira et al., 2022; Costa et al., 2023). Porém, como toda nova ferramenta que chega ao campo, precisa de ajustes às condições e ao objeto de aplicação, com a necessidade de

novos modelos e algoritmos de resposta coerentes a cada situação florestal (Souza et al., 2024).

Nesse contexto, a Embrapa desenvolve técnicas voltadas para a identificação de espécies florestais, a quantificação dos atributos da floresta e a estimativa do estoque de carbono presente na biomassa vegetal. Essas técnicas apresentam uma grande variação de custos, sendo os serviços com drones ou VANTs os mais acessíveis, o que facilita o acesso do público ao uso dessas tecnologias. Contudo, o processamento de dados ainda exige recursos humanos qualificados para assegurar a credibilidade dos resultados.

O carbono presente no solo é tão importante quanto aquele estocado na vegetação. A agricultura e o uso da terra influenciam muito a quantidade de carbono armazenada no solo, que pode ser igual ou até maior do que a encontrada na vegetação. Em 2021, a Embrapa divulgou um mapa do carbono no solo na resolução espacial de 90 m (escala equivalente entre 1:250.000 e 1:100.000) em subcamadas até 100 cm de profundidade (Vasques et al., 2021). Apesar de ser um avanço estratégico, essa base de dados ainda não pode ser usada como referência para propriedades rurais ou para acompanhar mudanças no estoque de carbono causadas por boas práticas agrícolas, como sistema plantio direto, a integração lavoura-pecuária-floresta e o uso de bioinsumos.

O monitoramento do estoque de carbono do solo requer duas medições principais: concentração de carbono e densidade do solo. Ambas são avaliações onerosas seja pelo esforço físico, seja pelo custo financeiro. Por outro lado, o monitoramento do carbono no solo vem ganhando importância, e há uma busca crescente por métodos mais rápidos e acessíveis para coletar e analisar amostras de solo. Esses métodos devem ser eficientes, econômicos e gerar o mínimo de resíduos laboratoriais possível.

A quantificação precisa da variação temporal da concentração de carbono é um desafio, face à sua lenta evolução ao longo do tempo e a elevada variabilidade no espaço (Haynes, 2005). Para mo-

monitorar e analisar a variação do carbono no solo, é fundamental definir métodos confiáveis de quantificação. O carbono pode ser medido por meio de métodos de combustão a seco (ISO 10694:1995) e também por via úmida, como o método de Walkley-Black (FAO, 2020). Este último é baseado na oxidação do carbono presente na amostra com uma solução de dicromato de potássio, e também é conhecido como o método da combustão úmida. Esse método tem o inconveniente de gerar elevada quantidade de resíduos químicos. No entanto, é o método mais usado nos laboratórios de análise do solo que atendem às propriedades rurais no Brasil, pois é relativamente barato e dispensa o uso de equipamentos especializados.

Apesar de os resultados obtidos com esse método serem largamente adotados para calibrar a recomendação de adubação nitrogenada para muitas culturas, sua aplicação no monitoramento das mudanças nos estoques de carbono do solo é questionada. Isso se deve à imprecisão inerente dos resultados, pois a oxidação do carbono das frações mais transformadas não é completa, e depende da recalcitrância (estabilidade físico-química) do carbono presente na amostra (Fontana; Campos, 2017).

O método da combustão a seco é considerado o padrão internacional, amplamente aceito e reconhecido devido à sua alta precisão e exatidão nos resultados (Nelson; Sommers, 1996; Fontana; Bianchi, 2017). Nesse método, a amostra do solo é incinerada a uma temperatura de, no mínimo, 925 °C, que resulta na oxidação completa de todas as formas de carbono presentes, transformando-as em CO₂. Posteriormente, o C-CO₂ é detectado por sensor de infravermelho. A principal desvantagem desse método é o alto custo da análise, que supera o do método via úmida. Isso ocorre devido à necessidade de equipamentos especializados, consumo de materiais específicos e custos elevados de manutenção, tornando-o acessível apenas a poucos laboratórios comerciais com elevada demanda de análises, limitando sua aplicação em larga escala.

Nesse contexto, o desenvolvimento de técnicas pela Embrapa e seus parceiros tem buscado mé-

todos robustos, acessíveis e com capacidade para atender, em escala adequada, às demandas em nível nacional. Duas tecnologias derivadas dessas iniciativas atualmente disponíveis no setor privado são o AgLIBS (Babos et al., 2024a) e o uso da espectroscopia de reflectância difusa no visível e no infravermelho próximo (Vis-NIRS) (Coelho et al., 2018). Ambas se destacam pelo baixo custo e agilidade na execução da análise, além de já serem aceitas em programas de certificação do mercado voluntário. O uso de tecnologias como Radio Detection And Ranging (RADAR)/Synthetic Aperture Radar (SAR) também se mostra promissor para o monitoramento e a avaliação do carbono no solo e nas raízes (Machado et al., 2025) e já é alvo de investigações através de projetos de pesquisa.

A densidade do solo (Ds) é um fator fundamental para calcular os estoques de carbono, e representa a maior fonte de incerteza nesse processo. Com o aumento do interesse para determinar mudanças no estoque de carbono do solo, devido ao seu papel na redução das emissões de GEE, a avaliação da Ds tornou-se indispensável e passou a ser requerida em uma escala mais ampla. Os métodos disponíveis para a determinação da Ds são trabalhosos e requerem cuidados específicos, além do uso de ferramentas apropriadas, limitando a sua aplicação em grandes extensões de áreas ou em estudos com alto número de repetições, tanto pelo trabalho minucioso quanto pelo elevado custo operacional.

A determinação da Ds pode ser feita diretamente, coletando-se amostras indeformadas e de volume conhecido de solo no campo, ou de maneira indireta, estimando-se com o uso de equações matemáticas. Os métodos padrão para determinar a Ds incluem o uso do anel volumétrico e o método da escavação, ambos reconhecidos por protocolos nacionais (Oliveira, 2014; Zanatta et al., 2015; Fontana et al., 2024) e internacionais (FAO, 2020). Esses métodos exigem a abertura de uma trincheira, manual ou mecanicamente, geralmente de 50 a 100 cm de profundidade, para acesso às camadas de interesse.

No método do anel volumétrico, um cilindro de volume conhecido (anel) é inserido cuidadosamente no solo, de forma a preservar sua estrutura. O solo contido no anel é então retirado, seco e pesado. A DS é calculada como a razão entre a massa seca do solo e o volume do anel. Já o método da escavação é indicado para solos soltos ou com alto teor de cascalhento, quando mais de 15% do volume é composto de materiais grossos. Nesse caso, em cada camada do solo é feito um "buraco", que é preenchido com areia fina de densidade conhecida (densidade da areia = massa da areia ÷ volume da areia). A Ds do solo é calculada com base na razão entre a massa do solo seco extraído e o volume ocupado pela areia utilizada.

As trincheiras abertas para aplicação desses métodos devem ser devidamente fechadas após a coleta, o que demanda tempo e grande esforço, seja manual ou mecânico. Para evitar essa etapa, têm sido propostos métodos automatizados que utilizam sondas para a obtenção de amostras indeformadas. No entanto, essas técnicas ainda precisam ser validadas em comparação aos métodos de referência, como o do anel volumétrico. A coleta por sonda automatizada obtém um monólito de solo (ou testemunho), que pode ser subdividido em camadas de interesse, seguido pela determinação da Ds, conforme os procedimentos tradicionais.

Os métodos mais modernos de determinação da Ds baseiam-se em técnicas nucleares, como a tomografia computadorizada (Timm et al., 2005; Pires et al., 2010) e a utilização de sondas de superfície nêutron-gama (Cássaro et al., 2000a, 2020b, 2020e). Ambas as técnicas adotam equipamentos bastante caros e necessitam de mão de obra altamente qualificada para seu uso, o que implica alto custo da utilização delas.

Alternativamente, as equipes técnicas têm desenvolvido modelos de predição da Ds que utilizam, como preditores, alguns atributos obtidos de amostras deformadas de análises de rotina de solo, como as frações granulométricas (areia, silte e argila), C, pH, soma de bases, entre outros, que

estão correlacionados com a agregação e estrutura do solo. As chamadas equações de pedotransferência têm boa aceitação e podem ser alternativas de custo-benefício interessante. Alguns modelos já disponíveis são descritos no item de soluções de inovação para densidade do solo, junto com adaptações técnicas para o uso de sondas mecânicas automatizadas. Essas soluções atendem ao setor produtivo por serem técnicas baratas, passíveis de serem aplicadas em larga escala e com rendimento operacional adequado. Essa abordagem será detalhada nas soluções tecnológicas, pois há equipes desenvolvendo modelos para predição com resultados muito satisfatórios (Reis et al., 2024; Santos et al., 2025).

O monitoramento dos fluxos de GEE também é uma atividade muito trabalhosa. As metodologias de avaliação in situ dos fluxos de GEE no sistema solo-atmosfera geralmente demandam a utilização de câmaras para a coleta de amostras e posterior análise em laboratório. As câmaras estáticas manuais são as ferramentas mais comuns para medição dos fluxos de gases do solo por serem portáteis, de simples funcionamento e, dependendo do método utilizado, de baixo custo (Dalal et al., 2003; Parkin; Venterea, 2010). Quando utilizadas seguindo critérios recomendados, essas câmaras apresentam grande valor e apresentam uma ótima relação custo-benefício (Hutchinson; Rochette, 2003; Parkin; Venterea, 2010).

Apesar de serem amplamente utilizadas em todo o mundo, as câmaras apresentam desafios operacionais significativos. O método demanda um grande esforço de trabalho e possui limitações relacionadas à sensibilidade, à frequência das avaliações e à necessidade de mão de obra especializada para interagir com o sistema e coletar as amostras de ar. Além disso, a eficiência da coleta depende tanto da capacidade do coletor quanto da distância entre as câmaras, restringindo sua aplicação em larga escala. Normalmente, uma pessoa consegue coletar amostras de até 10 câmaras, distribuídas num raio de até 30 m. Essa capacidade limita o número de repetições e de

replicatas a serem monitoradas, dificultando, por conseguinte, as análises comparativas devido ao baixo número de repetições de campo. É importante destacar que os fluxos de GEE do solo são influenciados por diversos fatores (La Scala et al., 2000; Jantalia et al., 2008; Veloso et al., 2019), resultando em uma alta variabilidade espacial e temporal (Deng et al., 2020). Por isso, é necessário aumentar o número de repetições na coleta para obter resultados mais precisos e representativos.

Outra condição limitante é que, em sistemas com coleta manual, é praticamente impossível realizar monitoramentos diários das emissões dos GEE por dias consecutivos. Essas dificuldades limitam sobremaneira o desenvolvimento de estudos mais abrangentes temporalmente e espacialmente. As torres de fluxo fornecem medições indiretas dos fluxos de GEE em uma escala temporal altamente detalhada e representativa para uma área maior, tipicamente entre 2 ha e 10 km², cujo tamanho depende das características da área monitorada e da sua instalação, sendo uma ferramenta valiosa para estudos em larga escala. No entanto, os resultados obtidos por esse método não são diretamente comparáveis com os obtidos com as câmaras instaladas no solo, pois, enquanto as torres de fluxo descrevem o balanço dos GEE no sistema solo-planta-atmosfera, as câmaras representam o fluxo líquido do sistema solo-atmosfera. Devido às características inerentes ao método das torres, sua instalação requer grandes áreas de relevo relativamente plano, além de profissionais qualificados para operação e manutenção.

Uma forma de aumentar a capacidade de coleta utilizando câmaras é por meio de sistemas automáticos para a coleta de ar e análise do fluxo de GEE. Esses sistemas são conectados a um analisador de gases, que pode ser um cromatógrafo gasoso ou espectrômetro a laser. As câmaras, nesse caso, são previamente programadas, e as coletas de amostras de ar e análise podem ocorrer inúmeras vezes ao dia. Apesar da excelente qualidade da informação gerada, o uso desses sistemas fica restrito a campos experimentais com segurança ade-

quada e depende da presença de equipamento de análise no campo, o que, para sistemas cromatográficos, têm limitações de sensibilidade dos equipamentos, pois esses operam em condições controladas de temperatura. O volume de informações obtido com esta técnica é extremamente elevado e pode levar a conclusões bem mais acuradas a respeito dos ciclos diários das emissões, assim como identificar a resposta direta do fluxo de GEE a mudanças nas condições edáficas, principalmente de temperatura e umidade. Atualmente, as câmaras automáticas disponíveis no mercado, que são todas importadas, ainda são de custo relativamente elevado e necessitam de adaptações para serem utilizadas nas condições brasileiras.

Diante dessa dificuldade, a Embrapa, junto com parceiros, desenvolveu um sistema semiautomático de coleta de amostras, no qual o operador do sistema leva o sistema ao campo, inicia o funcionamento e retorna ao final da campanha (geralmente 2 horas), recolhendo as amostras de ar e o aparato de coleta. Neste caso, a capacidade de coleta no campo, considerando um operador, aumenta no mínimo três vezes se comparado ao sistema tradicional de coleta (câmara estática operada manualmente).

Muitas das dificuldades mencionadas para o monitoramento dos fluxos de GEE do solo são também verdadeiras para o monitoramento do metano entérico de animais ruminantes. O monitoramento do metano entérico necessita de métodos não invasivos que sejam suficientemente precisos, o que representa uma dificuldade adicional. A fermentação ruminal é um processo complexo influenciado por diversos fatores, como tipo de dieta, qualidade da forragem, genética do animal e condições ambientais. A generalização dos resultados para diferentes sistemas de produção requer estudos com grande número de animais e em diferentes condições. Métodos para medir o metano entérico incluem câmaras de confinamento, técnicas de traçador, técnicas de "farejamento" e detectores portáteis de metano a laser. Métodos como câmaras de respiração, embora precisos, são invasivos e limitados

a um pequeno número de animais. A busca por métodos portáteis e menos intrusivos, como detectores de metano a laser, está em curso. Mais recentemente, um sistema automatizado de câmara de cabeça, GreenFeed (GF), foi desenvolvido para amostragem pontual de gases exalados e eructados (Zimmerman; Zimmerman, 2012). Comparações com câmaras de respiração ou método SF₆ estabeleceram que, quando usado corretamente, o GF é uma técnica confiável para medir emissões entéricas de metano de animais ruminantes (Dorich et al., 2015; Hammond et al., 2015).

Muitas são as técnicas e o instrumental desenvolvidos para facilitar o monitoramento, a integração multiescalar, e ampliar o acesso aos dados de campo. A evolução dessas técnicas também é impulsionada pela demanda cada vez maior das organizações de gerar informações mais detalhadas sobre as emissões e remoções, seja para melhoria da gestão climática, seja pela perspectiva de investimentos em mecanismos de mitigação. O fato é que, em função das dimensões do país, técnicas de larga escala são imprescindíveis para subsidiar o país com informações que atendam as demandas das regras do Acordo de Paris, assim como para promover ordenamento e controle eficiente sobre as emissões em nível de propriedade rural.

Soluções de inovação para monitoramento do carbono no solo

A obtenção de dados precisos e em larga escala sobre o carbono orgânico do solo (COS) é fundamental para compreender a saúde do solo, o ciclo global do carbono e o potencial de sequestro de carbono em sistemas agrícolas (Minhoni et al., 2021; Lima et al., 2025; Petropoulos et al., 2025). A importância desses dados reside na capacidade de mapear a distribuição do COS em grandes áreas, identificar áreas com maior potencial de sequestro ou risco de perda de carbono, e monitorar as

mudanças ao longo do tempo em resposta a práticas de manejo ou eventos climáticos extremos (Minhoni et al., 2021). Essa informação é crucial para a implementação de práticas de agricultura de baixo carbono e para o desenvolvimento de políticas de adaptação e mitigação da mudança climática no setor agrícola (Petropoulos et al., 2025).

As técnicas inovadoras de análise de solos desenvolvidas pela Embrapa, como a AgLIBS e a SpecSolo, podem contribuir de forma decisiva para o fortalecimento do papel do Brasil na liderança de ações voltadas à sustentabilidade agrícola e ao enfrentamento da mudança climática, em alinhamento direto com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU, especialmente o ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável), ODS 12 (Consumo e produção responsáveis), ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) e ODS 15 (Vida terrestre). Essas conexões reforçam o papel estratégico das técnicas espectroscópicas como tecnologias habilitadoras de políticas públicas voltadas à transformação ecológica da agricultura e ao monitoramento eficaz dos compromissos ambientais assumidos pelo Brasil em âmbitos nacional e internacional.

Além disso, técnicas potenciais estão sendo aprimoradas no meio científico, principalmente aquelas com elevada capacidade de rendimento e com aplicação remota. Nessa perspectiva há o uso de dados de satélites equipados com sensores SAR, como o Sentinel-1 e o ALOS PALSAR, por meio de duas técnicas principais: 1) de dupla polarização, que pode ser utilizada indiretamente para estimar o COS (El-Jamaoui et al., 2025) por meio do Índice de Vegetação SAR (SARVI); 2) Ground Penetrating Radar (GPR), que complementa as informações obtidas por RADAR/SAR orbital, embora operando em uma escala espacial menor, oferecendo detalhes sobre a estrutura do subsolo, incluindo a distribuição de raízes e a estratificação do solo, que podem influenciar o armazenamento de carbono (Jol, 2009). Ambas as tecnologias serão abordadas na seção Perspectivas Futuras.

Plataforma IA AgLIBS

A IA AgLIBS é uma plataforma digital para quantificação de carbono, nutrientes e outros parâmetros físico-químicos de solos. A base física dessa plataforma é a Espectroscopia de Emissão Óptica com Plasma Induzido por Laser (ou em inglês, Laser-induced Breakdown Spectroscopy – LIBS), que é uma técnica amplamente aplicada nas análises de materiais e também de rochas e solos por diversas instituições de pesquisas (Bublitz et al., 2001; Cremers; Radziemski, 2013), incluindo a National Aeronautics and Space Administration (NASA) em suas duas últimas expedições à Marte. Trata-se de um método de análises multielementares que se baseia em emissões atômicas e iônicas dos ele-

mentos químicos a partir de um plasma criado por laser de alta potência. A Figura 4.1 apresenta um esquema dessa técnica, ilustrando um espectro típico de emissão com indicação de uma das linhas de emissão do átomo de carbono em 193 nm e um diagrama com um sistema de medidas típico de LIBS.

A técnica vem sendo estudada na Embrapa desde 2006, como alternativa aos métodos tradicionais de análise da concentração de carbono. Essa tecnologia permite a quantificação de carbono, nutrientes do solo, textura, pH e capacidade de troca catiônica (CTC) de maneira mais rápida e acessível do que os métodos convencionais, além de fornecer dados digitalizados para análise e tomada de decisão.

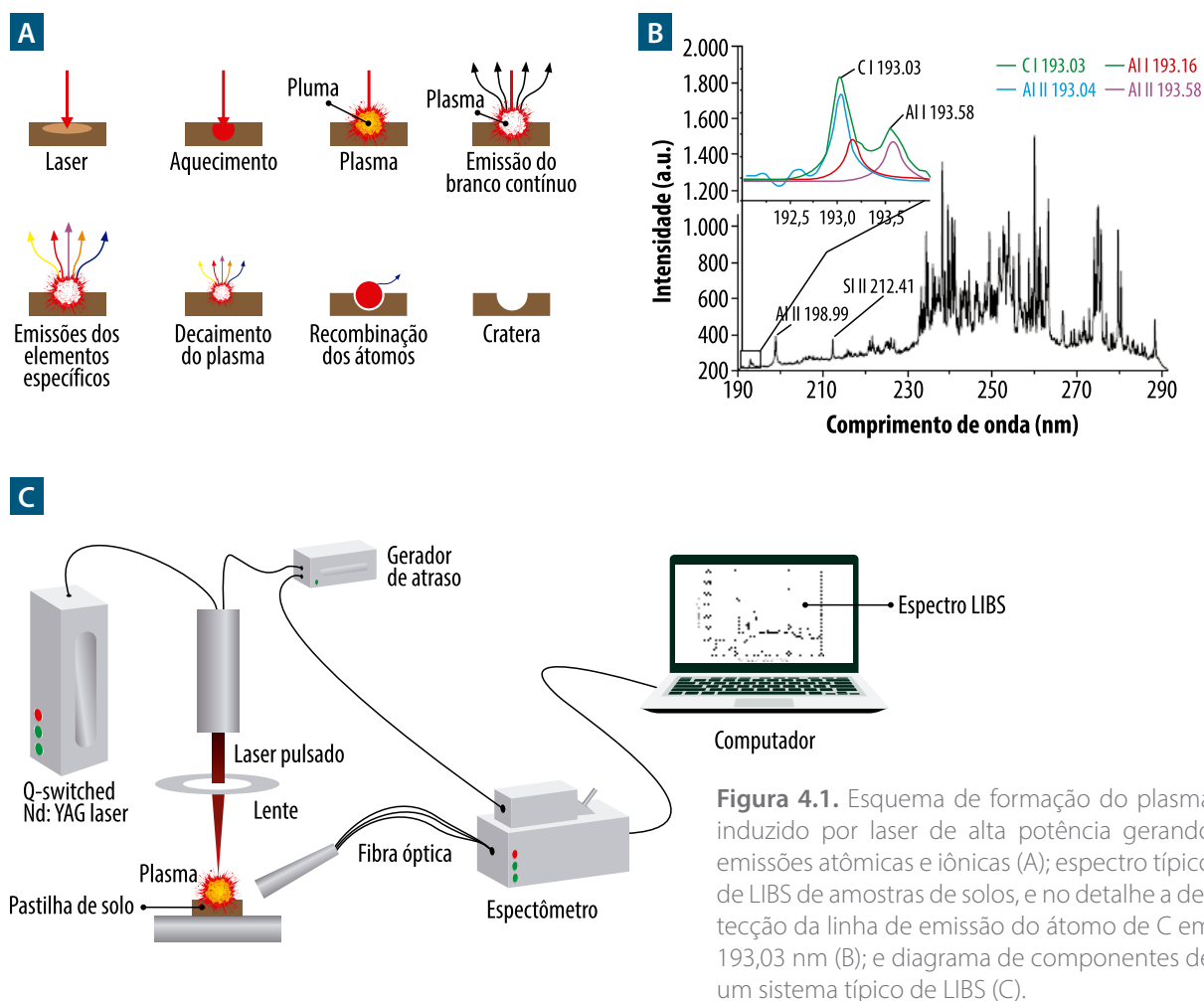


Figura 4.1. Esquema de formação do plasma induzido por laser de alta potência gerando emissões atômicas e iônicas (A); espectro típico de LIBS de amostras de solos, e no detalhe a detecção da linha de emissão do átomo de C em 193,03 nm (B); e diagrama de componentes de um sistema típico de LIBS (C).

Numa parceria público-privada, a técnica evoluiu para uma plataforma. A plataforma IA AgLIBS gera recomendações agronômicas para os produtores, otimizando a gestão do solo. Além disso, ela possibilita a criação de mapas detalhados de estoques de carbono, com maior rapidez e custos menores que o método da combustão seca, auxiliando na viabilização de projetos de créditos de carbono para produtores rurais e empresas do agro. Adicionalmente permite análises e mapas de macro e micronutrientes de plantas presentes nos solos, conforme demanda a agricultura de precisão para um manejo mais eficiente e sustentável dos solos, resultando no aumento da produtividade agrícola e/ou redução de custos de produção. Vale ressaltar que a plataforma IA AgLIBS é um produto com patente compartilhada entre a Embrapa Instrumentação e a Agrorobótica.

Em 2023 a técnica LIBS foi aprovada pela Certificadora Internacional Verra, com sede nos Estados Unidos, para uso na quantificação de carbono no solo, dentro da Metodologia “Verified Carbon Standard- VCS” (Metodologia VM 0042, Versão 2, de 30 de maio de 2023). Da maioria das publicações internacionais utilizadas pela Verra, para aceitação da técnica LIBS para quantificação do carbono no solo na Metodologia VM 0042, cinco delas foram publicadas por pesquisadores da Embrapa Instrumentação, associados ao Laboratório Nacional de Agrofitônica (Milori et al., 2011; Nicolodelli et al., 2014; Segnini et al., 2014; Villas-Boas et al., 2020a, 2020b).

A plataforma IA AgLIBS tem sido aplicada em projetos no Brasil afora (Figura 4.2). Em um dos resultados recentes, Babos et al. (2024a) demonstraram um valor médio do erro quadrático de predição (do inglês RMSEP) para as medidas com LIBS de 0,47% de C. Esse resultado foi obtido comparando medidas de mais de 1.000 amostras de solo de 11 propriedades rurais. Essas propriedades estavam distribuídas nos biomas Cerrados, Mata Atlântica e Pampa, e contavam com variações de conteúdo de carbono de 0,23 a 8,78% de C no solo, determinados por Analisador Elementar



Figura 4.2. Indicações de locais de medidas de carbono em solos usando a técnica LIBS, pela Embrapa Instrumentação, oriundos de experimentos de campo de longa duração em instituições públicas e, principalmente, de propriedades rurais privadas (“on-farm research”), em diferentes polos produtivos e biomas brasileiros.

CHN. Os coeficientes de determinação (R^2) entre as medidas obtidas por LIBS e o Analisador Elemental CHN foram de 0,94 e 0,75, para calibração e validação, respectivamente.

A implementação de tecnologias avançadas, como a plataforma IA AgLIBS, tem contribuído significativamente para a competitividade nacional no setor agropecuário. A adoção de tecnologias como a IA AgLIBS não só melhora a eficiência e sustentabilidade das operações agrícolas, mas também fortalece a posição do Brasil no mercado global, atendendo às demandas por produtos mais sustentáveis e contribuindo para a mitigação da mudança climática. O acesso a ferramentas digitais avançadas também permite um gerenciamento mais eficiente das propriedades rurais, em particular, da capacidade de monitorar e quantificar o aumento da matéria orgânica do solo (MOS), e consequentemente do carbono no solo, com impacto significativo na melhoria da estruturação

do solo, e em ações relevantes de adaptação aos impactos da mudança climática.

Embora os benefícios do manejo adequado dos solos sejam amplamente reconhecidos, a agricultura resiliente e adaptativa exigirá um monitoramento eficiente do sistema solo-planta-atmosfera, associando práticas de manejo à evolução da MOS. O LIBS também pode ser importante aliado para a consolidação e benefícios da adoção da agricultura de precisão, uma vez que propicia redução dos custos das análises de solos e plantas, simplificação nas técnicas de aplicação para ampliar o uso de manejos à taxa variável de insumos e defensivos nos solos e culturas em larga escala.

Além disso, a capacidade de quantificar e monitorar o carbono no solo em larga escala abre oportunidades para os produtores participarem de projetos de crédito de carbono, gerando receitas adicionais e possibilitando a entrada em novos mercados internacionais que valorizam práticas agrícolas sustentáveis. Essas iniciativas estão alinhadas com programas governamentais, como o Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária, com vistas ao Desenvolvimento Sustentável 2020-2030 (Plano ABC+). Adicionalmente a plataforma IA AgLIBS desempenha um papel estratégico na redução de riscos e no aumento da capacidade adaptativa da agricultura brasileira, tornando as propriedades rurais mais resilientes e sustentáveis. Ao liderar investimentos em sustentabilidade, o Brasil não apenas melhora suas práticas agrícolas internas, mas também oferece soluções que podem ser adaptadas globalmente, contribuindo para a sustentabilidade da produção de alimentos em escala mundial.

Plataforma SpecSolo

A Plataforma Digital SpecSolo representa uma das mais significativas inovações em análise de solos das últimas cinco décadas no Brasil, ao incorporar o uso da espectroscopia no infravermelho como base tecnológica. Essa abordagem permite substituir, com rapidez, precisão e confiabilidade,

de, os métodos tradicionais de análise, muitos dos quais são onerosos e potencialmente poluentes ao meio ambiente.

Ao eliminar a necessidade de reagentes químicos e reduzir drasticamente a geração de resíduos, a SpecSolo contribui para a mitigação de impactos ambientais e diminui os custos operacionais dos laboratórios com o tratamento e a destinação adequada desses resíduos. Além disso, a plataforma apresenta um enorme potencial para viabilizar a análise de carbono do solo em larga escala, constituindo-se em uma ferramenta estratégica para o avanço da agricultura de baixo carbono e para o mecanismo de comércio de carbono que vem se consolidando no Brasil.

A plataforma SpecSolo é baseada em técnicas de espectroscopia de infravermelho, que trata da relação entre a radiação eletromagnética e a matéria, amplamente utilizada na caracterização físico-química de solos. Seu princípio fundamental está na absorção seletiva de energia por ligações químicas específicas, promovendo transições vibracionais que refletem a composição molecular do material analisado. Essa capacidade torna a espectroscopia infravermelha uma ferramenta estratégica para a quantificação do carbono orgânico do solo, permitindo a identificação e estimativa de compostos relacionados à matéria orgânica, além de oferecer subsídios importantes para o entendimento da dinâmica do carbono e a avaliação da qualidade e fertilidade dos solos.

As regiões espectrais de maior interesse agrônomo compreendem o infravermelho médio (*Mid Infrared Spectroscopy*, MIR, 4.000–400 cm^{-1}), o infravermelho próximo (*Near Infrared Spectroscopy*, NIR, 12500–4000 cm^{-1}) e o espectro combinado visível-infravermelho próximo (Vis-NIR, 25.000–4.000 cm^{-1}). Cada uma dessas faixas oferece vantagens específicas, sendo utilizadas de forma complementar conforme o objetivo da análise, a logística laboratorial e o grau de robustez exigido para os modelos preditivos.

O NIR tem se consolidado como uma importante alternativa para aplicação em análises de solo em alta escala, devido à sua rapidez, não destrutividade, baixo custo por análise, ausência de reagentes químicos e possibilidade de automação. As bandas espectrais nesta região resultam de sobretons e bandas de combinação de vibrações fundamentais, resultando em bandas largas e sobrepostas. Sendo assim, para interpretação adequada desses espectros, é essencial o uso de técnicas de quimiometria e aprendizado de máquina (*Machine Learning*), como a regressão por quadrados mínimos parciais (*Partial Least Squares*, PLS), máquina de suporte de vetores (*Support Vector Machine*, SVM), Floresta Randômica (*Random Forest*, RF) e Redes Neurais (*Neural Network*, NN), que extraem informações nos dados espectrais e possibilitam a quantificação simultânea de múltiplos atributos do solo a partir de uma única leitura espectral. A Figura 4.3 ilustra um sistema típico de espectroscopia NIR, composto por monocromador e esfera de integração, utilizado para a coleta dos espectros de reflectância difusa em amostras de solo preparadas na condição de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA).

A técnica Vis-NIR amplia ainda mais esse potencial ao integrar o espectro do visível (400–700 nm), associado à coloração do solo – indicativa de presença de matéria orgânica, óxidos de ferro e características mineralógicas. Essa abordagem tem mostrado alto desempenho na predição de propriedades físicas e químicas em solos tropicais, como os encontrados no Brasil. Essa é a base de tecnologias como a SpecSolo¹, que emprega espectroscopia Vis-NIR integrada a um sistema de hardware, software e algoritmos hospedados em nuvem, oferecendo resultados rápidos e confiáveis para análise de fertilidade do solo em larga escala.

A tecnologia contribui para melhorar a competitividade do Brasil frente aos desafios impostos pela mudança do clima. A combinação da espectroscopia NIR com algoritmos de inteligência artificial,

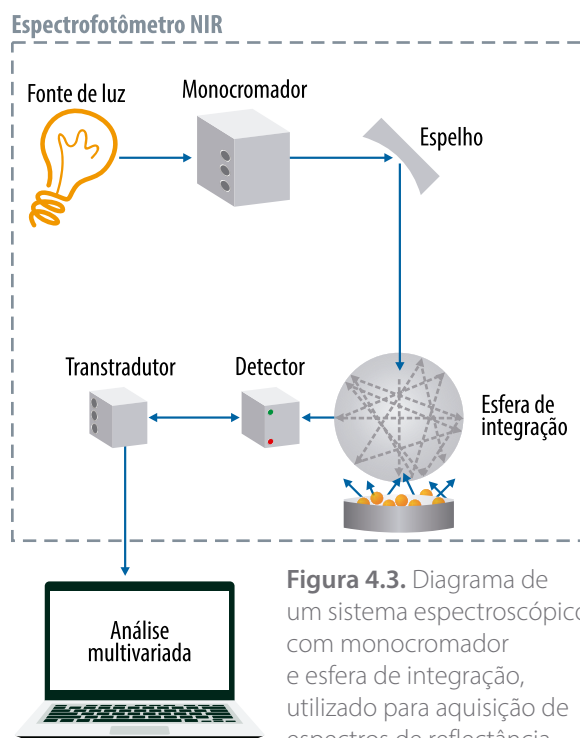


Figura 4.3. Diagrama de um sistema espectroscópico com monocromador e esfera de integração, utilizado para aquisição de espectros de reflectância difusa em amostras de solo.

associada à consolidação de bancos de dados espectrais robustos e ao avanço de dispositivos miniaturizados, tem ampliado significativamente o potencial uso dessa técnica em aplicações de rotina de análise em larga escala. As aplicações da espectroscopia infravermelha têm sido impulsionadas também por projetos nacionais estruturantes como de mapeamento e monitoramento de solos, como o PronaSolos, e por Ensaios de Proficiência, como o Programa de Análise de Qualidade de Laboratórios de Fertilidade², que a partir de 2024 passou a incluir a medição de carbono por NIR em seus ensaios de proficiência. Esse movimento, coordenado pela Embrapa, visa garantir padronização metodológica, controle de qualidade e validação interlaboratorial do uso da técnica em análises rotineiras.

Ao permitir análises rápidas e não destrutivas do solo, a espectroscopia NIR poderia integrar ferramentas de políticas públicas (como o Zoneamento

¹ Disponível em: www.specsolo.com.br/antiga_pg_specsolo_scan

² Disponível em: www.embrapa.br/solos/paqlf

Agrícola de Risco Climático – Zarc), contribuindo com dados mais exatos sobre o conteúdo de carbono do solo e favorecendo decisões mais seguras e sustentáveis quanto ao uso e manejo das terras agrícolas. Além disso, sua aplicação é altamente estratégica para o monitoramento e a verificação das práticas sustentáveis previstas no Plano ABC+, viabilizando o acompanhamento do potencial de mitigação de CO₂, através do conteúdo da matéria orgânica do solo (MOS) e dos estoques de carbono, indicadores-chave para uma agricultura de baixa emissão de carbono. Enfim, a tecnologia facilita o conhecimento sobre o estoque de carbono no solo e assim pode ser uma ferramenta que contribui para reduzir a exposição ao risco das culturas agrícolas e ajuda a incrementar a capacidade adaptativa e competitividade dos sistemas de produção em um ambiente cada vez mais dinâmico.

Em síntese, a espectroscopia infravermelha através da plataforma SpecSolo, representa uma revolução na forma como se realiza a análise de solos, promovendo uma transição rumo à sustentabilidade, digitalização e valorização do carbono no solo. Sua integração com metodologias modernas e políticas públicas nacionais contribui para posicionar o Brasil como importante ator no uso de tecnologias limpas e inteligentes para o monitoramento ambiental e o fortalecimento dos mercados de carbono, em favor da sociedade brasileira.

Soluções de inovação para monitoramento da densidade do solo

A densidade do solo (Ds) varia devido a diversos fatores, incluindo mineralogia do solo, distribuição e forma das partículas (efeito de empacotamento), além do uso e manejo da terra, topografia, drenagem e condições climáticas, que influenciam a acumulação de matéria orgânica, a distribuição do tamanho de poros, a agregação e a estrutura

do solo. Consequentemente, a Ds apresenta alta variabilidade espacial e temporal na paisagem e nas diferentes profundidades do solo.

Nas últimas duas décadas, tem havido um crescente interesse na predição da Ds, um parâmetro essencial para a quantificação dos estoques de carbono e nutrientes no solo, além de ser fundamental para a modelagem de diversos processos pedológicos. Uma abordagem alternativa, com custo significativamente inferior ao procedimento convencional de determinação da Ds, é o uso de modelos matemáticos de predição. Essa predição tem sido realizada com base em atributos do solo mais facilmente disponíveis. Alguns modelos já estão disponíveis e foram calibrados por ensaios desenvolvidos pela Embrapa e seus parceiros.

Outra abordagem potencial para contornar as dificuldades na coleta de amostras de solo para obter a Ds é o uso de sondas automáticas, sejam elas operadas por máquinas ou manualmente. Essa técnica está em testes em diferentes unidades de pesquisa da Embrapa com resultados promissores. O potencial dessa técnica será abordado na seção de Perspectivas Futuras.

Desenvolvimento de equações de pedotransferência

O conceito de pedotransferência (PTF) remete a métodos que “transferem” dados disponíveis para se estimar propriedades do solo ou outras variáveis difíceis de serem medidas, mas necessárias para modelagens ou avaliações de solos. As PTFs permitem estimar a Ds com base em outros atributos do solo, como granulometria (teores das frações areia, silte e argila), pH, soma de bases, capacidade de troca de cátions (CTC), teores de carbono orgânico, dentre outros. Os valores desses atributos podem ser obtidos por amostragens de solo obtidas por gradagem, dispensando a escavação de trincheiras.

Diversos estudos têm sido conduzidos para o desenvolvimento de PTFs, comumente utilizando como variáveis preditoras os teores de areia, silte, argila e teor de C, empregando distintos métodos de regressão linear e não linear e, mais recentemente, técnicas baseadas em aprendizagem de máquina. A acurácia na estimativa da Ds constitui um aspecto fundamental para a aplicação confiável em diferentes contextos, como a quantificação do estoque de carbono do solo, a avaliação da compactação do solo e na modelagem hidrológica, entre outros. Ao se utilizar estimativas de Ds obtidas por PTFs em substituição aos dados obtidos por métodos diretos, é essencial avaliar a acurácia do modelo preditivo empregado. A Tabela 4.2 apresenta uma síntese da literatura sobre PTFs desenvolvidas para a estimativa da Ds, destacando o alcance ou abrangência (local ou nacional), a acurácia associada, expressa pela raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE, do inglês *root mean square error*), bem como o tipo de modelo e variáveis preditoras utilizadas.

Modelos com abrangência local têm sido desenvolvidos para microbacias (Souza et al., 2016; Sevastas et al., 2018), classes de solo (Beutler et al., 2017; Cunha et al., 2017), regiões com características climáticas específicas (Al-Quinna; Jaber, 2013), biomas (Bernoux et al., 1998; Tomasella; Hodnet, 1998), e usos e coberturas do solo (Barros; Fearnside, 2015; Choudhury et al., 2023), entre outros. Em geral, os modelos desenvolvidos em escala nacional envolvem maior complexidade de relações entre as propriedades do solo e a Ds, em escalas mais amplas, que envolvem múltiplos usos da terra, diferentes domínios geomorfológicos e biomas. Outro ponto relevante é que métodos baseados em aprendizado de máquina apresentaram desempenho superior em comparação aos métodos convencionais de regressão, como regressão linear múltipla (MLR), regressão não linear múltipla (MNLR) e mínimos quadrados não linear (NLLS).

De modo geral, observa-se que, em solos de regiões temperadas, o carbono é a principal variável explicativa da Ds, sendo muitas vezes a única variável selecionada nas PTFs dessas regiões (Nanko et al., 2014; Abdelbaki, 2018). Por outro lado, em regiões tropicais, caracterizadas por solos muito intemperizados, a textura do solo apresenta maior relevância nos modelos preditivos da Ds, tendo o carbono como a segunda variável mais importante, como demonstrado nos estudos de Benites et al. (2007), Reis et al. (2024) e Santos et al. (2025). A principal limitação das PTFs que utilizam as variáveis granulométricas, COS e outras variáveis físico-químicas do solo é que essas variáveis são expressas em base gravimétrica, e capturam apenas parte dos efeitos sobre a Ds.

Uma abordagem promissora para contornar essa limitação consiste na incorporação de outras variáveis, tanto numéricas quanto categóricas, que agreguem conhecimento ao modelo preditivo por meio de informações relacionadas à estrutura do solo. Dentre as variáveis destacam-se a relação silte/argila, que tende a aumentar com a capacidade de agregação do solo; a relação argila/areia, associada à maior coesão e menor porosidade; e o teor de argila dispersa em água e o índice de floculação, cujos valores elevados indicam baixa estabilidade estrutural. Além disso, variáveis topográficas e relacionadas ao relevo, como declividade, altitude, índice topográfico de umidade, curvatura do terreno e orientação das encostas (aspecto), também influenciam a qualidade estrutural do solo, ao afetarem processos como erosão, redistribuição de partículas, acúmulo de matéria orgânica e variações no regime hídrico ao longo da paisagem.

A abordagem de uso de variáveis numéricas e categóricas em associação tem ganhado destaque nos últimos anos, conforme demonstrado em estudos como os de Santos et al. (2025). No entanto, para sua aplicação efetiva, é essencial dispor das coordenadas geográficas dos dados. Outro aspecto importante no desenvolvimento de modelos

Tabela 4.2. Síntese de trabalhos sobre o desenvolvimento de funções de pedotransferência para a densidade do solo, no Brasil e em outros países.

Trabalho	País	Alcance	Método ⁽¹⁾	RMSE ⁽²⁾	Variável preditora ⁽³⁾
Schillaci et al. (2021)	Itália	Local	ANN	0,07	arg, are, COS, pH, clima, relevo
Obidike-Ugwu et al. (2023)	Nigéria	Local	MLR	0,075	are, COS, q
Zheng et al. (2023)	China	Local	SVMR	0,08	arg, si, are, COS
Botula et al. (2015)	Congo	Local	k-NN	0,09	are, si, arg, COS, Fe, Al
Choudhury et al. (2023)	Índia	Local	ANN	0,09	are, si, COS
Gomes et al. (2017)	Brasil	Local	MLR	0,11	arg, COS, pH, SB, Al
Sevastas et al. (2018)	Grécia	Local	MNLR	0,11	arg, si, are, COS
Al-Qinna e Jaber (2013)	Jordânia	Local	MLR	0,13	are, COS
Botula et al. (2015)	Congo	Local	MLR	0,13	COS, Fe, Al
Souza et al. (2016)	Brasil	Local	RF	0,15	arg, COS, pH, SB, ambiente
Palladino et al. (2022)	Itália	Local	RF	0,16	arg, si, are, COS, pH, CaCO ₃ , relevo
Santos et al. (2025)	Brasil	Nacional	RF	0,12	arg, are, COS, clima, relevo, outras
Han et al. (2012)	China	Nacional	MLR	0,13	arg, COS, N
Ramcharan et al. (2017)	EUA	Nacional	RF	0,13	arg, are, COS, pH, ambiente, outras
Reis et al. (2024)	Brasil	Nacional	MLR	0,14	arg, are-fina, COS
Nanko et al. (2014)	Japão	Nacional	NLLS	0,14	COS
Boschi et al. (2015)	Brasil	Nacional	MLR	0,18	arg, are, COS, pH
Abdelbaki (2018)	EUA	Nacional	MLR	0,18	COS
Benites et al. (2007)	Brasil	Nacional	MLR	0,19	arg, COS, SB
Chen et al. (2024)	Europa	Nacional	RF	0,19	arg, si, COS, pH, N, clima, relevo
Heuscher et al. (2014)	EUA	Nacional	MLR	0,19	arg, si, COS, q
Beutler et al. (2017)	Brasil	Nacional	MLR	0,22	arg, COS

⁽¹⁾ ANN: Redes neurais artificiais; MLR: Regressão linear múltipla; SVMR: Regressão por máquina de vetores de suporte; k-NN: algoritmo de k vizinhos mais próximos; MNLR: Regressão não linear múltipla; RF: Floresta aleatória; NLLS: Mínimos quadrados não-lineares.

⁽²⁾ RMSE: *root mean square error*.

⁽³⁾ arg: argila; si: silte; are: areia; are-fi: areia fina; COS: carbono orgânico do solo; q: umidade do solo; Fe: ferro; Al: alumínio; SB: soma de bases; clima: variáveis climáticas; relevo: variáveis de relevo; ambiente: variáveis ambientais; outras: variáveis numéricas e categóricas adicionais; N: nitrogênio.

com aplicabilidade em escala nacional é a necessidade de um banco de dados amplo e representativo, que contemple a diversidade das principais classes de solo, classes texturais, biomas, zonas cli-

máticas e diferentes formas de uso e cobertura do solo, e, quando possível, o tempo de uso do solo, em especial de solos estruturados argilosos, que tendem a se compactar com o uso agrícola.

Soluções de inovação para monitoramento de fluxos de gases de efeito estufa na agricultura

A quantificação das emissões de GEE na agricultura é essencial para entender os impactos ambientais das atividades agropecuárias e para o desenvolvimento de estratégias de mitigação. No contexto das redes de pesquisa da Embrapa (*Fluxus*, *Saltus* e *Pecus*) e de outras iniciativas de pesquisa, o uso de câmaras estáticas manuais de coleta tem sido a principal solução técnica disponível até o momento para o monitoramento do fluxo de óxido nitroso (N_2O) e da volatilização de amônia (NH_3), seguindo critérios internacionais e garantindo a comparabilidade dos dados obtidos no Brasil com estudos globais.

No processo de determinação direta dos fluxos de GEE, a amostragem é realizada por meio de câmaras estáticas fechadas, um método aceito pela comunidade científica internacional desde que sejam observados critérios técnicos. Essas câmaras são instaladas no solo e capturam os gases emitidos ao longo do tempo. A coleta de amostras das câmaras ocorre em intervalos regulares, permitindo a análise da variação de concentração dos gases. As amostras de GEE coletadas normalmente são analisadas por cromatografia gasosa, utilizando detectores específicos para cada gás.

Mais recentemente, técnicas de medida de concentração de GEE por espectroscopia a laser têm sido aplicadas para mensurar dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O). A técnica tem como princípio geral a espectroscopia de absorção, ou seja, a interação entre a luz laser e as moléculas de gás, tendo em conta que os diferentes gases absorvem radiação em comprimentos de onda específicos. A técnica em si é comercial. A abordagem aqui se dará na adaptação dessas técnicas para o monitoramento contínuo do fluxo de GEE na agricultura.

Adaptação de câmaras estáticas para monitoramento da emissão direta em condições nacionais

Os principais aspectos do projeto das câmaras estáticas já foram detalhados em protocolos nacionais (Zanatta et al., 2014; Alves et al., 2017) e internacionais (Parkin; Venterea, 2010; Zaman et al., 2021). Os principais modelos de câmaras estáticas adaptados para uso em estudos no Brasil para medição direta de GEE podem ser observados na Figura 4.4.

A definição do formato da câmara e do material a ser utilizado na sua confecção geralmente está associada, pois procura-se adaptar materiais industrializados para facilitar a confecção, o manuseio no campo, baratear os custos, e, ao mesmo tempo, atender as especificações técnicas de confecção da câmara e da cultura a ser monitorada. Materiais baratos possibilitam aumentar o número de repetições no campo. Por outro lado, câmaras muito pesadas dificultam o manuseio no campo e, considerando a frequência de amostragem, necessitam de equipes com grande número de pessoas na execução das amostragens.

Os critérios a serem observados no desenvolvimento de projetos com câmaras estáticas são:

Dimensões e materiais: Devem ser construídas com materiais inertes aos gases medidos, como PVC ou alumínio, para evitar reações que alterem os resultados. A altura e o volume interno são otimizados para minimizar alterações ambientais dentro da câmara.

Ventilação controlada: Pequenos respiros (vents) garantem o equilíbrio de pressão interna sem alterar a concentração de gases.

Selamento adequado: A vedação entre base e topo pode ser feita com canaletas preenchidas com água ou borracha inerte, prevenindo vazamentos.



Figura 4.4. Tipos de câmaras e materiais disponíveis para a confecção: formato cilíndrico, com base em aço galvanizado e topo de PVC (A); formato cilíndrico, com base em aço galvanizado e topo de poliuretano recoberto com manta térmica (B); formato cilíndrico, com base e topo de PVC (C); formato retangular base em aço galvanizado e topo em polietileno (D); formato quadrado com base (E) e topo em aço galvanizado (F); formato retangular com base e topo em alumínio (G); formato retangular base em aço galvanizado (H); interior da câmara tipo retangular, ilustrando o posicionamento dos ventiladores na parte interna do topo (I); formato retangular base em aço galvanizado e topo em polietileno (J); formato retangular base (K) e topo em aço galvanizado (L).

Fotos: Josiléia Acordi Zanatta (A, B, J e L), Falberni De Souza Costa (C), Bruno José Rodrigues Alves (D, E, F e K), Cimélio Bayer (G) e Michely Tomazi (H e I).

Fonte: Adaptado de Zanatta et al. (2014)

Sistema de amostragem: Inclui portas de coleta conectadas a seringas ou frascos selados para posterior análise laboratorial.

Embora esse método seja amplamente utilizado, ele apresenta limitações, como a necessidade de amostragem manual e a possibilidade de distorções devido à influência das condições ambientais dentro da câmara. Partindo dessa dificuldade, pesquisadores da Embrapa Florestas em parceria com Universidade Tecnológica do Paraná desenvolveram um protótipo de equipamento semiautomático (Figura 4.5) capaz de realizar a obtenção das amostras diretamente em frascos evacuados após o fechamento das câmaras. O protótipo foi desenvolvido com base em um sistema embarcado controlando bombas e válvulas pneumáticas para a realização das coletas, controlado através de uma interface remota, em um aplicativo, para interações a distância via Bluetooth e facilidade no compartilhamento de dados obtidos. O sistema completo teve suas funcionalidades técnicas testadas em bancada e em campo (Figura 4.5), com resultados exitosos descritos em Libel et al. (2021).

As câmaras de coleta foram, até o momento, a principal solução técnica disponível para a mensuração dos fluxos de GEE na agricultura, garantin-

do a padronização e a comparabilidade dos resultados obtidos. Apesar das limitações operacionais e metodológicas, seu uso tem seguido protocolos científicos estabelecidos internacionalmente, assegurando a confiabilidade dos dados gerados. Avanços tecnológicos recentes já apontam para soluções mais automatizadas e eficientes, trazendo novas possibilidades para a inovação no monitoramento de GEE na agricultura.

Adaptação da técnica de espectroscopia a laser na medição de fluxos de gases de efeito estufa do solo

Existem diferentes técnicas embarcadas nos equipamentos de medição, baseadas na espectroscopia de absorção direta, que é a quantificação da atenuação de um feixe laser com comprimento de onda específico do gás a ser monitorado. Existem algumas variações de configuração como Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS), Cavity Attenuated Phase Shift Spectroscopy (CAPS) e Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy (OA-ICOS), em que a detecção da taxa de atenuação ocorre com a perda de energia de um pulso de laser con-

Fotos: Josiléia Zanatta

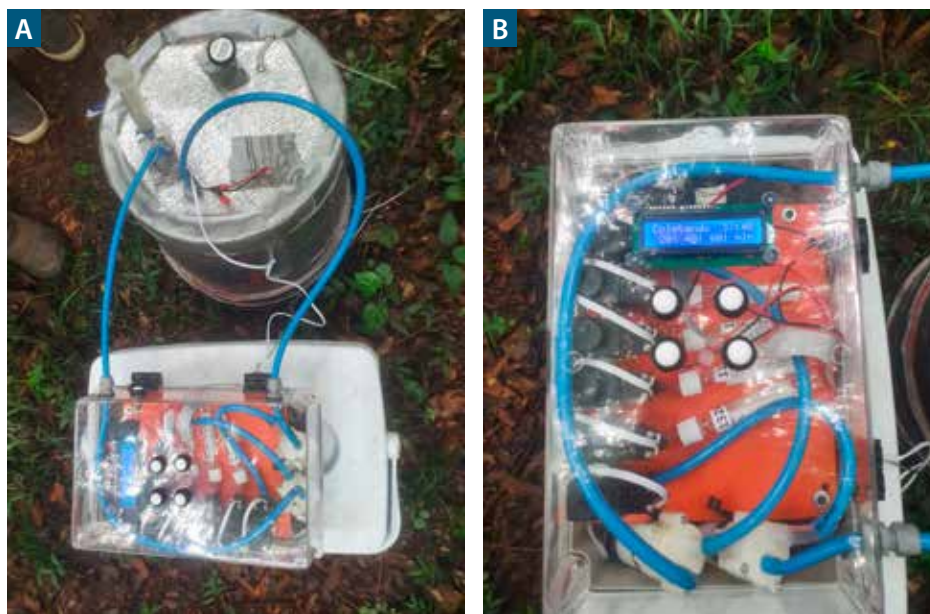


Figura 4.5. Protótipo de sistema semiautomático de coleta de amostras de ar via câmaras estáticas, para monitoramento de fluxo de gases de efeito estufa.

finado em uma cavidade óptica de alta refletividade, por onde o gás aspirado do ambiente está presente. O equipamento registra a intensidade da luz antes e depois de passar pelo gás. A diferença de intensidade (atenuação) é proporcional à concentração do gás no caminho óptico.

Uma grande vantagem da espectroscopia laser em relação à cromatografia gasosa é a alta precisão, mesmo em concentrações muito baixas do GEE, como no caso do óxido nitroso (N_2O). Além da alta precisão nas medidas, o tempo de resposta é rápido e a capacidade de operação no modo portátil é especialmente útil para estudos em áreas distantes, pois dispensa o armazenamento e transporte de amostras (Figura 4.6) ou mesmo em ensaios que requerem medidas muito frequentes (Figura 4.7). Nesse caso, a câmara de incubação funciona no modo dinâmico fechado, ou seja, o ar circula pela câmara passando pelo equipamento, que registra o aumento de concentração dos GEE com o tempo. O coeficiente angular da reta, ajustada aos dados de tempo e concentração, resulta no fluxo do gás emitido para a atmosfera.

Os modelos com múltiplos canais podem ser empregados para o monitoramento de um grande

número de tratamentos ao mesmo tempo. No caso do sistema destacado na Figura 4.7, 15 pontos de amostragem são monitorados a cada 2 horas (Ibarr et al., 2021). Além da abrangência espacial, a robustez dos valores de concentração obtidos é sem dúvida a maior vantagem desses sistemas a laser, pois, a cada 2 segundos, é realizada uma medida da concentração do gás. A concentração média do gás de interesse é o resultado de no mínimo 30 medidas. Essa robustez permite estimar o fluxo com menor número de tempos de coleta (Ibarr et al., 2021).

Em geral, os equipamentos com essa técnica são operados em sistemas dinâmicos. No modo estático, o volume de câmara deve ser superior a 50 L para evitar efeitos significativos de pressão negativa, pois uma desvantagem da técnica é a necessidade de amostras com maior volume para análise, até 50 vezes maior do que os utilizados em cromatografia gasosa. A sensibilidade a elevadas temperaturas é um problema para ambientes tropicais, que, em rotinas longas no campo, especialmente no verão, pode implicar interrupções frequentes por sobreaquecimento e necessidade de desligamento. A umidade do ar também pode representar um problema, porém é contornável

Fotos: Bruno Alves



Figura 4.6. Analisador do tipo Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy (OA-ICOS) em monitoramentos de fluxos de óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4) do solo plantado com soja, em casa de vegetação (A) e no campo (B), ambos na Embrapa Agrobiologia.



Figura 4.7. Analisador do tipo Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS), em monitoramentos de fluxos de gases de efeito estufa (GEE) do solo com espécies florestais em casa de vegetação (A) e no campo (B), ambos na Embrapa Florestas.

com a utilização de filtros na entrada do ar aspirado do ambiente externo. Os equipamentos têm custo elevado (> US\$ 180.000,00), sendo talvez o que mais limite sua ampla utilização no País. Por outro lado, a robustez dos equipamentos, que praticamente não demandam manutenção, além de dispensar o uso de gases de calibração, reduz bastante os custos de operação das pesquisas. A assistência técnica ainda é muito incipiente no País.

O modo de bancada é uma opção interessante que permite operar o equipamento de forma semelhante a um cromatógrafo de gases, evitando expor a poeiras, alta umidade e temperaturas. Tem sido usado na Embrapa Agrobiologia para estudos de fluxos de N_2O e CH_4 do solo pela técnica de câmaras estáticas fechadas. Neste caso, a amostra do interior da câmara é retirada a cada tempo de incubação, o que é feito com uma seringa de 200 mL acoplada a uma sacola do tipo Tedlar (sacolas de material plástico altamente impermeável para amostras ambientais), sendo um volume suficiente para o analisador laser do tipo AO-ICOS (Figura 4.8). As sacolas substituem as seringas e frascos de cromatografia (vials ou headspace) frequentemente usados na coleta e armazenamento dos gases para análise. O custo das sacolas, no entanto, é elevado (~US\$ 50,00 por unidade), embora sejam reutilizáveis.

A experiência com o uso dos equipamentos baseados na espectroscopia a laser mostra que se ganha muito em sensibilidade e precisão, sendo possível medir facilmente os fluxos de gases do solo, mesmo que muito pequenos. Essa condição permite reduzir o número de amostragens durante a incubação, e até mesmo o tempo entre amostragens, agregando eficiência na experimentação.

Soluções de inovação para monitoramento da emissão de gases de efeito estufa de animais

A pecuária tem sido associada a elevadas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Ocasionalmente, em discussões realizadas em torno da temática sobre mitigação de GEE em sistemas de produção de ruminantes, parece incompatível a relação entre eficiência alimentar, adequado desempenho animal e emissões de GEE. Sob diferentes formas, no entanto, é possível desenvolver sistemas de produção sustentáveis e, ao mesmo tempo, ter lucro e produção de carne e leite que atendam às exigências do consumidor e que



Fotos: Bruno Alves

Figura 4.8. Sistema de transferência de ar da câmara para sacola Tedlar, utilizando uma seringa de 200 mL.

Nota: Realiza-se uma aspiração inicial de 10 mL para lavagem, seguida de aspiração e transferência de 200 mL do ar da câmara para a sacola. A sacola é levada ao laboratório e uma a uma são conectadas ao analisador laser, sendo a análise das concentrações de óxido nítrico (N_2O) e metano (CH_4) realizadas em aproximadamente 1,5 minutos.

garantam a lucratividade ao produtor rural, conforme espécie e categoria animal.

Nessa perspectiva, duas tecnologias são especialmente importantes: a prova de proficiência de emissão de CH_4 em bovinos e os serviços de mensuração de GEE em pequenos ruminantes através de câmaras respirométricas.

Prova de proficiência de emissão de metano entérico de bovinos

A tecnologia, denominada Prova de Emissão de Gases (PEG), foi lançada pela Embrapa Pecuária Sul e visa medir a emissão do gás metano emitido pelos bovinos de raças europeias. O intuito é que

a pecuária possa utilizar essas informações para ajudar na seleção de reprodutores, unindo ganho de peso a produção com menor emissão de GEE. A PEG é uma ferramenta para melhorar a eficiência da pecuária e reduzir as emissões de GEE, e faz parte de um esforço maior para entender e reduzir o impacto da pecuária para o clima, contribuindo para solucionar um dos desafios da pecuária em termos de sustentabilidade. A ferramenta serve para identificar animais com menor emissão de metano, o que pode ser um fator importante na seleção genética, contribuindo indiretamente para a criação de rebanhos com maior eficiência na produção e menor impacto ambiental.

A metodologia de avaliação da emissão de metano entérico passou a integrar o serviço que é oferecido pela Embrapa Pecuária Sul na avaliação de desempenho e eficiência alimentar. A avaliação é realizada com reprodutores das raças europeias como Angus, Charolês, Braford e Hereford, que todos os anos são enviados à Unidade de Pesquisa. O serviço usa a técnica do gás traçador hexafluoreto de enxofre (SF_6) conforme descrito em protocolo estabelecido pela Embrapa em anos anteriores (Berndt et al., 2014). O teste busca identificar

os animais com menor emissão de metano para cada quilo de alimento consumido e por quilo de peso vivo produzido. O metano entérico é um dos principais GEE emitidos pela pecuária, e a pesquisa visa à redução desse impacto ambiental (Genro et al., 2023).

Além de aliar a emissão de metano com as provas de avaliação a campo de eficiência alimentar, a Embrapa Pecuária Sul pretende realizar uma validação genética desta característica, contribuindo com o maior entendimento da produção de metano pelos animais. A produção pecuária é a principal fonte de emissão de metano no Brasil, dessa forma, do ponto de vista da competitividade nacional, reduzir a emissão de metano na produção pecuária e melhorar os índices de eficiência alimentar implicam diretamente melhoria da imagem do País. Os resultados preliminares indicam menor emissão por animal por ano em relação ao preconizado pelos guias do IPCC (Genro et al., 2023), gerando uma qualificação dos animais e contribuição direta à descarbonização da pecuária brasileira.

Serviço de mensuração de gases de efeito estufa em pequenos ruminantes no Laboratório de Respirometria do Semiárido (Laresa)

No contexto da mudança climática, os ensaios de avaliação de metabolismo de ruminantes, através da respirometria, contribuem também para a mensuração da emissão de GEE, permitindo o desenvolvimento de técnicas de manejo alimentares eficientes para mitigação desses gases em sistemas de produção pecuários, subsidiando o desenvolvimento de rações e suplementos que propiciem a máxima eficiência alimentar.

A mensuração dessas emissões, utilizando câmaras respirométricas, ocorre em períodos de 21–24 horas por animal, constituindo o padrão ouro que permite, inclusive, calibrar outros equipamentos, visando ao uso de outras técnicas também aces-

síveis e escaláveis para a coleta de dados de campo. Na Embrapa Caprinos e Ovinos, essa técnica vem sendo estudada e aprimorada há pelo menos 16 anos. Inicialmente, os esforços foram direcionados para a calibração dos equipamentos garantindo medições adequadas, especialmente de metano entérico e dióxido de carbono. Modelos apropriados vêm sendo desenvolvidos continuamente, permitindo a avaliação de pequenos ruminantes a pasto. Outra abordagem inclui o uso de câmaras respirométricas portáteis, que podem ser transportadas para o campo, além da estratégia de deslocamento dos animais em horários específicos do dia até os locais onde estão instaladas as câmaras respirométricas, permitindo medições em períodos curtos de tempo (30 a 60 minutos).

Sob a perspectiva econômica, essa tecnologia tem o potencial de transformar o setor ao viabilizar novas práticas de alimentação, proporcionando benefícios financeiros aos produtores por meio da redução de custos e do aumento da eficiência produtiva. Dietas mitigadoras de GEE em associação a raças selecionadas para eficiência alimentar e menor emissão de GEE, por exemplo, podem ser aplicadas, na prática, por produtores de pequenos ruminantes, técnicos de campo e nutricionistas. Em ensaio experimental realizado na Embrapa Caprinos e Ovinos, foi possível mensurar que, a partir do uso de dietas com bioaditivos que manipulam a fermentação ruminal, houve a redução de 52% na emissão de CH_4 em relação a dietas tradicionais. É possível, portanto, a partir das avaliações feitas com essa metodologia, o desenvolvimento de sistemas pecuários mais produtivos e sustentáveis, que ajudem a manter os ecossistemas de forma adaptável à mudança do clima e que melhoraram progressivamente a eficiência de uso da terra e do solo. As pesquisas realizadas no Laresa resultaram em publicações inéditas, na tramitação de patente específica sobre utilização de bioaditivos mitigadores de GEE, oportunizando a interação com empresas nacionais e internacionais produtoras de insumos alimentares e bioaditivos mitigadores de GEE para ruminantes (Rogério et al.,

2019a, 2019b, 2022; Costa et al., 2020, 2021; Oliveira et al., 2020; Alves et al., 2024).

A instrumentação e os métodos desenvolvidos foram aplicados em experimentos de campo de longa duração da Embrapa e em áreas da iniciativa privada, gerando resultados altamente promissores. Os avanços da pesquisa e a crescente demanda do mercado por análises de GEE (metano entérico e CO₂) impulsionaram o lançamento do serviço oficialmente, que será realizado na *VICTAM LATAM 2025*³, maior evento (feira e congresso internacional) de tecnologia, equipamentos, ingredientes e aditivos para a cadeia produtiva com foco nas indústrias de nutrição animal e de processamento de grãos. Algumas limitações do uso da técnica podem ocorrer relativas às variações individuais, mas que são contornáveis pela necessidade de repetições mais numerosas, dependendo da variabilidade entre leituras.

O serviço de mensuração de GEE em pequenos ruminantes tem contribuído significativamente para a competitividade nacional no setor agropecuário. No Brasil, são reduzidas as estruturas e serviços que realizam esse tipo de mensuração. Ao ofertar o serviço, a Embrapa disponibiliza o seu ambiente de pesquisa qualificado, para que, de fato, sejamos meio para mensurar as reais emissões da pecuária, a adoção de práticas sustentáveis de produção, a máxima eficiência alimentar e produtiva, e reduzindo os riscos para o produtor e para a indústria.

O desenvolvimento de modelos matemáticos específicos para quantificação de emissões traz mais segurança e reduz riscos para a atividade, resultando em agregação de valor e incremento da competitividade. Para a indústria, é a garantia de que os produtos apresentam mais sustentabilidade. Aos produtores, permite que tenham maior conhecimento sobre sua produção, gerando receitas adicionais e possibilitando a entrada em novos mercados que valorizam práticas agrícolas

sustentáveis, fortalecendo a posição do Brasil no mercado global.

O serviço pode ser percebido pelos atores envolvidos como inovação, capaz de fornecer informações robustas, subsidiadas pela pesquisa qualificada, e que possam esclarecer que os sistemas pecuários brasileiros trazem consigo a característica da sustentabilidade ambiental, a partir de estratégias de manejo voltadas para a máxima eficiência e mitigação de GEE. Isso se traduz, notadamente, pela geração de índices específicos de mitigação de GEE por produto animal produzido (quilo de carcaça, litro de leite, por exemplo), permitindo a rastreabilidade das iniciativas de produção sustentável.

Soluções de inovação para monitoramento do carbono do componente arbóreo

Os inventários florestais tradicionais envolvem a medição de parâmetros biofísicos das árvores em parcelas amostrais, como o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura total (Corte et al., 2020). Esses dados são então utilizados em equações alométricas específicas para espécies ou grupos de espécies para estimar a biomassa de cada árvore, que é posteriormente extrapolada para a área total (Machado et al., 2025). Embora os inventários de campo possam fornecer estimativas altamente precisas em escalas locais, eles são dispendiosos, demandam muito tempo e são trabalhosos, especialmente para estudos que abrangem grandes áreas ou regiões de difícil acesso (Corte et al., 2020; Costa et al., 2021). No Brasil, o Inventário Florestal Nacional (IFN) utiliza essa metodologia para obter informações sobre os recursos florestais em nível nacional. Estudos como o de Machado et al. (2025) estabeleceram equações de biomassa e quantificaram os estoques de biomassa e carbono em florestas subtropicais no Paraná, utilizando

³ Disponível em: www.embrapa.br/caprinos-e-ovinos/sead.

dados alométricos coletados em campo e equações preexistentes para árvores maiores.

A quantificação dos estoques de carbono deriva muitas vezes das estimativas de biomassa. Assim, a biomassa aérea (Aboveground Biomass – AGB) em ecossistemas florestais e sistemas agroflorestais é fundamental para a compreensão do ciclo global do carbono, a avaliação da saúde dos ecossistemas, a determinação da produtividade primária e o monitoramento da biodiversidade (Sinha et al., 2016; Machado et al., 2025).

Técnicas de sensoriamento remoto para estimativa de biomassa

A dinâmica de crescimento e mortalidade, assim como perdas de biomassa por incêndios ou desmatamento, diretamente influenciam as concentrações de GEE na atmosfera (Costa et al., 2021; Machado et al., 2025). A estimativa da biomassa aérea, especialmente em larga escala e de forma repetida, é crucial para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e adaptação à mudança climática no setor agrícola e florestal, como o manejo florestal sustentável, o reflorestamento e a implementação de sistemas de integração como o lavoura-pecuária-floresta (ILPF) (Corte et al., 2020; Lima et al., 2022).

O sensoriamento remoto possibilita adquirir dados sobre a vegetação em escalas espaciais e temporais muito maiores, superando algumas das limitações dos inventários de campo (Costa et al., 2021; Lima et al., 2022). Diferentes tipos de sensores e plataformas podem ser utilizados para estimar a biomassa aérea, incluindo sensores ópticos passivos, como os presentes nos satélites das séries Landsat e Sentinel-2, e sensores ativos, como o Light Detection and Ranging (LiDAR) e o Radio Detection and Ranging – RADAR. Dados ópticos multiespectrais permitem o cálculo de índices de vegetação (como o NDVI, SAVI e EVI) que estão relacionados à densidade da vegetação, à cobertura do dossel e à biomassa (Ceddia et al., 2017;

Zhou et al., 2022; Bartsch et al., 2025). Minihoni et al. (2021), em um estudo realizado em áreas agrícolas no sudeste do Brasil, demonstraram que a análise multitemporal de índices espectrais derivados de imagens Sentinel-2 pode ser utilizada para avaliar o carbono orgânico do solo e, indiretamente, fornecer informações sobre a biomassa da vegetação. No entanto, a estimativa direta da biomassa aérea utilizando apenas dados ópticos pode ser limitada pela saturação do sinal em áreas de alta biomassa e pela sensibilidade às condições atmosféricas (Corte et al., 2020). Embora LiDAR e RADAR sejam semelhantes no princípio básico (envio e recepção de pulsos de energia), elas utilizam tecnologias distintas e possuem características diferentes.

O LiDAR pode fornecer informações detalhadas sobre a altura das árvores, a estrutura do dossel, a densidade da vegetação e o volume da madeira, parâmetros que estão fortemente correlacionados com a biomassa (Costa et al., 2021). Estudos conduzidos no Brasil, como o de D'Oliveira et al. (2020) na Amazônia e o de Machado et al. (2025) em florestas subtropicais, evidenciam o potencial do LiDAR aerotransportado e embarcado em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs ou popularmente conhecidos como drones) para estimar a biomassa aérea com alta precisão. Machado et al. (2025) utilizaram equações alométricas e dados de inventário florestal para validar estimativas de biomassa obtidas com LiDAR. Em ecossistemas de savana tropical (Cerrado), Costa et al. (2021) e Machado et al. (2025) demonstraram a capacidade do LiDAR embarcado em VANTs para estimar a biomassa aérea total (incluindo árvores, arbustos e vegetação rasteira), destacando a importância dessa tecnologia para o monitoramento do carbono.

A combinação de dados de sensoriamento remoto óptico e LiDAR pode superar as limitações de cada técnica individualmente, fornecendo estimativas de biomassa aérea mais precisas e robustas (Zhang et al., 2019; Petropoulos et al., 2025). A integração de informações sobre a superfície do dossel, obtidas por sensores ópticos, com da-

dos estruturais da vegetação, fornecidos pelo LiDAR, permite uma caracterização mais completa da biomassa (Zhang et al., 2019). Kulawardhana et al. (2014) e Zhang et al. (2019) demonstraram que modelos de regressão múltipla que utilizam variáveis combinadas de LiDAR e índices de vegetação multiespectrais apresentam melhor desempenho na predição da biomassa vegetal do que modelos baseados em apenas uma das fontes de dados.

A Embrapa tem contribuições consistentes para a estimativa de biomassa aérea em florestas tropicais amazônicas utilizando dados de LiDAR aéreo e de VANT, com contribuições que abrangeram metodologias inovadoras para inventário florestal na Amazônia (D'Oliveira et al., 2020) e também em outros biomas (Dalla Corte et al., 2022). Um exemplo disso é o Netflora, desenvolvido pela Embrapa, que utiliza algoritmos de IA treinados em um banco de dados de 40 mil hectares mapeados por drones para semiautomatizar o planejamento e a execução de inventários florestais de precisão e espacializar emissões de carbono em diferentes usos da terra na Amazônia. O Netflora fornece um protocolo para a aquisição de dados de drone para a detecção de espécies florestais e treinamento de algoritmos de IA de acordo com calendário fenológico para o reconhecimento de espécies florestais por meio de ortofotos. Dessa forma, fortalece a automação nos inventários iniciais e amplia as capacidades de monitoramento de biomassa aérea e estoques de carbono (Cunha et al., 2019; Queiroz et al., 2023) em sistemas de manejo florestal de precisão.

Para converter a biomassa aérea em estoques de carbono, geralmente se assume que uma proporção fixa da biomassa seca, tipicamente em torno de 50%, é composta por carbono (Machado et al., 2025). Assim, as estimativas de AGB (em toneladas por hectare ou gigagramas) podem ser multiplicadas por um fator de conversão para obter os estoques de carbono equivalentes. Machado et al. (2025) estimaram os estoques de carbono em florestas subtropicais do Paraná utilizando essa abordagem.

A estimativa da biomassa de raízes (BGB) é mais desafiadora devido à dificuldade de observação direta do subsolo. Tradicionalmente, a BGB é estimada utilizando fatores de proporção raiz-par-te aérea (R), que são multiplicados pela AGB para obter uma estimativa da biomassa subterrânea (Costa et al., 2021). Os fatores R podem variar amplamente dependendo da espécie, da idade da planta, das condições ambientais e do tipo de ecossistema (Costa et al., 2021). A precisão das estimativas de BGB baseadas em fatores R é, portanto, altamente dependente da disponibilidade de fatores específicos e representativos para a área de estudo. Alguns estudos têm buscado estabelecer relações empíricas entre parâmetros da parte aérea, como DAP, altura, área de copa, e a biomassa de raízes utilizando métodos destrutivos ou técnicas como o GPR (Adão et al., 2025), mas a generalização dessas relações ainda é um desafio. Basuki et al. (2009) e Machado et al. (2025) desenvolveram equações alométricas para estimar a biomassa acima e abaixo do solo em florestas tropicais de baixa altitude, demonstrando a complexidade da relação entre os componentes aéreo e subterrâneo.

Em relação às vantagens do sensoriamento remoto e das abordagens combinadas (óptico e LiDAR) sobre os inventários florestais tradicionais, destacam-se:

Cobertura espacial extensiva: Contribui para a avaliação da biomassa em grandes áreas, incluindo regiões remotas e de difícil acesso.

Repetibilidade e monitoramento temporal: Possibilita o acompanhamento das mudanças na biomassa ao longo do tempo em resposta a eventos naturais (crescimento, incêndios, tempestades) ou atividades humanas (manejo, desmatamento).

Redução de custos e tempo: Pode ser mais eficiente em termos de tempo e custo em comparação com a coleta intensiva de dados de campo em grandes áreas.

Informações estruturais detalhadas (LiDAR):

Fornece dados sobre a altura e a estrutura vertical da vegetação, que estão fortemente relacionadas à biomassa.

Também existem limitações e dificuldades associadas ao uso do sensoriamento remoto na estimativa da biomassa aérea, que serão tratadas na perspectiva futura.

A utilização de técnicas de sensoriamento remoto, especialmente o LiDAR e a combinação de dados ópticos e LiDAR, representa um avanço significativo na coleta de dados para a estimativa da biomassa aérea e, conseqüentemente, dos estoques de carbono em componentes arbóreos. Essas abordagens oferecem a escalabilidade e a repetibilidade necessárias para o monitoramento do carbono em larga escala, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias eficazes de adaptação e mitigação da mudança climática na agricultura e em ecossistemas florestais, incluindo o contexto brasileiro (Costa et al., 2021; Minihoni et al., 2021; Machado et al., 2025). No entanto, é fundamental reconhecer as limitações e investir no desenvolvimento de metodologias robustas para a calibração, validação e integração dessas técnicas com dados de campo para obter estimativas cada vez mais precisas e confiáveis da biomassa aérea e subterrânea.

Família SIS

A família SIS é um conjunto de softwares de apoio ao manejo florestal de espécies introduzidas ou exóticas. Os softwares de manejo florestal são desenvolvidos desde 1988 pela Embrapa, inicialmente para monocultivos e, desde 2016, também para ILPF. Atualmente, são 25 softwares amplamente utilizados pelo setor florestal brasileiro. Com os programas é possível fazer prognoses de produção de madeira no presente e em condições futuras, para cada condição de clima e solo, efetuar análises econômicas e, depois, levar ao campo a melhor alternativa de plantio. Os programas possibilitam simular como o plantio florestal

cresce e produz, conforme os regimes de manejo que o próprio usuário indica, bem como calcular o carbono capturado pelas árvores.

Os modelos foram criados a partir de dados de inventários contínuos e experimentos desenvolvidos pela própria Embrapa e por empresas florestais, que disponibilizaram as bases de dados de inventários do crescimento e produção de suas florestas e testaram os softwares gerados. Programados na linguagem Delphi, os softwares são denominados por “SIS” seguido pelo nome popular do gênero ou espécie contemplada. Os softwares contemplam espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, além de acácia-negra, araucária, bracinga, cedro-australiano, mogno-africano e teca. Eles fornecem informações que permitem otimizar a produção e aumentar a renda do produtor.

Diferentemente de culturas agrícolas, cada povoamento exige um manejo específico para otimizar a produção da floresta. As práticas de desbastes de diferentes tipos, intensidades e épocas, e variações na idade do corte final podem afetar a produção. O efeito da prática também pode variar em função de fatores como o objetivo industrial da produção, a qualidade do local (solo, clima), o material genético, o espaçamento e a densidade de plantas. Se um destes fatores for alterado, o regime ideal de manejo muda e, assim, o potencial produtivo da floresta. O desbaste é uma das práticas mais importantes na produção florestal. A sua importância decorre da relação direta com o crescimento das árvores. À medida que as árvores crescem em um reflorestamento, aumenta a competição entre elas por água, luz e nutrientes. Por isso, são realizados desbastes que visam reduzir o excesso de competição. Os programas SIS permitem simular os efeitos dos desbastes e testar qualquer regime de manejo que se deseja aplicar nos povoamentos. Para operacionalizar os simuladores “SIS”, o usuário fornece os dados de inventário da floresta e os softwares preveem o crescimento e produção, indicando o quanto de madeira a floresta produz, em qualquer idade.

A tecnologia apresentada auxilia na definição de tratamentos silviculturais do tipo poda, desbaste imediato ou futuro, ou permanência até a colheita final da floresta, considerando fatores e parâmetros que levam a otimização da produção florestal e da renda dependendo do objetivo. Dessa forma, fica evidente que a tecnologia impulsiona a eficiência da produção florestal, assegurando a competitividade na geração de produtos madeireiros provenientes da floresta. A utilização dos softwares para otimizar o manejo florestal contribui para a sustentabilidade do setor, evitando o desperdício de recursos e promovendo a gestão eficiente dos recursos naturais.

Outro aspecto importante é que a tecnologia auxilia na redução do risco agrícola, pois a simulação permite criar cenários considerando o tipo de solo e clima. Nessa condição, é possível relacionar a produção da floresta, os investimentos em técnicas e tratamentos silviculturais de acordo com a capacidade de suporte do ambiente. Essa silvicultura de precisão possibilita conduzir a floresta com bases científicas visando o aproveitamento adequado do sítio e maximização da renda.

A sociedade enxerga os programas SIS de forma positiva, principalmente no que se refere à sua utilidade para o planejamento estratégico e manejo florestal. Os softwares SIS auxiliam os produtores a tomarem decisões sobre plantios, desbastes e colheitas, otimizando a produção e aumentando a renda. Anualmente são 4 mil downloads dos softwares da família SIS. A Embrapa, responsável por esses softwares, enfatiza a importância da sua facilidade de uso e a capacidade de simular diversos cenários, permitindo que os produtores analisem diferentes estratégias de manejo florestal.

Perspectivas futuras

Diante dos desafios impostos pelas mudanças do clima, intensificadas pela emissão de GEE, é crucial para o Brasil e para o setor produtivo monitorar e

quantificar essas emissões e também o carbono armazenado em diferentes compartimentos do ambiente. O Brasil, com seu vasto território e forte setor agropecuário, tem um papel importante tanto na emissão quanto na mitigação dos GEE. Para cumprir seus compromissos internacionais, como o Acordo de Paris, e para que empresas e produtores rurais possam melhorar suas práticas e até serem recompensados por ações sustentáveis, é fundamental conseguir medir e monitorar o armazenamento de carbono no solo e nas florestas, e o quantitativo da emissão e da remoção de GEE, especialmente na agricultura.

A coleta de dados de campo para isso, em um país do tamanho do Brasil, é uma tarefa enorme. Para enfrentar esse desafio, a Embrapa e seus parceiros têm trabalhado no desenvolvimento e adaptação de técnicas e instrumental que sejam mais acessíveis e possam ser aplicados em larga escala. O objetivo é coletar dados de maneira mais eficiente e a um custo reduzido em comparação aos métodos tradicionais, que frequentemente exigem grande esforço, alta qualificação e podem ser invasivos. Embora os avanços tenham sido significativos, ainda há desafios a serem superados e áreas que precisam de melhorias.

Embora essas novas técnicas tenham avançado significativamente, ainda há aspectos que devem ser refinados ou aprimorados para que o monitoramento dos estoques de carbono e fluxos de GEE no campo, juntamente com outras variáveis essenciais, se torne completamente escalável, eficiente e reprodutível, permitindo a geração de métricas precisas em todo o País.

No que diz respeito ao monitoramento do carbono no solo, que é um componente tão importante quanto o carbono na vegetação, técnicas inovadoras como a plataforma digital AgLIBS e a plataforma SpecSolo representam um grande passo. Elas prometem análises mais rápidas e baratas, sem o uso de reagentes químicos e com menor geração de resíduos, facilitando a criação de mapas de carbono e nutrientes. A aceitação

dessas técnicas para certificar créditos de carbono em mercados voluntários é um passo importante, mas a padronização e validação em larga escala continuam sendo um trabalho contínuo. A integração com outros sistemas para gerar informações em tempo real, principalmente no caso da AgLIBS, como o conceito de um “rover agrícola” autônomo, ainda é uma perspectiva futura a ser consolidada. O “rover agrícola” seria capaz de transitar pelo campo monitorando o solo em tempo real e conectando essas informações diretamente com as operações agrícolas. Isso ajudaria a usar os insumos de forma mais inteligente, trazendo benefícios econômicos e ambientais.

Uma das principais perspectivas futuras para o monitoramento do carbono no solo e da biomassa de raízes é a integração de dados de sensoramento remoto, como RADAR/SAR e GPR, com modelos de aprendizado de máquina para melhorar a precisão da estimativa. O desafio é refinar os modelos para superar as complexas interações entre o sinal e outros fatores, como umidade do solo, e validar a precisão do GPR para estimar a biomassa de raízes. O GPR tem limitações de profundidade de penetração em solos argilosos ou úmidos, e a interpretação dos dados requer conhecimento especializado. A estimativa da biomassa de raízes com GPR ainda está em desenvolvimento. A integração desses dados com outras informações, usando aprendizado de máquina, é vista como um caminho para melhorar a precisão.

Outro ponto crucial para a quantificação do estoque de carbono no solo é a determinação da sua densidade. Os métodos tradicionais para medir a densidade são trabalhosos, limitando sua aplicação em grandes áreas. Uma alternativa promissora são as equações de pedotransferência (PTFs), que permitem estimar a densidade a partir de outras características do solo mais fáceis de obter, como granulometria (areia, silte, argila) e teor de carbono. Embora modelos baseados em aprendizado de máquina mostrem bom desempenho, um aspecto a ser aprimorado é a incorporação de va-

riáveis que capturam melhor os efeitos da estrutura do solo e das condições da paisagem (como relevo e clima), que também influenciam a densidade. Além disso, o desenvolvimento de PTFs que sejam precisas em nível nacional, considerando a enorme diversidade de solos do Brasil, é um desafio complexo que exige grandes bancos de dados e métodos avançados de processamento. Sondas automatizadas para a coleta de amostras de solo indeformadas também estão sendo testadas como uma forma de agilizar a determinação da densidade do solo, evitando a necessidade de cavar trincheiras. Embora essas sondas tenham grande potencial para substituir métodos tradicionais e permitir a coleta em larga escala, ainda são necessários estudos sistemáticos para validar sua precisão e correspondência com os métodos padrão em diferentes tipos de solo, condições de umidade e usos agrícolas.

Para o monitoramento dos fluxos de GEE liberados pelo solo na agricultura, as câmaras estáticas são a técnica mais utilizada globalmente. Contudo, com elas a coleta em campo é bastante complexa, exige muita mão de obra e limita o número de medições e a frequência de monitoramento, o que dificulta estudos mais abrangentes no tempo e no espaço. Sistemas semiautomáticos para coleta de amostras foram desenvolvidos para aumentar a capacidade de coleta no campo. A técnica de espectroscopia a laser para medição de GEE no solo permite respostas rápidas e operação portátil, mas é sensível a altas temperaturas e necessita de volumes de amostra maiores que a cromatografia gasosa. Além disso, a assistência técnica para equipamentos baseados em espectroscopia a laser ainda é incipiente no Brasil.

A mensuração de emissões de GEE de animais, como o metano entérico de bovinos e pequenos ruminantes, também apresenta desafios em termos de escala. Embora as câmaras respirométricas sejam consideradas o “padrão ouro” para medições precisas, elas são trabalhosas e restritas à pequena escala. Tornar essa mensuração acessível

e escalável para um grande número de animais e para uso direto nas propriedades rurais ainda é um obstáculo. A disponibilidade de serviços qualificados para essa mensuração já começa a ser possível no país, por meio da técnica do gás traçador SF₆. É preciso ampliar esse tipo de serviço e os ambientes em que esse seja ofertado, buscando abranger todas as principais condições de sistemas de produção presentes no país e de categorias de animais, raças, idade, entre outros.

Por fim, a quantificação do carbono armazenado em componentes arbóreos, essencial para entender o ciclo do carbono, também enfrenta desafios de escala. Os inventários florestais tradicionais, embora precisos localmente, são caros e lentos para grandes áreas. O sensoriamento remoto, incluindo LiDAR e imagens de satélite, oferece uma alternativa mais eficiente em termos de tempo e custo para monitorar biomassa em larga escala. No entanto, há limitações como a saturação de sinal em áreas densas (em dados ópticos) e o custo da aquisição e processamento de dados LiDAR. A criação de técnicas baseadas em inteligência artificial e sensores, como o Netflora, para apoiar inventários florestais e mapear emissões, requer coleta de dados específicos, como imagens capturadas por drones. Além disso, é fundamental o treinamento de modelos utilizando bancos de dados representativos e robustos para garantir a precisão das análises.

Em suma, enquanto o Brasil avança no desenvolvimento e adaptação de técnicas e ferramentas inovadoras para coletar e monitorar dados de campo para a gestão climática e ambiental na agricultura e floresta, ainda há um caminho a percorrer para tornar essas soluções totalmente acessíveis, escaláveis e validadas em todas as diversas condições do País. O aprimoramento da acurácia das previsões, a validação de novas metodologias, como sondas automatizadas, e a superação das limitações de escala dos métodos, incluindo câmaras de GEE e respirometria animal, são desafios persistentes. Além disso, é essencial refinar o uso

de dados de sensoriamento remoto e integrá-los a outras informações. Para enfrentar essas questões, é necessário um investimento contínuo em pesquisa e infraestrutura. Superar essas barreiras é fundamental para que o Brasil possa monitorar eficazmente seus estoques de carbono e emissões de GEE em larga escala, apoiando tanto os compromissos nacionais quanto as necessidades do setor produtivo para uma produção cada vez mais sustentável e competitiva. O objetivo é ter ferramentas de monitoramento acessíveis, precisas e confiáveis, que apoiem as metas climáticas do País, o setor produtivo e a gestão sustentável dos recursos naturais.

Referências

- ABDELBAKI, A. M. Evaluation of pedotransfer functions for predicting soil bulk density for U.S. soils. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 9, n. 4, p. 1611-1619, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2016.11.008>.
- ADÃO, F.; PÁDUA, L.; SOUSA, J. J. Evaluating Soil Degradation in Agricultural Soil with Ground-Penetrating Radar: A Systematic Review of Applications and Challenges. **Agriculture**, v. 15, n. 8, p. 852, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture15080852>.
- AL-QINNA, M. I.; JABER, S. M. Predicting soil bulk density using advanced pedotransfer functions in an arid environment. **Transactions of the ASABE**, v. 56, n. 3, p. 963-976, 2013. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.56.9922>.
- ALVES, B. J. R.; SCIVITTARO, W. B.; JANTALIA, C. P.; SOUSA, R. O. de; BAYER, C.; RODRIGUES, R. de A. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; MADARI, B. E. **Protocolo para medições de fluxos de gases de efeito estufa em sistemas aeróbicos e alagados de produção de grãos - Rede Fluxus**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2017. (Embrapa Agrobiologia. Documentos, 306). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/161925/1/DOC306-PROTOCOLO-MEDICOES-DE-FLUXOS-DE-GASES.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.
- ALVES, F. G. da S.; CARNEIRO, M. S. de S.; COSTA, C. dos S.; GUEDES, L. F.; OLIVEIRA, D. de S.; MARTINS, E. C.; POMPEU, R. C. F. F.; ROGERIO, M. C. P. Economic and financial viability of the production of Brazilian somalis sheep fed with different nutritional plans. **Tropical Animal Health and Production**, v. 56, p. 231, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11250-024-04014-w>.
- BABOS, D. V.; GUEDES, W. N.; FREITAS, V. S.; SILVA, F. S.; TOZO, M. L. L.; VILLAS-BOAS, P.; MARTIN-NETO, L.; MILORI, D. M. B. P. Laser-induced breakdown spectroscopy as an analytical tool

for total carbon quantification in tropical and subtropical soils: evaluation of calibration algorithms. **Frontiers in Soil Science**, v. 3 (1242647), p. 1-14, 2024a. DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fsoil.2023.1242647>.

BARROS, H. S.; FEARNSIDE, P. M. Pedo-transfer functions for estimating soil bulk density in central Amazonia. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 39, p. 397-407, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbcS20140358>.

BARTSCH, B. D. A.; ROSIN, N. A.; ROSAS, J. T. F.; POPPIEL, R. R.; MAKINO, F. Y.; VOGEL, L. G.; NOVAIS, J. J. M.; FALCIONI, R.; ALVES, M. R.; DEMATTÉ, J. A. M. Space-time mapping of soil organic carbon through remote sensing and machine learning. **Soil and Tillage Research**, v. 248, art. 106428, p. 1-14, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2024.106295>.

BASUKI, T. M.; VAN LAAKE, P. E.; SKIDMORE, A. K.; HUSSIN, Y. A. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. **Forest Ecology and Management**, v. 257, n. 8, p. 1684-1694, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.027>.

BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, v. 139, n. 1-2, p. 90-97, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.01.005>.

BERNDT, A.; PEDROSO, A. de F.; PEREIRA, L. G. R.; RODRIGUES, P. H. M.; ALMEIDA, R. G. de; GUIMARAES JUNIOR, R.; FRIGHETTO, R. T. S.; OLIVEIRA, P. P. A. **Diretrizes para avaliação da emissão de metano entérico com a técnica do gás traçador SF₆**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2014. 19 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 117). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1024608/1/Diretrizesparaavaliacaodaemissaoemetano.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

BERNOUX, M.; CERRI, C.; ARROUAYS, D.; JOLIVET, C.; VOLKOFF, B. Bulk densities of Brazilian Amazon Soils related to other soil properties. **Soil Science Society American Journal**, v. 62, n. 3, p. 743-9, 1998. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200030029x>.

BEUTLER, S. J.; PEREIRA, M. G.; TASSINARI, W. D. S.; MENEZES, M. D.; VALLADARES, G. S.; ANJOS, L. H. C. Bulk density prediction for histosols and soil horizons with high organic matter content. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 41, e0160158, p. 1-13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160158>.

BOSCHI, R. S.; LOPES-ASSAD, M. L. R. C.; SOUZA, G. P. S.; CIDIN, A. C. M.; ASSAD, E. D. Efeito de estimativa de densidade do solo no cálculo de estoque de carbono. **Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente**, v. 2, n. 1, p. 8-16, 2015.

BOTULA, Y. D.; NEMES, A.; VAN RANST, E.; MAFUKA, P.; PUE, J.; CORNELIS, W. M. Hierarchical pedotransfer functions to predict bulk density of highly weathered soils in Central Africa. **Soil Science Society American Journal**, v. 79, n. 2, p. 476-86, 2015. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.06.0238>.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Coletânea de fatores de emissão e remoção de gases efeito estufa da pecuária brasileira**. In: SOTTA, E. D.; SAMPAIO, F. G.; COSTA, M. S. N. (org.). Brasília, DF: Mapa/Senar, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/publicacoes/coletanea-gee-pecuaria_web.pdf/view. Acesso em: 10 out. 2023.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Brazil's national inventory report of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases: Brazil's National Inventory Report 1990-2022**. Brasília, DF: MCTI, 2024a. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-bienais-de-transparencia-btrs/BRA_NIR_2024_ENG.pdf. Acesso em: 15 jan. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília, DF: MCTI, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/comunicacoes-nacionais-do-brasil-a-unfccc/arquivos/4comunicacao/4_com_nac_brasil_web.pdf. Acesso em: 10 out. 2023.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE)**. Brasília, DF: MCTI, 2024b. Disponível em: <https://sirene.mcti.gov.br/>. Acesso em: 10 jul. 2024.

BUBLITZ, J.; DÖLLE, C.; SCHADE, W.; HARTMANN, A.; HORN, R. Laser-induced breakdown spectroscopy for soil diagnostics. **European Journal of Soil Science**, v. 52, n. 2, p. 305-312, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00375.x>.

CÁSSARO, F. A. M.; TOMINAGA, T. T.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA J. C. M.; TIMM, L. C. Improved laboratory calibration of a single-probe surface gamma-neutron gauge. **Australian Journal of Soil Research**, v. 38, n. 5, p. 937-946, 2000a.

CÁSSARO, F. A. M.; TOMINAGA, T. T.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA J. C. M.; TIMM, L. C. The use of a surface gamma-neutron gauge to explore compacted layers. **Soil Science**, v. 165, n. 8, p. 665-676, 2000b. DOI: <https://doi.org/10.1097/00010694-200008000-00008>.

CEDDIA, M.; GOMES, A.; VASQUES, G.; PINHEIRO, É. Soil Carbon Stock and Particle Size Fractions in the Central Amazon Predicted from Remotely Sensed Relief, Multispectral and Radar Data. **Remote Sensing**, v. 9, n. 2, p. 1-19, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9020124>.

CHEN, S.; CHEN, Z.; ZHANG, X.; LUO, Z.; SCHILLACI, C.; ARROUAYS, D.; RICHER-DE-FORGES, A. N.; SHI, Z. European topsoil bulk density and organic carbon stock database (0-20 cm) using machine-learning-based pedotransfer functions. **Earth System Science Data**, v. 16, n. 5, p. 2367-2383, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-16-2367-2024>.

CHOUDHURY, B. U.; SANTRA, P.; SINGH, N.; CHAKRABORTY, P. Development of land-use-specific pedotransfer functions for predicting bulk density of acidic topsoil in eastern Himalayas

- (Índia). **Geoderma Regional**, v. 34, e00671, p. 1-13, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.GEODRS.2023.E00671>.
- COELHO, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M.; PEREIRA, G. E.; LIESENBERG, V. Espectroscopia de Visível e Infravermelho Próximo (Vis-NIR) para predição de atributos de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, e0170068, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000500038>.
- CORTE, A. P. D.; SOUZA, D. V.; REX, F. E.; SANQUETTA, C. R.; MOHAN, M.; SILVA, C. A.; ZAMBRANO, A. M. A.; PRATA, G.; ALVES DE ALMEIDA, D. R.; TRAUTENMÜLLER, J. W.; KLAUBERG, C.; MORAES, A. de; SANQUETTA, M. N.; WILKINSON, B.; BROADBENT, E. N. Forest inventory with high-density UAV-Lidar: Machine learning approaches for predicting individual tree attributes. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 179, 105815, p. 1-14, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105815>.
- COSTA, C. dos S.; ROGÉRIO, M. C. P.; ALVES, F. G. da S.; GUEDES, L. F.; POMPEU, R. C. F. F.; FERREIRA, A. L.; VASCONCELOS, A. M. de; MUIR, J. P.; NEIVA, J. J. M. Dietary nutrient restrictions in the post-weaning period change feed efficiency and productivity of Santa Inês ewe lambs. **Animal Production Science**, v. 60, n. 17, p. 1978-1986, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1071/AN19300>.
- COSTA, C. dos S.; ROGÉRIO, M. C. P.; FERREIRA, A. L.; MACHADO, F. S.; POMPEU, R. C. F. F.; ALVES, F. G. da S.; RÉGO, J. P. A. do; PIMENTEL, P. G.; MUIR, J. P.; NEIVA, J. J. M. Dietary nutrient restrictions in the post-weaning period change Santa Inês ewe lamb nutritional metabolic profile. **Tropical Animal Health and Production**, v. 53, n. 3, article number 359, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-021-02767-3>.
- COSTA, M. B. T. da; SILVA, C. A.; BROADBENT, E. N.; LEITE, R. V.; MOHAN, M.; LIESENBERG, V.; STODDART, J.; AMARAL, C. H. de; ALMEIDA, D. R. A. de; SILVA, A. L. da; RÉY, GOYA, L. R.; CORDEIRO, V. A.; REX, F.; HIRSCH, A.; MARCATTI, G. E.; CARDIL, A.; MENDONÇA, B. A. F. de; HAMAMURA, C.; CORTE, A. P. D.; KLAUBERG, C. Beyond trees: Mapping total aboveground biomass density in the Brazilian savanna using high-density UAV-lidar data. **Forest Ecology and Management**, v. 491, 1151195, p. 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119155>.
- COSTA, M. G.; REX, F. E.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; MELO, L. C.; ROCHA, M. P.; ALMEIDA, J. R. V. de. Mapeamento de biomassa florestal utilizando LiDAR embarcado em VANT: estudo de caso em plantio de *Pinus*. **Revista Árvore**, v. 47, e470404, 2023.
- CREMERS, D. A.; RADZIEMSKI, L. J. **Handbook of laser induced breakdown spectroscopy**. Oxford, England: John Wiley & Sons, 2013. 418 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118567371>.
- CUNHA, J. M.; GAIO, D. C.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; SILVA, D. M. P.; LIMA, A. F. L. Atributos físicos e estoque de carbono do solo em áreas de terra preta arqueológica da Amazônia. **Revista. Ambiente e Água**, v. 12, n. 2, p. 263-281, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1890>.
- CUNHA, R. M. da; ORFANÓ, E. F.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; PAPA, D. de A. Estimativa da perda de biomassa em área de manejo florestal sustentável na Amazônia por meio da combinação de dados lidar e câmeras RGB a bordo de aeronave remotamente pilotada (ARP). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., Santos. **Anais [...]** Santos: Galoá Proceedings, 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/198851/1/26805.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2025.
- DALAL, R. C.; WANG W.; ROBERTSON G. P.; PARTON W. J. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options, a review. **Australian Journal Soil Research**, v. 41, n. 2, p.165-195, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR02064>.
- DALLA CORTE, A. P. SANQUETTA, C. R.; MENDONÇA, A. R. Tecnologia LiDAR aplicada a inventários florestais: métodos e estudos de caso. In: SILVA, J. R. M.; MARTINS, F. B. (org.). **Inovações em Inventário e Manejo Florestal**. Curitiba: Ed da UFPR, 2022. p. 45-78.
- DENG, O.; LI, X.; DENG, L.; ZHANG, S.; GAO, X.; LAN, T.; ZHOU, W.; TIAN, D.; XIAO, Y.; YANG, J.; OU, D.; LUO, L. Emission of CO₂ and CH₄ from a multi-ditches system in rice cultivation region: Flux, temporal-spatial variation and effect factors. **Journal of Environmental Management**, v. 270, 110918, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110918>.
- D'OLIVEIRA, M. V. N.; BROADBENT, E.; OLIVEIRA, L. C.; ALMEIDA, D. R. A.; PAPA, D. A.; FERREIRA, M. E.; ZAMBRANO, A. M. A.; SILVA, C. A.; AVINO, F. S.; PRATA, G. A.; MELLO, R. A.; FIGUEIREDO, E. O.; JORGE, L. A. de C.; LEOMAR JUNIOR; ALBUQUERQUE, R.; BRANCALION, P. H. S.; WILKINSON, B.; OLIVEIRA-DA-COSTA, M. Aboveground Biomass Estimation in Amazonian Tropical Forests: A Comparison of Aircraft- and GatorEye UAV-borne LIDAR Data in the Chico Mendes Extractive Reserve in Acre, Brazil. **Remote Sensing**, v. 12, n. 11, p. 754, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12111754>.
- DORICH, C. D.; VARADARAJAN, S.; PANTOJA, J. L.; HRISTOV, A. N. Short communication: Use of a portable automated open-circuit gas quantification system and the sulfur hexafluoride tracer technique for measuring enteric methane emissions in Holstein cows fed ad libitum or restricted. **Journal of Dairy Science**, v. 98, n. 4, p. 2676-2681, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8468>.
- EL-JAMAOU, I.; DELGADO-INIESTA, M. J.; MARTÍNEZ SÁNCHEZ, M. J.; PÉREZ SIRVENT, C.; MARTÍNEZ LÓPEZ, S. Assessing Soil Organic Carbon in Semi-Arid Agricultural Soils Using UAVs and Machine Learning: A Pathway to Sustainable Water and Soil Resource Management. **Sustainability**, v. 17, n. 8, p. 3440, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17083440>.
- FAO. **A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes**: GSOC-MRV protocol. Rome, 2020. 140 p. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cb0509en>. Acesso em: 25 mar. 2025.
- FERREIRA, F. A. GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. Aplicação de VANTs e LiDAR para a caracterização da estrutura de florestas nativas

no Cerrado. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 42, n. 172, e202202214, 2022.

FONTANA, A.; BIANCHI, S. R. Carbono e nitrogênio total: analisador elementar. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 393-396. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1107200/1/Pt3Cap4Carbonoenitrogeniototal.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2024.

FONTANA, A.; CAMPOS, D. V. B. de. Carbono orgânico. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 360-367. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1107196/1/Pt3Cap1Carbonoorganico.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2024.

FONTANA, A.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, W. G.; BALIEIRO, F. de C. (ed.). **Protocolo para coleta de amostras e quantificação do carbono no solo da agricultura de baixo carbono**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2024. 30 p. (Embrapa Solos. Documentos, 243). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1169442/1/CNPS-DOC-243-2024.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2025.

GENRO, T. C. M.; LARA, D. M. de; LAMPERT, V. do N. **Análise das emissões de metano entérico do rebanho de bovinos de corte do Rio Grande do Sul**. Bagé: Embrapa Pecuária Sul, 2023. 12 p. (Embrapa Pecuária Sul. Comunicado técnico, 109). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1158126/1/CT-109-Online.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2025.

GOMES, A. S.; FERREIRA, A. C. S.; PINHEIRO, E. F. M.; MENEZES, M. D.; CEDDIA, M. B. The use of Pedotransfer functions and the estimation of carbon stock in the Central Amazon region. **Scientia Agrícola**, v. 74, n. 6, p. 450-460, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0310>.

HAMMOND, K. J.; BURKE, J. L.; KOOLAARD, J. P.; MUETZEL, S.; PINARES-PATIÑO, C. S.; WAGHORN, G. C. The GreenFeed system for measurement of enteric methane emissions from cattle. **Animal Production Science**, v. 56, n. 3, p. 181-189, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1071/AN15631>.

HAN, G. Z.; ZHANG, G. L.; GONG, Z. T.; WANG, G. F. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density in China. **Soil Science**, v. 177, n. 3, p. 158-164, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31823fd493>.

HAYNES, R. J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview. **Advances in Agronomy**, v. 85, p. 221-268, 2005. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(04\)85005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)85005-3).

HEUSCHER, S. A.; BRANDT, C. C.; JARDINE, P. M. Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. **Soil Science Society American Journal**, v. 69, n. 1, p. 51-56, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0051a>.

HUNGRIA, M.; VARGAS, M. A. T. Environmental factors affecting N₂ fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. **Field Crops Research**, v. 65, n. 2-3, p. 151-164, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00084-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00084-2).

HUTCHINSON, G. L.; ROCHETTE, P. Non-flow-through steady-state chambers for measuring soil respiration. numerical evaluation of their performance. **Soil Science Society American Journal**, v. 67, n. 1, p. 166-180, 2003. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1660>.

IBARR, M. A.; ZANATTA, J. A.; DIECKOW, J.; RIBEIRO, R. H.; RACHWAL, M. F. G.; STAHL, J. Nitrous oxide and methane emissions from soil and nitrogen uptake by eucalyptus fertilized with enhanced efficiency fertilizers. **Plant and Soil**, v. 463, n. 1-2, p. 615-630, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04938-5>.

JANTALIA, C. P.; SANTOS, H. P. dos; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 82, n. 2, p. 161-173, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9178-y>.

JOL, H. M. **Ground penetrating radar: Theory and applications**. [S.l.]: Elsevier Science, 2009. 524 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.X0001-4>.

KULAWARDHANA, R. W.; POPESCU, S. C.; FEAGIN, R. A. Fusion of lidar and multispectral data to quantify salt marsh carbon stocks. **Remote Sensing of Environment**, v. 154, p. 345-357, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.036>.

LA SCALA, N.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n. 10, p. 1537-1542, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00051-1).

LIBEL, G.; LATINI, I. P.; HERCULES, M. C. **Sistema de coleta automatizada de amostras de ar para análise da concentração de gases de efeito estufa do solo**. 2021. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia da Computação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

LIMA, A. A. J.; LOPES, J. C.; LOPES, R. P.; DE FIGUEIREDO, T.; VIDAL-VÁZQUEZ, E.; HERNÁNDEZ, Z. Soil Organic Carbon Assessment Using Remote-Sensing Data and Machine Learning: A Systematic Literature Review. **Remote Sensing**, v. 17, n. 5, 882, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs17050882>.

LIMA, G. S. A. de; FERREIRA, M. E.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. D. M. Carbon estimation in an integrated crop-livestock system with imaging sensors aboard unmanned aerial platforms. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 28, e100867, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100867>.

MACHADO, H. A.; MALLMANN, A. A.; ENGEL, K.; FAVARIN, J. A. S.; MODESTO, J. L. C.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; KOEHLER, H. S.; PÉLICO NETTO, S.; BEHLING, A.;

TRAUTENMÜLLER, J. W. Aboveground biomass and carbon stocks in subtropical forests. **Ecological Indicators**, v. 172, 113294, p. 1-14, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113294>.

MAPBIOMAS. **Coleção 9 do MapBiomas da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. 2024. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura>. Acesso em: 6 maio 2025.

MILORI, D. M. B. P.; SEGNINI, A.; SILVA, W. T. L. da; POSADAS, A.; MARES, V.; QUIROZ, R.; MARTIN-NETO, L. **Emerging techniques for soil carbon measurements**. Copenhagen, Denmark: CCAFS, 2011. 30 p. DOI: <http://hdl.handle.net/10568/10279>.

MINHONI, R. T. D. A.; SCUDIERO, E.; ZACCARIA, D.; SAAD, J. C. C. Multitemporal satellite imagery analysis for soil organic carbon assessment in an agricultural farm in southeastern Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 784, 147216, p. 1-12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147216>.

NANKO, K.; UGAWA, S.; HASHIMOTO, S.; IMAYA, A.; KOBAYASHI, M.; SAKAI, H.; ISHIZUKA, S.; MIURA, S.; TANAKA, N.; TAKAHASHI, M.; KANEKO, S. A pedotransfer function for estimating bulk density of forest soil in Japan affected by volcanic ash. **Geoderma**, v. 213, p. 36-45, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.025>.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: SPARKS, L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (ed.). **Methods of soil analysis: part 3 chemical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1996. p. 961-1010.

NICOLODELLI, G.; MARANGONI, B. S.; CABRAL, J. S.; VILLAS-BOAS, P. R.; SENESI, G. S.; SANTOS, C. H.; ROMANO, R. A.; SEGNINI, A.; LUCAS, Y.; MONTES, C. R.; MILORI, D. M. B. P. Quantification of total carbon in soil using laser-induced breakdown spectroscopy: a method to correct interference lines. **Applied Optics**, v. 53, n. 10, p. 2170-2176, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1364/ao.53.002170>.

OBIDIKE-UGWU, E. O.; OGUNWOLE, J. O.; EZE, P. N. Derivation and validation of a pedotransfer function for estimating the bulk density of tropical forest soils. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 9, n. 1, p. 801-809, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01531-2>.

OLIVEIRA, D. S.; ALVES, A. A.; ROGÉRIO, M. C. P.; POMPEU, R. C. F. F.; PEREIRA, E. S.; AZEVEDO, D. M. M. R.; GUEDES, L. F.; COSTA, C. dos S.; MUIR, J. P. Influence of nutrient restriction on finishing Morada Nova lambs. **Tropical Animal Health and Production**, v. 52, n. 6, p. 3509-3518, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02385-5>.

OLIVEIRA, P. P. A. (ed.). **Protocolo para quantificação dos estoques de carbono do solo da Rede de Pesquisa Pecuária**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2014. 20 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documento, 116). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/>

bitstream/item/117416/1/Documentos116.pdf. Acesso em: 25 fev. 2025.

PALLADINO, M.; ROMANO, M.; PASOLLI, E.; NASTA, P. Developing pedotransfer functions for predicting soil bulk density in Campania. **Geoderma**, v. 412, 115726, p. 1-14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115726>.

PARKIN, T. B.; VENTEREA, R. T. Chamber-based Trace Gas Flux Measurements. In: FOLLETT, R. F. (ed.). **Sampling Protocols**. USDA, 2010. p. 3-39. Disponível em: <http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Program/212/Chapter%203.%20GRACEnet%20Trace%20Gas%20Sampling%20Protocols.pdf>. Acesso em: 21 maio 2015.

PETROPOULOS, T.; BENOS, L.; BUSATO, P.; KYRIAKARAKOS, G.; KATERIS, D.; AIDONIS, D.; BOCHTIS, D. Soil Organic Carbon Assessment for Carbon Farming: A Review. **Agriculture**, v. 15, n. 5, 567, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15050567>.

PIRES, L. F.; BORGES, J. A. R.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 2, p. 197-210, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.07.013>.

QUEIROZ, R. F. P. de; D'OLIVEIRA, M. V. N.; REZENDE, A. V.; ALENCAR, P. A. L. de. Estimation of Aboveground Biomass Stock in Tropical Savannas Using Photogrammetric Imaging. **Drones**, v. 7, n. 8, 423, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones7080493>.

RAMCHARAN, A.; HENGL, T.; BEAUDETTE, D.; WILLS, S. A soil bulk density pedotransfer function based on machine learning: A case study with the NCSS Soil characterization database. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, p. 1279-1287, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.12.0421>.

REIS, A. M. H.; TEIXEIRA, W. G. T.; FONTANA, A.; BARROS, A. H. C.; VICTORIA, D. C.; VASQUES, G. M.; SAMUEL-ROSA, A.; OTTONI, M. V.; MONTEIRO, J. E. B. A Hierarchical pedotransfer functions for predicting bulk density in Brazilian. **Scientia Agricola**, v. 81, e20220255, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0255>.

ROGÉRIO, M. C. P.; BORGES, I.; FERREIRA, A. L.; MACHADO, F. S.; POMPEU, R. C. F. F.; GUEDES, L. F.; COSTA, C. dos S.; GUEDES, F. L.; GALVANI, D. B. **Especificações padrões para mensurações de gases de efeito estufa e metabolismo de pequenos ruminantes no bioma Caatinga**. Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos, 2019a. 24 p. (Embrapa Caprinos e Ovinos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 13).

ROGÉRIO, M. C. P.; GUEDES, L. F.; ALVES, A. A.; POMPEU, R. C. F. F.; FERREIRA, M. I. C.; ALVES, F. G. da S.; COSTA, C. dos S.; BOMFIM, M. A. D.; GUEDES, F. L. **Estratégias nutricionais para grupos genéticos localmente adaptados ao Semiárido brasileiro visando a mitigação de gases de efeito estufa**. Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos, 2019b. 18 p. (Embrapa Caprinos e Ovinos. Comunicado técnico, 196). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa>

[br/infoteca/bitstream/doc/1117108/1/CNPC2019Cot196.pdf](https://br.infoteca/bitstream/doc/1117108/1/CNPC2019Cot196.pdf). Acesso em: 22 fev. 2025.

ROGÉRIO, M. C. P.; SOUSA, M. G. C. de; PIMENTEL, P. G.; POMPEU, R. C. F. F.; TEIXEIRA, M.; OLIVEIRA, D. de S.; BARROSO, M. R. C.; VIEIRA, L. da S. **Dietas para incremento da resiliência à verminose e mitigação de gases do efeito estufa**. Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos, 2022. 17 p. (Embrapa Caprinos e Ovinos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 19). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1148937/1/CNPC-2022-Art45.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2025.

SANTOS, L. S.; SOUZA, A. P. D.; LIMA, R. C. S.; NEVES, J. C. L.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; LEITE, V. G.; GOMES. Estimativa de altura e volume de árvores em floresta de Mata Atlântica utilizando dados LiDAR de drone. **Cerne**, v. 27, n. 4, e104990, 2021.

SANTOS, W. P.; VAZ, C. M. P.; MARTIN-NETO, L.; ANSELM, A.; TOMASELLA, J.; COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; VAN LIER, Q. J.; GALBIERI, R.; PERINA, F. J. Predicting bulk density in Brazilian soils for carbon stocks calculation: a comparative study of multiple linear regression and Random Forest models using continuous and categorical variables. **Discover Soil**, v. 2, n. 7, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00035-6>.

SCHILLACI, C.; PEREGO, A.; VALKAMA, E.; MÄRKER, M.; SAIA, S.; VERONESI, F.; LIPANI, A.; LOMBARDO, L.; TADIELLO, T.; GAMPER, H.A.; TEDONE, L.; MOSS, C.; PAREJA-SERRANO, E.; AMATO, G.; KÜHL, K.; DĂMĂȚIRĂ, C.; COGATO, A.; MZID, N.; EESWARAN, R.; RABELO, M.; SPERANDIO, G.; BOSINO, A.; BUFALINI, M.; TUNÇAY, T.; DING, J.; FIORENTINI, M.; TISCORNIA, G.; CONRADT, S.; BOTTA, M.; ACUTIS, M. New pedotransfer approaches to predict soil bulk density using WoSIS soil data and environmental covariates in Mediterranean agro-ecosystems. **Science of the Total Environment**, v. 780, 146609, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146609>.

SEGNINI, A.; XAVIER, A. A. P.; OTAVIANI-JUNIOR, P. L.; FERREIRA, E. C.; WATANABE, SPERANÇA, M. A.; NICOLODELLI, G.; VILLAS-BOAS, P. R.; OLIVEIRA, P. P. A.; MILORI, D. M. B. P. Physical and chemical matrix effects in soil carbon quantification using laser-induced breakdown spectroscopy. **American Journal of Analytical Chemistry**, v. 5, n. 11, p. 722-729, 2014.

SEVASTAS, S.; GASPARATOS, D.; BOTSIS, D.; SIARKOS, I.; DIAMANTARAS, K. I.; BILAS, G. Predicting bulk density using pedotransfer functions for soils in the Upper Anthemountas basin, Greece. **Geoderma Regional**, v. 14, e00169, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00169>.

SINHA, S.; JEGANATHAN, C.; SHARMA, L. K.; NATHAWAT, M. S.; DAS, A. K.; MOHAN, S. Developing synergy regression models with space-borne ALOS PALSAR and Landsat TM sensors for retrieving tropical forest biomass. **Earth System Science**, v. 125, n. 4, p. 725-735, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12040-016-0692-z>.

SOUZA, K. A.; OLIVEIRA, A. L. de; CARVALHO, L. M. T. de; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; LEITE, V. G.; NEVES, J. C. L. Desempenho de dados LiDAR aerotransportados no inventário florestal de

áreas de plantio de eucalipto. **Floresta**, v. 50, n. 4, p. 1928-1936, 2020.

SOUZA, B. Q.; BRITO, L. R.; CARVALHO, H. P.; PINHEIRO, R. M.; FERREIRA, E. J. L.; SILVA, V. E. P. Utilização de drones estudos florestais: uma revisão sistemática. **Diversitas Journal**, v. 9, n. 3, p. 1091-1104, 2024. DOI: <https://doi.org/10.48017/dj.v9i3.2887>.

SOUZA, E.; FERNANDES-FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BATJES, N. H.; SANTOS, G. R.; PONTES, L. M. Pedotransfer functions to estimate bulk density from soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin. **Scientia Agricola**, v. 73, n. 6, p. 525-534, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0485>.

TIMM, L. C.; PIRES, L. F.; REICHARDT, K.; ROVERATTI, R.; OLIVEIRA, J. C. M.; BACCHI, O. O. S. Soil bulk density evaluation by conventional and nuclear methods. **Australian Journal of Soil Research**, v. 43, n. 1, p. 97-103, 2005. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1071/SR04054>.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, v. 163, n. 3, p. 190-202, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1097/00010694-199803000-00003>.

VASQUES, G. M.; COELHO, M. R.; DART, R. de O.; MANSILLA BACA, J. F.; SANTOS, M. de L. M. **Mapas de estoque de carbono orgânico do solo do Brasil na resolução espacial de 1 km - Versão 2021 [CNPS]**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2021. Disponível em: https://geoinfo.dados.embrapa.br/maps/4735/metadeta_detail. Acesso em: 3 jun. 2025.

VELOSO, M. G.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; PERGHER, M.; BAYER, C.; HIGA, R. C. V. Long-term loblolly pine land use reduces methane and net greenhouse gas emissions in a subtropical Cambisol, despite increasing nitrous oxide. **Annals of Forest Science**, v. 7, n. 3, article number 86, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0869-0>.

VILLAS-BOAS, P. R.; FRANCO, M. A.; MARTIN-NETO, L.; GOLLANY, H. T.; MILORI, D. M. B. P. Applications of laser-induced breakdown spectroscopy for soil analysis, part I: Review of fundamentals and chemical and physical properties. **European Journal of Soil Science**, v. 71, n. 5, p. 789-804, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12888>.

VILLAS-BOAS, P. R.; FRANCO, M. A.; MARTIN-NETO, L.; GOLLANY, H. T.; MILORI, D. M. B. P. Applications of laser-induced breakdown spectroscopy for soil characterization, part II: Review of elemental analysis and soil classification. **European Journal of Soil Science**, v. 71, n. 5, p. 805-818, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12889>.

ZAMAN, M.; KLEINEIDAM, K.; BAKKEN, L.; BERENDT, J.; BRACKEN, C.; BUTTERBACH-BAHL, K.; CAI, Z.; CHANG, S. X.; CLOUGH, T.; DAWAR, K.; DING, W. X.; DÖRSCH, P.; REIS MARTINS, M. dos; ECKHARDT, C.; FIEDLER, S.; FROSCH, T.; GOOPY, J.; GÖRRES, C. M.; GUPTA, A.; HENJES, S.; HOFMANN, M. E. G.; HORN, M. A.; JAHANGIR, M. M. R.; JANSEN-WILLEMS, A.; LENHART, K.; HENG, L.; LEWICKA-SZCZEBAK, D.; LUCIC, G.; MERBOLD, L.; MOHN, J.; MOLSTAD, L.; MOSER, G.; MURPHY,

P.; SANZ-COBENA, A.; ŠIMEK, M.; URQUIAGA, S.; WELL, R.; WRAGE-MÖNNIG, N.; ZAMAN, S.; ZHANG, J.; MÜLLER, C. Methodology for Measuring Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Soils Using Non-isotopic Techniques. In: ZAMAN, M.; HENG, L.; MÜLLER, C. (ed.). **Measuring Emission of Agricultural Greenhouse Gases and Developing Mitigation Options using Nuclear and Related Techniques**. Cham: Springer, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-55396-8_2.

ZANATTA, J. A.; ALVES, B. J. R.; BAYER, C.; TOMAZI, M.; FERNANDES, A. H. B. M.; COSTA, F. de S.; CARVALHO, A. M. de. **Protocolo para medição de fluxos de gases de efeito estufa do solo**. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. 53 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 265). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/123470/1/Doc.-265-Protocolo-Josileia.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2024.

ZANATTA, J. A.; PULROLNIK, K.; VIANA, J. H. M. **Protocolo para avaliação do estoque de carbono e de nitrogênio do solo em sistemas florestais - Projeto Saltus**. Colombo: Embrapa Florestas, 2015. 31 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 277). Disponível em: <https://ainfo.cnptia>.

embrapa.br/digital/bitstream/item/129380/1/Doc.-277-Projeto-Saltus-2.pdf. Acesso em: 14 fev. 2024.

ZHANG, L.; SHAO, Z.; LIU, J.; CHENG, Q. Deep Learning Based Retrieval of Forest Aboveground Biomass from Combined LIDAR and Landsat 8 Data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 12, p. 1-16, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2012/436537>.

ZHENG, G.; JIAO, C.; XIE, X.; CUI, X.; SHANG, G.; ZHAO, C.; ZENG, R. Pedotransfer functions for predicting bulk density of coastal soils in East China. **Pedosphere**, v. 33, n. 6, p. 849-856, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.01.014>.

ZHOU, Y.; ZHAO, X.; GUO, X.; LI, Y. Mapping of soil organic carbon using machine learning models: Combination of optical and radar remote sensing data. **Soil Science Society of America Journal**, v. 86, n. 2, p. 293-310, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20371>.

ZIMMERMAN, P. R.; ZIMMERMAN, R. S. **Method and system for monitoring and reducing ruminant methane production**. US Patents 2011/0192213. 2012. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/18/5c/08/1b72aaab6616b4/US20090288606A1.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2024.

Do espaço ao campo

Uma inovação para aprimorar o **manejo dos solos**

Melhorar o cuidado com o solo, aumentar a produtividade com menor custo e, ao mesmo tempo, abrir novas oportunidades no mercado de carbono: essa é a transformação promovida por uma tecnologia desenvolvida na Embrapa Instrumentação, em São Carlos, SP. Trata-se da LIBS — sigla para *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*, ou Espectroscopia de Emissão Óptica com Plasma Induzido por Laser —, um método avançado, preciso e de baixo custo, adaptado para análise rápida de solos. Utilizada pela NASA em missões a Marte para examinar rochas e a superfície do planeta, essa tecnologia ganhou aplicação inédita na agricultura brasileira. A Embrapa trouxe “do espaço para o campo” uma ferramenta robusta, versátil e com reconhecimento internacional, capaz de revolucionar práticas agrícolas e abrir caminhos para uma agricultura mais inteligente e sustentável.

A técnica utiliza um pulso de laser altamente energético para vaporizar uma pequena porção de material (como solo, planta ou rocha). Esse vapor forma um plasma luminoso cujas emissões de luz são analisadas por um espectrômetro. Cada elemento químico emite luz em comprimentos de onda específicos, o que permite identificar e quantificar os elementos presentes na amostra.

O salto dessa tecnologia do laboratório para o campo aconteceu em 2015, com a criação da Agrorobótica — uma startup surgida como spin-off da própria Embrapa. Foi nesse momento que a ciência encontrou o empreendedorismo e o LIBS começou a ser aplicado de forma prática no cotidiano da agricultura. A partir de uma parceria em modelo de inovação aberta, Embrapa e Agrorobótica transformaram o LIBS em uma ferramenta inteligente e acessível: a plataforma IA AgLIBS,

que incorpora inteligência artificial para interpretar os dados do laser e convertê-los em recomendações agronômicas precisas.

Com a IA AgLIBS, agricultores agora conseguem fazer análises de solos com determinação de nutrientes, pH, capacidade de troca catiônica, e também carbono (o qual constitui em torno de 50% da matéria orgânica do solo), — de forma mais rápida, acessível e digital. Isso reduz desperdícios, melhora o manejo e, principalmente, aumenta a produtividade com menores custos.

E o impacto foi longe, e além da fazenda. A ferramenta está sendo usada em 17 estados brasileiros e já contribui com projetos de crédito de carbono, uma nova fonte de renda para produtores comprometidos com a sustentabilidade. Em 2023, a técnica LIBS foi reconhecida internacionalmente pela certificadora Verra, nos Estados Unidos, como válida para mensurar carbono no solo — um passo importante para a credibilidade e certificação dos programas de agricultura de baixo carbono.

A IA AgLIBS é um exemplo de como a combinação entre pesquisa pública e inovação privada pode levar uma tecnologia de alta complexidade a se tornar útil no dia a dia do agricultor. Hoje, ela está presente em propriedades rurais de diferentes biomas, em iniciativas como a Soja Baixo Carbono, em contratos com grandes empresas privadas ligadas ao agro, importantes cooperativas e associações de produtores rurais, e também em colaborações com universidades e centros de pesquisas.

Esse é um exemplo de ciência aplicada, soluções tecnológicas com impacto real e de agricultura cada vez mais inteligente e sustentável.





Foto: Gabriel Rezende Faria (Embrapa)

CAPÍTULO 5

Balanço de carbono dos principais sistemas agrícolas nacionais, protocolos e representações

Beata Eموke Madari – Anderson Santi – Celso Vainer Manzatto – Claudia Pozzi Jantalia – Etelvino Henrique Novotny – Ladislau Araújo Skorupa – Márcia Thaís de Melo Carvalho – Patrícia Perondi Anchão Oliveira – Vinicius de Melo Benites – Walkyria Bueno Scivittaro

Introdução

O balanço de carbono (C) em sistemas de produção agrícola (sistemas de produção de grãos, fibras, bioenergia e pecuário) refere-se à avaliação quantitativa das emissões de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), em comparação com a captura e com o armazenamento de C na biomassa vegetal e no solo. Esse conceito é fundamental para compreender o impacto climático das práticas de manejo e para identificar formas de tornar esses sistemas sustentáveis e resilientes.

Os sistemas de produção agrícola e pecuário participam ativamente do ciclo do C (Figura 5.1). Em um ambiente natural, as plantas retiram CO_2 da atmosfera pela fotossíntese, incorporando o C em moléculas orgânicas. Esse C pode ser devolvido à atmosfera pela respiração de plantas, animais e microrganismos, ou pode ser armazenado no solo quando restos de plantas e matéria orgânica se decompõem.

Assim, os sistemas de produção estão em contínua interação com o ambiente, contribuindo para o aumento ou a mitigação do aquecimento global. Entretanto, são influenciados pelo clima e por outros fatores externos. A resiliência e a capacidade de adaptação dos sistemas de produção



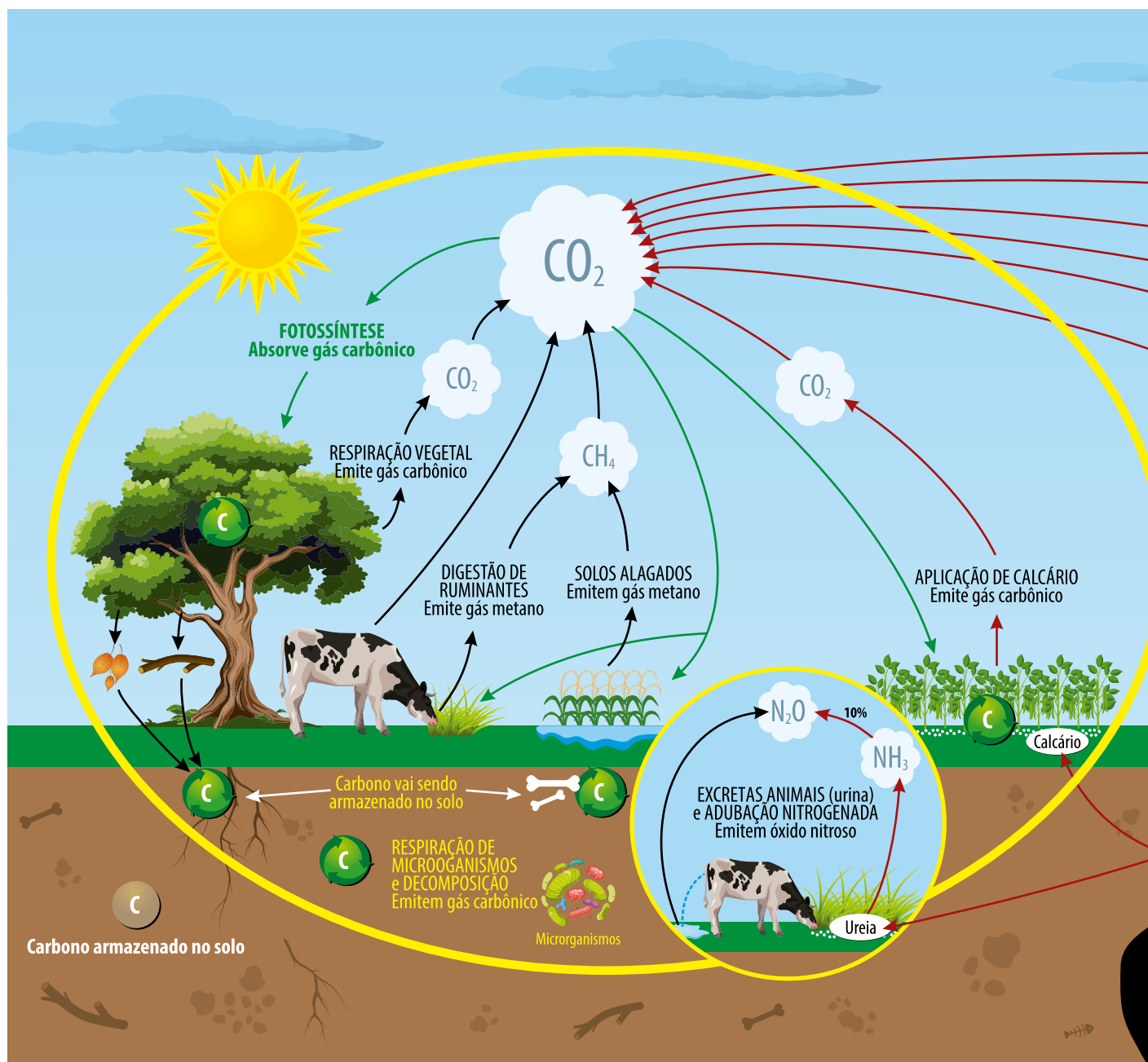
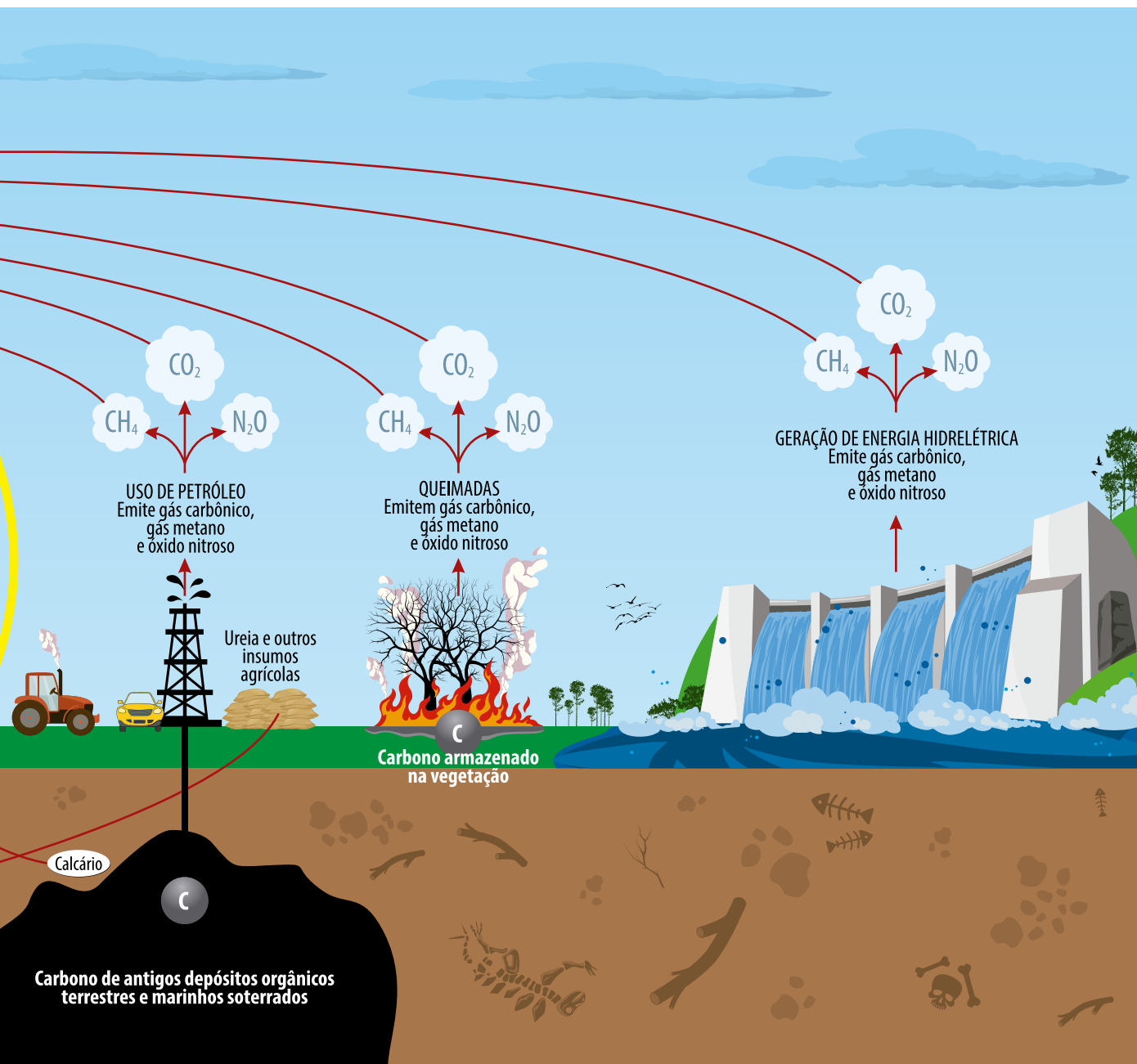


Figura 5.1. A agropecuária no ciclo de carbono. As setas verdes representam as vias de assimilação de carbono pela fotossíntese, que resultam no acúmulo de carbono no solo e na vegetação. As setas pretas indicam as vias de emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), resultantes de processos naturais associados às atividades agrícolas e pecuárias que ocorrem nas propriedades rurais (por exemplo, respiração vegetal, digestão dos ruminantes, decomposição da matéria orgânica em solos alagados, respiração de microrganismos do solo, excreção de urina e fezes de animais). Já as setas vermelhas representam as emissões de GEE oriundas do uso de insumos externos (por exemplo, ureia e calcário), aplicados na atividade agropecuária para a produção na fazenda, bem como na produção, mineração e transporte desses insumos fora da fazenda (por exemplo, uso de petróleo, queimadas, geração de energia). O N_2O foi incluído na figura porque, embora esse gás não contenha carbono, no cálculo do balanço de carbono ele é contabilizado como CO_2eq , considerando que, em termos de potencial de aquecimento global, uma molécula de N_2O equivale a 273 moléculas de CO_2 .



e, consequentemente, sua sustentabilidade, são diretamente impactados pela mudança do clima.

A sustentabilidade agropecuária envolve, portanto, a busca por sistemas de produção que mantenham a produtividade sem comprometer os recursos naturais. O balanço de C expressa a diferença entre a quantidade de C emitido e absor-

vido, permitindo avaliar se um sistema está contribuindo para a mitigação da mudança climática ou agravando o problema. Sistemas de produção que emitem grandes quantidades de CO_2 , CH_4 e N_2O , sem compensação adequada pelo sequestro de C, tendem a ser menos sustentáveis, pois aumentam a concentração de GEE na atmosfera.

A adoção de práticas de manejo sustentáveis pode, todavia, melhorar o balanço de C ao promover a captura e o armazenamento de C no solo e na vegetação. Tecnologias como o sistema plantio direto (SPD), a diversificação de culturas e os sistemas de integração são estratégias eficientes para aumentar a resiliência e a capacidade adaptativa dos sistemas produtivos e para mitigar emissões de GEE. Essas práticas contribuem para a manutenção e a melhoria da qualidade do solo, reduzem a demanda por insumos externos e melhoram a eficiência do uso dos recursos naturais.

Além de impactos ambientais positivos, o balanço de C favorável também influencia a viabilidade econômica da produção agrícola. Produtores que praticam produção sustentável podem acessar incentivos financeiros, como pagamentos por serviços ambientais e a participação no mercado de C, no qual os produtores podem se beneficiar de créditos de C ou receber a certificação de sustentabilidade gerada pela adoção de práticas de baixo impacto ambiental.

A adoção de estratégias voltadas a um balanço de C equilibrado fortalece a segurança alimentar e garante que a produção de alimentos ocorra de maneira sustentável, minimizando riscos climáticos que podem comprometer a agricultura em longo prazo. Dessa forma, a relação entre o balanço de C e a sustentabilidade agropecuária é essencial para garantir uma produção eficiente, resiliente e alinhada com as necessidades ambientais globais.

O balanço de C é, portanto, um indicador robusto da adequação e da sustentabilidade do modelo de agropecuária desenvolvido e permite identificar práticas que equilibram a produtividade com a preservação ambiental.

Processos e mecanismos envolvidos na retenção e emissão de carbono

A dinâmica do ciclo do C na agropecuária é mais complexa do que em ecossistemas naturais, em razão da diversidade de práticas adotadas no setor produtivo e seus impactos ambientais.

Os processos biológicos do solo, das plantas, da produção de insumos e do manejo dos sistemas agrícolas que resultam na emissão de GEE são diversos:

Respiração do solo e decomposição da matéria orgânica: a atividade microbiana no solo libera CO_2 , especialmente em sistemas de cultivo intensivo e áreas com alta mineralização da matéria orgânica.

Digestão dos ruminantes: a fermentação entérica em bovinos e outros ruminantes gera CH_4 , um dos GEE mais potentes.

Cultivo de arroz irrigado: a decomposição anaeróbica da matéria orgânica em campos inundados libera grandes quantidades de CH_4 .

Queima de biomassa: a queima de resíduos agrícolas e florestais libera CO_2 , CH_4 e N_2O .

Manejo inadequado de resíduos orgânicos: o armazenamento e tratamento de dejetos animais podem resultar na liberação de CH_4 e N_2O .

Uso de fertilizantes nitrogenados: a transformação microbiana do nitrogênio (N) no solo pode gerar N_2O , um gás com alto potencial de aquecimento global.

Perda de N de sistemas agrícolas via amônia (NH_3) volatilizada: a NH_3 não é GEE, mas, se depositada em outras áreas, pode gerar emissão de N_2O , tratando-se de emissão indireta de N_2O .

Essas fontes de emissões de GEE configuram um grande desafio. Entretanto, a agropecuária também oferece oportunidades para o sequestro de C.

Isso pode ocorrer de várias formas. O principal processo natural para a remoção de C da atmosfera é a fotossíntese, pela qual as plantas, utilizando a energia da luz solar, água e CO₂, sintetizam sua biomassa aérea e raízes e liberam oxigênio (O₂) para a atmosfera. O processo de fotossíntese é complementar à respiração autotrófica, um processo predominante noturno, pelo qual as plantas liberam CO₂ para a atmosfera. Em um ecossistema em equilíbrio, os processos de fotossíntese e respiração autotrófica tendem a estar balanceados, ou seja, o ecossistema nem emite, nem sequestra C em excesso. Em um sistema em que acontece forte acumulação de biomassa, o processo de fotossíntese prevalece, e o ecossistema retira mais CO₂ da atmosfera do que emite. Quando isso é combinado com manejo conservacionista do solo que evita a perda de CO₂ e outros GEE, pode resultar em um ecossistema sumidouro de C. O plantio de árvores em áreas agrícolas, por exemplo, pode armazenar C na biomassa e no solo. Em pastagens bem manejadas, o crescimento de folhas e de raízes é estimulado, resultando na produção de maior biomassa vegetal. Por meio de processos de transformação no solo, o material vegetal das raízes e da biomassa vegetal, incorporado e decomposto no solo pela atividade da fauna e microbiota, é convertido em matéria orgânica do solo. Entre 50 e 58% da matéria orgânica do solo é composta de C. A matéria orgânica, ou seja, o C presente no solo, pode ser transformada em formas estáveis de C, que permanecem no solo por longos períodos em razão da sua estrutura química ou da proteção física pela estrutura do solo. Essas formas estáveis contribuem para a acumulação de C, o que, além de possibilitar o sequestro de C no sistema de produção, promove a melhoria da fertilidade e das propriedades físicas e biológicas do solo, sendo, portanto, fundamental para a saúde do solo.

Métricas para o balanço de carbono

O balanço de C é a diferença entre as emissões totais de GEE e a quantidade de C sequestrada em um sistema de produção. É expresso em unida-

des de equivalência do CO₂ (CO₂eq), que convertem o impacto dos diferentes GEE, na agropecuária, tipicamente CO₂, N₂O e CH₄, em uma métrica comum, com base no potencial de aquecimento global de cada gás. Segundo o *Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática* (IPCC, sigla do inglês) da Organização das Nações Unidas (ONU) (IPCC, 2022a), o potencial de aquecimento global (GWP, sigla do inglês, ou PAG) dos principais GEE varia conforme o horizonte temporal considerado. Para um período de 100 anos, os valores são:

Metano (CH₄): aproximadamente 27 a 29 vezes o potencial de aquecimento do CO₂.

Óxido nitroso (N₂O): cerca de 273 vezes o potencial de aquecimento do CO₂.

Esses valores refletem a capacidade desses gases de reter calor na atmosfera, contribuindo significativamente para o aquecimento global.

O balanço de C pode ser descrito com uma equação simples:

Balanço de C = sequestro de C no sistema agrícola – emissão total de GEE do sistema agrícola

em que o *Balanço de C*, o *sequestro de C* e a *emissão total de GEE* estão expressos em CO₂ equivalente (CO₂eq).

Por convenção, um balanço positivo, mais favorável, indica que o sistema está removendo mais C (CO₂eq) da atmosfera do que emitindo. Entretanto, um balanço negativo, no qual as emissões superam a remoção, sugere que o sistema está contribuindo para o aquecimento global.

O balanço de C pode ser calculado para diferentes escopos da produção agropecuária. Pode ser determinado para um talhão, uma fazenda, a cadeia produtiva de um produto, uma empresa ou até um setor econômico inteiro, entre outras abordagens.

As métricas para determinar o balanço de C na produção agropecuária são ferramentas essenciais para avaliar as emissões e o sequestro de C

em sistemas produtivos. Essas métricas ajudam a identificar práticas mais sustentáveis e a monitorar o impacto ambiental da agropecuária. As principais métricas utilizadas são:

Emissões de GEE: mede a quantidade de CO₂, CH₄ e N₂O emitidos por atividades agropecuárias, como fermentação entérica na pecuária, uso de fertilizantes, manejo de resíduos e uso e manejo do solo.

Sequestro de C no solo: avalia a capacidade do solo de armazenar C orgânico, considerando práticas como plantio direto, rotação de culturas, recuperação de áreas degradadas e manejo da pastagem.

Balanço líquido de carbono: calcula a diferença entre as emissões totais de GEE e o C sequestrado, fornecendo uma visão geral do impacto ambiental do sistema produtivo.

Eficiência de uso de recursos: analisa a relação entre a produção agropecuária e as emissões de C, promovendo práticas que maximizem a produtividade com menor impacto ambiental. Por exemplo, a quantidade de grãos de milho produzidos por quilograma de fertilizante nitrogenado utilizado.

Pegada de carbono: expressa o total de emissões de C associadas à cadeia produtiva de um determinado produto agrícola, desde a produção até o consumo final.

Modelos e inventários: ferramentas como o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) e protocolos do IPCC são amplamente utilizados para padronizar e comparar dados de emissões e sequestro de C.

Essas métricas são fundamentais para orientar políticas públicas, mercados de C e práticas sustentáveis na agropecuária.

Para determinar o balanço de C na produção agropecuária, é necessário conhecer dados básicos e fundamentais sobre os componentes do balanço, como os fluxos de GEE e o conteúdo de C nos diferentes compartimentos do sistema de

produção e da cadeia produtiva. As medições diretas são de grande importância e devem ser executadas com rigor científico, porque os resultados obtidos estão sendo utilizados para a determinação e o cálculo de fatores, índices e taxas que alimentam bancos de dados e repositórios com informações continuamente atualizadas. Esses dados, por sua vez, são utilizados para a alimentação de modelos e de protocolos específicos e adaptados às condições tropicais e às necessidades do Brasil, dependendo da métrica utilizada e do escopo da avaliação.

No contexto das negociações internacionais, é essencial desenvolver métricas e indicadores, modelos de balanço de C e sistemas de monitoramento que permitam ao país atingir um nível de representação adequado à realidade nacional.

A metodologia do IPCC refere-se a diferentes níveis ou *Tiers* de complexidade e precisão na estimativa de emissões de GEE. Eles são classificados em três níveis principais:

Tier 1: método mais simples, baseado em fatores de emissão médios globais e dados de atividade gerais. É utilizado quando informações mais detalhadas não estão disponíveis.

Tier 2: usa fatores de emissão específicos para cada país ou região, proporcionando maior precisão nas estimativas.

Tier 3: método mais detalhado, baseado em medições diretas, modelos complexos ou inventários específicos de fontes de emissão.

O objetivo é alcançar pelo menos o nível *Tier 2*, que utiliza dados nacionais específicos, ou preferencialmente o nível *Tier 3*, que utiliza modelos desenvolvidos ou parametrizados, calibrados e validados para as condições edáficas, climáticas e sistemas de produção relevantes no País. Atingir esse patamar depende de métodos e protocolos adequados de coleta de dados e de representação dos estoques, emissões e remoções de C nos sistemas de produção brasileiros. Esses métodos e protocolos devem

ser internacionalmente reconhecidos e apropriados para representar a contribuição do setor agrícola nacional, incluindo as remoções e os efeitos das boas práticas e as características dos modelos de produção em ambiente tropical.

Para que isso possa ser providenciado de maneira contínua e consistente, é necessário investir na infraestrutura instrumental e analítica da rede de obtenção de dados e informações de campo e laboratório, além de contínuas adequações nos métodos, protocolos e infraestrutura de análises laboratoriais e agregação de pesquisadores e colaboradores especializados à equipe.

Panorama atual das emissões de gases de efeito estufa pela agropecuária brasileira e das tecnologias mitigadoras

A conversão de áreas naturais para uso agrícola ou pecuário é um fator que ainda contribui para a avaliação desfavorável do balanço de C (pegada de C) das cadeias dos sistemas de produção no Brasil. O desmatamento, especialmente em regiões tropicais, libera grandes quantidades de C estocado em árvores e solos, agravando o impacto climático. Ademais, práticas agrícolas e processos biogeoquímicos podem incrementar a perda de C e as emissões de GEE.

A fermentação entérica dos ruminantes gera grandes quantidades de CH_4 , um GEE muito potente. Apesar dos avanços na formulação de dietas e aditivos que reduzem essas emissões, muitos produtores ainda enfrentam desafios para implementar essas soluções pelo custo e pela falta de informação. Além disso, práticas como o manejo de dejetos para produção de biogás ainda não são amplamente adotadas, apesar do potencial de gerar energia renovável e reduzir impactos ambientais.

O uso intensivo de insumos químicos, como a dependência de fertilizantes nitrogenados e defensivos agrícolas, é um dos principais desafios para a redução das emissões de GEE na agropecuária. Fertilizantes sintéticos contribuem para a emissão de N_2O , um gás com alto potencial de aquecimento global. Reduzir o uso desses produtos exige alternativas sustentáveis, como o uso de fertilizantes orgânicos, rotação de culturas, uso de bioinsumos e aumento da circularidade na fazenda.

O manejo inadequado do solo pode resultar na liberação de C armazenado, reduzindo sua fertilidade e aumentando as emissões de GEE. Práticas como a aração e gradagem e a falta de cobertura permanente da superfície do solo contribuem para a degradação da matéria orgânica do solo. Técnicas como o SPD (o não revolvimento do solo combinado com o uso de plantas de cobertura e/ou adubos verdes e outras práticas sustentáveis, como as curvas de nível) e a recuperação de áreas degradadas ajudam a manter o C no solo, mas exigem capacitação técnica e incentivo econômico para sua adoção em larga escala.

Embora existam tecnologias e práticas agrícolas que reduzem emissões e aumentam o sequestro de C, como a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), a implementação de muitas delas ainda tem um alto custo inicial, e exige planejamento, investimento e mudanças culturais na produção. Produtores podem enfrentar dificuldades para obter crédito e financiamento para investir em sistemas sustentáveis. O acesso a incentivos governamentais e mercados de C pode estimular a adoção de boas práticas, mas ainda há desafios na regulamentação e valorização desses mecanismos.

A falta de infraestrutura e o acesso limitado a novas tecnologias, por exemplo, aquelas promovidas pelo Plano ABC+ (Brasil, 2021), descrito a seguir, dificultam a implementação de estratégias de baixa emissão de C, especialmente em pequenas propriedades rurais.

O Brasil, historicamente, tem sido protagonista nas discussões internacionais sobre desenvolvimento sustentável desde a *Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio 92)*, sendo o primeiro país, dentre os 150 países signatários, a assinar a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, sigla do inglês United Nations Framework Convention on Climate Change), reconhecendo que os efeitos da mudança climática representam uma preocupação compartilhada por toda a humanidade. Em 2009, o compromisso do Brasil foi consolidado com a instituição da Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC), por meio da Lei nº 12.187/2009 (Brasil, 2009). Nesse mesmo ano, durante a *15ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP 15)*, realizada em Copenhague, o Brasil apresentou voluntariamente a meta de reduzir entre 36,1 e 38,9% as emissões de GEE projetadas até 2020. Para atingir esse objetivo, o País propôs programas de ações voluntárias, dentre os quais se destacam a redução em 80% da taxa média anual de desmatamento na Amazônia e em 40% no bioma Cerrado. Posteriormente, o Brasil reafirmou e ampliou seus compromissos climáticos ao aderir ao *Acordo de Paris*, em 2015, durante a *COP 21*, ratificado internamente pelo Decreto nº 9.073/2017 (Brasil, 2017). No âmbito desse acordo, apresentou sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), estabelecendo a meta de reduzir em 37% suas emissões até 2025, e em 43% até 2030, com base nos níveis de 2005 (Brasil, 2024a).

Esse foi o contexto em que foi elaborada a primeira fase do Plano Setorial de Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – Plano ABC 2010–2020 (Brasil, 2012a), uma iniciativa estratégica e pioneira para conciliar a segurança alimentar com a sustentabilidade ambiental, por meio da adoção de tecnologias de baixa emissão e/ou de mitigação de C no uso e manejo da terra. Nesses 10 anos, o Plano ABC fomentou um portfólio de tecnologias com sólida

base técnica e científica, que também considerou aspectos econômicos, ambientais e sociais, com sua adoção num total de 54,03 milhões de hectares em todo o País, equivalente a 193,67 milhões de Mg CO₂eq evitados (Brasil, 2023a).

O impacto dessa política pública motivou o governo brasileiro a lançar, em 2021, o Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária, com vistas ao Desenvolvimento Sustentável 2020–2030 (Plano ABC+) (Brasil, 2021), como uma continuação ampliada de sua política setorial para enfrentamento à mudança do clima no setor agrícola. O plano tem como objetivo geral promover a adaptação à mudança do clima e o controle das emissões de GEE na agropecuária brasileira, com aumento da eficiência e resiliência dos sistemas produtivos, considerando uma gestão integrada da paisagem.

Além dos Sistemas de Produção Sustentáveis (SPS_{ABC}) previstos no plano anterior, — que incluíam: Recuperação de Pastagens Degradadas, Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e Sistemas Agroflorestais (SAFs), Sistema Plantio Direto (SPD), Fixação Biológica do Nitrogênio (FBN) e Florestas Plantadas —, nesta nova fase foram incorporados três novos SPS_{ABC}: Sistema Plantio Direto em Hortaliças (SPDH), Sistemas Irrigados (SI) e Terminação Intensiva (TI). Nessa etapa, os SAFs e o sistema ILPF passam a ser tratados distintamente, mas dentro de um mesmo grupo denominado Sistemas de Integração. Ampliou-se ainda o escopo de outros três SPS_{ABC}:

- Práticas para Recuperação de Pastagens Degradadas (PRPD), que passa a considerar a recuperação e a renovação de pastagens com algum grau de degradação.
- Bioinsumos (BI), que inclui Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) e Microrganismos Promotores do Crescimento de Plantas (MPCP).
- Manejo de Resíduos da Produção Animal (MRPA), que considera outros resíduos além de dejetos animais e estimula o uso dos subprodutos obtidos como bioenergia e biofertilizante.

Nesse novo ciclo do plano, os SPS_{ABC} Florestas Plantadas também se destaca, evidenciando seu elevado potencial para contribuir com a redução das emissões de GEE, promover o sequestro de C e fomentar cadeias produtivas sustentáveis de base florestal.

As metas previstas visam ampliar a área de adoção de SPS_{ABC} em 72,68 milhões de hectares, aumentar em 208,40 milhões de metros cúbicos o tratamento de resíduos animais, e estimular a utilização de bioinsumos e plantas para melhorar o uso eficiente de água e nutrientes pelas culturas agrícolas, com uma estimativa de capacidade de mitigação equivalente a 1.042,41 milhões de Mg CO₂eq.

Ademais, o Plano ABC+ definiu novos objetivos que, ao mesmo tempo, configuram um conjunto de desafios técnico-científicos e de gestão pública para a próxima década:

- **Manter** o estímulo à adoção e à manutenção de sistemas agrícolas conservacionistas e sustentáveis de produção, com aumento da produtividade e renda, da resiliência e do controle das emissões de GEE.
- **Fortalecer** as ações de transferência e difusão de tecnologias, capacitação e assistência técnica.
- **Estimular** e **apoiar** a pesquisa aplicada para o desenvolvimento ou aprimoramento de sistemas, práticas, produtos e processos de produção sustentáveis, com foco no aumento da resiliência, da produtividade e renda, e no controle das emissões de GEE.
- **Criar** e **fortalecer** mecanismos que possibilitem o reconhecimento e a valorização dos produtores que adotam sistemas, práticas, produtos e processos de produção sustentáveis.
- **Fomentar, ampliar** e **diversificar** fontes e instrumentos econômicos, financeiros e fiscais atrelados aos sistemas, às práticas, aos produtos e processos de produção sustentáveis.

- **Aprimorar** o sistema de gestão das informações do ABC+, para efetivação do Monitoramento, Relato e Verificação (MRV), e do monitoramento e da avaliação de seu portfólio de ações e resultados.
- **Fomentar** a agropecuária integrada à paisagem, de forma a incentivar a regularização ambiental das propriedades rurais e a produção sustentável em áreas de uso agrícola (Brasil, 2020).

Soluções de inovação tecnológica para a melhoria do balanço de carbono na agropecuária brasileira

A pesquisa e a inovação são indispensáveis para a sustentabilidade do setor agrícola. Elas impulsionam o desenvolvimento de novas tecnologias que aumentam a produtividade e a eficiência das lavouras e dos sistemas de produção. Ao mesmo tempo, possibilitam o uso mais racional dos recursos naturais e resultam em soluções que fortalecem a resiliência dos sistemas agrícolas perante eventos extremos, garantindo a segurança alimentar, bem como a estabilidade e a resiliência das cadeias produtivas. Esses fatores são fundamentais para manter a competitividade no mercado global, onde os padrões de qualidade e sustentabilidade são cada vez mais exigentes.

Investir em pesquisa e desenvolvimento fomenta a integração de tecnologias e ferramentas modernas, que auxiliam na tomada de decisões mais precisas, na redução de custos operacionais, e na otimização dos processos produtivos. Essa modernização eleva a rentabilidade dos produtores e atrai investimentos, gerando empregos e dinamizando o setor agrícola como um todo.

A cultura da inovação estimula a colaboração entre universidades, centros de pesquisa, empresas

e agricultores. Essa parceria, por sua vez, fortalece a credibilidade e amplia o alcance dos resultados e a disseminação das soluções desenvolvidas para diferentes públicos, desde formuladores de políticas públicas até o setor privado. A cooperação permite que o conhecimento científico e técnico seja rapidamente transformado em práticas que podem ser replicadas em larga escala, ampliando os ganhos competitivos e preparando o setor para os desafios do futuro.

Em resumo, a pesquisa e a inovação são as chaves para uma agricultura sustentável, resiliente e competitiva em longo prazo, garantindo a harmonia entre produção, preservação ambiental e progresso econômico.

Soluções para viabilizar pesquisa e inovação voltadas à melhoria do balanço de carbono de sistemas agrícolas

Entre as soluções que a Embrapa desenvolve para habilitar a inovação, estão bases de dados próprias e funcionalidades específicas do balanço de C em sistemas agrícolas tropicais, que são fundamentais para o desenvolvimento de plataformas de métricas. Para isso, é indispensável investir na atualização, modernização, ampliação e organização da infraestrutura de pesquisa científica e no armazenamento de dados e informação, além do desenvolvimento de equipamentos e técnicas avançadas para a coleta de dados de campo e modelagem, que são temas dos Capítulos 3 e 4.

Para a adoção de métodos e de parâmetros compatíveis com padrões internacionais, que assegurem transparência e precisão na mensuração das emissões e remoções de C, a Embrapa desenvolveu protocolos específicos para a amostragem e a determinação de fluxos de GEE, C e N no solo e na biomassa aplicáveis a sistemas de produção de grãos, pecuária e florestas. Esses protocolos estão disponíveis em seu acervo de publicações (Higa

et al., 2014; Oliveira, 2014a, 2014b; Urquiaga et al., 2016; Alves et al., 2017).

Neste capítulo, destacam-se outras duas soluções, mais recentes, que são diretamente associadas ao fornecimento de dados e informação de qualidade para o desenvolvimento de sistemas de produção sustentáveis e para o monitoramento dos sistemas produtivos em nível nacional e local.

Programa de Controle de Qualidade de Laboratórios de Fertilidade do Solo e o Ensaio de Proficiência para a Análise de Carbono do Solo – Qualidade analítica e harmonização laboratorial na análise de solo

Para que a agricultura brasileira continue forte e ambientalmente sustentável, é essencial que os resultados das análises de solo, realizadas em laboratórios especializados, sejam corretos e confiáveis. A análise de solo é o primeiro passo para verificar se há nutrientes suficientes para o crescimento e a boa produtividade das plantas. Com base nessas informações, é possível tomar decisões mais precisas sobre a quantidade adequada de calcário e adubo a ser aplicada, suprimindo apenas os nutrientes em deficiência e evitando excessos.

Nesse sentido, o Brasil conta com o Programa de Análise de Qualidade de Laboratórios de Fertilidade do Solo (PAQLF) e o Ensaio de Proficiência em Análise de Carbono do Solo (EPCS).

O PAQLF é um programa que começou em 1992 e é coordenado pela Embrapa Solos. A ideia principal é garantir que os resultados das análises de solo sobre a fertilidade sejam confiáveis. Para isso, o programa acompanha se os laboratórios fazem as análises das características importantes do solo de forma correta e sempre igual. Hoje, 176 laboratórios em todo o Brasil participam desse programa, e cerca de 70% deles mostram que fazem análises de fertilidade de boa qualidade todos os anos. Esse teste de qualidade verifica a quantidade dos principais nutrientes, de substâncias

perigosas, de outros elementos importantes e a composição física do solo, como areia, argila e silte. O PAQLF é como um padrão de qualidade que ajuda os laboratórios a melhorarem, servindo de exemplo para outros programas, como o EPCS.

Muitos fatores podem influenciar a qualidade dos resultados de análises de solo que avaliam sua fertilidade. A variação nos resultados pode levar a erros, comprometendo a confiança nos laboratórios e nas recomendações de adubação e calagem, o que pode gerar prejuízos para os agricultores e impactar negativamente a agricultura brasileira.

Se as análises de solo mostrarem que há mais nutrientes do que realmente existe, os agricultores podem usar quantidades insuficientes de adubo e calcário, o que prejudica a produção. Todavia, se os exames mostrarem que há menos nutrientes do que o valor real, pode haver uso excessivo desses insumos, gerando gastos desnecessários e aumentando o risco de poluir o ambiente, principalmente a água.

Dessa forma, a maior confiabilidade das análises leva a recomendações mais precisas para o manejo dos nutrientes do solo, gerando benefícios para a agricultura, o meio ambiente e a economia.

O PAQLF realiza encontros regulares com os laboratórios participantes para incentivar o uso correto dos métodos recomendados pela Embrapa e das melhores práticas de laboratório.

Por se tratar de um programa de âmbito nacional e largamente difundido, os próprios produtores rurais procuram apenas os laboratórios que participam e são aprovados no ensaio de proficiência. Essa expectativa estimula novos laboratórios a ingressarem no programa, o que acelera a melhoria de sua qualidade analítica e a conquista de reconhecimento no mercado.

O EPCS, entretanto, é uma iniciativa mais recente, estabelecida em 2023, sob a coordenação da Embrapa Meio Ambiente. Trata-se do primeiro programa interlaboratorial do mundo focado na aná-

lise de C do solo. O principal objetivo do ensaio é harmonizar os resultados das análises de C do solo entre os laboratórios participantes e fomentar uma rede de colaboração entre eles. O EPCS considera tanto os aspectos científicos relacionados à quantificação adequada de C no solo quanto a crescente demanda por essas análises no mercado de C para a agricultura.

Um aspecto essencial na análise de C do solo é a adoção de métodos com reconhecimento internacional.

O método mais preciso, reconhecido e confiável para determinar o C no solo é a técnica de combustão seca, também conhecida como método Dumas. Ele utiliza um equipamento chamado analisador elementar, que aquece a amostra de solo a cerca de 1.000 °C. Com essa alta temperatura, todo o C da amostra é liberado e medido com mais precisão. Apesar da alta precisão, esse método ainda é pouco comum nos laboratórios comerciais de análise de solo no Brasil, principalmente pelo custo elevado do equipamento, sua manutenção e a necessidade de um preparo específico da amostra.

A maioria dos laboratórios analisa o C do solo utilizando um método mais barato, porém menos preciso, chamado oxidação úmida ou Walkley-Black, cujos resultados são frequentemente expressos como matéria orgânica nos laudos que chegam ao agricultor. Embora mais acessível, esse método é menos preciso que o de combustão seca (Dumas) e gera resíduos perigosos como o cromo. Reconhecendo as limitações desse método mais comum, o EPCS oferece um serviço crucial: a comparação dos resultados do Walkley-Black com o padrão Dumas e a avaliação da correta aplicação do método de referência pelos laboratórios.

Além disso, o ensaio de proficiência abrange outros métodos inovadores para a determinação de C, que se apresentam como alternativas eficientes ao método Walkley-Black e ao Dumas. Esses novos métodos, detalhados no Capítulo 4, oferecem

maior capacidade de análise e menor custo, mantendo a acurácia necessária para identificar variações no teor de C do solo. Eles empregam técnicas espectroscópicas, calibradas e modeladas a partir do método de referência, a exemplo da Espectroscopia de Emissão Óptica com Plasma Induzido por Laser (LIBS) e da Espectroscopia de Infravermelho Próximo (NIR). O objetivo é que tanto o método de referência quanto essas alternativas sejam adotados pelos laboratórios comerciais de análise de solo, atendendo, assim, não somente à demanda básica por análises de C ou matéria orgânica para o manejo da fertilidade, mas também aos requisitos dos projetos de geração de créditos de C na agricultura.

O EPCS tem contado com a participação de 28 a 38 laboratórios por ano. Desses, 60 a 70% utilizam o método Dumas para medir o C no solo, enquanto 30 a 40% usam outras técnicas, como as espectroscópicas. Em geral, os laboratórios participantes apresentam resultados bem precisos. No primeiro ano do teste, 82% dos laboratórios foram considerados aptos, mas esse número caiu para 62% no segundo ano. Essa diferença aconteceu porque, a partir do segundo ano, o preparo da amostra de solo passou a ser uma etapa importante avaliada, já que é fundamental para representar corretamente o C. É comum que o desempenho dos laboratórios decresça quando um teste de qualidade introduz novidades, mas depois as falhas são identificadas e corrigidas, levando a uma melhora geral na qualidade dos resultados para os clientes.

Em resumo, os ensaios de proficiência para análises de solo, coordenados pela Embrapa, funcionam como uma terceira parte que dá credibilidade ao sistema de geração das informações, prevenindo contra riscos associados a informações e números distorcidos, que geram prejuízo ao agricultor e ao meio ambiente. O impacto da qualidade dos resultados pode alcançar patamares ainda mais complexos, na medida em que a comunicação e difusão de informações fundamentadas no que os laboratórios entregam são

usadas em sistemas de negociação e comercialização dos produtos, programas de certificação ambiental e políticas públicas voltadas para a baixa emissão ou sequestro de C.

Rede de experimentos em campo e em áreas de monitoramento de longa duração

Os componentes do balanço de C de sistemas agrícolas, como o C estocado no solo, a biomassa ou os GEE emitidos, são regulados por processos biofísicos dinâmicos, que afetam os compartimentos em curto, médio e longo prazo. Ao investigar o balanço de C em sistemas agrícolas, é essencial utilizar experimentos de campo e áreas de monitoramento de longa duração (ELD) bem documentados. Esses experimentos são laboratórios vivos, que fornecem dados e informação para o desenvolvimento de plataformas de métricas e de modelos adaptados aos ecossistemas naturais e sistemas de produção agropecuária brasileiros. Com o uso de dados de ELDs, é possível compreender como práticas específicas de manejo, como o sistema de cultivo ou a aplicação de fertilizantes, contribuem para o aumento dos estoques de C e sua permanência no solo, ou para a emissão dos GEE, sob diferentes condições ambientais (solo, clima, ecossistema). Experimentos e áreas de monitoramento de longa duração são, portanto, modelos experimentais muito adequados para a geração e a disponibilização do conhecimento científico relativo a práticas agronômicas, relevantes para a estabilidade sustentável dos sistemas de produção (Schillinger, 2011). Eles permitem buscar o entendimento de mudanças futuras com base nas tendências observadas no passado, oferecendo, assim, margem para a utilização de trabalhos com modelagem e simulação. Os ELDs são essenciais quando se consideram parâmetros caracterizados por lenta dinâmica temporal. Ao estudar sistemas complexos, as respostas no curto prazo são como um olhar em microscópio, e podem não refletir tendências que se manifestam em décadas. Dessa forma, experimentos de

curta duração, até aproximadamente dez anos, conseguem focar apenas na trajetória inicial ou em flutuações, enquanto experimentos de longa duração permitem descrever quais são os mecanismos envolvidos na dinâmica temporal e na variação das trajetórias no tempo (Knapp et al., 2012). Eles também são essenciais na avaliação e na predição do impacto da adoção de práticas e no manejo do solo sobre a sua qualidade e saúde, bem como no estudo da evolução do rendimento de grãos das culturas, entre outras informações, além de promoverem integração de estudos, envolvendo dimensões biológicas, biogeoquímicas, ambientais e econômicas.

Por essa razão, a Embrapa vem investindo muitos esforços não apenas para manter experimentos de longa duração, mas também para formar uma rede de experimentos de longa duração, que tem como grande desafio organizar os dados históricos que vêm sendo obtidos em repositório de dados, com segurança, e de maneira a garantir que esses possam ser disponíveis para futuros estudos. Sob a liderança da Embrapa, o Consórcio Internacional C-arouNd (Figura 5.2) foi recentemente estabelecido, reunindo 40 experimentos de longa duração ao redor do mundo, dos quais

17 são coordenados por Unidades da Embrapa. Essa rede prevê a contínua incorporação de experimentos e novas iniciativas, conforme as necessidades de avanço científico.

Para assegurar a consistência e comparabilidade das bases de dados ao longo do tempo e viabilizar a síntese do conhecimento, o Consórcio Internacional C-arouNd promove a catalogação de dados e metadados padronizados. Os dados de ELDs, sob responsabilidade de colaboradores brasileiros, são armazenados no Repositório de Dados de Pesquisa da Embrapa (Redape), enquanto os de parceiros internacionais são registrados no repositório Zenodo. Ambos adotam princípios de segurança e rastreabilidade iguais. O Redape é uma plataforma institucional criada pela Embrapa para armazenar, preservar e disponibilizar dados de pesquisa agropecuária. Esse repositório visa promover a transparência, a acessibilidade e, principalmente, a reutilização dos dados científicos gerados pela Embrapa e seus parceiros, garantindo que os dados estejam disponíveis para a comunidade científica, agricultores e outros interessados. O preenchimento dos campos de metadados de forma padronizada permite a extração e o cruzamento dos dados com base nos elementos relevantes para a classificação

Ilustração: Melissa Ananias Soler da Silva



Foto: Antônio Vitor Resende da Silva

Figura 5.2. Localização dos experimentos de longa-duração do Consórcio Internacional C-arouNd (à esquerda). Experimento de longa-duração (à direita), parte do Consórcio Internacional C-arouNd, em sistema plantio direto (SPD) com esquemas de rotação, sucessão ou consórcio de diversas culturas agrícolas, plantas de cobertura e adubos verdes, com foco nas culturas principais de algodão, soja, milho e feijão comum, conduzido desde 2014 em Latossolo argiloso, na Fazenda Capivara, Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO (Projeto Sistemas Integrados de Produção de Grãos e Fibra para Mitigação dos Efeitos da Seca — Embrapa SEG 20.18.03.026).

da informação, como a classificação do solo ou a classificação climática. Também é possível recuperar os dados pelo ano de início do experimento, uso da terra, tratamentos e cobertura geográfica. Essa abordagem fortalece a base de conhecimento sobre as mudanças nos processos do solo ao longo do tempo e fomenta a colaboração global na pesquisa, incrementando as possibilidades de uso dos dados por outros pesquisadores. Dados padronizados, associados com ferramentas de modelagem e inteligência artificial, têm imenso potencial para o manejo sustentável do solo e de sistemas de produção em geral, contribuindo para soluções mais eficazes para desafios ambientais.

Soluções para controlar a emissão de gases de efeito estufa e aumentar o sequestro de carbono em sistemas de produção agrícola e florestais

Nesta seção, apresentam-se, como soluções, algumas das tecnologias vinculadas aos Planos ABC e ABC+, descritas no Panorama atual, com contribuição expressiva da Embrapa em colaboração com seus diversos parceiros. Inicia-se com as soluções nacionalmente relevantes de uma maneira geral, finalizando-se com o destaque de uma tecnologia com importância local ou regional.

Recuperação de pastagens degradadas

A produção pecuária brasileira é majoritariamente baseada em sistemas pastoris, com genética zebuína e pastos tropicais, e, em alguns nichos, como no bioma Pampas, com genética taurina e pastos temperados. Essas adaptações climáticas permitiram o uso de pastagens em todas as condições de solo e de clima do território brasileiro. Apenas 6,96 milhões de cabeças, correspondentes a 16,58% do abate total (ABIEC, 2024), passaram por confinamento na fase final de engorda. As etapas de cria e recria são realizadas quase exclusivamente em pastagens (Oliveira; Oliveira, 2024).

A degradação das pastagens ocorre pela adoção da pecuária extrativista, que possui baixos índices produtivos, sem preocupação com a perenização, em outras palavras, com a preservação e renovação contínua, do pasto e dos recursos naturais (Oliveira; Corsi, 2005).

De modo geral, a ausência de manejo fisiológico da planta forrageira, bem como da correção e manutenção da fertilidade do solo, contribui para a degradação das pastagens (Oliveira; Corsi, 2005; Dias-Filho, 2011). Outras causas importantes, no Brasil, segundo Dias-Filho (2011), são a ausência de adubações periódicas, as falhas no estabelecimento da pastagem e os problemas bióticos, como o ataque de insetos-praga e, mais recentemente, a síndrome da morte do capim-marandu, na região Norte. Uma pastagem pode ser considerada degradada dentro de um universo relativamente amplo de condições. Os extremos dessas condições são conceitualmente denominados degradação agrícola e degradação biológica (Dias-Filho, 1998, 2011; Macedo, 1999). Na degradação agrícola, há aumento na proporção de plantas daninhas na pastagem, reduzindo gradualmente a capacidade de suporte. Na degradação biológica, o solo perde a capacidade de sustentar a produção vegetal de maneira significativa, levando à substituição da pastagem por plantas pouco exigentes em fertilidade do solo, ou simplesmente ao aparecimento de áreas desprovidas de vegetação com solo descoberto (Dias-Filho, 2011).

Nesse sentido, a recuperação de pastagens é muito importante e desejável para a pecuária brasileira, que possui condições edafoclimáticas favoráveis para a produção pecuária em ambientes pastoris. Recuperar uma pastagem consiste em utilizar a população de plantas e empregar técnicas que promovam a recuperação daquela pastagem degradada, e pode ser realizada de várias formas, como a recuperação direta das pastagens, a recuperação adotando-se o consórcio com leguminosas e a recuperação usando os vários arran-

jos de integração lavoura-pecuária propostos na literatura (Oliveira, 2007; Oliveira; Oliveira, 2024).

Os sistemas baseados em pastagens, quando bem conduzidos em termos de manejo animal e de plantas forrageiras, são sustentáveis e oferecem muitas oportunidades ao setor pecuário ligadas ao bem-estar animal. Animais criados em pastagens permanecem em um ambiente mais próximo de seu habitat natural, o que reduz o estresse, a poluição ambiental relacionada com a aglomeração e ao manejo de excretas, bem como os problemas sanitários típicos de confinamento. Além disso, esses sistemas contribuem para o enfrentamento das mudanças climáticas, uma vez que pastagens bem manejadas podem sequestrar C e promover o efeito poupa-terra, que diminui a pressão por desmatamento e favorecendo a preservação da biodiversidade (Martha Junior et al., 2012; Segnini et al., 2019; Oliveira et al., 2020, 2021a, 2024a, 2024b). Quando realizada a consorciação de gramíneas com leguminosas, os benefícios são ampliados, sobretudo em relação ao balanço de C, com destaque para a FBN (Matta et al., 2024), que favorece o sequestro de C (Oliveira et al., 2024b) e a redução da emissão de CH₄ entérico, pela presença de compostos secundários nas leguminosas (Boddey et al., 2020; Furtado et al., 2023; Homem et al., 2024).

Muitas ações têm tornado sustentáveis os sistemas pecuários baseados em pastagens no Brasil. Em 2023, o rebanho bovino foi estimado em 197 milhões de cabeças, distribuídas em uma área de pastagem de 161 milhões de hectares, o que representa uma redução de 11,3% na área utilizada nos últimos 20 anos. Nesse período, a produtividade média brasileira quase dobrou, passando de 36,2 para 65,8 quilos de carcaça por hectare. O Brasil, sob a lógica da intensificação sustentável, tem aumentado sua produtividade, produzindo mais em uma área menor (ABIEC, 2024).

Ademais, foi instituído o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sus-

tentáveis (Brasil, 2023b) que, dentre as várias técnicas recomendadas, propõe a intensificação da pecuária de corte, que engloba a recuperação de pastagens.

Todas essas ações envolvendo a recuperação e a intensificação das pastagens brasileiras, que englobam área superior a 160 milhões de hectares, podem contribuir com as questões de mitigação das emissões de GEE e ajudar no controle da mudança climática, fenômeno que não se restringe às fronteiras entre países e afeta o mundo de forma global.

Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta

Os sistemas de integração são uma forma eficiente e relativamente mais sustentável de produzir alimentos, fibras e madeira ou energia de biomassa. Em vez de destinar áreas exclusivamente para a agricultura, pecuária ou floresta de forma separada, esse sistema combina as três atividades em um mesmo espaço, propiciando um equilíbrio natural entre elas. Podem ser estruturados de diferentes formas, dependendo das condições climáticas, do tipo de solo e dos objetivos produtivos da propriedade (Oliveira et al., 2018). Quanto ao clima, nas regiões de invernos mais frios no Sul do Brasil, a aveia preta e o azevém são comumente utilizados para pastejo de gado de corte ou leiteiro, e, após dessecação, servem como palhada para o SPD de soja ou milho no verão. Solos mais arenosos tendem a perder matéria orgânica mais rapidamente que solos mais argilosos. Portanto, o sistema ILP, com a fase de pastagem de braquiária por dois anos, seguida de um ano de cultivo de grãos, pode oferecer maior resiliência aos diferentes usos do solo do que um sistema ILP com predominância da fase agrícola (Skorupa; Manzatto, 2019). As principais modalidades do sistema ILPF, conforme Balbino et al. (2011) são:

Integração Lavoura-Pecuária (ILP): sistema que integra os componentes lavoura e pecuária em rotação, consórcio ou sucessão na mesma área em um mesmo ano agrícola ou por múltiplos anos.

Integração Lavoura-Floresta (ILF): sistema que integra os componentes floresta e lavoura pela consorciação de espécies arbóreas com cultivos agrícolas anuais ou perenes. O componente lavoura pode ser utilizado na fase inicial de implantação do componente florestal ou em ciclos durante o desenvolvimento do sistema.

Integração Pecuária-Floresta (IPF): sistema que integra os componentes pecuária e floresta em consórcio (Figura 5.3).

Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF): sistema que integra os componentes lavoura, pecuária e floresta em rotação, consórcio ou sucessão na mesma área. O componente lavoura normalmente é preferencial no início (aproximadamente dois anos) para evitar danos às mudas de árvores pelos animais e, após, pode ser usado em ciclos durante o desenvolvimento do sistema.

Por apresentarem características semelhantes (Almeida et al., 2013; Aragão et al., 2023), o sistema ILPF e o sistema agroflorestal (SAF) têm recebido apoio conjunto de políticas públicas, como no Plano ABC+ para o período de 2020 a 2030 (Brasil, 2021), sendo ambos incluídos na tecnologia denominada Sistemas de Integração.

Cada forma de integração busca otimizar a utilização da terra, promovendo sinergia entre as atividades produtivas. Essa sinergia ocorre quando os componentes – como lavoura, pecuária e o componente arbóreo –, juntamente com os elementos abióticos, interagem de forma complementar, de modo que os meios de produção disponíveis possam ser utilizados de maneira mais eficiente (Balbino et al., 2011). O sistema de produção, quando integrado, é capaz de aumentar a resiliência e, por consequência, a sustentabilidade da produção agropecuária, ao possibilitar melhores condições para o enfrentamento das variações climáticas, entre outros fatores. O componente arbóreo, por exemplo, oferece sombra, melhora o microclima para os animais e contribui para a formação de chuvas regionais, melhorando os cultivos. A pecuária fornece fertilizantes naturais por meio dos dejetos dos animais e favorece maior cobertura do solo pela grande quantidade de biomassa, o que enriquece e protege o solo contra a erosão. Já a lavoura contribui para a diversidade, beneficiando polinizadores e promovendo a saúde do solo. Os sistemas de integração são uma das principais bases tecnológicas da intensificação sustentável e da intensificação ecológica. Essas práticas são fundamentais para a preservação dos recursos naturais e para a eficiência econômica do setor agropecuário.

Fotos: Beata Emoke Madari



Figura 5.3. Pastagem degradada (à esquerda) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) (à direita) com a espécie florestal *Schizolobium* sp. na Fazenda Gamada, em Nova Canaã do Norte, MT. A espécie florestal no ILPF é *Schizolobium* sp.

Nota: Projeto Carbioma: Agropecuária sustentável no Cerrado e na transição Cerrado-Amazônia (Embrapa SEG 02.11.05.001/CNPq 562601/2010-4).

Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), especialmente aqueles conduzidos sob plantio direto com rotação de culturas, podem ser considerados como uma das mais sofisticadas sincronizações de usos e de manejos do solo propiciando alta eficiência do uso de insumos, espaço e tempo para a produção de alimentos e energia, com simultânea manutenção de outros serviços do ecossistema. Isso se refere a processos que garantem o equilíbrio e a sustentabilidade do sistema produtivo. Pode envolver a regulação ambiental, como o controle da temperatura, umidade e disponibilidade de nutrientes no solo; a regulação ecológica, caracterizada pela melhoria da biodiversidade, pelo ciclo hidrológico, polinização, acúmulo de C e pelo ciclo de nutrientes mais eficiente e pela redução de impactos negativos da produção, como erosão e degradação do solo; e a regulação produtiva, onde há um manejo integrado para otimizar o desempenho das culturas, do gado e das árvores (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Herrero et al., 2012; Ferraz et al., 2019; Moura et al., 2023; Madari et al., 2024; Matos et al., 2025).

Do ponto de vista econômico, a diversificação na oferta de produtos gerados na propriedade rural proporciona ao produtor alternativas para maximizar o lucro, ao se beneficiar das oscilações naturais dos preços nos mercados de produtos agrícolas (Reis et al., 2021).

Reis et al. (2023), utilizando um modelo matemático baseado em lógica difusa, avaliaram 22 propriedades rurais nos três biomas no estado de Mato Grosso: Cerrado, Pantanal e Amazônia, considerando métricas de sustentabilidade econômica, ambiental e social, obtiveram resultados reveladores. As fazendas que adotaram integração entre lavoura e pecuária (ILP) ou pecuária-floresta (IPF) tinham os melhores índices de sustentabilidade que as fazendas especializadas em monocultivo de grãos ou pastagem contínua. Esses sistemas sob integração se mostraram mais equilibrados, aproveitando melhor os recursos naturais e garantindo um impacto ambiental reduzido.

As grandes fazendas com tamanho médio de 2.648,5 ha de cultivo contínuo de grãos, especialmente de soja e milho, apesar de apresentarem as maiores margens de lucro, em média de US\$ 607,03 por hectare, e adotarem tecnologia avançada, tinham, entretanto, um custo de produção elevado em razão do uso intenso de insumos como fertilizantes e pesticidas. Já as propriedades dedicadas exclusivamente à pecuária de corte, de tamanho médio de 1.120 ha, apresentavam baixa produtividade e alto impacto ambiental, principalmente devido às emissões de GEE (média de $1,95 \times 10^{-8}$ t CO₂eq J⁻¹) e ao baixo uso de tecnologia no manejo dos animais.

O grande destaque ficou por conta das fazendas com sistemas de integração (ILP). Elas conseguiram produtividade de grãos ligeiramente superior às fazendas de monocultura e apresentaram valores negativos (média de $-1,11 \times 10^{-11}$ t CO₂eq J⁻¹), na emissão de GEE, o que significa que elas não apenas reduzem poluição como podem capturar C da atmosfera. Além disso, essas fazendas se destacaram na questão social, pois contavam com trabalhadores mais capacitados e com maior nível de escolaridade.

Por meio de uma ampla enquete sobre a adoção de sistema ILPF, envolvendo mais de 7 mil entrevistados conduzidas no Brasil entre 2015 e 2016, foi constatado que os principais fatores motivadores para os pecuaristas adotarem sistemas de integração foram a redução de impactos ambientais, a possibilidade da recuperação da pastagem e as vantagens oferecidas da rotação de culturas. Entre os produtores de grãos, os fatores mais relevantes para a adoção do sistema ILPF foram o aumento da rentabilidade por hectare e a diminuição dos riscos financeiros (Skorupa; Manzatto, 2019).

Sistema plantio direto

A necessidade de garantir maior produtividade, sem expandir a fronteira agrícola e diminuir o impacto da produção agrícola sobre o meio ambiente, exige estratégias de intensificação sustentável,

otimizando o uso de insumos e áreas cultivadas (Garnett et al., 2013). A rotação de culturas tem se mostrado eficaz na redução de riscos e na adaptação à mudança climática (Ewing et al., 2024), promovendo resiliência e melhor aproveitamento dos recursos naturais. O plantio direto associado à diversificação de culturas fortalece a retenção de C no solo, melhora sua qualidade e reduz perdas produtivas, assegurando maior estabilidade na renda agrícola.

O Sistema Plantio Direto (SPD) surgiu no Brasil na década de 1970, por iniciativa de produtores rurais. Nas décadas subsequentes, sua expansão ocorreu de forma lenta. Entretanto, entre 2006 e 2017, houve incremento de 84,9% na área sob SPD, alcançando 33 milhões de hectares (Fuentes-Llanillo et al., 2021) e, mais recentemente, 41 milhões de hectares¹. Esse sistema baseia-se em três princípios: rotação de culturas, revolvimento do solo restrito à linha de semeadura, e a cobertura permanente do solo, com uso de plantas vivas e/ou resíduos vegetais (palhadas). Entretanto, mesmo décadas após sua implantação, o SPD tem sido adotado em lavouras com insuficiente cobertura do solo, o que compromete sua eficácia protetiva. Essa limitação é observada, por exemplo, no Cerrado brasileiro, em sistemas soja de safra seguida de milho segunda safra – ou algodão segunda safra; e na região Sul do País, onde há predominância da cultura da soja no verão e o pousio no inverno. Nessa última região, dos 17,5 milhões de hectares semeados com culturas de verão, apenas 3 milhões de hectares são aproveitados no inverno, com destaque para o cultivo de trigo e, em menor proporção, de aveia, cevada, triticale e centeio (IBGE, 2025). Já no Cerrado da região do Matopiba, as altas temperaturas, aliadas aos solos com baixos percentuais de argila, têm acelerado a decomposição

da matéria orgânica, dificultando, de forma significativa, a formação de palhada.

O SPD, que integra práticas associadas ao manejo racional do solo, da água e dos insumos, tornou-se um dos pilares da agricultura sustentável no Brasil (Sá et al., 2025). Dentre os benefícios advindos do SPD, em ambientes tropicais e subtropicais no Brasil, estão a melhoria na conservação do solo e da água, o aumento do estoque de C no solo, a redução das emissões de GEE, o aumento da capacidade de retenção de água, a mitigação dos efeitos da seca e do aumento da temperatura, a estabilidade da produção, a quebra de ciclo de insetos-praga e doenças, o controle de plantas daninhas, a redução de custos, o melhor aproveitamento de insumos, a resiliência climática e, consequentemente, o aumento ou a manutenção de altos níveis de produtividade das culturas. Além disso, o SPD pode contribuir com o atendimento a exigências ambientais de mercados internacionais, centradas em produção mais limpa e no mercado de C, bem como para a adoção de práticas da agricultura regenerativa (Figura 5.4)².

Embora o mercado de C no Brasil ainda seja incipiente, operando apenas no escopo do mercado voluntário, e as vantagens do SPD na redução das emissões de GEE possam não refletir em benefícios econômicos diretos ao agricultor, o SPD está diretamente integrado às políticas públicas e metas climáticas. Além disso, contribui para maior segurança e estabilidade produtiva, bem como para a melhoria da capacidade adaptativa dos sistemas agrícolas, gerando reflexos positivos na economia nacional. Nesse contexto, o protagonismo do agricultor na promoção da sustentabilidade está associado à adoção da agricultura conservacionis-

¹ Comunicação por e-mail/telefônica de Rafael Fuentes-Llanillo, pesquisador do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná, enviada a Alexandre Cunha de Barcellos Ferreira, pesquisador da Embrapa Algodão, em 22/4/2025.

² A foto do feijoeiro faz parte do projeto Integra C: Tecnologia para sequestro de C em sistemas integrados de produção agropecuária no Cerrado (Embrapa SEG 20.18.03.043). A foto do algodoeiro faz parte do projeto Sucessão e rotação de culturas: superação de desafios e aperfeiçoamento do processo produtivo do algodoeiro no sistema plantio direto (Embrapa SEG 02.12.08.003).



Foto: Beta Etnok Madari



Foto: Alexandre Cunha de Barcellos Ferreira

Figura 5.4. Feijão comum (*Phaseolus vulgaris* BRS FC104, à esquerda) em plantio direto sobre palhada de braquiária (*Urochloa brizantha* BRS Paiaguás), em sistema de integração lavoura-pecuária, com coinoculação de sementes com *Rhizobio tropici*, *freirei* e *leucaneae* para FBN, além de aplicação foliar de *Azospirillum brasiliense* para estimular o crescimento vegetal, na Fazenda Capivara da Embrapa Arroz e Feijão, em Santo Antônio de Goiás, GO. Algodão (*Gossypium hirsutum*, à direita) em sistema de semeadura direta sobre palha de braquiária (*Urochloa ruziziensis*), em Santa Helena de Goiás, GO.

ta, em que o manejo do solo e das culturas é centrado no SPD.

A adoção desse sistema é estratégica para enfrentar desafios como a degradação do solo, a insegurança hídrica, a variabilidade climática e a demanda crescente por alimentos. Seus benefícios ambientais incluem a redução da erosão, o aumento da infiltração de água no solo, o sequestro de C e a melhoria da biodiversidade do solo. Do ponto de vista econômico, destacam-se o incremento da produtividade com menor uso de insumos, o efeito poupa-terra, a estabilidade da produção e a resiliência climática. Já os benefícios sociais estão relacionados à segurança alimentar, à geração de renda no campo e à valorização do agricultor.

Florestas plantadas (pinus e eucalipto)

As florestas desempenham um papel essencial na mitigação dos efeitos da mudança climática e na regulação do clima (Waring et al., 2020). Além disso, prestam uma série de serviços ambientais fundamentais, como a produção de água, a conservação do solo e a melhoria da qualidade do ar (IPCC, 2018). No caso dos plantios florestais, sua preservação minimiza emissões de GEE associa-

das ao desmatamento. Os reflorestamentos podem remover entre 40 e 100 bilhões de toneladas de C da atmosfera (FAO, 2025), o que equivale a aproximadamente uma década de emissões antropogênicas nas taxas atuais (IPCC, 2018). Esses serviços ambientais contribuem para reduzir a exposição ao risco climático, ao mesmo tempo em que fortalecem a capacidade adaptativa e a competitividade nacional em um cenário de maior exigência ambiental.

A biomassa das florestas plantadas contém aproximadamente 47 a 50% de C, e o estoque de C está diretamente ligado à produtividade da floresta, definida pela diferença entre produção por fotossíntese e consumo por respiração e colheita. Globalmente, estima-se que essas florestas removem da atmosfera cerca de 5 a 6 bilhões de toneladas de CO₂ por ano (IPCC, 2022b) e armazenam 82 a 86% do C presente na biomassa viva acima do solo (Six et al., 2002).

Por fim, os solos florestais são fundamentais no ciclo do C, sendo responsáveis pelo armazenamento de mais de dois terços do C orgânico das reservas globais no solo (Ahmed, 2018), reforçando sua

importância na mitigação dos impactos ambientais e na preservação da biodiversidade.

O estoque de C em um ecossistema florestal pode ser dividido em três grandes compartimentos:

- Carbono presente na biomassa viva das árvores: tronco, galhos, folhas e raízes.
- Carbono presente na biomassa morta: necromassa e serapilheira, a necromassa sendo a biomassa morta, incluindo troncos, galhos, folhas e raízes em decomposição; e a serapilheira, a camada de matéria orgânica composta por folhas, galhos, frutos e outros resíduos vegetais que se acumulam sobre o solo das florestas.
- Carbono contido na matéria orgânica do solo florestal.

A maior parte do C em uma floresta está presente na biomassa viva (44%) e na matéria orgânica do solo (45%). Porções menores do C florestal estão presentes na serapilheira, correspondendo a 6%, e na madeira morta, que representa 4% do estoque total (Grafton et al., 2021). Essas proporções e a quantidade de C armazenado em cada compartimento dependem do clima, da idade e de aspectos do manejo florestal, como espaçamento, desbaste, poda, fertilização e controle das plantas daninhas.

O sequestro de C nos produtos florestais madeireiros também depende da destinação da madeira colhida, pois diferentes usos determinam a longevidade do armazenamento de C e a taxa de emissão de GEE. Por exemplo, o uso da madeira para construção civil e mobiliário prolonga o sequestro de C por décadas ou até séculos; já o papel e a celulose, como embalagens e papelão, possuem ciclo curto, pois são rapidamente descartados e decompostos ou reciclados. O uso como fonte de energia (biomassa) libera rapidamente o C armazenado, tornando esse um processo de curto prazo, similar à decomposição natural. Resíduos industriais e agrícolas, como serragem, cascas e outros subprodutos, podem ser aproveitados na produção de painéis de madeira, prolongando o

armazenamento de C ou, caso descartados inadequadamente, sofrem degradação rápida e liberam C para a atmosfera.

Pinus e eucalipto são os cultivos de maior importância econômica no País, representando mais de 90% da área de florestas plantadas, que atualmente é de 10 milhões de hectares. Reconhecendo a relevância dessas culturas, os componentes do balanço de C foram monitorados nas principais regiões produtoras. No caso do pinus, o acompanhamento ocorreu no Sul do Brasil, enquanto para o eucalipto, a análise abrangeu uma área mais ampla, desde o Rio Grande do Sul até o Pará, por meio de projetos coordenados pela Embrapa. Os inventários apontam que a biomassa de eucalipto, entre seis e sete anos de idade, contém, em média, 76 t/ha de C (Tabela 5.1). Da mesma forma, árvores plantadas de pinus, próximas à idade de corte, armazenam cerca de 145 t, enquanto o estoque de C no solo, na camada de 0 a 100 cm, alcança aproximadamente 190 t/ha de C (Tabela 5.2).

No Brasil, os estoques de C nos plantios de pinus ultrapassam 348 milhões de toneladas, considerando-se que a área cultivada atualmente é de aproximadamente 1,8 milhão de hectares (Indústria Brasileira de Árvores, 2024). Já na cultura do eucalipto, a variação nos valores de C armazenado é mais ampla. Um levantamento nacional conduzido por Zanatta et al. (2020) identificou um estoque médio de 42,2 t/ha de C na camada de 0-20 cm, com valores que oscilam entre 16 e 102 t/ha de C.

Os solos florestais desempenham um papel essencial na remoção de GEE, atuando não apenas na absorção de CO₂, mas também como drenos de CH₄, um gás com potencial de aquecimento global 27 vezes superior ao do CO₂ (IPCC, 2021). Essa capacidade resulta da atividade de bactérias metanotróficas, que utilizam o CH₄ como fonte de energia e de C, contribuindo significativamente para a mitigação das emissões desse potente GEE. Presentes em diversos ambientes, como solos

Tabela 5.1. Estoques de carbono no componente arbóreo de florestas de eucalipto no Brasil, em razão da faixa de idade, expressos em toneladas por hectare.

Idade (anos)	Estado	Estoque de C na Biomassa Aérea	Estoque de C na Biomassa Radicular	Referência
		(Mg/ha)		
Média 2-3	MG e RS	15,7	5,6	Gatto et al. (2011), Wink et al. (2015) e Araujo et al. (2017)
Média 4-5	MG, BA e SP	43,8	8,6	Stape et al. (2008), Gatto et al. (2011) e Rodrigues (2017)
Média 6-7	SP, MG, BA e PR	63,1	13,3	Paixão et al. (2006), Stape et al. (2008), Gatto et al. (2011), Salvador (2015), Scarano e Ceotto (2015) e Souza (2019)
Média 8-20	MG e RS	97,1	18,5	Gatto et al. (2011) e Wink et al. (2015)

Tabela 5.2. Estoques de carbono no componente arbóreo e no solo florestal de florestas de pinus e vegetação nativa no Brasil, em função da faixa de idade, expresso em toneladas por hectare.

Idade (anos)	Classe de solo	Solo	Biomassa ⁽¹⁾		Serapilheira	Referência
		0-100 cm	Aérea	Radicular		
		(Mg/ha de C)				
5	Chernossolo	227,8	15,3	3,6	7,7	Balbinot et al. (2003)
17	Chernossolo	216,2	141,4	33,8	6,6	Veloso et al. (2018)
–	Chernossolo	209,0	73,3	17,4	2,2	
18	Latossolo	135,7	116,0	9,1	9,4	Ibarr et al. (2022)
–	Latossolo	199,7	79,2	19,0	3,5	
21	Argissolo	–	–	–	10,3	Kleinpaul et al. (2003)
16	Chernossolo	–	73,3	25,4	13,2	Sixel et al. (2015)
17	Chernossolo	–	121,7	16,2	7,0	Witschoreck (2008)
18	Cambissolo	–	109,9	–	–	Sette Junior et al. (2006)
7	Latossolo	–	63,4	17,1	4,7	Deliberali (2015)
16	Cambissolo	–	58,0	6,8	8,6	Watzlawick (2003)
–	Cambissolo	–	88,6	14,7	3,1	
25	Chernossolo	–	185,2	37,6	14,1	Bizon (2005)
9	Chernossolo háplico	–	53,6	–	–	Munhoz (2011)
média < 10			44,1	10,4	6,2	–
média > 10			115,1	21,5	9,8	–

florestais e agrícolas, essas bactérias ajudam a reduzir a concentração de CH_4 na atmosfera. Em plantios de pinus e eucalipto, elas promovem um influxo médio de 3 a 5 kg de C na forma de CH_4 por hectare ao ano (Veloso et al., 2019; Oliveira et al., 2021a; Ibarr et al., 2022; Rodrigues et al., 2023). Considerando-se a vasta área cultivada no Brasil com essas espécies e assumindo uma taxa de 3 kg de C de CH_4 por hectare ao ano, estima-se que os solos florestais possam mitigar até 1 milhão de toneladas de CO_2eq anualmente, evidenciando sua importância no equilíbrio do ciclo do C e na redução dos impactos climáticos.

Os fluxos de N_2O nos solos de florestas são relativamente baixos, em razão da quantidade reduzida de fertilizantes nitrogenados aplicada aos cultivos. As doses costumam ser inferiores a 100 kg/ha de N (Moreira et al., 2017), para um ciclo de 7 anos para o eucalipto e de 15 anos para o pinus.

O Brasil pode beneficiar-se significativamente do setor de florestas plantadas, uma vez que poucos países possuem condições climáticas favoráveis e tecnologia apropriada para a produção florestal como o Brasil. Essas vantagens, além de conferir ao País os melhores índices de produtividade mundial (Indústria Brasileira de Árvores, 2024), permitem que o balanço de C de sistemas florestais plantados seja positivo, possibilitando a geração de receita por meio da certificação de produtos florestais com baixa emissão de C e da comercialização de créditos de C. A importância das florestas plantadas com tecnologia com potencial de mitigação das emissões de GEE é reconhecida no plano nacional de adaptação e mitigação da agricultura, representando 50% da meta de mitigação de 2020 a 2030, principalmente pelo aumento na área plantada, na ordem de 4 milhões de hectares.

Restauração de ecossistemas

O Brasil sancionou, há 13 anos, a Lei nº 12.651/2012 (Brasil, 2012b), denominada de Lei de Proteção da Vegetação Nativa (LPVN), também comumente conhecida como o novo Código Florestal. Essa le-

gislação estabelece diretrizes gerais para a proteção da vegetação nativa, abrangendo as Áreas de Preservação Permanente (APPs), as Reservas Legais (RLs) e as Áreas de Uso Restrito (AURs). A lei insere-se no conjunto de normas jurídicas que regulam o uso da terra e a conservação dos recursos naturais no Brasil, em complemento a outros instrumentos legais, como a Lei nº 6.938/1981 (Brasil, 1981), que institui a Política Nacional do Meio Ambiente, e a Lei nº 9.605/1998 (Brasil, 1998), a chamada Lei de Crimes Ambientais, entre outros dispositivos. Entre seus principais mecanismos, destacam-se a instituição do Cadastro Ambiental Rural (CAR) e a criação dos Programas de Regularização Ambiental (PRA), a serem implementados pelos estados e pelo Distrito Federal. Passada mais de uma década, a maioria das propriedades e posses rurais do País já foi registrada no Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (Sicar), permitindo que o governo federal e os órgãos ambientais estaduais tenham acesso à localização e à situação ambiental dessas áreas. A partir da avaliação e checagem das informações prestadas, é possível a identificação de eventuais passivos ambientais nas propriedades e posses rurais do País, ou seja, de áreas degradadas ou alteradas.

Na propriedade ou posse rural, as principais áreas protegidas são as APPs e as RLs. As APPs são áreas cobertas ou não pela vegetação nativa, contribuindo para a proteção do solo, dos recursos hídricos, da oferta de água em quantidade e qualidade, da fauna e da flora, bem como de outros benefícios. Entre as principais categorias de APP, podem ser citadas as áreas ao longo de cursos d'água, no entorno de olhos d'água e nascentes, veredas, lagos, áreas com forte inclinação ($> 45^\circ$), entre outras. As dimensões das áreas de APP a serem mantidas ou recuperadas, bem como o regime de sua utilização, dependem de diversos fatores, os quais são explicitados na legislação (Brasil, 2012b; Skorupa et al., 2024). As RLs, por sua vez, são áreas com vegetação nativa que devem ser mantidas no interior de uma propriedade ou posse rural, visando assegurar o uso econômico dos recursos naturais

de maneira sustentável, proteger a fauna e a flora, e auxiliar na manutenção ou reabilitação dos processos ecológicos. Suas dimensões mínimas dependem da localização geográfica do imóvel no País, e são expressas em percentuais da área da propriedade ou posse rural (Figura 5.5). As formas de recomposição ou compensação e sua utilização são também definidas por lei.

De acordo com a plataforma Termômetro do Código Florestal (Observatório do Código Florestal, 2025), com base nos dados do Sicar, estima-se que o Brasil possua um passivo ambiental em áreas de imóveis rurais de cerca de 16 milhões de hectares em RL e cerca de 3 milhões de hectares em áreas de APP. No caso dos assentamentos, esses passivos são estimados em cerca de 1 milhão de hectares de RL e 135 mil hectares de APP. Uma visão geral da distribuição desses passivos é apresentada na Figura 5.6.

No caso das RLs, a maior parte do deficit está concentrada na Amazônia, que responde por mais de 50% do total, com cerca de 9,5 milhões de hectares, seguida pelo Cerrado (5,5 milhões de hectares), Mata Atlântica (2,5 milhões de hectares), Caatinga (351 mil hectares), Pampa (225 mil hecta-

res) e Pantanal (40 mil hectares). No caso das APPs, os maiores passivos recaem sobre a Mata Atlântica, estimados em cerca de 1 milhão de hectares, seguidos pelo Cerrado (930 mil hectares), Amazônia (650 mil hectares), Caatinga (290 mil hectares), Pampa (116 mil hectares) e Pantanal (51 mil hectares).

O Brasil assumiu vários compromissos internacionais e nacionais de reflorestamento e restauração florestal, principalmente a partir de 2015. Naquele ano, no âmbito da *COP 21*, em Paris, o País comprometeu-se a restaurar 12 milhões de hectares de vegetação nativa até 2030, como parte de sua primeira Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) (Brasil, 2015). Na atualização da NDC apresentada na *COP 29*, em 2024, em Baku, Azerbaijão, o Brasil reafirmou a importância da restauração florestal como uma estratégia fundamental para atingir a neutralidade climática até 2050 (Brasil, 2024a). Esse direcionamento foi reforçado em políticas internas, como a atualização do Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg) (Brasil, 2024b), que mantém o objetivo de recuperar 12 milhões de hectares até 2030 e visa acelerar e ampliar as ações de restauração no País. Além disso, o compromisso com a restauração ambiental é contemplado no Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC+ (2020–2030) (Brasil, 2021), que incluiu entre suas metas o plantio de florestas em 4 milhões de

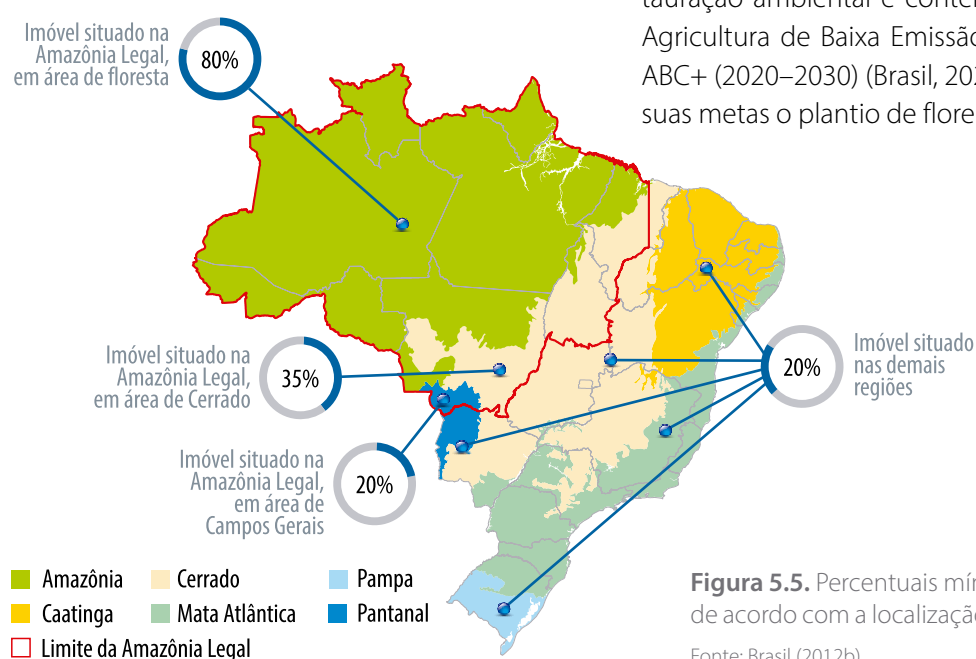


Figura 5.5. Percentuais mínimos de Reserva Legal de acordo com a localização geográfica do imóvel.

Fonte: Brasil (2012b).

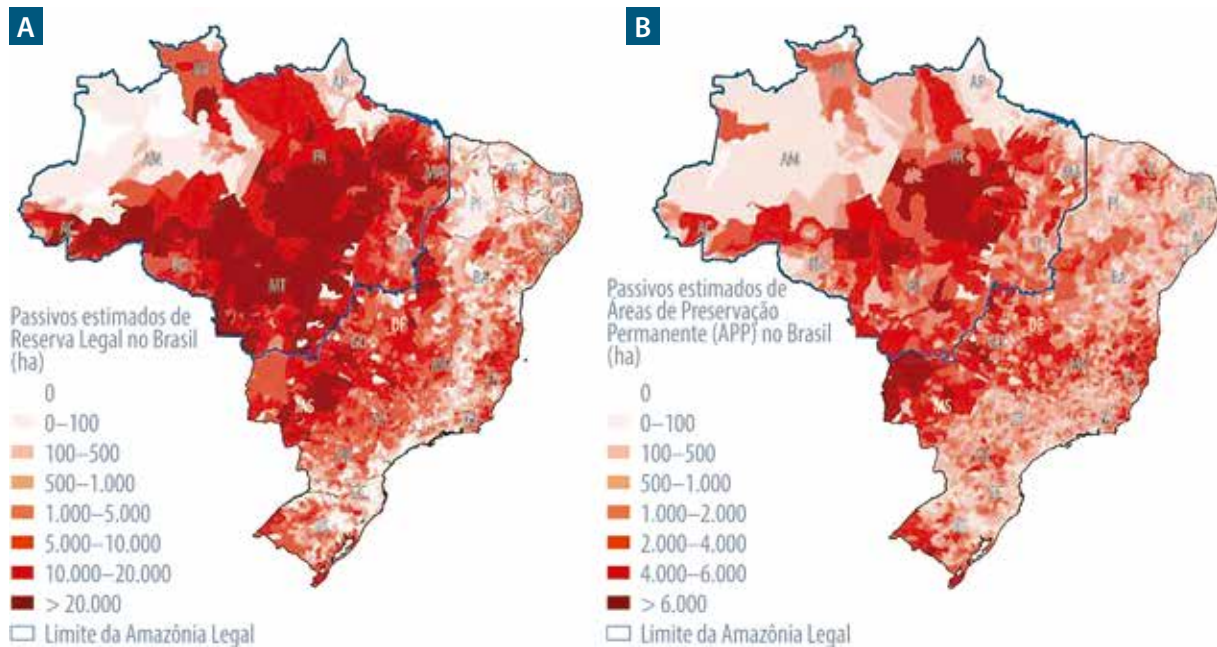


Figura 5.6. Distribuição dos passivos de Reserva Legal (A) e de Áreas de Preservação Permanente (B) na malha municipal do Brasil.

Fonte: Observatório do Código Florestal (2025).

hectares até 2030, com um potencial de mitigação de emissões de GEE de 510 milhões de Mg CO₂eq.

Exemplos do potencial de mitigação de GEE por meio de ações de restauração de áreas degradadas ou alteradas são apontados por Oliveira et al. (2024c), para Minas Gerais, que estimam que a restauração de 6,14 milhões de hectares no estado tem o potencial de sequestrar 170 milhões de toneladas de CO₂ até 2050. Silva (2024), por sua vez, estima que a restauração de apenas 1 ha na Mata Atlântica pode contribuir para a remoção de 37 a 221 t de C, equivalente a remoção de 136 a 809 t de CO₂, respectivamente, até 2030.

A Embrapa tem dedicado esforços para apoiar o cumprimento dos compromissos assumidos pelo País, ofertando produtos, processos e serviços voltados para as ações de recuperação de áreas degradadas ou alteradas. Um exemplo emblemático foi a criação da rede RestauraBio, que reúne cerca de 140 profissionais da Empresa que atuam no tema restauração de ecossistemas. A Empresa também desenvolveu e tem aperfei-

çoado ferramentas para apoiar essas ações, como a Plataforma WebAmbiente (Embrapa, 2025), concebida para a realização de diagnósticos de áreas degradadas ou alteradas e objeto de restauração; e o Sistema Agrotag VEG (Agrotag, 2025), voltado para a realização de monitoramento das áreas em restauração, apenas para citar dois exemplos.

Os compromissos entre os proprietários e os posseiros com os órgãos ambientais estaduais para sanar os eventuais passivos ambientais estão em curso por meio de sua adesão aos Programas de Regularização Ambiental (PRA) dos estados e do Distrito Federal. De modo geral, a definição das melhores estratégias para recuperação de áreas degradadas ou alteradas leva em consideração diagnósticos prévios, visando determinar os níveis de degradação observados, tendo como referência o potencial de regeneração natural das áreas e as ações necessárias para evitar, conter ou mitigar os fatores de degradação. Na Figura 5.7, é apresentada uma síntese da abordagem adotada na definição das melhores estratégias de recompo-

Condição da área a ser recomposta	Perturbada ou alterada		Degradada
Potencial de regeneração natural	Alto	Médio	Baixo
Alternativas de recomposição conforme a Lei nº 12.651/2012	Condução da regeneração natural	Plantio de espécies nativas conjugado com a condução da regeneração de espécies nativas	Plantio de espécies nativas
	Uso intercalado de espécies lenhosas, perenes ou de ciclo longo, exóticas com espécies nativas de ocorrência regional, em até 50% da área total a ser recomposta		
Estratégias para recomposição	Recomposição passiva: controle dos fatores de degradação	Manejo da regeneração e/ou realização de plantios parciais para adensamento, enriquecimento e nucleação	Plantio em área total: semeadura direta e/ou plantio de mudas ou estacas
Controle dos fatores de degradação	Cercamento da área, controle de plantas competidoras, controle de formigas cortadeiras, contenção de fogo, eliminação de processos erosivos e recuperação da fertilidade do solo		

Figura 5.7. Estratégias de recomposição para a restauração de áreas degradadas ou alteradas, a partir das alternativas legais e as condições de perturbação das áreas a serem recompostas.

Fonte: Adaptado de Skorupa et al. (2021).

sição, levando em conta as alternativas legais e as condições iniciais das áreas a serem recompostas.

A restauração pode se dar apenas com o propósito de restaurar processos ecológicos (Restauração Ecológica), ou, então, contemplar a exploração econômica das áreas, em uma abordagem produtiva de grãos, frutos, sementes, fibras, entre outros produtos (Restauração Produtiva), em sistemas agroflorestais.

Tecnologias e sistemas de produção mitigadores de emissões de gases de efeito estufa no cultivo de arroz irrigado nas regiões de clima temperado e tropical do Brasil

O arroz é essencial para a segurança alimentar global, ocupando cerca de 168,4 milhões de hectares no mundo, o que equivale a 9% das terras cultivadas (Silva; Wander, 2025). Sua produção está dire-

tamente ligada à emissão de GEE. A magnitude e o padrão dessas emissões são determinados, principalmente, pelo regime hídrico, pelo aporte de material orgânico e de fertilizantes nitrogenados sintéticos, assim como pelas práticas de manejo do solo e pelas características da planta de arroz (Yan et al., 2005; Hussain et al., 2015). O CH₄, é gerado pela decomposição da matéria orgânica no solo sob condições de alagamento (Le Mer; Roger, 2001; Conrad, 2002). A emissão do N₂O é proveniente da transformação microbiana do N no solo e é favorecida pela alternância entre períodos de alagamento e drenagem (Reddy; DeLaune, 2008). Já a emissão do CO₂ decorre de operações agrícolas, como o preparo do solo e o uso de insumos sintéticos. Em termos mundiais, a lavoura de arroz contribui com, respectivamente, 30 e 11% das emissões de CH₄ e N₂O associadas à agropecuária (IPCC, 2007).

No Brasil, a produção de arroz irrigado ocupou, na safra 2022/2023, aproximadamente 1,16 milhão de hectares, o que corresponde a apenas 0,69% da área cultivada mundial (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024). A maior parte está concentrada nas terras baixas da região Sul, que detêm mais de 85% da área cultivada no País. Nos últimos anos, a região Norte tem despontado como polo emergente da produção do cereal, abrigando atualmente 10% da área de arroz irrigado nacional (Embrapa Arroz e Feijão, 2024). Essa área, entretanto, representa cerca de 25% da área irrigada do País e responde por 40% do volume de água captado.

Para mitigar esses impactos, as políticas públicas devem fomentar práticas agrícolas sustentáveis, incluindo o manejo eficiente da água e estratégias de cultivo de baixa emissão de GEE. A promoção da captura de C pelo solo pode equilibrar a necessidade de produção com a preservação ambiental, garantindo um sistema agrícola mais sustentável.

A evolução das práticas de manejo, a seleção de cultivares adaptadas e a adequação dos sistemas de produção têm sido determinantes para o direcionamento de ações de pesquisa, desenvolvi-

mento e inovação voltadas à redução das emissões de GEE na produção de arroz irrigado. A Embrapa e as instituições parceiras têm conduzido estudos para monitorar impactos ambientais e identificar oportunidades de mitigação, garantindo maior sustentabilidade ao setor produtivo. Os esforços científicos iniciaram há cerca de duas décadas na região de clima temperado, com foco especial no Rio Grande do Sul, principal polo da orizicultura nacional. Com o crescimento da produção no Centro-Norte do País, as pesquisas foram ampliadas para regiões tropicais, acompanhando a expansão da área cultivada e adaptando estratégias de manejo às novas condições edafoclimáticas.

Na Tabela 5.3, estão resumidos os principais resultados obtidos relacionados à mitigação das emissões de GEE na produção de arroz irrigado.

Os avanços na quantificação das emissões de GEE na produção de arroz irrigado possibilitaram identificar diferentes fontes minerais de N com menor emissão de N_2O comparado com a ureia, fonte usualmente aplicada, e determinar fatores de emissão específicas de N_2O e NH_3 para as condições de solo e clima da região Sul do Brasil, principal produtor de arroz do País.

Tabela 5.3. Soluções tecnológicas para a redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE) na produção do arroz irrigado no Brasil.

Manejo ou prática	Resultado para a redução de emissão de GEE
Manejo da água	Irrigação por inundação intermitente, por sulco e aspersão apresentam potencial mitigador da emissão de GEE superior a 70%, em comparação à irrigação por inundação contínua.
Adubação nitrogenada	Uso de fertilizantes de eficiência aumentada reduz emissões de GEE em relação às fontes solúveis tradicionais.
Diversificação de culturas	Rotação do arroz com cultivos de sequeiro (soja, milho, sorgo, forrageiras) reduz a emissão de GEE em comparação ao monocultivo de arroz.
Cultivares de arroz	Identificação de cultivares com menor emissão de CH_4 devido à diversidade genética, refletindo diferenças na produção, oxidação e transporte do gás.
Manejo do solo e palhada	Preparo antecipado do solo no outono e rotação com soja reduzem em mais de cinco vezes a emissão de GEE anual em terras baixas, comparado ao preparo convencional na primavera.
Sistemas de produção sustentáveis	Rotação ou sucessão de cultivos de sequeiro em camalhões de base larga, sob Sistema de Plantio Direto (SPD), combinada com pastagens melhoradas e pastejo rotacionado, reduz emissões de CH_4 e aumenta o acúmulo de C no solo.
Rotação soja/arroz irrigado	Manutenção do solo drenado por mais tempo (soja/soja/arroz irrigado) reduz emissões de CH_4 do arroz em até 30%, sendo mais favorável que a rotação simples soja/arroz irrigado.

A ureia protegida com inibidor de urease (NBPT) e a ureia tratada com inibidor de nitrificação (DCD), por exemplo, apresentam emissão de N_2O inferior à da ureia simples, com perdas de 1,96 e 2,87% do N aplicado, respectivamente.

A emissão de N_2O é a principal via de perda de N do sistema solo-planta nas lavouras de arroz irrigado, enquanto a volatilização de NH_3 é menos significativa, ocorrendo principalmente em aplicações nos estágios iniciais de desenvolvimento da cultura. É importante destacar que os fatores de emissão de NH_3 determinados para o cultivo de arroz irrigado no Sul do Brasil foram bem inferiores ao valor de referência do IPCC (10%), indicando menor contribuição dessa via para as perdas de N na região.

A 3ª Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima foi publicada em 2016 (Brasil, 2016) e a 4ª Comunicação Nacional, em 2020 (Brasil, 2020), sob a coordenação técnica da Embrapa e supervisão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTI). Em ambas as edições, para o estado Rio do Grande do Sul, as estimativas de emissões de CH_4 do cultivo de arroz foram calculadas com base em fatores de emissão locais, em substituição aos dados padrão propostos pelo IPCC, utilizados em versões anteriores. Essa mudança permitiu uma estimativa mais realista do cenário nacional de emissões com relação à cultura de arroz irrigado.

As práticas de manejo e os sistemas de produção mitigadores de emissões de GEE no cultivo de arroz irrigado foram desenvolvidos com o objetivo de manter ou aumentar a produtividade e a eficiência no uso de recursos naturais e insumos. Dessa forma, além de ganhos ambientais significativos, as estratégias geradas estão atreladas a benefícios técnicos e econômicos, garantindo sustentabilidade e competitividade à produção nacional, equiparando-a ou destacando-a em relação aos demais países produtores.

As tecnologias mitigadoras indicadas trazem diversos benefícios relacionados à adaptação, como a identificação de cultivares de arroz irrigado com

maior eficiência no uso da água e adaptadas ao cultivo em ambiente com menor oferta de água. Também merecem destaque os benefícios em adaptação decorrentes da diversificação dos sistemas de produção, como a redução do banco de sementes de arroz-daninho, principal limitante da lavoura arrozeira na atualidade, a minimização da ocorrência e do impacto negativo das principais doenças do arroz, particularmente a brusone, assim como de insetos-praga; o favorecimento da ciclagem de nutrientes; o aporte de N ao sistema, via FBN; e a redução na demanda de adubação da cultura.

As tecnologias e sistemas de produção mitigadores de GEE desenvolvidos para o setor orizícola nacional buscaram, de forma ampla, promover ganhos em sustentabilidade e potencializar a produção nas áreas de terras baixas. Assim, as inovações tecnológicas desenvolvidas visam conciliar a manutenção da biodiversidade e outros serviços ecossistêmicos associados aos agroecossistemas com a ampliação da produção de arroz, outras culturas de grãos, forrageiras, carne e leite, fortalecendo a economia regional e a segurança alimentar nacional, em sintonia com os compromissos assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris para a redução das emissões de GEE.

Sistemas de produção de importância local ou regional

A diversidade de sistemas de produção agrícola e florestal praticados no Brasil reflete a diversidade de seus biomas, culturas e saberes presentes em seu vasto território. Entre esses sistemas, destacam-se aqueles de importância local ou regional, desenvolvidos e adaptados às condições ecológicas, sociais e econômicas de determinados territórios (Buainain; Garcia, 2013; Balieiro et al., 2024). Ainda que, em muitos casos, possam não ser amplamente conhecidos ou valorizados, tampouco inseridos nos mercados de larga escala, tais sistemas têm desempenhado importantes papéis nos contextos em que se inserem, contribuindo para a segurança alimentar, a conservação da biodiversidade, a geração de renda e o fortalecimento da resiliência frente à mudança climática, incluindo

a mitigação da emissão de GEE, sendo, por isso, reconhecidos em importantes políticas públicas (Brasil, 2021, 2024a, 2024b; Perin et al., 2021).

A contribuição desses sistemas não se dá apenas pela oferta de produtos diferenciados e de alto valor agregado, como, por exemplo, os produzidos em sistemas agroflorestais ou decorrentes do uso e manejo da vegetação nativa, mas também por promoverem um modelo de produção mais eficiente no uso dos recursos naturais e viáveis economicamente. Ao aliar inovação social e tecnológica à valorização de saberes tradicionais e à conservação dos ecossistemas, esses sistemas fortalecem a identidade territorial e aumentam a capacidade do País de competir com produtos sustentáveis em mercados cada vez mais exigentes em relação à rastreabilidade e à responsabilidade socioambiental (FAO, 2020).

Do ponto de vista da gestão de riscos, os sistemas agroflorestais, incluindo os de base agroecológica, reduzem significativamente a vulnerabilidade dos produtores frente a eventos climáticos extremos, pragas e oscilações de mercado, uma vez que contemplam uma diversidade de espécies nativas e cultivadas, cujo manejo confere maior estabilidade à produção, diluindo riscos econômicos e ecológicos. Além disso, esses sistemas favorecem a capacidade adaptativa das comunidades rurais, permitindo que as soluções sejam moldadas localmente e ajustadas às mudanças que se apresentam ao longo do tempo (Brasil, 2021).

No cenário global, os impactos desses sistemas para a sustentabilidade da produção de alimentos são relevantes. A adoção e valorização de sistemas como os apresentados nos estudos de caso a seguir representam uma via concreta para contribuir na mitigação de GEE, na recuperação de solos degradados, no aumento da produtividade sem conversão de novas áreas e na conservação da biodiversidade (IPCC, 2019). Em regiões como os biomas Amazônia, Cerrado e Caatinga, onde há pressões crescentes sobre os ecossistemas, tais experiências apontam caminhos para um desenvolvimento de baixo C, com geração de emprego e renda.

Esses sistemas de produção apresentam externalidades positivas, especialmente em um contexto em que o comércio internacional está cada vez mais atento às exigências socioambientais. Produtos originados de sistemas sustentáveis podem acessar nichos de mercado, fomentar cadeias de valor mais justas e transparentes, além de contribuir com metas globais de enfrentamento da degradação dos solos e da crise climática (IPCC, 2019; Organisation for Economic Co-Operation and Development, 2023).

O Brasil tem liderado esforços importantes na promoção da produção agropecuária sustentável, incluindo sistemas de relevância local e regional. Iniciativas como o Plano ABC+ (Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária) (Brasil, 2021), o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg) (Brasil, 2024b), o Programa Nacional de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação (REDD+) (Brasil, 2025), o Programa Bioeconomia Brasil – Sociobiodiversidade (Brasil, 2024c), o Programa Nacional de Florestas Produtivas (Brasil, 2024d), o Programa de Aquisição de Alimentos (PAA) (Perin et al., 2021), o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (Pronaf), e o fortalecimento de políticas de pagamento por serviços ambientais se relacionam diretamente com os sistemas locais e regionais aqui tratados e indicam que o País está investindo em soluções que vão além de sistemas de produção de larga escala, ou de tendências momentâneas impostas por mercados externos. O Plano ABC+, por exemplo, incentiva práticas como sistemas agroflorestais e a recuperação de áreas degradadas, incluindo APP e RL, assim como Programa Nacional de Florestas Produtivas (PNFP) que visa apoiar a recuperação de áreas degradadas ou alteradas para uso produtivo, contribuindo para a regularização e a adequação ambiental da agricultura familiar e para o aumento da produção de alimentos saudáveis e produtos oriundos da sociobiodiversidade. O Planaveg, por sua vez, estabelece metas ambiciosas de restauração com modelos produtivos sustentáveis. De forma complementar, o REDD+ reconhece o papel

de comunidades extrativistas na conservação de florestas; o programa Bioeconomia Brasil valoriza produtos da sociobiodiversidade; e o PAA e o Pronaf buscam garantir mercado e financiamento para a agricultura familiar. Por fim, o sucesso e o fortalecimento desses sistemas demonstram que o protagonismo também vem das bases, de agricultores, extrativistas e comunidades tradicionais que desenvolvem, inovam e mantêm vivas formas sustentáveis de habitar e produzir no campo.

Soluções tecnológicas que contribuem para a baixa emissão de carbono nos sistemas de produção agrícola e para o monitoramento, relato e verificação dos resultados das tecnologias do Plano ABC+

Neste tópico, são apresentadas tecnologias que, embora não constituam sistemas de produção, desempenham papel fundamental para o sucesso do Plano ABC+ (Brasil, 2021). Essas tecnologias contribuem tanto para viabilizar ou aumentar a capacidade de mitigação e adaptação dos diversos sistemas de produção, quanto para tornar possível o monitoramento, relato e verificação (MRV) dos impactos desses sistemas. Elas são essenciais em virtude da necessidade de comprovação das metas de redução das emissões assumidas pelo Brasil no seu NDC, como parte do Acordo de Paris. As ferramentas de MRV são também indispensáveis para atender às expectativas da sociedade no enfrentamento das mudanças globais, considerando os riscos e as oportunidades que os mercados tendem a demandar, riscos relacionados a novos padrões e regulamentações de produção passíveis de exigências pelos mercados, e oportunidades decorrentes da economia de C, com a adoção das tecnologias que estocam C no solo e na paisagem.

Inoculantes nas culturas de grãos

A aplicação de inoculantes contendo bactérias promotoras de crescimento de plantas representa uma estratégia que alia tradição e inovação na agricultura brasileira. Esses microrganismos desempenham papel fundamental na FBN e na promoção do crescimento vegetal, contribuindo diretamente para a redução do uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos. A produção desses fertilizantes demanda alto consumo energético e está associada a significativas emissões de GEE. Em contraste, a FBN, ao utilizar bactérias capazes de converter o N atmosférico em formas assimiláveis pelas plantas, constitui uma alternativa sustentável e eficiente, com potencial para reduzir impactos ambientais e aumentar a sustentabilidade dos sistemas produtivos agrícolas. Em vista disso, a utilização da FBN na cultura da soja, explorada há mais de 40 anos no Brasil, é considerada um dos pilares da chamada “agricultura tropical”, pois a inoculação recorrente proporciona o aporte de N necessário para a cultura sem a necessidade do uso de fertilizantes sintéticos (Hungria; Nogueira, 2022).

Atualmente, o setor industrial brasileiro que produz inoculantes conta com mais de uma centena de estabelecimentos produtores. São mais de 600 produtos registrados no Mapa e mais de 100 milhões de doses de inoculantes comercializadas por ano, para uso em cerca de 45 milhões de hectares. A principal cultura que se beneficia é a soja, com uma área de mais de 30 milhões de hectares inoculados anualmente, seguida pelo milho, com cerca de 7 a 8 milhões de hectares, e pela cana-de-açúcar, com aproximadamente 1,5 milhão de hectare. Além disso, recentemente, a coinoculação também tem sido considerada capaz de promover baixa emissão de N_2O e altas produtividades de feijão-comum, alimento base para a população brasileira, especialmente quando cultivado apenas com bioinsumos para FBN em sistema de integração lavoura-pecuária (Schulman et al., 2025).

Para compreender o potencial das tecnologias baseadas em bactérias promotoras de crescimento,

faz-se necessário entender os diferentes aspectos dos inoculantes. Bactérias, coletivamente chamadas de rizóbios e que englobam gêneros como *Bradyrhizobium*, *Rhizobium*, entre diversos outros, são capazes de estabelecer simbiose com plantas leguminosas, como a soja e o feijão, formando estruturas radiculares, chamadas nódulos, onde ocorre a fixação do N. A simbiose da soja com as bactérias aportadas com inoculantes contendo *Bradyrhizobium* contribui com cerca de 90% do N necessário para a cultura (Hungria; Nogueira, 2022). A reinoculação anual nessa cultura leva a incrementos médios de 8 a 10% na produtividade de grãos. Esses ganhos levam a uma economia da ordem de 15 bilhões de dólares anuais no Brasil (Telles et al., 2023), além de benefícios ambientais significativos. Estima-se que mais de 300 kg de CO₂ equivalente deixem de ser emitidos por hectare ao ano no cultivo da soja, demonstrando que a FBN exerce papel fundamental na mitigação das emissões de GEE na agricultura brasileira (Santos et al., 2019; Prando et al., 2024). Segundo dados do IPCC, a cada 1 kg de N aplicado na agricultura, são emitidos cerca de 10 kg de gases CO₂eq.

Outra tecnologia que também se baseia em bactérias fixadoras de N, porém sem capacidade de estabelecer simbiose, envolve estirpes de *Azospirillum* e *Nitrospirillum*. Essas pesquisas se iniciaram no Brasil há mais de 50 anos, com os estudos pioneiros da pesquisadora Johanna Döbereiner, embora os primeiros produtos comerciais tenham surgido mais recentemente. Na Argentina, inoculantes contendo *Azospirillum* passaram a ser comercializados há mais de 20 anos, enquanto, no Brasil, isso ocorreu há pouco mais de uma década. Essas bactérias apresentam baixa especificidade na associação com hospedeiros vegetais e, além da capacidade de fixar N, desempenham uma série de mecanismos de promoção de crescimento de raízes e parte aérea vegetais (Santos et al., 2019). Os resultados indicam melhoria no desempenho das plantas, especialmente quanto ao aproveitamento dos fertilizantes. Estimativas recentes indicam

melhoria na eficiência de uso de N em até 20% (Santos et al., 2019). Embora o *Azospirillum* tenha sido inicialmente recomendado para o milho, resultados expressivos também vêm sendo obtidos com sua coinoculação com *Bradyrhizobium* na cultura da soja, o que alia alto aporte de N e melhor aproveitamento de nutrientes de uma forma geral (Hungria et al., 2015; Jantalia et al., 2021; Barbosa et al., 2022). No caso específico do *Nitrospirillum*, bactéria que compõe inoculantes para a cultura da cana-de-açúcar, foram obtidos resultados semelhantes aos verificados na cultura do milho (Reis et al., 2020).

Outros inoculantes têm sido introduzidos mais recentemente no mercado brasileiro. Um exemplo são as diferentes espécies de *Bacillus*, recomendadas para a mitigação do estresse hídrico vegetal e para melhorar o aproveitamento de fósforo (P) no solo (Oliveira-Paiva et al., 2024). Nesse caso, o uso de *Bacillus* solubilizadores de P tem mostrado respostas positivas em promover o melhor uso desse nutriente que se encontra imobilizado no solo. Apenas 15 a 20% do P aplicado aos solos tropicais, como os do Cerrado, são efetivamente utilizados pelas plantas, e o restante fica retido no solo. Ao facilitar a mobilização desse P para as culturas, esse inoculante permite tanto retorno econômico em razão da necessidade de menores doses de fertilizantes, quanto benefícios ambientais, ao reduzirem a demanda por produção e transporte desses insumos.

O sucesso de uso do *Azospirillum* vem abrindo caminho para que a pesquisa avance na busca por outras tecnologias de base microbiana para a agricultura, estimulando a indústria a desenvolver e registrar novos produtos inoculantes e encorajando os produtores a adotarem essas inovações. Recentemente, foram lançados inoculantes com consórcio de bactérias *Azospirillum* e *Pseudomonas*, voltados para o incremento da produção de biomassa em pastagens (Hungria et al., 2021) bem como inoculantes contendo *Bradyrhizobium*, *Bacillus* e *Paraburkholderias* para a cultura da soja, integrando

FBN, promoção de crescimento de plantas e proteção das plântulas (Fernandes et al., 2021).

A pesquisa em bioinsumos tem avançado significativamente, buscando aprimorar a eficiência dos inoculantes para diferentes culturas e desenvolver metodologias mais precisas para quantificação da FBN. Os avanços recentes da pesquisa incluem o lançamento de novas estirpes comerciais, bem como a validação científica que bioinsumos utilizados em condições brasileiras podem reduzir as emissões de GEE em até 60%. A inclusão de bioinsumos no Plano Nacional de Fertilizantes (Brasil, 2023c) reforça o compromisso do Brasil com uma agricultura de baixo C. As metas do plano incluem o incremento da adoção de bioinsumos para a nutrição de plantas, a ampliação da oferta de produtos biológicos que promovam a eficiência no uso de fertilizantes e a redução das perdas gasosas (N_2O e NH_3) de N na agricultura.

Em resumo, a inoculação de culturas com microrganismos benéficos validados pela pesquisa representa uma tecnologia consolidada e estratégica para a agricultura brasileira, oferecendo benefícios econômicos, ambientais e sociais significativos. A pesquisa e o desenvolvimento de bioinsumos, aliados a políticas públicas eficazes, são fundamentais para que o Brasil continue avançando na produção agrícola sustentável e na mitigação da mudança climática.

Fertilizantes de eficiência aprimorada — organominerais e fertilizantes nitrogenados especiais

Fertilizantes são insumos essenciais para a agricultura, pois fornecem nutrientes necessários para a produção vegetal. O Brasil é o quarto maior consumidor mundial de fertilizantes e depende fortemente da importação desses insumos. A maioria dos solos agrícolas brasileiros são pobres em nutrientes e demandam grande quantidade de fertilizantes. Sem o uso desses insumos, a área necessária para produzir a mesma quantidade de alimentos que o Brasil produz hoje seria pelo me-

nos 40% maior do que a área ocupada pela atividade agrícola. Assim, os fertilizantes contribuem para a redução da necessidade de abertura de novas áreas, e isso deve ser considerado em sua pegada de C. Contudo, o processo de produção de fertilizantes, sobretudo de fertilizantes nitrogenados, é um grande emissor de GEE. A indústria de fertilizantes nitrogenados tem trabalhado há muitos anos em práticas para a redução das emissões de poluentes e de GEE, o que tem diminuído sensivelmente sua pegada de C.

Nas últimas décadas, com o crescente interesse por práticas de descarbonização da agricultura, surgiu a necessidade de desenvolver fertilizantes mais eficientes, que resultem em menores emissões de GEE. Em resposta a essa demanda, a indústria passou a otimizar seus processos industriais e a ofertar fertilizantes com tecnologias agregadas, com o objetivo de otimizar a entrega de nutrientes e reduzir as perdas de N por volatilização de amônia. Destacam-se, nesse contexto, os fertilizantes nitrogenados protegidos ou enriquecidos com inibidores de processos químicos que promovam tais perdas.

Outra importante vertente são os fertilizantes organominerais, que utilizam resíduos orgânicos em sua composição. Esses produtos contribuem para o aproveitamento adequado que, de outra forma, poderiam causar impactos ambientais negativos. Dessa forma, os organominerais não apenas reduzem a dependência de fontes minerais, como também minimizam os impactos ambientais associados à disposição inadequada desses resíduos.

A utilização de fertilizantes de menor impacto ambiental reduz o impacto de todo o sistema de produção, resultando em produtos com menor pegada de C, tornando a produção de alimentos mais sustentável. Todas as tecnologias em fertilizantes validadas no Brasil podem ser rapidamente estendidas para países de agricultura tropical, como os da África e da América Latina, que possuem solos e clima semelhantes ao Brasil.

Fertilizantes organominerais

Fertilizantes organominerais são obtidos a partir da associação entre fertilizantes minerais e fontes orgânicas, que podem ser resíduos orgânicos das mais diversas origens. O uso de resíduos orgânicos de origem agrícola, agropecuária ou agroindustrial para a produção de fertilizantes organominerais é uma estratégia para recuperar os nutrientes contidos nesses resíduos e para dispor corretamente desses resíduos, reduzindo-se assim os seus potenciais impactos ambientais. Dessa forma, resíduos que seriam aplicados in natura, envolvendo enorme quantidade de energia no transporte e na aplicação além de gerar grande quantidade de GEE, podem ser aproveitados de uma forma mais econômica e ecológica.

O Brasil é um grande produtor de carnes, sobretudo de suínos e de aves. Essas atividades geram grande quantidade de resíduos que, se não forem corretamente destinados, podem causar impacto ambiental pela contaminação de águas e pela emissão de GEE (Alves et al., 2012). Estima-se que, anualmente, o Brasil produz cerca de 8 milhões de toneladas de cama de aviário e 105 milhões de metros cúbicos de dejetos de suínos (Benites et al., 2010). Considerando-se o conteúdo de nutrientes (NPK) desses resíduos, isso representa cerca de 20% da demanda nacional por nutrientes. A utilização desses materiais na produção de fertilizantes organominerais representa importante ação para a redução da dependência externa brasileira de fertilizantes importados e para a mitigação das emissões de GEE quando comparada ao uso direto dos resíduos in natura.

Ureia modificada

A ureia é a fonte de N mais utilizada no Brasil, representando aproximadamente 50% do total consumido anualmente no País. Antes de disponibilizar formas assimiláveis de N às plantas, a ureia passa por hidrólise enzimática catalisada pela urease, uma enzima natural.

No processo de hidrólise, ocorre alcalinização ao redor dos grânulos de ureia, que induzem perdas de N para a atmosfera por volatilização de amônia. Essas perdas representam, em média, 20% do N aplicado na forma de ureia, pelo menos o dobro do que se observa para outros tipos de fertilizantes, como o sulfato de amônio e o nitrato de amônio (Mazzetto et al., 2020). Esses autores também concluíram que as emissões de N_2O , um potente GEE, são maiores quando se utiliza a ureia. É importante considerar que a amônia volatilizada é uma fonte indireta de N_2O após sua deposição nos solos (Alves et al., 2012).

Para reduzir o desperdício da ureia e minimizar seus impactos ambientais, algumas soluções têm sido desenvolvidas. Uma das estratégias consiste em revestir os grãos de ureia com materiais como polímeros ou enxofre elementar, que atuam como barreiras físicas, promovendo liberação gradual do nutriente no solo. Essa liberação controlada evita que muito N se perca no ar em forma de gás. Em alguns casos, a eficiência no controle das perdas de N é relativamente alta. Um estudo realizado em Sergipe, por exemplo, comparou diferentes formas de ureia (Santos et al., 2020). Os resultados indicaram que a aplicação de um fertilizante organomineral, composto por ureia combinada a materiais orgânicos, reduziu as perdas de N em até 74% em uma safra e 67% na safra seguinte, em comparação com a ureia comum e o sulfato de amônio. Todavia, a ureia revestida com enxofre apresentou resultados variáveis: em uma safra, reduziu as perdas em 53%, mas em outra, registrou perdas superiores às da ureia comum. Isso indica que, embora essa tecnologia seja promissora, ainda há desafios para garantir consistência em sua eficácia.

Uma alternativa para diminuir as perdas de N e os impactos ambientais causados pelo uso da ureia como fertilizante é a aplicação de substâncias que desaceleram o processo químico natural que libera o N da ureia no solo. Entre essas substâncias estão os inibidores da urease (uma enzima

que transforma a ureia em amônia) como o NBPT [N-(n-butil) triamida tiofosfórica], combinados, às vezes, com inibidores que evitam outras perdas de N, via desnitrificação ou por lixiviação de nitrato. Os inibidores de nitrificação mais comuns são o DCD (dicianodiamida), o nitrapyrin [2-cloro-6-(triclometil)piridina}}, e o DMPP (3,4-dimetilpirazol fosfato) Mazzetto et al. (2020). Uma dessas combinações, composta por NBPT e nitrapirina, reduziu em 49% as emissões de N_2O após a aplicação do fertilizante em uma plantação de milho. Já o uso isolado de NBPT, possibilitou a redução das perdas de N na forma de amônia em até 35% (Martins et al., 2017), o que representa redução significativa das emissões indiretas de N_2O , decorrentes da deposição atmosférica subsequente da amônia. Além disso, com a aplicação da ureia misturada com inibidores, as plantas conseguem aproveitar melhor o fertilizante, resultando em aumento significativo na produção de grãos com mais de 1,5 t/ha em comparação ao uso convencional de ureia.

Embora a ureia seja um fertilizante amplamente utilizado na agricultura brasileira, seu uso convencional está associado a perdas de N com implicações diretas na eficiência do uso do fertilizante e no agravamento das emissões de GEE. Dessa forma, o aprimoramento das tecnologias para produzir fertilizantes melhorados à base de ureia representa uma oportunidade concreta para aliar ganhos de eficiência agrônômica à redução do impacto ambiental da adubação nitrogenada.

Biochar: alternativa tecnológica com potencial de adicionalidade no mercado de carbono, melhoria do solo e recuperação de áreas degradadas

A proposta de utilizar resíduos da pirólise e de biorrefinarias na agricultura abre novas possibilidades para o manejo sustentável do solo e de resíduos (Novotny et al., 2015). A pirólise é um processo que aquece a biomassa sem oxigênio suficiente para a combustão, transformando-a em biochar

(em português também chamado de biocarvão), um tipo de carvão vegetal. A biomassa utilizada é subproduto de processos que envolvem a produção de energia renovável (calor, eletricidade e biocombustíveis) e a fabricação de substitutos petroquímicos, como polímeros, plásticos e insumos agroindustriais. O biochar apresenta alta concentração de C em uma forma bastante resistente à decomposição (recalcitrante). Quando colocado no solo, lá pode permanecer por centenas ou milhares de anos, oferecendo benefícios para a fertilidade do solo (Madari et al., 2017; Rodrigues et al., 2019) e retenção de nutrientes e água (Carvalho et al., 2014), além da filtragem de agrotóxicos (Pierri et al., 2022) e elementos tóxicos (Wnetrzak et al., 2014). Trata-se de uma tecnologia aplicável em diferentes escalas, tanto na produção, quanto na aplicação do biochar (Latawiec et al., 2019). Inspirada no conhecimento indígena pré-colombiano (Novotny et al., 2009), essa tecnologia alia tradição e ciência para uma agricultura sustentável (Dela Piccola et al., 2021).

A tecnologia biochar teve sua inspiração nos estudos sobre as Terras Pretas de Índio da Amazônia (Novotny et al., 2007). Esses solos são extremamente férteis e ricos em C (Sombroek et al., 1993; Cunha et al., 2007), apresentando notável resiliência ao manterem sua fertilidade mesmo após prolongado uso agrícola. Essa característica se deve, principalmente, à humificação, um processo que transforma e incorpora materiais orgânicos, inclusive carbonizados, à matéria orgânica dos solos. As Terras Pretas foram formadas pelos indígenas pré-colombianos, embora não se saiba ao certo se sua origem foi um processo intencional de melhoria do solo ou apenas um subproduto das práticas agrícolas e de habitação (Lombardo et al., 2022). Essas populações costumavam descartar os resíduos do seu dia a dia, restos de alimentos, animais, carapaças de quelônios e excrementos, em fogueiras, possivelmente para evitar a proliferação de insetos e a atração de predadores. Como consequência, houve acúmulo significativo de materiais carbonizados, cinzas e carvão no solo. Com o tempo, as alterações

químicas naturais desses resíduos carbonizados resultaram em um material recalcitrante, capaz de reter nutrientes essenciais para o crescimento das plantas, graças à formação de grupos químicos reativos. Essa retenção impede a perda dos nutrientes, tornando as Terras Pretas de Índio extremamente produtivas, mesmo em um ambiente amazônico sujeito a chuvas intensas e ao intemperismo. O intemperismo é o processo natural que desgasta e transforma as rochas ao longo do tempo, ajudando na formação do solo. Ele acontece por meio de forças da natureza, como chuva, vento, calor e até mesmo a ação de plantas e microrganismos. A maioria dos solos em clima tropical são altamente intemperizados, o que faz com que tenham baixa fertilidade natural, pois muitos nutrientes essenciais foram perdidos ao longo do tempo. No Brasil, os Latossolos e Argissolos são exemplos comuns desse tipo de solo.

O estudo das Terras Pretas de Índio possibilitou a definição de um modelo de material orgânico a ser reproduzido visando à melhoria da fertilidade do solo de forma sustentável e ao sequestro de C (Novotny et al., 2009). Para isso, podem-se utilizar resíduos carbonizados (biochar) e gerar os desejados grupos químicos reativos de forma expedita e econômica, utilizando técnicas modernas em uma integração harmoniosa entre o conhecimento tradicional indígena pré-colombiano, baseado no respeito à natureza, e o conhecimento científico contemporâneo.

Por fim, é importante destacar que essa tecnologia não pretende competir por recursos energéticos, como o carvão vegetal e o bagaço de cana-de-açúcar, mas sim otimizar seu uso para a geração de energia ou produtos químicos. Isso é feito por meio de métodos modernos de pirólise e do aproveitamento de resíduos de difícil descarte, que frequentemente se transformam em passivos ambientais. Entre esses resíduos estão os oriundos das indústrias madeireira, de papel e celulose, da produção de carvão vegetal, bem como os provenientes da indústria de biocombustíveis de segunda, terceira e quarta gerações – como bio-

diesel, etanol a partir de processos celulósicos e biocombustíveis derivados de algas –, além de lodo de esgoto, casca de arroz e outros subprodutos da agroindústria. Dessa forma, concilia-se a produção de energia e alimentos com o aumento da fertilidade do solo e o sequestro de C. Ademais, há benefícios ambientais dessa abordagem, que transformam desafios em oportunidades e promovem integração sustentável entre os setores energético e agroindustrial.

Talvez se esteja diante de uma segunda Revolução Verde, na qual tecnologias já ultrapassadas serão substituídas por processos inovadores que valorizam o reaproveitamento de resíduos e a produção de novos insumos adaptados às condições tropicais. Por se tratar de tema inédito na literatura e os pesquisadores da Embrapa serem pioneiros no assunto, as contribuições ainda são principalmente no âmbito do avanço do conhecimento que já dão suporte ao desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis, que promovam o sequestro de C e o aumento da fertilidade do solo, dando melhor destino aos resíduos agroindustriais.

Tecnologias para diminuir a emissão de metano entérico

Os ruminantes são capazes de utilizar grandes quantidades de fibras e convertê-las em produtos de elevado valor nutricional para o homem. A melhoria da eficiência de conversão dos alimentos fibrosos em produtos como o leite e a carne depende de múltiplos fatores biológicos, como o genótipo e o metabolismo, entre outros, estando a nutrição dos animais intimamente relacionada às respostas esperadas (Oliveira et al., 2025)³.

³ OLIVEIRA, P. P. A.; BRUNO, J. F.; CHAMILETE, S. A. M.; FURTADO, A. J.; BRUNETTI, H. B.; NOVO, A. L. M.; ALVES, T. C.; NASSU, R. T.; BERNDT, A. Boas práticas para a mitigação da emissão de metano entérico em bovinos leiteiros. In: OLIVEIRA, P. P. A.; NOVO, A. L. M.; BERNDT, A.; NASSU, R. T.; ALVES, T. C. (ed.). **Protocolos de boas práticas para a mitigação de gases do efeito estufa em sistemas de produção de bovinos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, [2025?]. p. 8-42. No prelo.

No entanto, para realizar esse processo, os ruminantes liberam o gás CH_4 via eructação, sendo este um dos principais GEE oriundos das atividades pecuárias. O CH_4 é produzido de maneira natural dentro do retículo-rúmen dos ruminantes, o que representa uma perda energética durante a digestão do alimento, além de impactar negativamente o ambiente.

Em sistemas pecuários no Brasil, muitas vezes a emissão entérica de CH_4 representa mais de 90% das emissões totais de GEE, tornando imprescindíveis ações para diminuir a emissão desse gás, fato que contribui para facilitar as formas de compensação pelas remoções de GEE (Oliveira et al., 2020). Além disso, o Brasil recentemente aderiu ao Global Methane Pledge, cujo principal objetivo é realizar ações voluntárias para reduzir coletivamente as emissões globais de CH_4 em pelo menos 30% até 2030, em relação aos níveis de 2020. Essa medida tem o potencial de reduzir em até 0,2 °C o aquecimento global até 2050 (Global Methane Pledge, 2025).

Várias instituições vêm desenvolvendo campanhas e políticas voltadas à mitigação da emissão de CH_4 entérico, e muito destaque tem sido dado ao manejo nutricional. Entretanto, o impacto das ações de melhoria dos índices zootécnicos das fazendas, relacionados à produção e à reprodução, também causam grande impacto sobre as emissões de CH_4 , configurando-se como importantes estratégias para a mitigação da emissão de GEE (Oliveira et al., 2025).

Segundo Oliveira et al. (2025), em termos de manejo nutricional e de manipulação ruminal, diversas estratégias podem ser adotadas, como: manejo do pastejo; suplementação lipídica; uso de óleos essenciais; de ionóforos; de algas marinhas; de receptores de elétrons alternativos; de compostos secundários de plantas; de leveduras e de inibidores químicos da metanogênese, processo no qual microrganismos geram CH_4 .

O manejo do pastejo é a forma com que se regula o acesso dos animais à pastagem. A emissão de CH_4 varia de acordo com a quantidade e a qualidade do alimento digerido e, de maneira geral, é maior quando os animais consomem alimentos de pior qualidade e de menor densidade energética. No Brasil, Congio et al. (2018) observaram que pastos de capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum. 'Cameroon') com critério de entrada dos animais no pasto com 95% de interceptação luminosa, em comparação com a máxima interceptação, proporcionaram redução de 20% na emissão de CH_4 em gramas por quilograma de leite produzido.

A suplementação lipídica, como a inclusão de óleos de sementes na dieta de bovinos, promove a mitigação de CH_4 por meio de sua toxicidade contra microrganismos metanogênicos, da redução de bactérias que consomem CH_4 e de alterações na fermentação ruminal, resultando em menor produção e emissão de CH_4 . Nas meta-análises de Congio et al. (2021) e Arndt et al. (2022), observaram-se diminuições na emissão de CH_4 entérico por animal, variando de 17,6 a 47,9%, dependendo do tipo e da quantidade de lipídio empregado na dieta do animal.

Os óleos essenciais são misturas complexas de metabólitos secundários encontrados em todos os tecidos vivos de plantas e podem conter componentes como eugenol, presente no broto de cravo, ou timol e carvacrol, presentes no orégano. Quando esses compostos são extraídos e concentrados, ou produzidos quimicamente, os óleos essenciais podem exercer atividades antimicrobianas contra bactérias e fungos, quando adicionados na dieta de bovinos, especialmente bactérias gram-positivas. No rúmen, essas bactérias estão envolvidas em processos de fermentação acoplados à produção de CH_4 pela liberação de gás hidrogênio (H_2) (Owens; Goetsch, 1988).

Um produto comercial à base de óleo de orégano e de extrato de chá verde, e suas combinações, quando fornecido a vacas leiteiras em lactação,

reduziu a emissão de CH₄ por quilograma de matéria seca ingerida entre 16 e 22% (Kolling et al., 2018). Já na metanálise de Belanche et al. (2020), reduções de 8,8% na produção diária de CH₄ por animal, 12,9% por quilograma de matéria seca ingerida e de 9,9% na produção de leite (corrigida por gordura e proteína) foram relatadas para uma mistura de coentro, eugenol, acetato de geranila e geraniol em vacas leiteiras.

Os ionóforos, como a monensina, a lasalocida ou a salinomycin, são uma classe de aditivos que deprimem ou inibem seletivamente o crescimento de microrganismos do rúmen, reduzindo a produção de CH₄ de forma indireta. Na metanálise de Appuhamy et al. (2013), vacas leiteiras suplementadas com monensina apresentaram, em média, redução de 3,6% (g/d) na emissão de CH₄.

Já as algas marinhas são macroalgas, organismos complexos e diversos que podem crescer em ambientes marinhos e de água doce. Quando utilizadas na alimentação de bovinos, as algas marinhas que produzem e armazenam uma substância chamada bromofórmio, potente inibidor da enzima metiltransferase, podem reduzir a produção de CH₄. Estudos com ovelhas, novilhos e vacas leiteiras relataram reduções na produção de CH₄ entre 9 e 98%, com o uso da suplementação da dieta com *Asparagopsis* spp. Essa variação depende da dose de suplementação utilizada e do tipo da dieta usada (Roque et al., 2019, 2021; Stefanoni et al., 2021). A eficácia de *Asparagopsis* spp. na mitigação de CH₄ depende de sua concentração de bromofórmio, que varia de 3,0 a 51,0 mg/kg de matéria seca. Além disso, *Asparagopsis* spp. é mais eficaz em diminuir a produção de CH₄ em dietas de alto teor de concentrado do que em dietas de alta forragem (Roque et al., 2021). Entretanto, conforme alerta Hristov (2024), após compilar os trabalhos de Stefanoni et al. (2021), Thorsteinsson et al. (2023) e Krook et al. (2024), é necessário atentar para a qualidade do leite de vacas alimentadas com macroalgas, pois estas contêm elevadas concentrações de iodo, arsênio e outros metais pesa-

dos ou elementos tóxicos. Ainda que tecnologias estejam sendo desenvolvidas para reduzir alguns dos elementos regulamentados, como o iodo, precauções devem ser adotadas.

Os receptores de elétrons alternativos são compostos orgânicos, como o fumarato e malato, e compostos inorgânicos, como o nitrato e sulfato. Em especial o nitrato, capta hidrogênios no rúmen, competindo com a formação de CH₄, auxiliando consequentemente para sua diminuição. Vale lembrar que o nitrato é potencialmente tóxico, havendo necessidade de adaptação ou readaptação da dieta se seu uso for descontinuado. Na metanálise de Feng et al. (2020), a redução média na produção de CH₄ foi estimada em 13,9% na dose média de nitrato. Já Arndt et al. (2022) observaram que a inclusão de fumarato e nitrato, como receptores de elétrons alternativos, diminuiu a produção total de CH₄ em 16 e 17%, respectivamente.

Os compostos secundários de plantas, como os taninos e saponinas encontrados em diversas plantas leguminosas e não leguminosas, possuem potencial para reduzir a emissão de CH₄ por meio da inibição direta ou indireta de microrganismos metanogênicos e de algumas bactérias fibrolíticas especializadas, o que pode comprometer a digestão da fibra. O uso de fontes vegetais eficazes de mitigação de CH₄ entérico, contendo taninos e/ou saponinas, como *Leucaena* spp., *E. cyclocarpum* e *G. sepium*, é particularmente importante para sistemas de pastejo, especialmente durante a estação seca, quando a qualidade geral da pastagem é baixa (Congio et al., 2021). Segundo esses autores, a inclusão de 27% de *Leucaena* spp., com base na matéria seca, em dietas predominantemente compostas por gramináceas diminuiu o rendimento de CH₄ por quilograma de matéria seca ingerida e o fator Ym em 27,4 e 29,6%, respectivamente, sem afetar a produção diária de CH₄, a intensidade de emissão por litro de leite nem a produção de leite. Na metanálise de Arndt et al. (2022), foi constatado

que a inclusão de forragens taníferas na dieta de ruminantes reduziu a intensidade de emissão de CH₄ associada à produção de leite em 18%.

As leveduras, principalmente do gênero *Saccharomyces*, são fungos que atuam modificando a fermentação ruminal de duas maneiras: fornecendo fatores estimulantes para as bactérias ruminais e absorvendo o oxigênio que entra no ambiente ruminal. Esse processo aumenta a eficiência fermentativa, favorecendo a produção de propionato, cujo maior volume proporcionado está diretamente relacionado à redução das emissões de CH₄. Embora nem todos os estudos apontem reduções significativas nas emissões de CH₄ com a suplementação de leveduras (Darabighane et al., 2019; Palangi; Lackner, 2022), há evidências de efeitos benéficos em determinadas condições. Tristant e Moran (2015), por exemplo, observaram redução de 4% (g/dia) na produção de CH₄ em vacas holandesas em lactação, mantidas em confinamento e suplementadas com *S. cerevisiae* na dose de 5 x 10⁷ UFC/kg de matéria seca.

Os inibidores químicos sintéticos da metanogênese, como o 3-nitrooxipropanol (3-NOP), são moléculas de baixo peso molecular que, quando incluídas em pequenas doses na alimentação de ruminantes, inibem a produção de CH₄ ao bloquearem a etapa final de sua formação no rúmen. Em níveis típicos de inclusão em dietas com alto teor de concentrado para bovinos leiteiros e de corte, o 3-NOP reduziu a produção de CH₄ em 30% (Hristov et al., 2015; Arndt et al., 2022; Beauchemin et al., 2022).

No Brasil, várias dessas estratégias estão sendo adotadas com sucesso, com o objetivo de atender ao Global Methane Pledge e melhorar os resultados do Inventário Nacional de Emissões e Remoções dos Gases de Efeito Estufa. Nesse contexto, a Embrapa frequentemente realiza avaliações para verificar o efeito dessas estratégias em condições tropicais.

Protocolo MRV na agropecuária brasileira

O protocolo MRV (Mensuração/Monitoramento, Relato e Verificação) foi desenvolvido conceitualmente pela Embrapa e pela Fundação Getúlio Vargas – FGV (Gurgel et al., 2020) com o objetivo de validar informações sobre diversos sistemas de produção agropecuária, ser aplicável a todos os biomas brasileiros e possibilitar a obtenção contínua de dados oriundos das propriedades rurais. Essa abordagem permite o gerenciamento de resultados e dos impactos das ações de enfrentamento da mudança climática, sendo útil no planejamento de projetos, na tomada de decisões sobre investimentos, na geração de créditos de C, no estabelecimento de metas e no delineamento de estratégias climáticas. O protocolo está alinhado às diretrizes da UNFCCC (Wilkes et al., 2013; IPCC, 2019), fornecendo informações confiáveis sobre as mudanças nos estoques de C no solo e emissões/remoções de GEE em propriedades que adotam sistemas de produção sustentáveis (SPS).

O protocolo pode ser aplicado a diversos sistemas agrícolas, incluindo culturas anuais e perenes (alimentares, fibrosas, forrageiras e bioenergéticas), confinamento de animais, tratamento de dejetos, sistemas integrados, silvipastoris e agroflorestais. Desenvolvido a partir de um modelo conceitual, o protocolo integra ferramentas de coleta de dados locais e remotos, banco de dados de múltiplo uso e métodos de cálculo e verificação remota.

Uma das principais ferramentas associadas ao protocolo é a calculadora GHG Protocol Agricultura e Pecuária, disponibilizada também na versão web, aplicada ao balanço de emissões dos escopos I (emissões diretas, provenientes das operações da própria empresa) e II (emissões indiretas associadas à energia adquirida pela empresa). Essa ferramenta passou por atualizações que incluem emissões oriundas de confinamento de bovinos e do componente florestal. Os coeficientes de emissão foram revisados conforme o Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa (Brasil,

2020) e com base na literatura científica mais recente (Manzatto, 2024).

O protocolo é aplicável a produtores de diferentes portes. Embora unidades médias e grandes tenham maior interesse comercial pela possibilidade de obtenção de vantagens econômicas, pequenos produtores também podem se beneficiar por meio da validação de boas práticas e do monitoramento da evolução de seus sistemas em comparação com outros estabelecimentos.

Deve-se destacar que o protocolo foi desenvolvido com base em ferramentas já disponíveis, agora integradas e automatizadas para a coleta, o registro e a verificação dos dados nas propriedades. Entre essas ferramentas, destacam-se:

Sacir (Sistema de Apoio à Caracterização de Imóveis Rurais): plataforma web que gera cartogramas com informações sobre aptidão agrícola, confrontos com unidades de conservação e terras indígenas, cobertura de vegetação nativa, uso da terra e qualidade das pastagens desde 2008. O serviço disponibiliza os mapas de uso atual do imóvel, aptidão agrícola, declividade, histórico de uso, histórico das pastagens e estado de sua adequação ambiental.

AgroTag MRV: sistema para identificação do uso e cobertura das terras, coleta de dados a campo e integração de informações temáticas.

SatVeg: ferramenta de visualização de perfis temporais dos índices vegetativos (NDVI e EVI), utilizada para apoiar a gestão territorial e para monitorar a dinâmica da cobertura do solo.

GHG Protocol para Agricultura e Pecuária: ferramenta de cálculo das emissões de GEE, mensurando as emissões e as remoções nas propriedades rurais.

Os processos de medição e de monitoramento dependem, fundamentalmente, da forma como as informações são coletadas (Figura 5.8). De forma geral, os dados de entrada podem ser agrupados em duas categorias: locais e remotos. Entre os

dados locais incluem-se amostras de solo, formulários e dados fornecidos por agentes responsáveis pela implementação dos projetos (produtores ou consultores), fotografias georreferenciadas tiradas na propriedade, entre outras informações coletadas em campo. Quanto aos dados remotos, utilizam-se fontes de informação mais amplas, geradas originalmente para outras finalidades, como dados socioeconômicos coletados por institutos públicos de pesquisa (por exemplo, os da Pesquisa Agrícola e Pecuária Municipal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE), dados ambientais disponibilizados pelo Serviço Florestal Brasileiro com base no Cadastro Ambiental Rural (CAR), e repositórios de imagens por satélite. Essa combinação de fontes possibilita um sistema robusto e adaptável de MRV, fundamental para responder às demandas por rastreabilidade, sustentabilidade e transparência nas cadeias produtivas agropecuárias.

Perspectivas futuras

Neste capítulo, foram apresentadas soluções voltadas ao fortalecimento da pesquisa e da inovação, aos sistemas de produção e às práticas agrícolas que promovem a baixa emissão de carbono (C), bem como tecnologias de ponta que contribuem para o controle e a gestão da emissão de gases de efeito estufa (GEE) e do balanço de C.

A pesquisa agropecuária brasileira caminha para uma era de transformações, em que inovação, integração e sustentabilidade se consolidam como pilares para o desenvolvimento de sistemas de produção resilientes e de baixa emissão de C.

O avanço no estudo do balanço de C, aliado ao desenvolvimento de métodos precisos de mensuração e monitoramento, é essencial para aprimorar estimativas de emissão e remoção de C, e orientar decisões estratégicas na gestão agrícola. Protocolos alinhados a padrões internacionais e ferramentas de inteligência artificial possibilitam

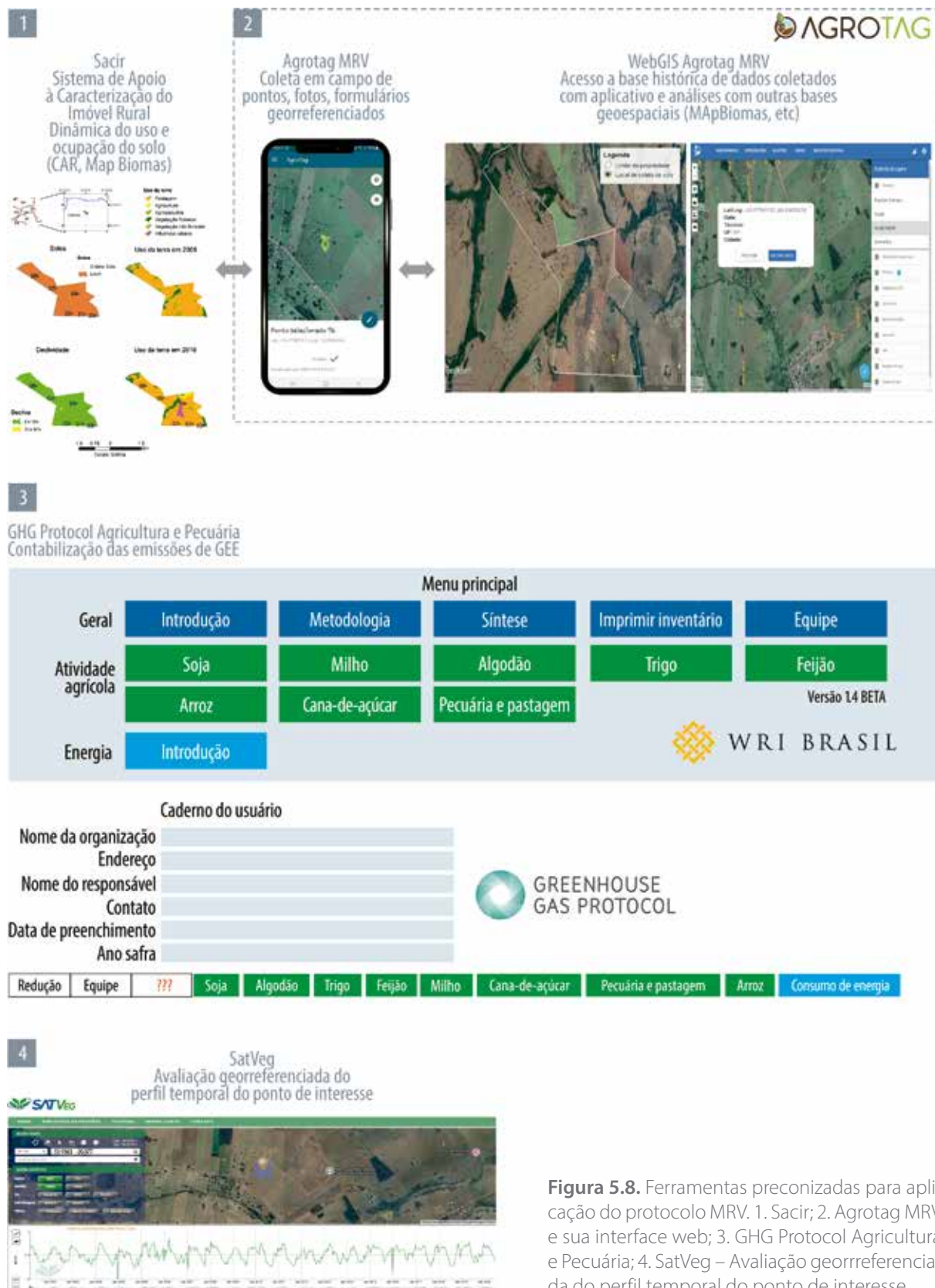


Figura 5.8. Ferramentas preconizadas para aplicação do protocolo MRV. 1. Sacir; 2. Agrotag MRV e sua interface web; 3. GHG Protocol Agricultura e Pecuária; 4. SatVeg – Avaliação georreferenciada do perfil temporal do ponto de interesse.

ajustes em tempo real nas práticas de manejo, otimizando o sequestro de C e reduzindo a pegada de C dos sistemas de produção.

No desenvolvimento de tecnologias, observa-se uma tendência crescente de aliar ganhos econômicos e ambientais. Sistemas complexos de produção, como a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), demonstram que a sinergia entre atividades agrícolas, pecuárias e florestais aumenta a produtividade e reduz os impactos ambientais. Práticas como o plantio direto, a rotação de culturas e o uso estratégico de leguminosas contribuem para a saúde do solo e para a diminuição das emissões de GEE, promovendo paisagens multifuncionais que conciliam produção, biodiversidade e sequestro de C.

A inovação tecnológica também se destaca na busca por alternativas para a adubação nitrogenada. O desenvolvimento de fertilizantes de eficiência aprimorada, que envolvam inibidores de urease, ureia modificada ou organominerais, representa uma tendência irreversível na redução de perdas de nitrogênio (N) e das emissões diretas e indiretas de N_2O . Essa vertente, além de melhorar o rendimento das culturas, contribui significativamente para a mitigação dos impactos ambientais, transformando passivos energéticos em soluções sustentáveis.

Outra fronteira que desponta na pesquisa agropecuária é a utilização de bioinsumos e tecnologias de base microbiana, como os inoculantes e bactérias promotoras de crescimento. A eficiência na fixação biológica de N (FBN), já consolidada na cultura da soja, aponta para um futuro em que o uso consciente de bioinsumos possa reduzir drasticamente a dependência de fertilizantes sintéticos, promovendo um ciclo produtivo mais sustentável e de menor impacto ambiental. As pesquisas indicam ganhos expressivos tanto em produtividade quanto na mitigação de emissões de GEE, ao se reduzir o aporte de insumos industriais. Essa tendência, combinada com o desenvolvimento de produtos inovadores resultantes de consórcios

entre a academia, institutos de pesquisa e o setor privado, deverá ampliar o leque de tecnologias disponíveis para a agricultura de baixo C.

Tecnologias como o biochar oferecem alternativas para melhorar a fertilidade e saúde do solo e sequestrar C em longo prazo, especialmente em áreas degradadas. Essas inovações podem transformar a produção, promovendo uma “segunda revolução verde” que une produtividade, sustentabilidade e inovação.

Protocolos de mensuração, relato e verificação (MRV), aliados a imagens de satélite, sensores remotos e plataformas digitais, fortalecem a transparência e eficiência no monitoramento e na gestão ambiental. Essa integração favorece a valoração financeira de práticas sustentáveis, como certificações e créditos de C, e apoia a participação em mercados de C.

A convergência entre inovação, sustentabilidade e modernização não se restringe apenas às tecnologias individuais, mas abrange também mudança de paradigma na forma de pensar e gerir a produção agropecuária. Futuras pesquisas deverão enfatizar a importância da interdisciplinaridade, estimulando a colaboração entre entes governamentais, instituições de pesquisa e o setor produtivo. Essa dinâmica colaborativa facilitará a adaptação das tecnologias emergentes às condições específicas dos diferentes biomas brasileiros, promovendo soluções customizadas que atendam às necessidades locais e regionais. A capacitação técnica dos agricultores, o desenvolvimento de políticas de incentivo e a promoção de parcerias público-privadas são estratégias indispensáveis para que essa transformação ocorra de forma ampla e efetiva.

É impossível ignorar os desafios impostos pela mudança climática, que exigem resposta articulada em termos de pesquisa, inovação e adaptação. A mudança do clima afeta diretamente a disponibilidade de água, a saúde dos solos e a produtividade agrícola, elevando a urgência de desen-

volver sistemas de produção resilientes. Nesse cenário, tecnologias que possibilitem a gestão integrada dos recursos naturais em tempo real, aliadas a práticas conservacionistas e de regeneração dos ecossistemas, ganham destaque. A pesquisa agropecuária, portanto, deverá se orientar para não apenas aumentar a produtividade, mas também garantir a segurança alimentar e (bio)energética, num ambiente mais sustentável e preparado para os desafios futuros.

Resumidamente, o futuro para a pesquisa agropecuária no Brasil se configura a partir da junção de múltiplas frentes: a evolução de métodos precisos para a mensuração do balanço de C; a incorporação de tecnologias inovadoras, como fertilizantes de eficiência aprimorada, bioinsumos, biochar e cultivares adaptadas; a adoção de sistemas de produção biodiversos e integrados; e a ampliação do uso de ferramentas digitais para monitoramento e gestão ambiental. Essa nova abordagem, que une inovação tecnológica, sustentabilidade ecológica, e gestão integrada dos dados, promete transformar a agropecuária brasileira em um modelo de produção resiliente, eficiente e ambientalmente responsável. Ao mesmo tempo, ela abre caminho para que o País cumpra seus compromissos internacionais relacionados à mitigação da mudança climática e consolide sua posição como protagonista no desenvolvimento de tecnologias de baixo C para a agricultura global, com foco no Hemisfério Sul e em regiões tropicais e subtropicais.

Por fim, essa transformação requer a integração entre o conhecimento tradicional e as novas tecnologias, a capacitação contínua dos produtores, a formulação de políticas públicas eficientes e a consolidação de uma infraestrutura robusta para experimentação, coleta e análise de dados. Assim, o setor agropecuário poderá aumentar sua competitividade, preservar os recursos naturais e garantir um desenvolvimento agrícola sustentável para as futuras gerações.

Referências

- ABIEC. **Beef report 2024**: perfil da pecuária no Brasil. ago. 2024. Disponível em: <https://www.abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2024-perfil-da-pecuaria-no-brasil/>. Acesso em: 25 abr. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Mapeamento do arroz irrigado no Brasil**: safra 2022-2023. abr. 2024. (Boletim do SNIRH, 5). Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/ac9b36cd-88fc-4211-911a-741b5f290c00/attachments/ANA_Boletim_SNIRH_5_ArrozIrrigado_web.pdf. Acesso em: 2 maio 2025.
- AGROTAG. **Sistema AgroTag**. Disponível em: <https://www.agrotag.cnptia.embrapa.br/#/>. Acesso em: 28 abr. 2025.
- AHMED, I. U. Forest soil C: stock and stability under global change. In: VIANA, H. F.; GARCÍA-MOROTE, F. A. (ed.). **New perspectives in forest science**. London: InTech, 2018. p. 37-67. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74690>.
- ALMEIDA, R. G.; ANDRADE, C. M. S.; PACIULLO, D. S. C.; FERNANDES, P. C. C.; CAVALCANTE, A. C. R.; BARBOSA, R. A.; VALLE, C. B. Brazilian agroforestry systems for cattle and sheep. **Tropical Grasslands - Forrajes Tropicales**, v. 1, n. 2, p. 175-183, Dec. 2013. DOI: [https://doi.org/10.17138/tgft\(1\)175-183](https://doi.org/10.17138/tgft(1)175-183).
- ALVES, B. J. R.; CARVALHO, A. M.; JANTALIA, C. P.; MADARI, B. E.; URQUIAGA, S.; SANTOS, J. C. F. dos; SANTOS, H. P. dos; CARVALHO, C. J. R. de. Emissões de óxido nítrico e óxido nítrico do solo em sistemas agrícolas. In: LIMA, M. A.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; MACHADO, P. L. O. de A.; URQUIAGA, S. (ed.). **Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira**. Brasília, DF: Embrapa; Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2012. p. 159-191.
- ALVES, B. J. R.; SCIVITTARO, W. B.; JANTALIA, C. P.; SOUSA, R. O.; BAYER, C.; RODRIGUES, R. de A. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; MADARI, B. E. **Protocolo para medições de fluxos de gases de efeito estufa em sistemas aeróbicos e alagados de produção de grãos - Rede Fluxus**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2017. 55 p. (Embrapa Agrobiologia. Documentos, 306). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1072895/1/DOC306PROTOCOLOMEDICOESDEFLUXOSDEGASES.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2024.
- APPUHAMY, J. A. D. R. N.; STRATHE, A. B.; JAYASUNDARA, S.; WAGNER-RIDDLE, C.; DIJKSTRA, J.; FRANCE, J.; KEBREAB, E. Anti-methanogenic effects of monensin in dairy and beef cattle: a meta-analysis. **Journal of Dairy Science**, v. 96, n. 8, p. 5161-5173, Aug. 2013. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5923>.
- ARAGÃO, W. F. D. X.; ZOLIN, C. A.; BEHLING, M.; PEZZOPANE, J. R. M.; XIMENES, E. S. O. C.; FLUMIGNAN, D. L.; MAGALHÃES, C. A. S. Transmission of photosynthetically active radiation and the productivities of soybean and maize in agroforestry systems. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 209, n. 5, p. 619-631, May 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/jac.12653>.
- ARAUJO, V. A.; GARCIA, J. N.; CORTEZ-BARBOSA, J.; GAVA, M.; SAVI, A. F.; MORALES, E. A. M.; LAHR, F. A. R.; VASCONCELOS,

- J. S.; CHRISTOFOR, A. L. Importância da madeira de florestas plantadas para a indústria de manufaturados. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 90, p. 189-200, abr./jun. 2017. DOI: <https://doi.org/10.4336/2017.pfb.37.90.824>.
- ARNDT, C.; HRISTOV, A. N.; PRICE, W. J.; MCCLELLAND, S. C.; PELAEZ, A. M.; CUEVA, S. F.; OH, J.; DIJKSTRA, J.; BANNINK, A.; BAYAT, A. R.; CROMPTON, L. A.; EUGENE, M. A.; ENAHORO, D.; KEBREAB, E.; KREUZER, M.; MCGEEK, M.; MARTIN, C.; NEWBOLD, C. J.; REYNOLDS, C. K.; SCHWARM, A.; SHINGFIELD, K. J.; VENEMAN, J. B.; YANEZ-RUIZ, D. R.; YU, Z. Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5°C target by 2030 but not 2050. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 119, e2111294119, May 2022. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2111294119>.
- BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. de O.; STONE, L. F. (ed.). **Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2011. 130 p.
- BALBINOT, R.; SCHUMACHER, M. V.; WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R. Inventário do carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 5 n. 1, p. 59-68, jan./jun. 2003. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/RECEN/article/view/433/588>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- BALIEIRO, F. C.; PEREIRA, H. S.; LOYOLA, R.; TONIN, A. M.; AUGUSTO, D. C. C.; MELO, F. P. L.; MAIA, J. L. S.; UGUEN, K.; MONTEIRO, M. M.; VIEIRA, R. R. S.; BARBIERI, R. L.; ALFAIA, S. S. Conciliando a agricultura e a manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos. In: PRADO, R. B.; OVERBECK, G. E.; GRACO-ROZA, C.; MOREIRA, R. A.; MONTEIRO, M. M.; DUARTE, G. T. (org.). **Relatório temático sobre agricultura, biodiversidade e serviços ecossistêmicos**. Campinas: Ed. dos Autores, 2024. p. 99-131. DOI: <http://doi.org/10.4322/978-65-01-21502-0.cap04>.
- BARBOSA, J. Z.; ROBERTO, L. A.; HUNGRIA, M.; CORRÊA, R. S.; MAGRI, E.; CORREIA, T. D. Meta-analysis of maize responses to *Azospirillum brasilense* inoculation in Brazil: Benefits and lessons to improve inoculation efficiency. **Applied Soil Ecology**, v. 170, 104276, Feb. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104276>.
- BEAUCHEMIN, K. A.; UNGERFELD, E. M.; ABDALLA, A. L.; ALVAREZ, C.; ARNDT, C.; BECQUET, P.; BENCHAAAR, C.; BERNDT, A.; MAURICIO, R. M.; MCALLISTER, T. A.; OYHANTÇABAL, W.; SALAMI, S. A.; SHALLOO, L.; SUN, Y.; TRICARICO, J.; UWIZEYE, A.; CAMILLIS, C. DE; BERNOUX, M.; ROBINSON, T.; KEBREAB, E. Invited review: current enteric methane mitigation options. **Journal of Dairy Science**, v. 105, n. 12, p. 9297-9326, Dec. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22091>.
- BELANCHE, A.; NEWBOLD, C. J.; MORGAVI, D. P.; BACH, A.; ZWEIFEL, B.; YÁÑEZ-RUIZ, D. R. A meta-analysis describing the effects of the essential oils blend Agolin on ruminant on performance, rumen fermentation and methane emissions in dairy cows. **Animals**, v. 10, n. 4, p. 620, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani10040620>.
- BENITES, V. de M.; CORREA, J. C.; MENEZES, J. F. S.; POLIDORO, J. C. Produção de fertilizante organomineral granulado a partir de dejetos de suínos e aves no Brasil. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 29.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 13.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 11.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 8., 2010, Guarapari. **Fontes de nutrientes e produção agrícola: modelando o futuro: anais**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 5 p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/954898/1/FERTBIO2010ViniciusBenites.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- BIZON, J. M. C. **Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantios de *Pinus taeda* L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes**. 2005. 96 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.
- BODDEY, R. M.; CASAGRANDE, D. R.; HOMEM, B. G. C.; ALVES, B. J. R. Forage legumes in grass pastures in tropical Brazil and likely impacts on greenhouse gas emissions: a review. **Grass and Forage Science**, v. 75, n. 4, p. 357-371, Aug. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/gfs.12498>.
- BRASIL. Decreto nº 11.815, de 5 de dezembro de 2023. Institui o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis. **Diário Oficial da União**: seção 1, n. 231, p. 18, 6 dez. 2023b. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/decreto-n-11.815-de-5-de-dezembro-de-2023-528496572>. Acesso em: 30 abr. 2025.
- BRASIL. Decreto nº 12.044, de 5 de junho de 2024. Institui a Estratégia Nacional de Bioeconomia. **Diário Oficial da União**: seção 1, n. 107, p. 3, 6 jun. 2024c. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=06/06/2024&jornal=515&pagina=3&totalArquivos=122>. Acesso em: 30 abr. 2025.
- BRASIL. Decreto nº 12.087, de 3 de julho de 2024. Institui o Programa Nacional de Florestas Produtivas. **Diário Oficial da União**: seção 1, n. 127, p. 7, 4 jul. 2024d. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=04/07/2024&jornal=515&pagina=7&totalArquivos=202>. Acesso em: 1 maio 2025.
- BRASIL. Decreto nº 9.073, de 5 de junho de 2017. Promulga o Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, celebrado em Paris, em 12 de dezembro de 2015, e firmado em Nova Iorque, em 22 de abril de 2016. **Diário Oficial da União**: seção 1, n. 107, p. 3, 6 jun. 2017. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/decreto/d9073.htm. Acesso em: 18 abr. 2025.
- BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 109, 30 dez. 2009. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm. Acesso em: 5 jun. 2025.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nº 4.771,

de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, ano 149, n. 102, p. 1, 28 maio 2012b. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 28 abr. 2025.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 16509, 2 set. 1981. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938compilada.htm. Acesso em: 20 ago. 2021.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 1, 13 fev. 1998. Retificada em: 17 fev. 1998. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm. Acesso em: 28 abr. 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Plano ABC**: dez anos de sucesso e uma nova forma sustentável de produção agropecuária. Brasília, DF, 2023a. Disponível em: <https://repositorio-dspace.agricultura.gov.br/handle/1/2117>. Acesso em: 18 abr. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura**: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Brasília, DF, 2012a. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/publicacoes/download.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária 2020-2030**: plano operacional. Brasília, DF, 2021. 133 p. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/publicacoes/final-isbn-plano-setorial-para-adaptacao-a-mudanca-do-clima-e-baixa-emissao-de-carbono-na-agropecuaria-compactado.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Quarta comunicação nacional do Brasil à convenção**: quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima. Brasília, DF, 2020. Disponível em: https://repositorio.mcti.gov.br/bitstream/mctic/4782/1/2020_quarta_comunicacao_nacional_brasil_convencao_quadro_nacoes_unidas_sobre_mudanca_clima.pdf. Acesso em: 14 jun. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Terceira comunicação nacional do Brasil à convenção**: quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima: sumário executivo. Brasília, DF, 2016. Disponível em: https://repositorio.mcti.gov.br/bitstream/mctic/4312/1/2016_terceira_comunicacao_nacional_brasil_convencao_quadro_nacoes_unidas_sobre_mudanca_clima_sumario_executivo.pdf. Acesso em: 14 jun. 2025.

BRASIL. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. **Plano nacional de fertilizantes 2050**: uma estratégia

para os fertilizantes no Brasil. Brasília, DF, 2023c. 198 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/confert/pnf/pnf-v-08-06-12-23.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Estratégia nacional para REDD+ do Brasil**. Brasília, DF, 2025. Disponível em: <http://redd.mma.gov.br/pt/estrategia-nacional-para-redd>. Acesso em: 25 abr. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **A NDC do Brasil**: a visão do Brasil para 2035. Brasília, DF, 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/brasil-entrega-a-onu-nova-ndc-alinhada-ao-acordo-de-paris/ndc-versao-em-portugues.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Contribuição nacionalmente determinada pretendida (iNDC) do Brasil**. Brasília, DF, 2015. Disponível em: <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/BRAZIL%20iNDC%20portuguese%20-%20FINAL.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano nacional de recuperação da vegetação nativa 2025-2028**: sumário executivo. Brasília, DF, 2024b. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/biodiversidade-e-biomas/sumario-executivo-planaveg>. Acesso em: 25 abr. 2025.

BUAINAIN, A. M.; GARCIA, J. R. Contextos locais ou regionais: importância para a viabilidade econômica dos pequenos produtores. In: CAMPOS, S. K.; NAVARRO, Z. (org.). **A pequena produção rural e as tendências do desenvolvimento agrário brasileiro**: ganhar tempo é possível? Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2013. p. 133-176. Disponível em: <https://ceca.ufal.br/professor/jhqc/LivroPequenaProduRural.pdf#page=135>. Acesso em: 30 abr. 2025.

CARVALHO, M. T. de M.; MAIA, A. de H. N.; MADARI, B. E.; BASTIAANS, L.; VAN OORT, P. A. J.; HEINEMANN, A. B.; SILVA, M. A. S. da; PETTER, F. A.; MARIMON JUNIOR, B. H.; MEINKE, H. Biochar increases plant-available water in a sandy loam soil under an aerobic rice crop system. **Solid Earth**, v. 5, n. 2, p. 939-952, Sept. 2014. DOI: <https://doi.org/10.5194/se-5-939-2014>.

CONGIO, G. F. S.; BANNINK, A.; MOGOLLÓN, O. L. M.; HRISTOV, A. N. Enteric methane mitigation strategies for ruminant livestock systems in the Latin America and Caribbean region: a meta-analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, 127693, Aug. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127693>.

CONGIO, G. F. S.; BATALHA, C. D. A.; CHIAVEGATO, M. B.; BERNDT, A.; OLIVEIRA, P. P. A.; FRIGHETTO, R. T. S.; MAXWELL, T. M. R.; GREGORINI, P.; SILVA, S. C. Strategic grazing management towards sustainable intensification at tropical pasture-based dairy systems. **Science of the Total Environment**, v. 636, p. 872-880, Sept. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.301>.

CONRAD, R. Control of microbial methane production in wetland rice fields. **Nutrient Cycling in**

- Agroecosystems**, v. 64, p. 59-69, Oct. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1021178713988>.
- CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. de M.; CANELLAS, L. P.; NOVOTNY, E. H.; MOUTTA, R. de O.; TROMPOWSKY, P. M.; SANTOS, G. A. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte a antrópico da amazônia (Terra Preta). **Acta Amazonica**, v. 37, n. 1, p. 91-98, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672007000100010>.
- DARABIGHANE, B.; SALEM, A. Z. M.; AGHJEHGHESHLAGH, F. M.; MAHDAVI, A.; ZAREI, A.; ELGHANDOUR, M. M. M. Y.; LÓPEZ, S. Environmental efficiency of *Saccharomyces cerevisiae* on methane production in dairy and beef cattle via a meta-analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 3651-3658, Feb. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3878-x>.
- DELA PICCOLLA, C.; HESTERBERG, D.; MURAOKA, T.; NOVOTNY, E. H. Optimizing pyrolysis conditions for recycling pig bones into phosphate fertilizer. **Waste Management**, v. 131, p. 249-257, July 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.06.012>.
- DELIBERALI, I. **Captura e alocação de carbono em *Pinus taeda* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* sob manejos hídricos e nutricionais distintos**. 2015. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens**: processos, causas e estratégias de recuperação. 4. ed. rev. ampl. Belém, PA: Ed. do Autor, 2011. 215 p.
- DIAS-FILHO, M. B. Pastagens cultivadas na Amazônia Oriental brasileira: processos e causas de degradação e estratégias de recuperação. In: DIAS, L. E.; MELLO, J. W. V. de (ed.). **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, 1998. p. 135-147.
- EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. **Dados conjunturais do arroz**: área, produção e rendimento: Brasil (1986 a 2023). 2024. Disponível em: <http://www.cnpaf.embrapa.br/socioeconomia/index.htm>. Acesso em: 10 maio 2025.
- EMBRAPA. **WebAmbiente**: Adequação ambiental na mão do produtor. Disponível em: <https://www.webambiente.cnptia.embrapa.br/>. Acesso em: 20 abr. 2025.
- EWING, P. M.; CHIM, B. K.; LEHMAN, R. M.; OSBORNE, S. Diversified grain rotations can be highly and reliably productive in unstable climates. **Field Crops Research**, v. 310, 109361, Apr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109361>.
- FAO. **FAOSTAT**: forestry production and trade: visualize data. 2025. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO/visualize>. Acesso em: 20 abr. 2025.
- FAO. **Transformar os sistemas agrícolas e alimentares**: um desafio que devemos encarar juntos. Roma, 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/1333246/>. Acesso em: 20 abr. 2025.
- FENG, X. Y.; DIJKSTRA, J.; BANNINK, A.; VAN GASTELEN, S.; FRANCE, J.; KEBREAB, E. Antimethanogenic effects of nitrate supplementation in cattle: a meta-analysis. **Journal of Dairy Science**, v. 103, n. 12, p. 11375-11385, Dec. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18541>.
- FERNANDES, M. F. R.; RIBEIRO, T. G.; ROUWS, J. R.; SOARES, L. H. B.; ZILLI, J. E. Biotechnological potential of bacteria from genera *Bacillus* *Paraburkholderia* and *Pseudomonas* to control seed fungal pathogens. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 52, p. 705-714, June 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42770-021-00448-9>.
- FERRAZ, R. P. D.; PRADO, R. B.; PARRON, L. M.; CAMPANHA, M. M. (ed.). **Marco referencial em serviços ecossistêmicos**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 121 p.
- FUENTES-LLANILLO, R.; TELLES, T. S.; SOARES JUNIOR, D.; MELO, T. R. de; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 208, 104877, Apr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104877>.
- FURTADO, A. J.; ABDALLA FILHO, A. L.; BRUNO, J. F.; PASQUINI NETO, R.; LOBO, A. A. G.; SILVA, G. V. da; PERNA JUNIOR, F.; ALVES, T. C.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. de F.; MEDEIROS, S. R. de; OLIVEIRA, P. P. A.; RODRIGUES, P. H. M. Pigeon pea intercropped with tropical pasture as a mitigation strategy for enteric methane emissions of *Nellore* steers. **Animals**, v. 13, n. 8, 1323, Apr. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani13081323>.
- GARNETT, T.; APPLEBY, M. C.; BALMFORD, A.; BATEMAN, I. J.; BENTON, T. G.; BLOOMER, P.; BURLINGAME, B.; DOLAN, L.; FRASER, D.; HERRERO, M.; HOFFMANN, I.; SMITH, P.; THORNTON, P. K.; TOULMIN, C.; VERMEULEN, S. J.; GODFRAY, H. C. J. Sustainable intensification in agriculture: premises and policies. **Science**, v. 341, n. 6141, p. 33-34, July 2013. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1234485>.
- GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; LEITE, H. G.; VILLANI, E. M. A. Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região centro-leste do estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 35, n. 4, p. 95-905, ago. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000500015>.
- GLOBAL METHANE PLEDGE. **About the global methane pledge**. <https://www.globalmethanepledge.org/#about>. Acesso em: 25 maio 2025.
- GRAFTON, R. Q.; CHU, H. L.; NELSON, H.; BONNIS, G. A **global analysis of the cost-efficiency of forest carbon sequestration**. Paris: OECD Publishing, 2021. 66 p. (Environment Working Paper, 185). DOI: <https://dx.doi.org/10.1787/e4d45973-en>.
- GURGEL, A. C.; COSTA, C. F.; PEROSA, B. B.; MANZATTO, C.; ASSAD, M. L. L.; ASSAD, E.; VICENTE, L. F.; VICENTE, A. K.; SPINELLI-ARAUJO, L. **Proposta de monitoramento, relato e verificação das emissões de gases de efeito estufa da agricultura de baixa emissão de carbono**: observatório do Plano ABC e Plataforma ABC. [Rio de Janeiro]: FGV, 2020. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23887.00161>.
- HERRERO, M.; THORNTON, P. K.; NOTENBAERT, A.; MSANGI, S.; WOOD, S.; KRUSKA, R.; DIXON, J.; BOSSIO, D.; VAN DE STEEG, J.;

FREEMAN, H. A.; LI, X.; RAO, P. P. **Drivers of change in crop-livestock systems and their potential impacts on agro-ecosystems services and human wellbeing to 2030:** a study commissioned by the CGIAR Systemwide Livestock Programme. Nairobi: ILRI, 2012. 114 p.

HIGA, R. C. V.; CARDOSO, D. J.; ANDRADE, G. de C.; ZANATTA, J. A.; ROSSI, L. M. B.; PULROLNIK, K.; NICODEMO, M. L. F.; GARRASTAZU, M. C.; VASCONCELOS, S. S.; SALIS, S. M. de. **Protocolo de medição e estimativa de biomassa e carbono florestal.** Colombo: Embrapa Florestas, 2014. 68 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 266). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1011409/1/Doc.266.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2025.

HOMEM, B. G. C.; BORGES, L. P. C.; LIMA, I. B. G.; GUIMARÃES, B. C.; SPASIANI, P. P.; FERREIRA, I. M.; MEO-FILHO, P.; BERNDT, A.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; CASAGRANDE, D. R. Forage peanut legume as a strategy for improving beef production without increasing livestock greenhouse gas emissions. **Animal**, v. 18, n. 5, 101158, May 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101158>.

HRISTOV, A. N. Invited review: advances in nutrition and feed additives to mitigate enteric methane emissions. **Journal of Dairy Science**, v. 107, n. 7, p. 4129-4146, July 2024. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24440>.

HRISTOV, A. N.; OH, J.; GIALONGO, F.; FREDERICK, T. W.; HARPER, M. T.; WEEKS, H. L.; BRANCO, A. F.; MOATE, P. J.; DEIGHTON, M. H.; WILLIAMS, S. R. O.; KINDERMANN, M.; DUVAL, S. An inhibitor persistently decreased enteric methane emission from dairy cows with no negative effect on milk production. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 112, n. 34, p. 10663-10668, July 2015. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1504124112>.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. Fixação biológica do nitrogênio. In: MEYER, M. C.; BUENO, A. F.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. (ed.). **Bioinsumos na cultura da soja.** Brasília, DF: Embrapa, 2022. p. 143-162.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Soybean seed co-inoculation with *Bradyrhizobium* spp. And *Azospirillum brasilense*: a new biotechnological tool to improve yield and sustainability. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, n. 6, p. 811-817, Apr. 2015. DOI: <https://doi.org/10.4236/ajps.2015.66087>.

HUNGRIA, M.; RONDINA, A. B. L.; NUNES, A. L. P.; ARAUJO, R. S.; NOGUEIRA, M. A. Seed and leaf-spray inoculation of PGPR in brachiarias (*Urochloa* spp.) as an economic and environmental opportunity to improve plant growth, forage yield and nutrient status. **Plant and Soil**, v. 463, p. 171-186, June 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04908-x>.

HUSSAIN, S.; PENG, S.; FAHAD, S.; KHALIQ, A.; HUANG, J.; CUI, K.; NIE, L. Rice management interventions to mitigate greenhouse gas emissions: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, p. 3342-3360, Mar. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3760-4>.

IBARR, M. A.; ZANATTA, J. A.; DIECKOW, J.; RACHWAL, M. F. G.; RIBEIRO, R. H.; CARDOSO, D. J.; RAMALHO, B.; STAHL, J. Changes in soil carbon and nitrogen stocks after conversion of subtropical natural forest to loblolly pine plantations. **European Journal of Forest Research**, v. 141, p. 31-42, Feb. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01424-6>.

IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola:** série histórica da estimativa anual da área plantada, área colhida, produção e rendimento médio dos produtos das lavouras. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6588>. Acesso em: 16 abr. 2025.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Ibá 2024:** relatório anual. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio2024.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2025.

IPCC. **Climate change 2007:** impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 976 p. (Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change).

IPCC. **Climate change 2021:** the physical science basis. Working Group I: contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.

IPCC. **Climate change 2022:** impacts, adaptation, and vulnerability. Working group II: contribution to the Sixth Assessment Report. 2022b. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.

IPCC. **Climate change 2022:** mitigation of climate change. Working group III: contribution to the Sixth Assessment Report. 2022a. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Acesso em: 23 maio 2025.

IPCC. **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. 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl>. Acesso em: 18 abr. 2025.

IPCC. **Global warming of 1.5°C:** an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15>. Acesso em: 23 maio 2022.

JANTALIA, C. P.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; MENEZES, W.; ZILLI, J. E. **Soja inoculada com bactérias dos gêneros *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* spp. em áreas comerciais dos estados do Tocantins e Bahia:** efeito na contribuição da FBN e na produtividade de grãos. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2021. (Embrapa Agrobiologia. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 105). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1135978/1/SOJA-Inoculada-com-bacterias-dos-geros-Bradyrhizobium.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2025.

- KLEINPAUL, I. S.; SCHUMACHER, M. V.; KÖNIG, F. G.; KLEINPAUL, J. J. Acúmulo de serapilheira em povoamentos de pinus e eucaliptos no campus da UFSM. In: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL, 9., 2003, Nova Prata, RS. **Floresta**: função social: anais. Nova Prata: Prefeitura Municipal, 2003.
- KNAPP, A. K.; SMITH, M. D.; HOBBIE, S. E.; COLLINS, S. L.; FAHEY, T. J.; HANSEN, G. J. A.; LANDIS, D. A.; LA PIERRE, K. J.; MELILLO, J. M.; SEASTEDT, T. R.; SHAVER, R. G.; WEBSTER, J. R. Past, present, and future roles of Long-Term Experiments in the LTER Network. **BioScience**, v. 62, n. 4, p. 377-389, Apr. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.4.9>.
- KOLLING, G. J.; STIVANIN, S. C. B.; GABBI, A. M.; MACHADO, F. S.; FERREIRA, A. L.; CAMPOS, M. M.; TOMICH, T. R.; CUNHA, C. S.; DILL, S. W.; PEREIRA, L. G. R.; FISCHER, V. Performance and methane emissions in dairy cows fed oregano and green tea extracts as feed additives. **Journal of Dairy Science**, v. 101, n. 5, p. 4221-4234, May 2018. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13841>.
- KROOK, J. L.; DUINKER, A.; LARSEN, W. E.; BIRKELAND, I. M.; SKEIE, S.; HORN, J.; STÉVANT, P. Approaches for reducing the iodine content of the brown seaweed *Saccharina latissima* - effects on sensory properties. **Journal of Applied Phycology**, v. 36, p. 783-796, Apr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10811-023-02974-5>.
- LATAWIEC, A. E.; STRASSBURG, B. B. N.; JUNQUEIRA, A. B.; ARAUJO, E.; MORAES, L. F. D.; PINTO, H. A. N.; CASTRO, A.; RANGEL, M.; MALAGUTI, G. A.; RODRIGUES, A. F.; BARIONI, L. G.; NOVOTNY, E. H.; CORNELISSEN, G.; MENDES, M. A.; BATISTA, N.; GUERRA, J. G.; ZONTA, E.; JAKOVAC, C.; HALE, S. E. Biochar amendment improves degraded pasturelands in Brazil: environmental and cost-benefit analysis. **Scientific Reports**, v. 9, 11993, Aug. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47647-x>.
- LE MER, J.; ROGER, P. Production, oxidations, emission and consumption of methane by soils: a review. **European Journal of Soil Biology**, v. 37, n. 1, p. 25-50, Jan./Mar. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(01\)01067-6](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(01)01067-6).
- LOMBARDO, U.; ARROYO-KALIN, M.; SCHMIDT, M.; HUISMAN, H.; LIMA, H. P.; MORAES, C. de P.; NEVES, E. G.; CLEMENTE, C. R.; FONSECA, J. A. de; ALMEIDA, F. O. de; ALHO, C. F. B. V.; RAMSEY, C. B.; BROWN, G. G.; CAVALLINI, M. S.; COSTA, M. L. de; CUNHA, L.; ANJOS, L. H. C. dos; DECEVAN, W. M.; FAUSTO, C.; CAROMANO, C. F.; FONTANA, A.; FRANCHETTO, B.; GLASER, B.; HECKENBERGER, M. J.; HECHT, S.; HONORATO, V.; JAROSCH, K. A.; JUNQUEIRA, A. B.; KATER, T.; TAMANAH, E. K.; KUYPER, T.; LEHMANN, J.; MADELLA, M.; MAEZUMI, S. Y.; CASCON, L. M.; MAYLE, F. F.; MCKEY, D.; MORAES, B.; MORCOTE-RIOS, G.; BARBOSA, C. A. P.; MAGALHÃES, M. P.; CARNEIRO-PRESTES, G.; PUGLIESE, F.; PUPIM, F. N.; RACKZA, M. F.; PY-DANIEL, A. R.; RIRIS, P.; ROCHA, B. C. da; RODRIGUES, L.; ROSTAIS, S.; MACEDO, R. S.; SHOCK, M. P.; SPRAFKE, T.; BASSI, F. L.; VALLE, R. V. T.; VILLAGRÁ, Y. S. S.; WATTING, J.; WEBER, S. L.; TEIXEIRA, W. G. Evidence confirms an anthropic origin of Amazonian Dark Earths. **Nature Communications**, v. 13, 3444, June 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31064-2>.
- MACEDO, M. C. M. Degradação de pastagens: conceitos e métodos de recuperação. In: SIMPÓSIO SUSTENTABILIDADE DA PECUÁRIA DE LEITE NO BRASIL, 1999, Goiânia. **Anais...** Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite; Goiânia: Serrana Nutrição Animal, 1999. p. 137-150.
- MADARI, B. E.; MATOS, P. S.; OLIVEIRA, J. M.; CARVALHO, M. T. de M.; SILVEIRA, A. L. R.; MACHADO, P. L. O. de A.; ARAUJO, W. A.; SIQUEIRA, M. M. B.; FERRARESI, T. M.; FREITAS, F. M. C.; RIZZO, P. V.; SILVA, R. R.; PACHECO, A. R. Soil carbon stock changes in a crop-livestock-forestry integration in Southern Goiás State, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 98, p. 2141-2156, Oct. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01056-w>.
- MADARI, B. E.; SILVA, M. A. S.; CARVALHO, M. T. M.; MAIA, A. H. N.; PETTER, F. A.; SANTOS, J. L. S.; TSAI, S. M.; LEAL, W. G. de O.; ZEVIANI, W. M. Properties of a sandy clay loam Haplic Ferralsol and soybean grain yield in a five-year field trial as affected by biochar amendment. **Geoderma**, v. 305, p. 100-112, Nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.029>.
- MANZATTO, C. V. Desenvolvimento e validação de um sistema MRV para a agricultura ABC. In: VIDAL, M. da S. M.; CURRI, M. V.; ARMACOLO, N. M. (org.). **Inovações rurais no cerrado**: pesquisas para a prática sustentável. Brasília, DF: Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade, 2024. p. 56-59.
- MARTHA JUNIOR, G. B.; ALVES, E.; CONTINI, E. Land-saving approaches and beef production growth in Brazil. **Agricultural Systems**, v. 110, p. 173-177, July 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jagsy.2012.03.001>.
- MARTINS, M. R.; SANT'ANNA, S. A.; ZAMAN, M.; SANTOS, R. C.; MONTEIRO, R. C.; ALVES, B. J. R.; JANTALIA, C. P.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. Strategies for the use of urease and nitrification inhibitors with urea: Impact on N₂O and NH₃ emissions, fertilizer-15N recovery and maize yield in a tropical soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 247, p. 54-62, Sept. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.021>.
- MATOS, P. S.; OLIVEIRA, J. de M.; CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E.; SILVEIRA, A. L. R.; DAMIAN, J. M.; MORAES, P. A. O.; ARAUJO, W. A.; SIQUEIRA, M. M. B.; SILVA, R. R.; FERRARESI, T. M.; STONE, L. F.; SILVA, M. A. S.; FREITAS, F. M. C.; PACHECO, A. R.; YELUPIRATI, J.; ALMEIDA, P. L. O. Impact of land use intensification on key drivers of soil organic carbon pools in Brazil's Central-West. **Catena**, v. 249, 108636, Feb. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108636>.
- MATTA, F. P.; GODOY, R.; OLIVEIRA, P. P. A.; FERRAZ JUNIOR, R. S. Row spacing for pigeon pea sowing and its influence on the recovery of degraded pasture. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 59, e03516, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2024.v59.03516>.
- MAZZETTO, A. M.; STYLES, D.; GIBBONS, J.; ARNDT, C.; MISSELBROOK, T.; CHADWICK, D. Region-specific emission factors for Brazil increase the estimate of nitrous oxide emissions from nitrogen fertilizer application by 21%. **Atmospheric Environment**, v. 230, 117506, June 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117506>.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being: synthesis**. Washington, DC: Island Press, 2005. 155 p.

MOREIRA, A.; MOTTA, A. C. V.; COSTA, A.; MUNIZ, A. S.; CASSOL, L. C.; ZANÃO JÚNIOR, L. A.; BATISTA, M. A.; MÜLLER, M. M. L.; HAGER, N.; PAULETTI, V. (ed.). SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Núcleo Estadual do Paraná. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. Curitiba: SBCS, Núcleo Estadual do Paraná, 2017. 482 p.

MOURA, T. M.; CARVALHO, M. T. de M.; STONE, L. F.; MADARI, B. E.; SANTOS, D. de C.; ALVES, E. M.; TROGELLO, E.; FAUSTINO, L. L.; MACHADO, P. L. O. de A. Newly implemented crop-livestock-forest systems increase available water and aeration in soils of the Brazilian Savannah. **Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics**, v. 124, n. 2, p. 149-158, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17170/kobra-202311028941>.

MUNHOZ, J. S. B. **Caracterização da produtividade florestal e dos padrões de crescimento de Pinus taeda L. no Sul do Brasil através de análise de tronco**. 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-28042011-162045/pt-br.php>. Acesso em: 20 abr. 2025.

NOVOTNY, E. H.; AZEVEDO, E. R. de; BONAGAMBA, T. J.; CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. de M.; HAYES, M. H. B. Studies of the compositions of humic acids from Amazonian Dark Earth soils. **Environmental Science & Technology**, v. 41, n. 2, p. 400-405, Jan. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1021/es060941x>.

NOVOTNY, E. H.; HAYES, M. H. B.; MADARI, B. E.; BONAGAMBA, T. J.; AZEVEDO, E. R. de; SOUZA, A. A. de; SONG, G.; NOGUEIRA, C. M.; MANGRICH, A. S. Lessons from the Terra Preta de Índios of the Amazon region for the utilisation of charcoal for soil amendment. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 20, n. 6, p. 1003-1010, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-50532009000600002>.

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. de F.; CARVALHO, M. T. de M.; MADARI, B. E. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use: a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 321-344, Mar./Abr. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140818>.

OBSERVATÓRIO DO CÓDIGO FLORESTAL. **Termômetro do Código Florestal**. Disponível em: <https://observatorioflorestal.org.br>. Acesso em: 20 abr. 2025.

OLIVEIRA, A. D. de; RIBEIRO, F. P.; FERREIRA, E. A. B.; MALAQUIAS, J. V.; GATTO, A.; ZUIM, D. R.; PINHEIRO, L. de A.; PULROLNIK, K.; SOARES, J. P. G.; CARVALHO, A. M. de. CH₄ and N₂O fluxes from planted forests and native Cerrado ecosystems in Brazil. **Scientia Agrícola**, v. 78, n. 1, e20180355, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0355>.

OLIVEIRA, J. M.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. M.; ASSIS, P. C. R.; SILVEIRA, A. L. R.; LIMA, M. L.; WRUCK, F. J.; MEDEIROS, J. C.; MACHADO, P. L. O. A. Integrated farming systems for

improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 18, p. 105-116, Jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1146-0>.

OLIVEIRA, P. P. A. (ed.). **Protocolo para quantificação dos estoques de carbono do solo da rede de pesquisa Pecuária**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2014a. 20 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 116). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1006926/1/Documentos116.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2025.

OLIVEIRA, P. P. A. (ed.). **Protocolo recomendado para avaliação do consumo voluntário de animais em pastejo**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2014b. 14 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 115). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/988293/1/Documentos115.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2025.

OLIVEIRA, P. P. A. Recuperação e reforma de pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 24., 2007, Piracicaba. **Produção de ruminantes em pastagens**: anais. Piracicaba: FEALQ, 2007. p. 39-73. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/34872/1/RecuperacaoReformaPastagens.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2025.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; PERNA JÚNIOR, F.; TADINI, A. M.; MARTIN-NETO, L.; RODRIGUES, P. H. M. Potential of integrated trees-pasture-based systems for GHG emission mitigation and improving soil carbon dynamics in the Atlantic forest biome, Southeastern of Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 158, 127219, Aug. 2024a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127219>.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; ALVES, T. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SAKAMOTO, L. S.; HENRIQUE, F. L.; RODRIGUES, P. H. M. Greenhouse gas balance and carbon footprint of pasture-based beef cattle production systems in the tropical region (Atlantic Forest biome). **Animal**, v. 14, p. s427-s437, 2020. Sup. 3. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1751731120001822>.

OLIVEIRA, P. P. A.; CORSI, M. **Recuperação de pastagens degradadas para sistemas intensivos de produção de bovinos**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. 22 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Circular técnica, 38). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPPSE/15659/1/Circular38.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2025.

OLIVEIRA, P. P. A.; FURTADO, A. J.; ABDALLA FILHO, A. L.; BRUNO, J. F.; PERNA JÚNIOR, F.; BERNARDI, A. C. C.; RODRIGUES, P. H. M.; NOGUEIRA, A. R. A. **Estratégias de recuperação de pastagens degradadas para aumento do sequestro de carbono no solo, incluindo o consórcio com o feijão-guandu**: resultados parciais. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2024b. 14 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 62). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1164736/1/2024-cppse-bp-62-ppao-estrategia-recuperacao-pastagens-degradadas->

aumento-sequestro-carbono-solo-consorcio-feijao-guandu-resultados-parciais.pdf. Acesso em: 18 abr. 2025.

OLIVEIRA, P. P. A.; OLIVEIRA, B. A. A produção animal em pastagens no Brasil frente aos desafios climáticos. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM, 11., 2024, Viçosa, MG. **Anais [...]** Visconde do Rio Branco, MG: Suprema, 2024. p. 147-194.

OLIVEIRA, P. P. A.; RODRIGUES, P. H. M.; PRAES, M. F. F. M.; PEDROSO, A. F.; OLIVEIRA, B. A.; SPERANÇA, M. A.; BOSI, C.; FERNANDES, F. A. Soil carbon dynamics in Brazilian Atlantic forest converted into pasture-based dairy production systems. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 2, p. 1136-1149, Mar./Apr. 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20578>.

OLIVEIRA, S. C.; OLIVEIRA, A. C. C. R. de; LEITE FILHO, A. T.; SILVA, L. J. da; SOARES FILHO, B. **A restauração da vegetação nativa pode conduzir Minas Gerais ao Net Zero?** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2024c. (Policy brief). Disponível em: https://csr.ufmg.br/csr/wp-content/uploads/2024/10/policy_restauracao-veg-net-zero_final.pdf. Acesso em: 29 abr. 2025.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A. de; BINI, D.; SOUSA, S. M. de; RIBEIRO, V. P.; SANTOS, F. C. dos; LANA, U. G. de P.; SOUZA, F. F. de; GOMES, E. A.; MARRIEL, I. E. Inoculation with *Bacillus megaterium* CNPMS B119 and *Bacillus subtilis* CNPMS B2084 improve P-acquisition and maize yield in Brazil. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, 1426166, June 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1426166>.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **OECD-FAO agricultural outlook 2023–2032**. 2023. Disponível em: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/07/oecd-fao-agricultural-outlook-2023-2032_859ba0c2/08801ab7-en.pdf. Acesso em: 18 abr. 2025.

OWENS, F. N.; GOETSCH, A. L. Ruminal fermentation. In: CHURCH, D. C. (ed.). **The ruminant animal: digestive physiology and nutrition**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1988. p. 145-171.

PAIXÃO, F. A.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; SILVA, M. L.; LEITE, G. H.; SILVA, G. F. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 30, n. 3, p. 411-420, jun. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000300011>.

PALANGI, V.; LACKNER, M. Management of enteric methane emissions in ruminants using feed additives: a review. **Animals**, v. 12, n. 24, 3452, Dec. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12243452>.

PERIN, G.; ALMEIDA, A. F. C. S.; SPÍNOLA, P. A. C.; PELLA, A. F. C.; SAMBUICHI, R. H. R. **A evolução do Programa de Aquisição de Alimentos (PAA): uma análise da sua trajetória de implementação, benefícios e desafios**. Brasília, DF: Ipea, 2021. (IPEA. Texto para discussão, 2691). Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/10824/1/td_2691.pdf. Acesso em: 30 abr. 2025.

PIERRI, I.; NOVOTNY, E. H.; CERRI, C. E. P.; SOUZA, A. J.; MATTOS, B. B.; TORNISIELO, V. L.; REGITANO, J. B. Accessing

biochar's porosity using a new low field NMR approach and its impacts on the retention of highly mobile herbicides.

Chemosphere, v. 287, 132237, Jan. 2022. Part 3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132237>.

PRANDO, A. M.; BARBOSA, J. Z.; OLIVEIRA, A. B.; NOGUEIRA, M. A.; POSSAMAI, E. J.; HUNGRIA, M. Benefits of soybean co-inoculation with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum* brasilense: large-scale validation with farmers in Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 155, p. 127112, Apr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127112>.

REDDY, K. R.; DELAUNE, R. D. Nitrogen. In: **Biogeochemistry of wetlands: science and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2008. p. 257-323. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203491454>.

REIS, J. C.; RODRIGUES, G. S.; BARROS, I.; RODRIGUES, R. A. R.; GARRETT, R. D.; VALENTIM, J. F.; KAMOI, M. Y. T.; MICHETTI, M.; WRUCK, F. J.; RODRIGUES-FILHO, S. Fuzzy logic indicators for the assessment of farming sustainability strategies in a tropical agricultural frontier. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 43, 8, Jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00858-5>.

REIS, J. C.; RODRIGUES, G. S.; BARROS, I.; RODRIGUES, R. A. R.; GARRETT, R. D.; VALENTIM, J. F.; KAMOI, M. Y. T.; MICHELETTI, M.; WRUCK, F. J.; RODRIGUES-FILHO, S.; PIMENTEL, P. E. O.; SMUKLER, S. Integrated crop-livestock systems: a sustainable land-use alternative for food production in Brazilian Cerrado and Amazon. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, 124580, Feb. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124580>.

REIS, V. M.; RIOS, F. A.; BRAZ, G. B. P.; CONSTANTINI, J.; HIRATA, E. S.; BIFFE, D. F. Performance agrônômica da cana-de-açúcar submetida à inoculação de *Nitrospirillum amazonense* (BR11145). **Revista Caatinga**, v. 33, n. 4, p. 918-916, Oct./Dec. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n406rc>.

RODRIGUES, A. F.; NOVOTNY, E. H.; KNICKER, H.; OLIVEIRA, R. Humic acid composition and soil fertility of soils near an ancient charcoal kiln: are they similar to Terra Preta de Índios soils? **Journal of Soils and Sediments**, v. 19, p. 1374-1381, Mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2162-5>.

RODRIGUES, G. G. **Fixação e alocação de carbono em plantações clonais de eucalipto sob diferentes densidades de plantio**. 2017. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz’, Piracicaba. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-05102017-104939/publico/Gleice_Gomes_Rodrigues_versao_revisada.pdf. Acesso em: 20 abr. 2025.

RODRIGUES, G. G.; ZANATTA, J. A.; RACHWAL, M. F. G.; HIGA, R. C. V.; LAVORANTI, O.; SILVA, L. D. Methane and nitrous oxide fluxes from clonal eucalyptus forests in different spacing arrangements. **Forestry**, v. 96, n. 4, p. 618-629, Oct. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad001>.

ROQUE, B. M.; SALWEN, J. K.; KINLEY, R.; KEBREAB, E. Inclusion of *Asparagopsis armata* in lactating dairy cows' diet reduces enteric methane emission by over 50 percent. **Journal**

of **Cleaner Production**, v. 234, p. 132-138, Oct. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.193>.

ROQUE, B. M.; VENEGAS, M.; KINLEY, R. D.; NYS, R. de; DUARTE, T. L.; YANG, X.; KEBREAB, E. Red seaweed (*Asparagopsis taxiformis*) supplementation reduces enteric methane by over 80 percent in beef steers. **PLoS One**, v. 16, n. 3, e0247820, Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247820>.

SÁ, J. C. M.; LAL, R.; LORENZ, K.; BAJGAI, Y.; GAVILAN, C.; KAPOOR, M.; FERREIRA, A. O.; BRIEDIS, C.; INAGAKI, T. M.; CANALLI, L. B.; GONÇALVES, D. R. P.; BORTOLUZZI, J. No-till systems restore soil organic carbon stock in Brazilian biomes and contribute to the climate solution. **Science of The Total Environment**, v. 977, 179370, May 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179370>.

SALVADOR, S. M. **Quantificação da biomassa e nutrientes em plantios de *Eucalyptus urograndis* em solos distintos**. 2015. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8769/SALVADOR%2c%20SIMONE%20MARTINI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 abr. 2025.

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. **AMB Express**, v. 9, 205, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0932-0>.

SANTOS, W. M.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; PACHECO, E. P.; BARROS, I.; FERNANDES, M. F.; BATISTA, J. N.; BENDER, E. P.; SOUZA, H. N.; JANTALIA, C. P. Ammonia volatilization and yield of corn fertilized with different nitrogen sources in the Brazilian semiarid. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, e01036, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01036>.

SCARANO, F. R.; CEOTTO, P. Brazilian Atlantic forest: impact, vulnerability, and adaptation to climate change. **Biodiversity and Conservation**, v. 24, n. 9, p. 2319-2331, Sept. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-015-0972-y>.

SCHILLINGER, W. F. Practical lessons for successful long-term cropping systems experiments. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 26, n. 1, p. 1-3, Mar. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1742170510000359>.

SCHULMAN, P.; CARVALHO, M. T. de M.; MELLO, R. N. de; MADARI, B. E.; MACHADO, P. L. O. de A.; FERREIRA, E. P. de B.; FERRARESI, T. M.; BORBA, T. C. de O.; MENDES, R.; HIROSE, E.; ARAUJO, W. A. de; SIQUEIRA, M. M. de B.; SILVA, R. R. da; MORAIS, P. A. de O. Co-inoculation maintains yields and lowers N₂O emission by affecting rhizosphere bacterial diversity in common bean grown on a C-rich clayey Ferralsol. **Soil Advances**, v. 3, 100046, June 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilad.2025.100046>.

SEGNINI, A.; XAVIER, A. A. P.; OTAVIANI-JUNIOR, P. L.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. D. F.; PRAES, M. F. F. M.; RODRIGUES, P. H. M.; MILORI, D. M. B. P. Soil carbon stock and humification in pastures under different levels of intensification in Brazil.

Scientia Agricola, v. 76, n. 1, p. 33-40, Jan./Feb. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2017-0131>.

SETTE JUNIOR, C. R.; NAKAJIMA, N. Y.; GEROMINI, M. P. Captura de carbono orgânico em povoamentos de *Pinus taeda* L. na região de Rio Negrinho, SC. **Floresta**, v. 36, n. 1, p. 33-44, jan./abr. 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v36i1.5506>.

SILVA, G. F. da. Recuperação de áreas ambientais degradadas no bioma Mata Atlântica: estimativa do estoque de carbono. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE, 5., 2024. **Anais [...]**. Fortaleza: Integrar, 2024. p. 333-339. Disponível em: https://www.editoraintegrar.com.br/wp-content/uploads/2024/10/CONITERS2024_compressed.pdf. Acesso em: 29 abr. 2025.

SILVA, O. F. da; WANDER, A. E. Estatística da produção. In: SANTOS, A. B. (ed.). **Arroz**. Brasília, DF: Embrapa, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/pre-producao/socioeconomia/estatistica-de-producao>. Acesso em: 18 abr. 2025.

SIX, J.; CALLEWAERT, P.; LENDERS, S.; DE GRUYZE, S.; MORRIS, S. J.; GREGORICH, E. G.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 6, p. 1981-1987, Nov. 2002. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1981>.

SIXEL, R. M. D. M.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; ANDRADE, G. R. P.; AZEVEDO, A. C.; STAHL, J.; MOREIRA, A. M. Sustainability of wood productivity of *Pinus taeda* based on nutrient export and stocks in the biomass and in the soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 5, p. 1416-1427, Sept./Oct. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140297>.

SKORUPA, L. A.; MANZATTO, C. V. (ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil**: estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impactos. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 471 p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1118657/1/SkorupaSistemasIntegracao2019.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2025.

SKORUPA, L. A.; RIBEIRO, J. F.; MANZATTO, C. V. Adequação agroambiental da propriedade rural. In: MORANDI, M. A. B.; PACHER, A. P. C.; MENDES, R.; TANURE, J. P. M.; ANDRADE, C. A.; MENEZES, C. (ed.). **Agricultura & meio ambiente**: a busca pela sustentabilidade. Brasília, DF: Embrapa, 2024. p. 61-96. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1171572/1/cap-2.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2025.

SKORUPA, L. A.; VIEIRA, D. L. M.; KUHLMANN, M.; SAMPAIO, A. B.; MORAES, L. F. D.; ISERNHAGEN, I.; RIBEIRO, J. F. **Roteiro para elaboração de um projeto de recomposição de áreas degradadas ou alteradas**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2021. 58 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 373). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1135028/1/Roteiro-para-elaboracao-de-um-projeto-de-recomposicao-de-areas-degradadas-ou-alteradas-Doc373.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2025.

SOMBROEK, W. G.; NACHTERGAEL, F. O.; HEBEL, A. Amounts, dynamics and sequestrations of carbon in tropical and subtropical soils. **Ambio**, v. 22, n. 7, p. 417-426, 1993.

SOUZA, C. L. L. **Balanco de carbono do processo de produção de madeira de reflorestamento no cerrado do norte de Minas Gerais**. 2019. 27 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, MG.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 3/4, p. 920-930, Mar. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.085>.

STEFENONI, H. A.; RÄISÄNEN, S. E.; CUEVA, S. F.; WASSON, D. E.; LAGE, C. F. A.; MELGAR, A.; FETTER, M. E.; SMITH, P.; HENNESSY, M.; VECCHIARELLI, B.; BENDER, J.; PITTA, D.; CANTRELL, C. L.; YARISH, C.; HRISTOV, A. N. Effects of the macroalga *Asparagopsis taxiformis* and oregano leaves on methane emission, rumen fermentation, and lactational performance of dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 104, n. 4, p. 4157-4173, Apr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19686>.

TELLES, T. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Economic value of biological nitrogen fixation in soybean crops in Brazil. **Environmental Technology & Innovation**, v. 31, 103158, Aug. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103158>.

THORSTEINSSON, M.; WEISBJERG, M. R.; LUND, P.; BRUHN, A.; HELLWING, A. L. F.; NIELSEN, M. O. Effects of dietary inclusion of 3 Nordic brown macroalgae on enteric methane emission and productivity of dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 106, n. 10, p. 6921-6937, Oct. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23437>.

TRISTANT, D.; MORAN, C. A. The efficacy of feeding a live probiotic yeast, Yea-Sacc®, on the performance of lactating dairy cows. **Journal of Applied Animal Nutrition**, v. 3, e12, Oct. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1017/jan.2015.10>.

URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; JANTALIA, C. P.; MADARI, B. E.; MACHADO, P. L. O. de A.; BODDEY, R. M. **Protocolo para avaliar o potencial de sistemas agrícolas no sequestro de C e acúmulo de N no solo**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2016. 23 p. (Embrapa Agrobiologia. Documentos, 303). <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1048881/1/DOC303ProtocoloparaavaliarUrquiagaetal.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2025.

VELOSO, M. G.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; HIGA, R. C.; BREVIHERI, R. C.; COMERFORD, N.; STOPPE, A. M. Reforestation with loblolly pine can restore the initial soil carbon stock relative to a subtropical natural forest after 30 years. **European Journal of Forest Research**, v. 137, n. 5, p. 593-604, June 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1127-y>.

VELOSO, M. G.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; PERGHER, M.; BAYER, C.; HIGA, R. C. V. Long-term loblolly pine land use reduces methane and net greenhouse gas emissions in

a subtropical Cambisol, despite increasing nitrous oxide.

Annals of Forest Science, v. 76, n. 86, Aug. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13595-019-0871-6>.

WARING, B.; NEUMANN, M.; PRENTICE, I. C.; ADAMS, M.; SMITH, P.; SIEGERT, M. Forests and decarbonization – roles of natural and planted forests. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 3, article 58, May 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00058>.

WATZLAWICK, L. F. **Estimativa de biomassa e carbono em floresta ombrófila mista e plantações florestais a partir de dados de imagens do satélite Ikonos II**. 2003. 120 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/bitstream/handle/1884/26789/T%20-%20WATZLAWICK%2c%20LUCIANO%20FARINHA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 abr. 2025.

WILKES, A.; TENNIGKEIT, T.; SOLYMOSI, K. **National integrated mitigation planning in agriculture**: a review paper. Rome: FAO, 2013. 53 p. (Mitigation Of Climate Change In Agriculture, 7). Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i3237e>. Acesso em: 25 abr. 2025.

WINK, C.; REINERT, D. J.; TORNQUIST, C. G.; SILVA, I. R. Dinâmica do carbono e nitrogênio em plantações de eucalipto no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1623-1632, nov./dez. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140182>.

WITSCHORECK, R. **Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. de 17 anos de idade no município de Cambará do Sul – RS**. 2008. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. Disponível em: <https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/832/2020/08/Rudi-Witschoreck.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2025.

WNETRZAK, R.; LEAHY, J. J.; CHOJNACKA, K. W.; SAEID, A.; NOVOTNY, E.; JENSEN, L. S.; KWAPINSKI, W. Influence of pig manure biochar mineral content on Cr(III) sorption capacity. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 89, n. 4, p. 569-578, Apr. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/jctb.4159>.

YAN, X.; YAGI, K.; AKIYAMA, H.; AKIMOTO, H. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields. **Global Change Biology**, v. 11, n. 7, p. 1131-1141, July 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00976.x>.

ZANATTA, J. A.; BORDRON, B.; HOLLER, W. A.; RACHWAL, M. F. G.; ROSSI, L. M. B.; HIGA, R. C. V. **Índice de alteração do carbono no solo, em conversões de uso do solo envolvendo plantações florestais no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2020. 27 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 342). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1125871/1/Livro-Doc-342-1804-final-2.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2025.

Agricultura Sustentável na Amazônia

Como os **Sistemas Agroflorestais** ajudam a proteger o meio ambiente¹

Às vezes, mesmo numa região imponente como a Amazônia, a força verde é reduzida pela terra cansada, que muitos considerariam ser sem vida. Durante anos, a prática do “corte e queima” transformou vastas áreas em solos empobrecidos, onde pouco conseguia crescer de forma sustentável. No pequeno município de Castanhal, Pará, um agricultor chamado Francisco Gomes conseguiu mudar essa realidade e mostrou que é possível revertê-la.

Com o apoio de pesquisadores da Embrapa, Francisco se tornou o protagonista de uma iniciativa inovadora para restaurar áreas degradadas. Em 2023, sua propriedade foi escolhida para um experimento pioneiro na região chamado Unidade de Referência Tecnológica (URT). A ideia era substituir algumas práticas agrícolas, muitas vezes destrutivas, por sistemas agroflorestais, onde diversas plantas convivem harmoniosamente e ajudam a recuperar o solo.

O terreno foi dividido em quatro áreas, cada uma testando um arranjo diferente de cultivos. No primeiro módulo, o açaí BRS Pai D'égua foi plantado ao lado do cupuaçu BRS Carimbó. No segundo, açaizeiros compartilharam espaço com pés de cacau, incluindo diferentes genótipos da fruta. No terceiro módulo, o taperebá foi combinado com cupuaçuzeiros, e, no quarto, bacurizeiros cresceram junto com o cacau. A ideia era ver como essas plantas interagem entre si e quais combinações ajudariam melhor na recuperação do solo e na produção sustentável.

Os resultados não demoraram a aparecer. E, com árvores crescendo fortes e o solo mostrando sinais de regeneração, a URT chamou a atenção de outros produtores e especialistas. Mais de 300 pessoas visitaram a propriedade, incluindo agricultores, pesquisadores, sindicatos e representantes do governo. A iniciativa mostrou que era possível produzir sem destruir, substituindo o sistema de “corte e queima” por algo mais equilibrado e sustentável.

Além da recuperação ambiental, a experiência na Agrovila Iracema trouxe outro ensinamento fundamental: a importância de ouvir os produtores. O conhecimento técnico dos cientistas foi essencial, mas as percepções de Francisco e de outros agricultores foram igualmente valiosas para adaptação e adoção pelos produtores. Eles ajudaram a escolher quais espécies plantar e ajustaram as estratégias conforme as necessidades da comunidade. Essa troca de conhecimento fez toda a diferença para o sucesso do projeto.

Inspirados pelos bons resultados, outros agricultores da região começaram a testar sistemas agroflorestais em suas próprias terras. Em 2024 e 2025, novas áreas degradadas começaram a ser restauradas, trazendo benefícios tanto para o meio ambiente quanto para a economia local.

O projeto da Agrovila Iracema hoje é uma referência. Ele prova que inovação e tradição podem caminhar juntas. E mostra, também, que a colaboração entre pesquisadores e agricultores pode transformar realidades e abrir caminho para um futuro mais sustentável na Amazônia.



Francisco Gomes, com taperebazeiro de 4 meses de idade, 7 de outubro de 2023.

¹ Projeto Sistemas agroflorestais de arranjos múltiplos para mitigação de mudanças climáticas na Amazônia: Unidade de Referência Tecnológica Agrovila Iracema no Nordeste Paraense (Apoiado pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento), de autoria de Fabrício Nascimento Ferreira, Rafael Moysés Alves, Adriano Venturieri da Embrapa Amazônia Oriental e de Eufran Ferreira do Amaral da Embrapa Acre.



CAPÍTULO 6

Contabilidade de carbono e avaliação de ciclo de vida de produtos agropecuários brasileiros

Marília Ieda da Silveira Folegatti – Roberto Giolo de Almeida – Alexandre Berndt – Maria Cléa Brito de Figueirêdo – Vanderlise Giongo – Álvaro Augusto Dossa – Rubens Sonsol Gondim – Renan Milagres Lage Novaes – Anna Leticia Montenegro Turtelli Pighinelli – Nilza Patrícia Ramos

Introdução

O enfrentamento das mudanças climáticas passa pela identificação e quantificação das emissões causadoras desse impacto, o que pode ser feito por diferentes abordagens. Dado o seu caráter crítico e urgente, é imperativo dispor de métricas acuradas. Quando a intenção é avaliar impactos ambientais potenciais de produtos, a avaliação de ciclo de vida (ACV) é uma das metodologias de natureza quantitativa mais reconhecidas internacionalmente, com forte base científica. Ao tratar especificamente das mudanças climáticas, essa métrica¹ é denominada pegada de carbono de produtos. Já quando se refere a impactos no consumo e na qualidade da água, é denominada pegada hídrica.

Os estudos em ACV iniciaram-se na Embrapa no início deste milênio. Num primeiro momento, a pesquisa nesse tema esteve voltada às principais commodities brasileiras, especialmente as direcionadas à exportação ou ao uso energético (como cana-de-açúcar, soja, milho, palma de óleo, etc.), e a frutas tropicais, produtos de maior valor agregado e direcionados a mercados exigentes quanto às questões ambientais (como caju, coco, manga, melão e seus derivados). Esses estudos geraram inventários de

¹ A avaliação de ciclo de vida é uma metodologia de natureza quantitativa, baseada em balanços de massa e energia nos processos de transformação e transporte no ciclo de vida do produto – ou seja, consiste na aplicação de uma métrica.

processos agrícolas publicados em bancos de dados nacionais e internacionais, além do perfil ambiental dos produtos. Enquanto isso, a Embrapa criava um importante modelo para análise de mudança de uso da terra. Tais iniciativas contribuíram para a maior representatividade e competitividade comercial dos produtos agrícolas brasileiros.

Quanto às culturas energéticas, os trabalhos evoluíram para contribuições em políticas públicas, como a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), e em políticas internacionais, como o esquema de redução e compensação de carbono para a aviação internacional da Organização Internacional de Aviação Civil (Corsia – *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*), e as normas da Organização Marítima Internacional (IMO – *International Maritime Organization*), agência especializada da Organização das Nações Unidas (ONU) responsável pela regulamentação do transporte marítimo internacional. Já os trabalhos com frutas tropicais passaram a concentrar-se na análise da pegada de carbono e da pegada hídrica, além de importantes pesquisas em modelagem para biorrefinarias. Essas pesquisas buscam dar uso integral às frutas, por meio do desenvolvimento de rotas tecnológicas economicamente e ambientalmente sustentáveis para a extração de compostos a partir de cascas e caroços, como o amido extraído do caroço de manga e a nanocelulose extraída das fibras das cascas de coco verde e bagaço de cana.

Novas iniciativas surgiram com o emprego da ACV na cadeia pecuária bovina de leite e de corte, principalmente em estudos de pegada de carbono, bem como em importantes culturas adaptadas ao clima subtropical e ao bioma Cerrado, como o trigo. Também merecem destaque as recentes pesquisas envolvendo a criação de ferramentas de apoio aos programas de baixo carbono da Embrapa, dedicados às culturas da soja, do milho, do sorgo e do trigo, além da pecuária de leite e de corte.

Este capítulo, inicialmente, apresentará o panorama atual da metodologia de ACV e os desafios de sua aplicação na agricultura tropical, seguindo-se a apresentação de algumas soluções de inovação geradas pela Embrapa e por parceiros, que integram conhecimentos e tecnologias sobre esse tema.

Panorama atual

O que é avaliação de ciclo de vida

A avaliação de ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta de gestão ambiental que permite avaliar o desempenho ambiental de produtos e serviços. Com uma abordagem sistêmica, a ACV denominada “do berço ao túmulo” traz a quantificação de potenciais impactos ambientais considerando todo o ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas, produção, distribuição, uso, até a disposição final de um produto.

Além de identificar os estágios do ciclo de vida que mais contribuem para a geração de impactos, os resultados da ACV permitem propor melhorias, integrar aspectos ambientais a projetos e processos de desenvolvimento, comparar rotas tecnológicas e produtos com função semelhantes, além de fornecer subsídios para declarações ambientais. Trata-se de uma metodologia com forte base científica e reconhecida internacionalmente, padronizada por várias normas, destacando-se a ISO 14040:2006 e a ISO 14044:2006 (International Organization for Standardization, 2006a, 2006b). Além dessas normas gerais, há aquelas específicas voltadas ao estudo de impactos determinados, como a ISO 14067 (International Organization for Standardization, 2018), que detalha os passos para o estudo da pegada de carbono, e a ISO 14046 (International Organization for Standardization, 2014), que direciona a análise da pegada hídrica de um produto. Ressalta-se que, quando a avaliação da pegada hídrica está focada na escassez de água, esta é denominada pegada de escassez hídrica.

Os estudos de ACV são realizados para diferentes escopos e aplicações, tanto no setor acadêmico, como nos setores industrial e governamental. Por apresentarem uma complexidade inerente, esses estudos desafiam a pesquisa científica a desenvolver soluções tecnológicas para viabilizar seu emprego adequado. Nesse sentido, as contribuições da Embrapa contemplam modelos ambientais, modelos de processos, ferramentas para a construção de inventários de ciclo de vida para estimar a pegada de carbono e o perfil ambiental de produtos agrícolas.

Avaliação de ciclo de vida no ambiente agrícola e tropical

A ACV é uma metodologia originalmente proposta para processos industriais. Essa técnica implica a contabilização de fluxos de material e energia trocados entre o ambiente onde ocorrem os processos produtivos e o meio ambiente e pressupõe o fechamento de balanços de massa. Em uma estrutura fisicamente delimitada, como a industrial, é possível controlar esses fluxos. Emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos são necessariamente tratados e relatados em função das legislações ambientais.

Já os processos agrícolas² ocorrem em ambiente aberto, sem fronteiras físicas entre o espaço de produção e o ambiente natural. Logo, muitos fluxos de saída não são quantificáveis, mas sim estimados por modelos dependentes de parâmetros específicos de clima, solo, características de plantas e aspectos relativos ao manejo nutricional e fitossanitário.

Modelos para a estimação de fluxos de saída dos sistemas produtivos para os compartimentos ambientais são apresentados em guias metodológicos para estudos de ACV, em geral associados a bancos de dados de inventários de ciclo de vida

(ICV) (Nemecek et al., 2001; Nemecek; Kägi, 2007; Nemecek; Schnetzer, 2011; Calvo Buendía et al., 2019; Van Paassen et al., 2019; Koch; Salou, 2020). Esses guias reúnem modelos originalmente desenvolvidos para a agricultura de clima temperado. Tais modelos exigem adequação ou parametrização para melhor representarem a agricultura de clima tropical e subtropical (Matsuura; Picoli, 2019). Uma das soluções apresentadas neste capítulo é a ferramenta BR-Calc, componente da ICVCalc, voltada à geração de inventários de processos agrícolas a partir de modelos e fatores adaptados à agricultura brasileira.

Diferentemente das regiões de clima temperado, em regiões de clima tropical é possível a exploração de mais de uma cultura em um mesmo ano agrícola, seja em sequência (safra, safrinha, segunda safra, terceira safra, etc.), seja de forma integrada (Hirakuri et al., 2012). O melhor aproveitamento da área agrícola é um dos benefícios da adoção de sistemas mais complexos, que trazem ainda outras vantagens, como o compartilhamento de recursos naturais e tecnológicos, bem como dos impactos gerados pelo seu uso. A atribuição dos impactos ambientais aos produtos de um sistema de produção³ é comumente feita por alocação⁴, usando um critério físico (como massa, volume, energia, exergia⁵, área ocupada ou tempo

³ Um “[...] sistema de produção é composto pelo conjunto de sistemas de cultivo e/ou de criação no âmbito de uma propriedade rural, definidos a partir dos fatores de produção (terra, capital e mão-de-obra) e **interligados** por um processo de gestão” (Hirakuri et al., 2012, p. 13, grifo do autor).

⁴ A alocação é definida como o “particionamento dos fluxos de entrada ou saída de um processo ou sistema de produto, entre o sistema de produto em estudo e um ou mais outros sistemas de produto” (International Organization for Standardization, 2006a, p. 4, tradução nossa).

⁵ Exergia é a parte da energia de um sistema que pode ser convertida em trabalho útil quando o sistema é levado ao equilíbrio termodinâmico com seu ambiente de referência, levando em conta temperatura, pressão e composição química do meio.

² Neste texto, os processos agrícolas são compreendidos em sentido amplo, incluindo processos florestais e pecuários e suas integrações.

de ocupação) ou econômico. A ICVCalc adota um modelo de alocação que distribui os fatores de impacto entre os produtos comerciais derivados de um sistema de produção, considerando simultaneamente a área e o tempo de ocupação de cada uso da terra (culturas comerciais e atividades de serviço⁶) em um ciclo completo de produção. A escolha desse critério (área e tempo de ocupação da terra combinados) justifica-se pelo fato de os recursos compartilhados serem pertinentes ao recurso terra agricultável: ocupação da terra e emissões de gases de efeito estufa (GEE) derivadas da mudança de uso da terra e da calagem (pela queima de combustíveis veiculares e pelo uso do insumo calcário, propriamente dito). Como a escolha do método de alocação afeta significativamente o resultado da ACV, é recomendável realizar uma análise de sensibilidade para determinar as consequências dessa escolha (The European Feed Manufacturers' Federation, 2024).

Nesse contexto, algumas cadeias produtivas importantes para a economia brasileira, tanto para o abastecimento nacional quanto para exportações, mostram-se interessadas no uso da ACV como ferramenta de análise e tomada de decisão, visando à redução das emissões de GEE, da escassez hídrica e de outros impactos ambientais. O panorama atual de algumas dessas cadeias é descrito a seguir.

Avaliação de ciclo de vida da carne e do leite

A Embrapa participa dos esforços globais para o desenvolvimento de tecnologias que contribuam para o aumento da eficiência de produção e para a mitigação das emissões de GEE na pecuária, atendendo às expectativas de uma sociedade com consumidores exigentes quanto ao menor impacto da produção sobre o meio ambiente.

⁶ Entenda-se como atividades de serviço: adubação verde, culturas de cobertura, pousio, etc.

Para discutir a redução de emissões de GEE na pecuária, é fundamental considerar as métricas mais adequadas, sendo uma das mais reconhecidas internacionalmente, e de fácil entendimento, a intensidade de emissão, que representa o quanto desses gases foi emitido. A intensidade de emissão, quando calculada seguindo as premissas da ACV e relacionada a uma dada quantidade de produto, é denominada de pegada de carbono.

Para reduzir a pegada de carbono dos produtos de origem animal, é possível atuar em três pilares tecnológicos: o primeiro é o pilar da manipulação da fermentação ruminal, utilizando aditivos, grãos, pastagens melhoradas e dietas com maior digestibilidade. Essas tecnologias contribuem para uma via de fermentação mais favorável para o animal, com menor produção de metano. O segundo pilar é a melhora da eficiência do sistema de produção, por meio de tecnologias amplamente disponíveis relacionadas à sanidade animal, à nutrição, à reprodução e à gestão da cadeia de produção. O terceiro pilar corresponde às remoções de GEE⁷, incluindo o sequestro de carbono⁸, que pode acontecer tanto em solos bem manejados de pastagens e de áreas agrícolas quanto nos troncos e raízes do componente arbóreo de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF).

⁷ Segundo o AR6 WGIII do IPCC (Shukla; Skea, 2022, p. 36, tradução nossa), "Remoção de gases de efeito estufa (Greenhouse Gas Removal – GGR) refere-se a atividades humanas que removem GEE da atmosfera e os armazenam em reservatórios geológicos, terrestres ou oceânicos, ou em produtos." Inclui o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O) ou outros GEE, bem como processos como DAC (captura direta do ar), BECCS (bioenergia com captura e armazenamento de carbono), reflorestamento e aumento do carbono do solo.

⁸ "Sequestro de carbono" é o processo de armazenar carbono em um reservatório (ou "pool" de carbono) — como florestas, solos, formações geológicas ou oceanos — de forma que ele permaneça longe da atmosfera por um tempo suficientemente longo ("on climatically significant timescales") para reduzir as concentrações de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico e, portanto, mitigar as mudanças climáticas. (IPCC, 2025).

Os objetivos de mitigação dos dois primeiros pilares são frequentemente alcançados por tecnologias como, por exemplo, o uso de suplementos em animais em pastejo, ou a intensificação do pastejo⁹ em áreas bem manejadas. Congio et al. (2021) analisaram 130 trabalhos científicos conduzidos na América Latina e no Caribe que quantificaram os impactos de diferentes estratégias de mitigação de metano. Os resultados apontaram que a mais eficiente foi o melhoramento genético animal (38% de redução), seguido do manejo adequado da pastagem (22 a 35%) e, por fim, da melhoria da dieta dos animais, incluindo maior nível de proteína e alimentos concentrados (10 a 20%). Os impactos da suplementação e do confinamento foram estudados por Méo Filho et al. (2020), que destacaram que essas tecnologias têm crescido como alternativa viável, com maior eficiência na redução de emissões de GEE por quilo de ganho de peso, especialmente quando associadas a tecnologias inovadoras como o uso de aditivos que reduzem diretamente as emissões de metano. Aditivos como óleos essenciais e coprodutos da agroindústria, que contêm compostos secundários com efeito direto sobre a geração de metano, foram estudados por Pena-Bermudez et al. (2022), Budel et al. (2023) e Benetel et al. (2024).

Em relação à intensificação das pastagens¹⁰, Oliveira et al. (2020) demonstraram que um número maior de cabeças pastando em uma área bem manejada tem suas emissões reduzidas por quilograma de produto (2,0 kg CO₂eq/kg carcaça), enquanto pastagens degradadas resultaram

em pegadas de carbono até 25 vezes maiores (50,3 kg CO₂eq/kg carcaça). De forma similar, Méo Filho et al. (2022) observaram uma redução de 50% na intensidade de emissão de metano ao comparar manejo de pastagem intensivo com o extensivo (6,75 versus 13,5 kg CO₂eq/kg carcaça).

Sistemas de produção de pastagens consorciadas de gramíneas e leguminosas também são alternativas eficientes para a redução da pegada de carbono, pois as forrageiras ingeridas têm maior nível de proteína e de digestibilidade, mitigando as emissões. As leguminosas também fixam nitrogênio de forma biológica, reduzindo a necessidade de fertilizantes sintéticos e promovendo um balanço positivo de nitrogênio, equivalente a 150 kg/ha.ano de ureia, com redução de 23% nas emissões por unidade de produto (Homem et al., 2024). Furtado (2022) e Furtado et al. (2023) demonstraram uma redução de 70% na intensidade de emissão de metano ao consorciar capim marandu com feijão guandu, principalmente pelo aumento de ganho de peso no período de seca.

O sequestro de carbono nos solos de pastagens com pastejo intensificado foi estudado por Oliveira et al. (2022), que indicaram valores de 1,92 e 1,80 t CO₂eq/ha.ano para sistemas sem irrigação e com alta e média lotação, respectivamente. Os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), tecnologia muito estudada e difundida pela Embrapa, também merecem destaque no sequestro de carbono nos solos e troncos de árvores. Oliveira et al. (2024) concluíram que a melhoria do manejo do uso da terra e a introdução de árvores afetam positivamente o teor de carbono do solo. O sequestro de carbono em sistemas integrados de árvores e pastagens ocorre em camadas mais profundas. Um efeito duplamente benéfico foi observado no aumento do teor de carbono em solos rasos (efeito pastagem) e em camadas mais profundas (efeito eucalipto). Praticamente metade do estoque de carbono em um metro de profundidade concentra-se nos primeiros 30 cm a partir da superfície. O sequestro de

⁹ A “intensificação do pastejo” refere-se ao aumento da eficiência do uso do pasto pelo animal, por meio do manejo do rebanho e da estratégia de utilização da forragem. Está relacionada à gestão do processo de pastejo em si, ou seja, como, quanto, quando e por quanto tempo os animais pastam uma determinada área.

¹⁰ A intensificação de pastagem é um conjunto de estratégias e práticas de manejo voltadas para aumentar a produtividade da pecuária por hectare, por meio de melhorias nas condições da pastagem, no uso de insumos e na gestão do rebanho.

carbono total em solos e troncos alcançou 19 t CO₂eq/ha.ano. Brunetti et al. (2025) destacaram que, mesmo em um sistema intensivo com 2,5 vezes mais animais que a média brasileira, e com fornecimento de alimentação adicional, os sistemas silvipastoris compensaram 77% da emissão entérica de CH₄ por fixação de carbono nos troncos das árvores, resultando em melhor balanço entre emissões e remoções (-14,28 t CO₂ eq/ha.ano).

Estudos complementares envolvendo sistemas de integração para mitigação das emissões de GEE também demonstraram a maior eficiência desses sistemas quanto ao uso da água, contribuindo para a redução da pegada hídrica¹¹ da carne brasileira. Sistemas de integração do tipo ILP (integração lavoura-pecuária) e ILPF apresentam potencial de redução do consumo de água doce na criação de gado de corte em condições de pastejo, melhorando a eficiência do uso da forragem e diminuindo a evapotranspiração da forrageira (Barsotti et al., 2022), com reflexos positivos na eficiência de conversão alimentar e na produtividade hídrica em comparação a sistemas extensivos com pastagens monoespecíficas (Barsotti et al., 2024). Barsotti et al. (2025) também observaram que a escassez de água verde é baixa em sistemas agropastoris (182 a 328 L/kg de peso de carcaça) e que sistemas de integração reduzem a pegada hídrica do gado de corte em até 69%, configurando-se como estratégias eficientes para reduzir os impactos ambientais do consumo de água em sistemas pecuários baseados em pastagens. Após 14 anos, esses mesmos sistemas de in-

tegração avaliados, ILPF e ILP, apresentaram estoques de carbono na camada de 0 a 20 cm do solo, de 3,2 e 7,4 Mg/ha, respectivamente, e taxas de acúmulo de carbono de 231,7 e 531,4 kg/ha.ano, respectivamente (Almeida et al., 2023).

Essas tecnologias, cujos efeitos foram testados em experimentos de campo, podem ser utilizadas para calibrar e validar modelos matemáticos para a estimativa de emissões, além de servirem como dados de entrada para calculadoras de pegada de carbono. Ajustes e calibrações em modelos para definição de parâmetros adequados ao ambiente tropical (“tropicalização”) são necessários para que eles reflitam as condições de produção brasileiras. A elaboração de protocolos, o desenvolvimento de ferramentas para cálculo do balanço de GEE e a aplicação de boas práticas para melhoria desse balanço geram informações relevantes para a tomada de decisão sobre investimentos, tecnologias e processos empregados nos empreendimentos rurais, capazes de reduzir a pegada de carbono atribuída aos produtos de origem animal.

Avaliação de ciclo de vida aplicada ao estudo das pegadas de carbono e hídrica de frutas tropicais

A fruticultura se destaca pelo valor da produção, pelo número de empregos gerados por área cultivada, segundo Sobel e Costa (2004), de 0,8 a 1,2 emprego direto por hectare cultivado, e pela inserção das mulheres no mercado de trabalho, especialmente na fase de pós-colheita, além de promover a alavancagem do setor de serviços. Comparando essa atividade à sojicultura, esta última é caracterizada por ser uma cultura altamente mecanizada e de grande escala, o que resulta em baixa geração de empregos diretos por hectare. Estudos como os da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2025a), e de pesquisadores como Graziano da Silva (2004) e, mais recentemente, Barcellos et al. (2017), indicam que a soja gera cerca de 0,05 a 0,07 emprego direto por hectare cultivado. Em regiões com alto nível de

¹¹ O método da pegada hídrica com classificação por cores – água azul, verde e cinza – foi proposto pelo pesquisador Arjen Y. Hoekstra, um dos fundadores do conceito moderno de pegada hídrica e do método *Water Footprint Assessment Methodology* (Metodologia de avaliação da pegada hídrica). Esse método define: água azul – água superficial ou subterrânea usada (rios, lagos, aquíferos); água verde – água da chuva armazenada no solo e utilizada pelas plantas (evapotranspiração); água cinza – volume de água necessário para diluir poluentes até níveis aceitáveis (Hoekstra et al., 2011).

mecanização, como o Matopiba ou o Centro-Oeste, esse número pode cair ainda mais (de 0,03 a 0,04 empregos por hectare).

O Brasil está em terceiro lugar na produção mundial de frutas, atrás apenas da China e da Índia, com a maior parte da produção (98%) abastecendo o mercado interno. Destacam-se, em 2024:

- Banana (7.046.345 t; 469.989 ha plantados; valor bruto da produção de R\$ 16.062.591.000).
- Coco (2.105.345.000 frutos; R\$ 2.275.451.000).
- Goiaba (557.225 t; R\$ 1.385.628.000).
- Caju (159.212 t de castanhas; 819 mil litros de cajuína; 441.892 ha; R\$ 689.335.000).

Com relação ao mercado externo, de acordo com o IBGE (2025) e o Mapa (2025), os principais produtos exportados pelo Brasil em 2023 foram:

- Manga (266 mil toneladas; 80.465 ha; US\$ 284,89 milhões).
- Melão (228 mil toneladas; 30.535 ha; US\$ 183,11 milhões).
- Uvas (73 mil toneladas, 77.019 ha; US\$ 172,01 milhões) (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2025).

Inúmeros estudos avaliaram as pegadas de carbono de frutas tropicais, como melão, manga, banana e coco verde (Figura 6.1). Uma comparação de diferentes estudos mostrou que a manga em sistema com adubação verde com coquetel vegetal em área experimental resultou em pegada de Carbono negativa (isto é, o estoque de carbono na biomassa e no solo, devido ao uso de coquetel vegetal nas entrelinhas, foi maior que as emissões no ciclo de vida do produto. Considerando a média de vários estudos com frutas em todo mundo, avaliou-se que a pegada de uma fruta saindo da fazenda é de 0,5 kg CO₂ eq/kg, variando $\pm$ 0,36 kg CO₂ eq/kg (Subedi et al., 2024). É importante ressaltar que, embora as equações e fatores para estimativa das emissões do IPCC tenham sido

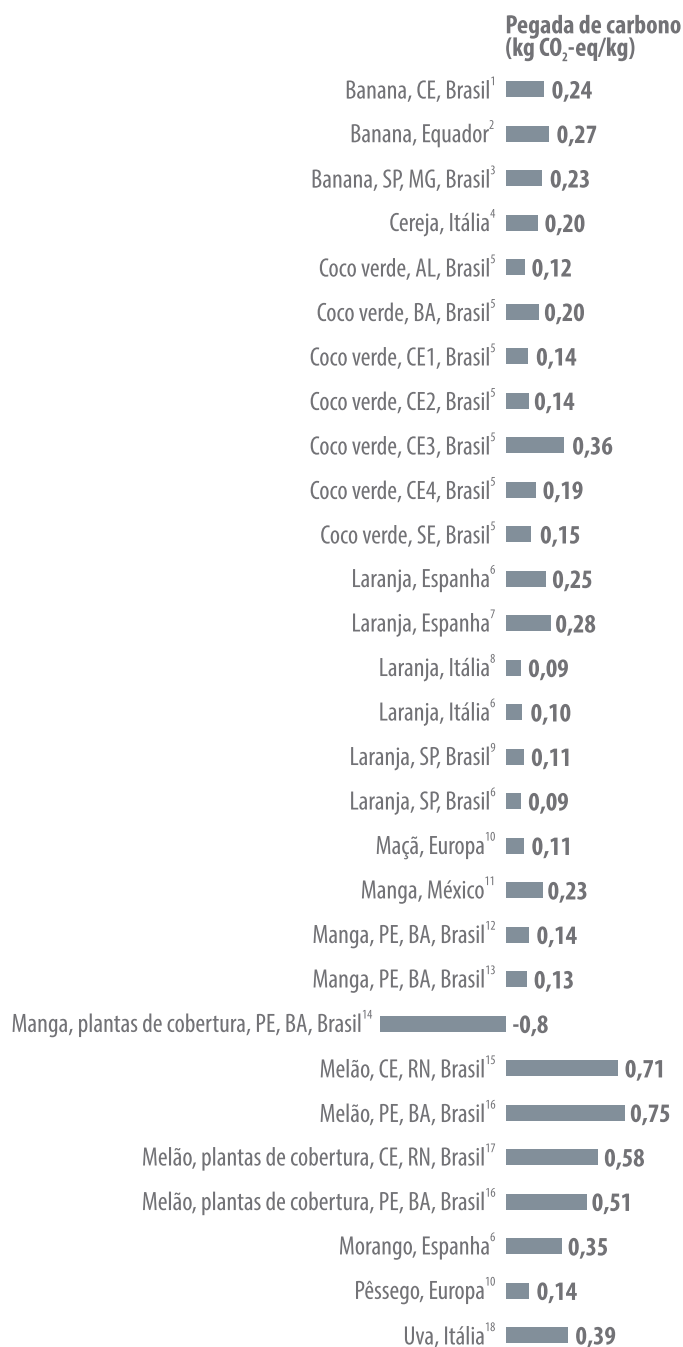


Figura 6.1. Comparação da pegada de carbono de diferentes frutas produzidas em distintos países e relatadas em diversos estudos.

Nota: Esses estudos apresentaram diferenças no escopo e ano dos fatores de emissão de GEE e GWP (do inglês, *Global Warming Potential*).

Fonte: ¹Lima et al. (2024), ²Roibás et al. (2016), ³Coltro e Karaski (2019), ⁴Tassieli et al. (2018), ⁵Sampaio et al. (2021), ⁶Mordini et al. (2009), ⁷Ribal et al. (2019), ⁸Giudice et al. (2013), ⁹Knudsen et al. (2011), ¹⁰Vinayes et al. (2017), ¹¹NMB (2010), ¹²Basset-Mens et al. (2016), ¹³Muller-Carneiro et al. (2018), ¹⁴Dias et al. (2020), ¹⁵Figueirêdo et al. (2013), ¹⁶Santos et al. (2018), ¹⁷Barros et al. (2019) e ¹⁸Marras et al. (2015).

empregadas nesses estudos, esses fatores e o GWP (*Global Warming Potential*) variaram com a evolução da ciência climática ao longo do tempo. Além disso, as emissões oriundas da MUT, produção de mudas, embalagem e transporte da fruta para um mercado consumidor foram desconsideradas na maioria dos estudos. No cultivo de espécies perenes (por exemplo: caju, manga e coco verde), poucos estudos abrangeram todas as fases do pomar (implantação, crescimento e plena produção).

A análise da pegada de escassez hídrica em frutas é menos frequente do que a da pegada de carbono, além de empregar diferentes métodos de avaliação. Estudos que adotaram o método *Aware* (*Available Water REmaining*), recomendado pela Iniciativa do Ciclo de Vida (Boulay et al., 2016), utilizando índices anuais de escassez gerados por Boulay et al. (2018), mostram contrastes significativos. A produção de uva irrigada no Peru, em bacias hidrográficas de clima árido, apresentou a maior pegada hídrica, enquanto o coco verde cul-

tivado no Ceará apresentou a menor (Figura 6.2). Ressalta-se que, no estudo da uva, observou-se grande variação da pegada de escassez hídrica (de 3,93 a 208,4 m³-eq/kg), de acordo com a localização da produção irrigada nas diferentes bacias hidrográficas do Peru (Vázquez-Rowe et al., 2017).

Avaliação de ciclo de vida do trigo

A produção de trigo e de seus produtos derivados, como farinha, massas, biscoitos e pães, é de vital importância para a alimentação global. Mundialmente, o trigo é responsável por cerca de 18% das calorias e 19% das proteínas ingeridas diariamente (Mottaleb; Govindan, 2023). Juntamente com o arroz, o milho e a cana-de-açúcar, o trigo representa quase metade da produção agrícola mundial anual em termos de toneladas produzidas (FAO, 2025). Embora os volumes produzidos e consumidos sejam fatores-chave para compreender a relevância de um produto para as questões climáticas, é necessário entender como a produção é realizada e como o produto chega ao consumidor.

A ACV do trigo e de sua farinha foi realizada de forma pioneira no Brasil e na América Latina, conforme relatado por Giongo et al. (2025).

A integração de parâmetros de sustentabilidade nos requisitos exigidos pelas empresas a seus fornecedores não é recente (Amini; Bienstock, 2014; Beske et al., 2014). A produção que utiliza insumos com menor impacto ambiental é cada vez mais parte das estratégias corporativas e dos



Figura 6.2. Comparação da pegada de escassez hídrica de diferentes frutas, produzidas em distintos países e relatadas em diversos estudos.

Nota: o escopo desses estudos abrangeu desde a produção de insumos e o transporte até as áreas de produção agrícola. Apenas o estudo sobre a manga considerou as etapas de pós-colheita e de embalagem da fruta.

Fonte: ¹Vázquez-Rowe et al. (2017), ²Sampaio et al. (2021), ³Muller-Carneiro et al. (2019), ⁴Dias et al. (2020) e ⁵Lima et al. (2024).

compromissos que o setor produtivo tem com os *stakeholders*. Dessa maneira, para as organizações que compram e usam trigo e derivados, é fundamental entender como esses produtos são produzidos e quais são seus impactos, para que não haja interrupções na produção, no fornecimento ou na confiança. Assim, critérios multidimensionais de sustentabilidade (social, ambiental e de governança) podem ser implementados nas transações dentro da cadeia de valor. Esses parâmetros precisam ser gerenciados para que não aumentem os custos de transação envolvidos (Dossa et al., 2023) e devem considerar incertezas diversas. Uma das formas de reduzir tal problemática é aumentar a precisão das medições e o rigor nos controles de critérios, como a pegada de carbono.

A ausência de métricas de pegada de carbono para regiões produtoras específicas é um problema. Os sistemas de produção são adaptados para as múltiplas características de uma área, como clima, solo, estrutura fundiária e logística de comercialização, entre outros fatores (Giongo et al., 2025). Assim, aplicar a pegada de carbono de uma região com sistema de produção diferente gera incerteza sobre a validade desses dados. Isso evidencia que as estimativas de impacto ambiental (incluindo os relacionados às mudanças climáticas) devem ser o mais próximas possível do sistema de produção que gerou o produto em análise. Para a triticultura brasileira, isso é especialmente relevante.

A produção de trigo no Brasil é classificada em quatro regiões – fria e úmida; moderadamente quente e úmida; moderadamente quente e seca; e quente e seca – definidas para orientar a adaptação das cultivares, considerando critérios como regime hídrico, temperatura e altitude (Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, 2023). Seguindo os critérios do zoneamento agrícola de risco climático (Zarc), as áreas coloridas em azul, amarelo, verde e laranja indicam regiões aptas às cultivares recomendadas de trigo. A área em vermelho corresponde a regiões onde

o cultivo de trigo não é recomendado, devido a condições climáticas e edafológicas adversas. Áreas não coloridas dentro dos estados representam regiões excluídas por restrições agroclimáticas. As três primeiras regiões (cores azul, amarelo e verde) estão distribuídas pelos estados do Sul do Brasil, bem como no sul de São Paulo e em partes do Mato Grosso do Sul. Já a última região (cor laranja) está situada principalmente no Cerrado brasileiro, caracterizando o trigo tropical (Figura 6.3).

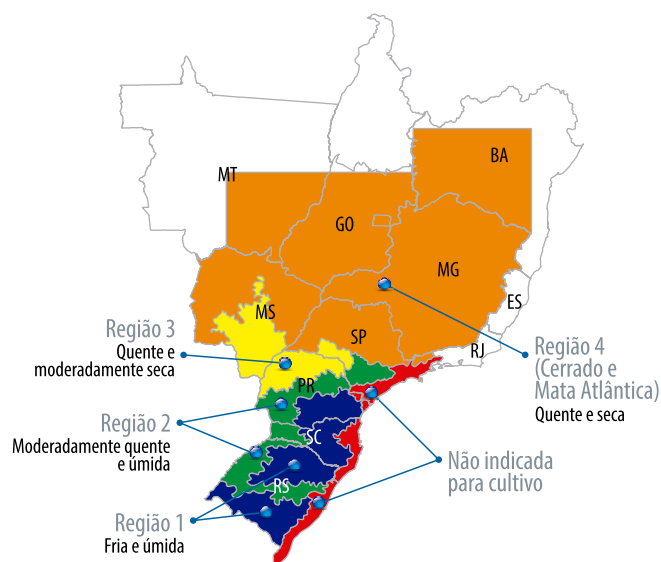


Figura 6.3. Regiões homogêneas de adaptação de cultivares de trigo no Brasil.

Fonte: Pasinato et al. (2018).

A produção de trigo no Brasil apresentou crescimento significativo nas últimas décadas (Figura 6.4), tendo passado de apenas 3,2 milhões de toneladas para mais de 8,4 milhões de toneladas (estimadas) em apenas 25 anos. O recorde de produção ocorreu em 2022, com 10,5 milhões de toneladas, quase atingindo a demanda anual do País, de cerca de 12,5 milhões de toneladas (Associação Brasileira da Indústria do Trigo, 2022). Essa produção está concentrada principalmente nos três estados do Sul do Brasil, que representaram, em média, 87,8% da produção nacional nos últimos cinco anos (Conab, 2005b). Apesar disso, é

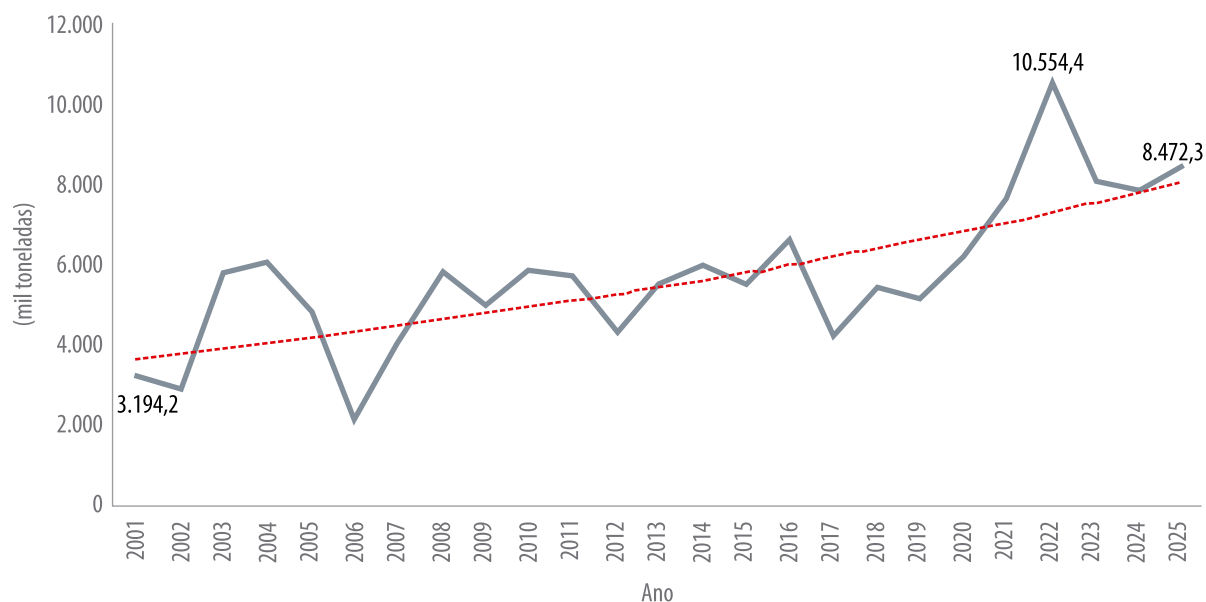


Figura 6.4. Produção de trigo no Brasil de 2001 a 2025 (em mil toneladas).

Fonte: Conab (2005b).

preciso destacar o crescimento da produção de trigo na quarta região homogênea de adaptação de cultivares, Cerrado e Mata Atlântica (Figura 6.3).

O expressivo crescimento da produção de trigo no Brasil está intimamente associado ao aumento da produtividade. Nos últimos 25 anos, a produtividade cresceu aproximadamente 64%, conforme demonstram os dados da Conab (2025b), passando de cerca de 1,8 t/ha em 2001 para 3,0 t/ha (estimativa da safra 2025). O restante do crescimento da produção ocorreu em decorrência da expansão da área (Figura 6.4).

Nesse sentido, é preciso destacar que a cultura do trigo não é promotora da abertura de novas áreas. O trigo rotaciona com outras culturas temporárias (como soja, milho e feijão), aumentando a eficiência no uso do solo e reduzindo áreas de pousio e de monocultura prejudicial ao solo (Denardin et al., 2019).

A triticultura brasileira está passando por um amplo processo de evolução. A adoção em larga escala de inovações, como drones e bioinsumos (Compre Rural, 2023), a expansão do trigo na re-

gião do Cerrado (Acosta, 2018; Chagas et al., 2021) e a crescente preocupação multi-institucional com a redução dos impactos ambientais (Dossa et al., 2023) são alguns destaques. Entre esses avanços, o crescimento do trigo tropical merece especial atenção. A expansão do trigo para a região do Cerrado brasileiro é parte de uma ampla ação coordenada de múltiplos atores em busca da autossuficiência da produção brasileira de trigo. Trabalhos anteriores (Acosta, 2018; Acosta; Ramos, 2021; Farias et al., 2024) demonstram o potencial de aumento da produção de trigo no Brasil a partir de diferentes modelos, seja pelo aumento da produtividade, seja pela expansão da área de plantio em áreas agrícolas já consolidadas, como é o caso do trigo tropical.

A relevância disso se evidencia quando analisados os possíveis impactos de tal incremento de produção. Considerando dados do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), entre 2015 e 2024, o Brasil importou 11,3 bilhões de dólares em trigo para suprir a demanda nacional. Portanto, incrementar a capacidade de produção própria de trigo atende a múlti-

plas dimensões da sustentabilidade: aproximação geográfica entre produção e consumo, redução da dependência externa de um alimento básico, diminuição do dispêndio externo, melhoria da balança comercial e, finalmente, estímulo aos processos de rotação de cultura e proteção do solo.

Entrevistas com especialistas da região indicam que a produção de trigo no Cerrado brasileiro pode ser agrupada em duas categorias: trigo de sequeiro e trigo irrigado. A produção de trigo irrigado possui maior potencial de produtividade, atingindo médias de 6 t/ha. Entretanto, a produção de sequeiro tem menor produtividade (cerca de 2 a 2,5 t/ha), mas maior área para expandir, considerando a presença já estabelecida de soja e milho na região. A irrigação para o trigo é incomum na região tradicional (Sul), salvo em situações específicas como, por exemplo, para a produção de sementes. Isso demonstra potenciais impactos ambientais distintos (pegada hídrica e de carbono), o que aumenta a necessidade de avaliação geograficamente localizada desses sistemas de produção. Assim, faz-se necessária a coordenação de ações por meio de um programa voltado a essa temática.

Com o desafio de produzir todo o trigo que o Brasil necessita e promover a segurança alimentar global, o Programa Trigo Baixo Carbono (Dossa et al., 2023) incorpora em seu escopo estratégias de adaptação e mitigação às mudanças climáticas, utilizando a ACV como ferramenta para avaliar desafios e oportunidades de aprimoramento contínuo da cadeia tritícola. O estudo de Giongo et al. (2025) apresenta a pegada de carbono do trigo produzido no Sul do Brasil, como uma das primeiras iniciativas para relatar o desempenho ambiental desse produto brasileiro. Apesar do avanço na aplicação da ACV para culturas como o trigo, ainda há escassez de estudos representativos da produção de trigo no Cerrado brasileiro. Essa lacuna reforça a importância de expandir os estudos de ACV para outros biomas e sistemas agrícolas tropicais.

Soluções de inovação

Com base no panorama atual apresentado, tanto no que se refere à própria ACV e às calculadoras adaptadas ao ambiente tropical, quanto a seu uso em cadeias importantes para a economia nacional, a seguir são apresentadas soluções de inovação desenvolvidas pela Embrapa e por parceiros, buscando contribuir para a melhoria da eficiência técnica, econômica e ambiental dos produtos da agricultura brasileira.

Métodos para estimativa de mudança de uso da terra e emissões de gases de efeito estufa

A mudança de uso da terra, ou *land-use change* (LUC, da sigla em inglês), é um dos processos com maior potencial de impacto nos resultados da pegada de carbono de produtos agropecuários. A mudança de uso da terra pode elevar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) de 8 a 20 vezes em relação às emissões de todos os demais processos envolvidos na produção agropecuária (Castanheira; Freire, 2013; Poore; Nemecek, 2018). O processo também é muito relevante para outras categorias de impacto, como biodiversidade e serviços ecossistêmicos (Defries et al., 2004; Calvo Buendía et al., 2019). No Brasil, a mudança de uso da terra tem sido responsável por uma parcela considerável das emissões de GEE nacionais, contribuindo com uma média de 43% das emissões totais líquidas do País no período de 2002 a 2022 (Brasil, 2022). Portanto, estimativas acuradas de mudança de uso da terra são críticas para os estudos de pegada de carbono e de ACV de produtos brasileiros e, conseqüentemente, para as ações de descarbonização das cadeias de produção.

A mudança de uso da terra pode ser do tipo direta ou indireta (International Organization for Standardization, 2018). A mudança direta (*direct LUC* ou *DLUC*) ocorre quando há uma mudança de uso da terra dentro das fronteiras do sistema, enquanto

a indireta (*indirect LUC* ou *ILUC*) ocorre fora das fronteiras do sistema, causada por uma mudança direta (International Organization for Standardization, 2018). Por exemplo, quando o foco de estudo é o cultivo X e o sistema em análise é a fazenda usada para esse cultivo, a mudança de uso da terra de pastagem para o cultivo X dentro da fazenda é uma DLUC. Já a expansão dessa pastagem deslocada sobre uma área de floresta na fazenda vizinha ou no país vizinho pode ser considerada uma ILUC.

A contabilização das emissões de GEE derivadas de DLUC é frequentemente exigida nos protocolos e padrões internacionais de pegada de carbono, como a norma ISO (International Organization for Standardization, 2018) e o GHG protocol (Greenhouse Gas Protocol, 2022). No entanto, o levantamento de dados primários para essa tarefa pode ser custoso, trabalhoso ou mesmo inviável, seja pela falta de dados de alta resolução, seja pelos altos custos e tempo necessários (Brenton et al., 2021). Para contornar essa limitação, métodos e ferramentas foram desenvolvidos internacionalmente para disponibilizar estimativas de DLUC para uso em estudos de pegada de carbono (por exemplo, em Blonk Consultants, 2021; Lam et al., 2021). No entanto, as estimativas de DLUC eram frequentemente disponibilizadas apenas nacionalmente (por exemplo, em Tubiello et al., 2021), ou apenas para cultivos em recortes regionais e temporais específicos (por exemplo, em Figueiredo et al., 2013; Maciel et al., 2015), ou continham representações inconsistentes do território brasileiro (por exemplo, como relatado em Novaes et al., 2022).

Nesse contexto, a Embrapa tem coordenado ações e projetos de pesquisa e desenvolvimento de métodos e estudos que permitam a estimativa mais acurada da mudança de uso da terra e das emissões de GEE, para subsidiar estudos de ACV e de pegada de carbono de produtos agropecuários brasileiros. As principais linhas de atuação incluem: 1) desenvolvimento do método *Brazilian*

land-use change (BRLUC) para estimativas de DLUC para os produtos brasileiros; 2) geração de dados e informações para apoio à consideração de LUC em políticas públicas envolvendo a contabilidade de carbono.

O método BRLUC foi desenvolvido para permitir a estimativa de emissões e remoções de dióxido de carbono (CO₂) causadas pela mudança de uso da terra associada a produtos agropecuários brasileiros, subnacionais e compatível com os principais protocolos internacionais. Em sua primeira versão, ele permitia a estimativa de emissões estaduais para 64 cultivos, além de pastagem e silvicultura (Novaes et al., 2017). Uma versão aprimorada trouxe resultados municipais, com base em dados espacialmente explícitos (Garofalo et al., 2022). Ambas as versões estão disponíveis gratuitamente para acesso e download no portal da Embrapa¹². Atualmente, uma nova versão está em fase final de publicação e disponibilizará emissões considerando também os manejos de uso da terra praticados nas diferentes regiões brasileiras, assim como estimativas de estoques de carbono municipais.

Em razão da sua consistência e abrangência, os resultados do método BRLUC foram incorporados a um dos principais bancos de dados internacionais de inventários de ciclo de vida, o Ecoinvent¹³ (Donke et al., 2020). Seus dados também foram incorporados ao banco de dados internacional GFLI e ao Banco Nacional de Inventários de Ciclo de Vida¹⁴ (SICV-Brasil), gerido pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (Ibict/MCTI). Ademais, o método encontra-se em processo de incorporação a outras bases de dados, como o Hestia¹⁵ e o sistema Orbae¹⁶. A incorporação

¹² Disponível em: <https://brluc.cnpma.embrapa.br>.

¹³ Disponível em: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-data-base>.

¹⁴ Disponível em: <https://sicv.acv.ibict.br/Node>.

¹⁵ Disponível em: <https://www.hestia.earth>.

¹⁶ Disponível em: <https://orbae.adastra.eco>.

a esses bancos de dados e sistemas leva à ampliação da adoção do método e de seus resultados pelos seus muitos e variados usuários, que vão desde grandes centros de pesquisa e governos a multinacionais de consultoria e da agroindústria. Essa adoção permite que estudos sobre produtos agropecuários brasileiros apresentem resultados mais acurados sobre o sistema de produção nacional.

Alguns desses estudos têm sido publicados e fornecem uma amostra da amplitude de aplicações do método. São exemplos os estudos sobre: o impacto de rações para peixes (Silva et al., 2018); a pegada de carbono da produção de manga e de sisal no Semiárido (Folegatti-Matsuura et al., 2019; Müller Carneiro et al., 2019), da carne bovina brasileira (Dinato et al., 2019), do coco no Nordeste brasileiro (Sampaio et al., 2021) e da soja produzida no Pará (Brito et al., 2021); o desempenho da manufatura de jeans no Brasil (Morita et al., 2020); e os efeitos da modelagem sobre a pegada de carbono de biocombustíveis (Brandão et al., 2021). Essa amostra exemplifica a ampla versatilidade do método e sua aplicação para os mais diversos fins.

Com base na experiência adquirida nessas ações de pesquisa e desenvolvimento, a Embrapa tem também contribuído para o tratamento mais eficaz da mudança de uso da terra em políticas públicas que envolvam a contabilidade de carbono. O principal destaque tem sido sua atuação junto à RenovaBio, da qual resultou a proposta para a definição dos critérios de elegibilidade no programa (Moreira et al., 2018; Novaes et al., 2023). A equipe também tem contribuído com notas técnicas e informações para políticas internacionais, como na definição de critérios e parâmetros para a avaliação de sustentabilidade no ciclo de vida de biocombustíveis, para uso na aviação, no Corsia, e na navegação, na IMO, assim como na diretiva de energias renováveis da Comissão Europeia (RED – Renewable Energy Directive). Atuou ainda junto à Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) para o ajuste de da-

dos da área agropecuária do Brasil (Novaes et al., 2022), com grande impacto em modelos globais de mudança de uso da terra.

Além da expressiva contribuição no desenvolvimento de soluções relacionadas à mudança de uso da terra, a Embrapa Meio Ambiente e seus parceiros têm dedicado esforços ao desenvolvimento de ferramentas computacionais para a ACV e para a elaboração de inventários de processos agrícolas, visando a estimativas da pegada de carbono de produtos e ferramentas acessórias, como as apresentadas a seguir.

ICVCalc-Embrapa – ferramenta para inventários agrícolas tropicais

A ICVCalc-Embrapa é uma ferramenta dedicada à construção de inventários de processos agrícolas para estudos de ACV, cuja adoção, como já evidenciado, permite alcançar maior acurácia em estudos sobre o sistema de produção nacional. Atualmente, existem duas versões: a primeira, desenvolvida no *software* Microsoft Excel¹⁷ (Folegatti-Matsuura et al., 2022); e a segunda, disponibilizada como sistema web¹⁸.

A versão em Excel abrange os principais protocolos metodológicos internacionais empregados para estimar as emissões derivadas de processos agrícolas nos diferentes compartimentos ambientais: a) Nemecek (Nemecek; Schnetzer, 2011); b) WFLDB (Nemecek et al., 2015); c) Agri-footprint (Van Paassen et al., 2019); d) Agribalyse (Koch; Salou, 2020); e) IPCC (2020). O BR-Calc foi desenvolvido pela Embrapa Meio Ambiente por meio da adaptação dos modelos presentes em outros protocolos para que melhor representem os processos da agricultura brasileira, incluindo bancos de dados de clima e solo para as mesorregiões do País.

¹⁷ Disponível em: <https://www.cnpma.embrapa.br/download/icvcalc>.

¹⁸ Disponível em: <https://icvcalc.cnpma.embrapa.br>.

A ferramenta adota duas opções de inserção de dados: dados brutos ou dados previamente tratados. Na primeira opção, são usados dados referentes a uma safra de uma cultura agrícola, tratados na planilha *PrimaryData*. A planilha *Allocation* é usada para culturas participantes de um sistema de produção, sendo destinada aos cálculos de alocação das cargas ambientais relacionadas aos recursos consumidos e aos impactos gerados, que devem ser compartilhados entre os produtos agrícolas desse sistema. Já na segunda opção, fluxos (recursos da natureza ou da tecnosfera¹⁹) já normalizados para um hectare ou um quilograma de produto são inseridos na planilha *InputData*.

Todos os protocolos metodológicos dispõem de duas planilhas: a) Calc, destinada à inserção de parâmetros técnicos que alimentam os modelos ambientais específicos de cada protocolo; b) LCI, que consolida o inventário do processo agrícola, composto pelo conjunto dos fluxos de entrada e saída. Além disso, na versão em Excel da ICVCalc há a planilha *Emissions Comparison*, que apresenta os resultados de emissões para os diferentes compartimentos ambientais estimados em cada protocolo.

A versão ICVCalc web é uma derivação da primeira ferramenta, que processa especificamente o modelo BR-Calc. Além da estrutura de cálculo, a ICVCalc web é composta por vários bancos de dados auxiliares e consome APIs (*Application Programming Interface*) de outros softwares (como o BRLUC), o que facilita a construção de inventários de processos agrícolas. Desenvolvida em Python, oferece uma interface de operação mais amigável. A entrada de dados é feita por talhão agrícola, e o usuário é encaminhado por uma sequência de páginas que permite que ele descreva em detalhes o seu sistema de produção (nesse caso, sem modelo de alocação embutido). O

resultado é o inventário do processo agrícola (tal como na versão em Excel), mas em formato interoperável com os principais softwares de apoio à ACV. Enquanto a ICVCalc em Excel é voltada a um público especializado em ACV, permitindo certo grau de personalização da estrutura de cálculo, a ICVCalc web é dedicada a um público conhecedor de sistemas agrícolas, mas não necessariamente da técnica de ACV.

RenovaCalc – ferramenta para o setor agroenergético em apoio à Política Nacional de Biocombustíveis

Como citado anteriormente, a RenovaBio é a Política Nacional de Biocombustíveis. Instituída pela Lei nº 13.576/2017, seu principal objetivo é ampliar a participação dos biocombustíveis na matriz de transportes brasileira, produzidos em bases mais sustentáveis, contribuindo assim para a descarbonização do setor, em consonância com os compromissos assumidos pelo Brasil na *Conferência do Clima*, em Paris (2015).

Para a operacionalização da RenovaBio, por demanda da Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Ministério de Minas e Energia (MME), uma equipe composta pela Embrapa Meio Ambiente, pela Universidade Estadual de Campinas, pelo Laboratório Nacional de Biorrenováveis e pela Agroicone desenvolveu a RenovaCalc²⁰, uma ferramenta para estimar a intensidade de carbono de biocombustíveis (Matsuura et al., 2018). Na atual versão pública, a calculadora trabalha com quatro tipos de biocombustíveis: etanol, biodiesel, biometano e bioquerosene de aviação, obtidos por nove rotas tecnológicas (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2022).

A base metodológica da RenovaCalc é a ACV atribucional, focada exclusivamente na categoria de

¹⁹ Tecnosfera é a parte do sistema terrestre formada por materiais, artefatos e fluxos criados ou gerenciados pela atividade humana, interagindo com a biosfera, a litosfera, a hidrosfera e a atmosfera.

²⁰ Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/renovacalc>.

impacto “mudanças climáticas”, com abrangência “do poço à roda”, isto é, contabilizando as emissões de GEE ao longo de toda a cadeia produtiva, desde a extração de recursos naturais, aquisição, produção e tratamento da biomassa, passando por sua conversão em biocombustível, até a combustão em motores, incluindo todas as etapas de transporte (Matsuura et al., 2022).

A RenovaCalc tem alguns diferenciais em relação a outras ferramentas de contabilidade de carbono aplicadas em políticas agroenergéticas internacionais: a) permite o uso de dados primários, expressando o perfil específico do produtor de biocombustíveis; b) disponibiliza toda a estrutura de cálculo aberta, garantindo transparência; e c) opera no software Microsoft Excel, de domínio geral. Em linhas gerais, a RenovaCalc demanda dois conjuntos de dados a serem preenchidos pelo usuário: dados agrícolas e dados industriais. Para a fase de produção de biomassa, devem ser informadas as quantidades consumidas de insumos agrícolas e energéticos, bem como a área e o volume de produção. Para a fase de conversão em biocombustível, requer-se a inserção de dados de rendimentos de produtos e coprodutos, além dos consumos de energia e outros insumos industriais.

A RenovaCalc estima as emissões de GEE dos processos agrícola e industrial que, combinadas às emissões de *background* (advindas do banco de dados Ecoinvent), resultam na intensidade de carbono (IC) do ciclo de vida do biocombustível, expressa em g CO₂eq/MJ. A IC do biocombustível, subtraída da IC de seu combustível fóssil equivalente (por exemplo, gasolina, no caso de etanol; ou diesel, no caso de biodiesel), resulta na Nota de Eficiência Energético-Ambiental (Neea), indicador que representa a mitigação das emissões de GEE pela introdução do biocombustível na matriz de transporte em substituição ao combustível fóssil.

Com base na Neea, são calculados os Créditos de Descarbonização (CBios), ativos ambientais negociados em bolsa de valores. Cada CBio corresponde a uma tonelada de CO₂eq evitada. Com a

“aposentadoria” dos CBios, efetiva-se a mitigação de emissões de GEE prevista nas metas anuais da RenovaBio. Entre 2020 e fevereiro de 2025, o programa já havia promovido a mitigação de mais de 160 milhões de toneladas de CO₂eq.

Calculadora da pegada de carbono da pecuária – esforços para o aumento da eficiência e mitigação de emissões da pecuária bovina brasileira

O esforço da Embrapa para contribuir com o aumento da eficiência de produção e a mitigação das emissões de GEE resultou no desenvolvimento da Calculadora de Pecuária de Baixo Carbono (CPBC). A CPBC é uma ferramenta para o cálculo da pegada de carbono de um quilograma de carne ou de leite produzido, expressa em kg de CO₂eq/kg de produto. A ferramenta calcula as emissões de metano entérico provenientes da digestão dos animais e do metano gerado pelo manejo de dejetos de empreendimentos rurais de pequeno, médio e grande porte. Essa calculadora considera as pegadas de carbono dos alimentos utilizados ou produzidos na propriedade e destinados à alimentação animal, estando alinhada à plataforma da Embrapa para geração de inventários agrícolas em estudos de avaliação de ciclo de vida (ICVCalc). A CPBC também estima as emissões e remoções de carbono resultantes da mudança de uso da terra, assim como as remoções potenciais em propriedades que adotam sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) ou integração pecuária-floresta (IPF), que incluem árvores nas quais o carbono é majoritariamente estocado. Os modelos matemáticos são baseados no Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (Ogle et al., 2019), nas diretrizes da Leap/FAO (*Livestock Environmental Assessment and Performance Partnership/Food and Agriculture Organization of the United Nations*) (FAO, 2015) e nas normas ISO 14040, 14044 (International

Organization for Standardization 2006a, 2006b) e ISO 14067 (International Organization for Standardization, 2018).

A produção de carne e leite de baixo carbono parte da premissa de que a redução das emissões é um desafio, pois depende do nível de adoção tecnológica de cada propriedade rural e da maturidade do sistema de produção. No Brasil, a ampla diversidade de condições de clima e solo possibilita diferentes combinações tecnológicas, resultando em fortes contrastes entre sistemas de produção. Assim, não há um caminho único de ajustes para todos os sistemas e ambientes. Considerando as diferentes estratégias possíveis de mitigação e remoção de GEE, diversas tecnologias podem ser adotadas, promovendo reduções diretas ou indiretas de emissões. Mesmo nesse contexto de complexidade de sistemas e trajetórias possíveis, a CPBC permite que produtores e indústrias processadoras gerenciem o desempenho técnico e ambiental dos produtos.

A partir do preenchimento das informações de entrada, a ferramenta retorna ao usuário os resultados das emissões líquidas por quilograma de produto, assim como indica as principais fontes de emissão. Todo o processo de cálculo e de geração de resultados está incorporado a uma plataforma que faz a gestão dos indicadores de cada propriedade. A plataforma pode também ser usada para o gerenciamento do desempenho de fornecedores ao longo do tempo, ou para simular tecnologias que possam melhorar o desempenho de cada sistema de produção. Para a indústria, trata-se de um sistema digital que agrega dados de seus fornecedores e técnicos e de sistemas de produção de forma segura e rápida. É possível desenvolver arranjos comerciais por meio de colaborações entre empresas de uma cadeia produtiva, interessadas no fomento à introdução de práticas sustentáveis nas propriedades pecuárias, com foco na pecuária de baixa emissão de carbono, com um diferencial mercadológico. É possível desenvolver novos modelos de negócios, incluindo

ações de capacitação e de monitoramento do desempenho de propriedades rurais em todo o Brasil. Outra oportunidade é a adesão de produtores e indústrias de processamento primário (laticínios e frigoríficos) aos protocolos de baixo carbono da Embrapa, apoiados por calculadoras e esquemas de certificação.

A Embrapa desenvolve, desde 2012, estudos voltados para protocolos de produção bovina com foco em eficiência e mitigação de emissões de GEE. Inicialmente, os esforços concentraram-se nos sistemas de produção ou ações “dentro da porteira”, com base nas boas práticas agropecuárias e processos tecnológicos elencados pelo Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC) do governo federal, Plano Nacional de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (para o período de 2010 a 2020) (Brasil, 2012), e pelo Plano de Adaptação e Baixa Emissão de Carbono na Agricultura - ABC+ (Plano ABC+) (para o período de 2021 a 2030) (Brasil, 2021).

Nesse sentido, protocolos de produtos como carne baixo carbono (Almeida; Alves, 2020), couro baixo carbono (Jacintho et al., 2024), bezerro baixo carbono e leite baixo carbono (em desenvolvimento) foram propostos, envolvendo rastreabilidade e certificação de terceira parte (com verificação do tipo MRV), além de requisitos obrigatórios, como a proibição do uso do fogo e do desmatamento, a partir do Pacto Setorial da Pecuária (Fórum Amazônia Sustentável, 2008).

Na CPBC, estão em desenvolvimento ações integradas para estruturar um banco de dados tropicalizado de emissões de insumos agropecuários, assim como planilhas para levantamento de dados da indústria de carne e couro, com a finalidade de expressar a pegada de carbono por produto pecuário, em alinhamento às demandas globais por uma agropecuária mais eficiente e sustentável.

Reduzindo a pegada de carbono do melão amarelo

Os estudos sobre a pegada de carbono do melão amarelo foram conduzidos entre 2011 e 2014 nas duas principais regiões produtoras do Brasil: Bai-xo Jaguaribe-Apodi, na divisa do Ceará com o Rio Grande do Norte, responsável por 97% da produ-ção destinada à exportação em 2024 (Brasil, 2024), e o Submédio São Francisco, na divisa entre Per-nambuco e Bahia, com produção voltada princi-palmente ao mercado interno. A pegada de car-bono do melão produzido no Ceará e Rio Grande do Norte foi avaliada por quilo de fruto exportado, com base no potencial de aquecimento global (GWP, da sigla em inglês) do IPCC (2006), conside-rando o horizonte de 100 anos. Foram compara-dos: a) o sistema de monocultivo comercial, ado-tado pelas fazendas da região (Figueirêdo et al., 2013) e b) o sistema de rotação com gramíneas e leguminosas, em área experimental (Barros et al., 2019). Já no Submédio São Francisco, a pegada foi estimada tanto para o monocultivo com-ercial quanto para a rotação com coquetéis vege-tais em áreas experimentais, sendo os resultados expressos por quilograma de melão transportado até a Companhia de Entrepósitos e Armazéns Ge-rais de São Paulo (Ceagesp). Nesse caso, foi adota-do o GWP do IPCC (2013), que revisou o valor do

metano de 25 para 36 (Santos et al., 2018). Esses estudos consideraram todas as etapas da cadeia: mudança de uso da terra, produção e transporte de insumos, produção de sementes e mudas, cul-tivo do melão, além da pós-colheita, embalagem e transporte para diferentes destinos.

Os resultados desses estudos em dois locais di-ferentes (Figura 6.5) mostraram que a pegada de carbono média do melão oriundo do sistema de monocultivo, considerando a produção em áreas ocupadas com vegetação de Caatinga há menos de 20 anos, foi maior que a do sistema de rotação com adubos verdes (áreas experimentais), entre 0,71 e 0,75 kg CO₂eq/kg de melão para o primeiro, e entre 0,52 e 0,58 kg CO₂eq/kg de melão para o segundo. Usou-se a rotação com milho e braquiá-ria e a rotação com coquetel vegetal (25% de legu-minosas e 75% de não leguminosas, com biomassa incorporada ao solo), respectivamente. Observou-se que as pegadas nos sistemas com rotação po-deriam ser reduzidas ainda mais se o nitrogênio dos adubos verdes substituísse, mesmo que par-cialmente, o uso de fertilizantes sintéticos nitroge-nados (Santos et al., 2018; Barros et al., 2019). Além disso, o envio do melão para o porto de Nova York, em vez do porto de Rotterdam, reduziu a pegada do melão exportado em 2% (Barros et al, 2017).

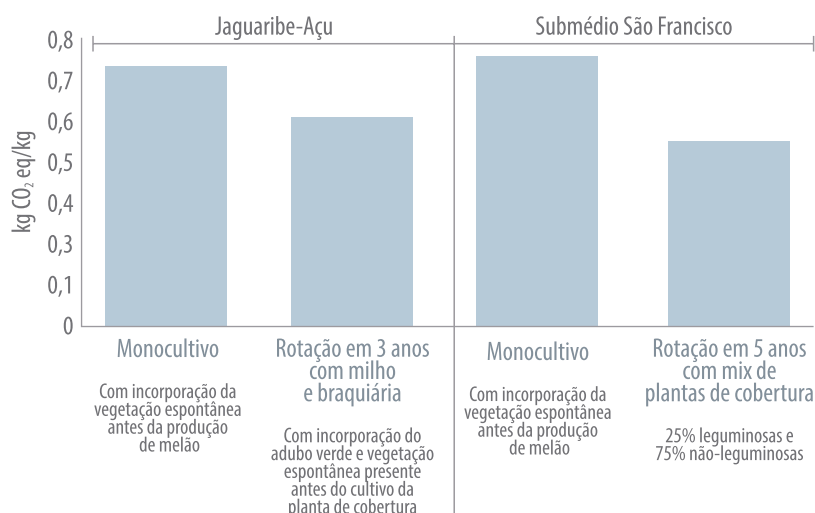


Figura 6.5. Pegada de carbono do melão em sistema de monocultivo e rotação com adubos verdes.

Fonte: Adaptado de Figueirêdo et al. (2013), Barros et al. (2017) e Santos et al. (2018).

Analisando os processos relacionados às pegadas de carbono do melão em monocultivo, observou-se que a produção de insumos utilizados no campo e a produção de melão, propriamente dita, foram os processos que mais contribuíram para essa pegada na região Jaguaribe-Apodi (Figura 6.6). As emissões de GEE na produção de fertilizantes nitrogenados e de plásticos (*mulching* e bandejas plásticas) foram as mais importantes na contabilização das emissões da produção dos insumos. Já as emissões oriundas da mudança do uso da terra, quando a área com vegetação de Caatinga foi convertida em área agrícola, foram as principais responsáveis pelo total das emissões geradas no campo (Figueirêdo et al., 2013).

Como solução inovadora para reduzir essa pegada, propuseram-se cenários de ajustes para o monocultivo comercial no Jaguaribe-Apodi: a) uso de fertilizantes conforme as recomendações da literatura científica; b) redução no uso de plásticos, visto que algumas fazendas não utilizavam bandejas; e c) instalação do pomar em áreas já ocupadas com produção agrícola há mais de 20 anos, realidade observada em algumas fazendas (Figura 6.6). A avaliação da pegada desses cenários mostrou que as fazendas da região Jaguaribe-Apodi utilizavam 33% mais nitrogênio do que o recomendado para a cultura, sendo possível sua redução, o que levaria a uma pegada 6% menor (Cenário 1). A instalação da produção em área já desmatada há mais de 20 anos reduziria a pega-

da do monocultivo em 24% (Cenário 2). A eliminação do uso de bandejas plásticas empregadas para evitar o contato do melão com o *mulching* no campo reduziria em 13% a pegada (Cenário 3). A combinação desses cenários resultaria em uma redução de 44% na pegada do melão em monocultivo (Figueirêdo et al., 2013).

Segundo Santos et al. (2018), os principais processos que contribuíram para a pegada de carbono do melão em rotação com coquetel vegetal, na região do Submédio São Francisco, foram:

- O transporte rodoviário dos melões para São Paulo (com 58% da pegada).
- A instalação do cultivo em área desmatada há menos de 20 anos (20%).
- O uso de embalagens de papelão no transporte do melão (20%).
- A produção e aplicação, no campo, de fertilizantes nitrogenados sintéticos (18%).

A solução de inovação, nesse caso, consistiu em substituir o transporte exclusivamente rodoviário pela combinação de transporte rodoviário e marítimo até São Paulo, instalar o cultivo em área livre de desmatamento há mais de 20 anos e utilizar apenas adubo verde na fertilização nitrogenada (a quantidade de nitrogênio ofertada pelo adubo era superior à necessidade da cultura), reduzindo os impactos em 30%.

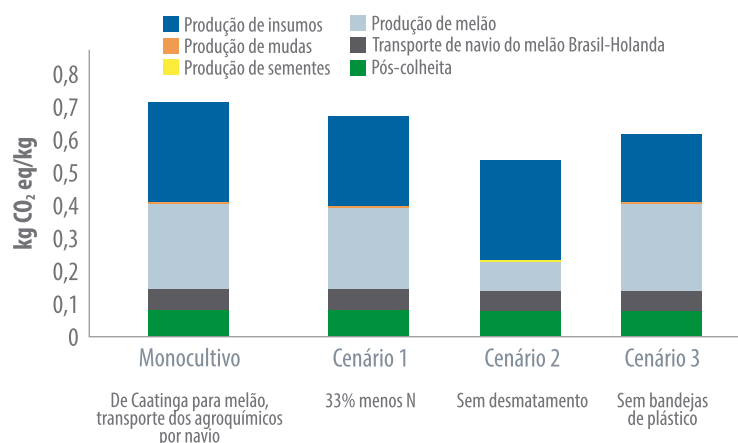


Figura 6.6. Análise de cenários que contribuem na redução da pegada de carbono do melão no monocultivo Jaguaribe-Açu.

Fonte: Adaptada de Figueirêdo et al. (2013).

Reduzindo a pegada hídrica do melão amarelo

Para reduzir a pegada hídrica do melão nordestino, a chave é o aumento da eficiência no uso da água na irrigação e a produção em épocas de menor escassez hídrica. Essa é uma das conclusões do estudo de ACV e do cálculo da pegada de escassez hídrica na produção do melão amarelo nas duas principais regiões produtoras do País, ambas no Nordeste.

A pegada de escassez hídrica de uma cultura considera os vários processos associados ao seu ciclo de vida e é calculada pela multiplicação de dois fatores: o consumo de água da cultura por quilograma de produto e o índice de escassez de uma região, que indica sua vulnerabilidade à redução na disponibilidade hídrica (Figueirêdo et al., 2014; Santos et al. 2018). Para esse cálculo, no estudo do melão, considerou-se o consumo médio de água por processo (por exemplo, produção de fertilizantes e produção agrícola) e os índices de escassez das principais regiões onde os processos ocorrem, ponderando o consumo e o índice pela contribuição de cada região.

No que se refere ao consumo de água para irrigação do melão, foram comparados o volume de água e a produção por ciclo, informados pelos produtores rurais, com a necessidade hídrica bruta da cultura, calculada a partir da evapotranspiração de referência nos meses de cultivo (em ciclo de 70 dias), da precipitação efetiva na região produtora, do coeficiente de cultivo (FAO, 1997) e da eficiência do sistema de irrigação (gotejamento).

Com relação ao índice de escassez, empregou-se o Índice de Estresse Hídrico (*Water Stress Index* – WSI), que normaliza o valor da pegada de uma cultura em relação a um valor de referência global (Figueirêdo et al., 2014). O índice de escassez utilizado nessa avaliação é medido em L H₂Oeq/kg de produto e foi calculado por Ridoutt e Pfister (2010). Já no estudo na região do Submédio São Francisco, avaliou-se apenas o consumo hídrico

no ciclo de vida do melão (Santos et al., 2018), sem calcular a pegada de escassez.

Com relação ao volume de água consumido para irrigação do melão, observou-se que foi superior à necessidade hídrica da cultura em ambas as regiões, do Jaguaribe-Apodi e Submédio São Francisco. Nas fazendas em Jaguaribe-Apodi, o volume médio informado de água na irrigação variou de 186 a 202 L/kg de melão, de acordo com o período de produção, que vai de julho a fevereiro, com menor consumo de água de julho a setembro. Observou-se, na comparação entre o volume aplicado e o necessário para a cultura, que em cultivos de melão ocorrendo de setembro a novembro, aplicava-se 39% a mais de água do que o necessário, enquanto entre dezembro e fevereiro (período de menor exigência de irrigação), aplicava-se 160% a mais de água (Figueirêdo et al., 2014). Também na região do Submédio São Francisco, a comparação entre o volume de água aplicado na estação de cultivo (julho a dezembro) – 9.000 m³/ha em qualquer mês – e a necessidade da cultura (em média 2.700 m³/ha) mostrou o uso excessivo desse escasso recurso no Semiárido nordestino (Santos et al., 2018).

O uso excessivo de água resultou em menor produtividade na região Jaguaribe-Apodi (Figueirêdo et al., 2014). A maior produtividade (40 t/ha) foi alcançada quando o menor volume de irrigação foi utilizado (89 L/kg), enquanto a menor produtividade (14 t/ha) ocorreu quando o maior volume de irrigação foi aplicado (446 L/kg).

A pegada média de escassez hídrica do melão foi de 135,40 L H₂Oeq/kg de melão exportado e produzido na região Jaguaribe-Apodi (Figueirêdo et al., 2014). O consumo total de água no ciclo de vida do melão dessa região foi de 197,90 L/kg, sendo 98,6% oriundos da irrigação do melão. O maior índice médio de escassez esteve associado à produção de fertilizantes, considerando que, em 2010, as principais regiões produtoras eram: Chile (63% da produção), Portugal (15%), Israel (10%) e outros países (12%). Entretanto, o consumo de

água na produção de fertilizantes representou apenas 0,5% do consumo total de água no ciclo de vida do melão. Assim, para reduzir essa pegada, a chave é o aumento da eficiência no uso da água na irrigação e a intensificação da produção em meses de menor escassez.

Reduzindo as pegadas de carbono e hídrica na produção de manga

A ACV e o cálculo das pegadas de carbono e hídrica também colaboram para a solução dos problemas relacionados às emissões de carbono e à escassez hídrica na produção da manga. As avaliações das pegadas da manga ocorreram na região do Submédio São Francisco, responsável por 92% da exportação de manga do Brasil em 2024 (Brasil, 2024). As análises foram realizadas por quilograma de manga, considerando a produção e o transporte de insumos, a mudança de uso da terra, a produção de mudas e de manga em área experimental (Dias et al., 2020), bem como tratamentos pós-colheita e embalagem em áreas comerciais de monocultivo (Müller Carneiro et al., 2019).

A pegada de carbono no sistema de monocultivo comercial foi avaliada considerando o GWP dos GEE do IPCC (2007) para 100 anos. Já a pegada da manga em área experimental, utilizando ou não coquetéis vegetais, foi avaliada considerando o GWP do IPCC (2013). Em ambos os estudos, considerou-se que os pomares de manga foram instalados em áreas anteriormente ocupadas por vegetação de Caatinga. A pegada de escassez hídrica foi avaliada pelo método *Aware (Available Water REmaining)* (Boulay et al., 2018), utilizando índices em nível de país.

Com relação à pegada de carbono (0,13 kg CO₂eq/kg de manga), observou-se que, no sistema comercial, o principal fator foi a emissão de GEE decorrente da produção e aplicação de fertilizantes nitrogenados nos pomares (Müller Carneiro et al., 2019). Embora a biomassa da mangueira tenha sequestrado mais carbono do que a vege-

tação de Caatinga, esse estoque não compensou as perdas de carbono no solo no sistema de monocultivo nem as emissões de GEE oriundas da produção em campo e do restante da cadeia. Entretanto, na produção de manga com adubação verde (área experimental), observou-se uma pegada de carbono negativa (-0,82 kg CO₂eq/kg de manga), 16% menor que a pegada observada nas parcelas em monocultivo (Dias et al., 2020).

A menor pegada de carbono no sistema com adubação verde deveu-se ao maior sequestro de carbono na biomassa e solo (6.964 kg CO₂/ha, em oito anos), proporcionado pelos coquetéis vegetais (75% de leguminosas e 25% de não leguminosas) mantidos como cobertura e incorporados anualmente ao solo entre as linhas de mangueiras. Nas parcelas sem adubação verde, o estoque de carbono foi de 4.590 kg CO₂/ha, em oito anos.

Além disso, no cenário em que o pomar foi instalado em área previamente ocupada com melão, a pegada de carbono da manga foi reduzida em 78%, em relação à situação em que houve remoção da vegetação de Caatinga (Dias et al., 2020).

Com relação à pegada de escassez hídrica (0,9 m³ eq/kg de manga embalada), no sistema comercial, 78% desse impacto é decorrente do consumo de água na irrigação (Müller Carneiro et al., 2019) e o restante, da higienização da fruta na pós-colheita e da embalagem. O consumo médio de água informado convergiu com a necessidade hídrica bruta da cultura, embora os valores para os estágios de implantação, crescimento e plena produção tenham divergido.

A pegada de escassez da manga na área experimental com adubação verde, de 2,82 m³ eq/kg de manga (Dias et al., 2020), foi maior que a observada no monocultivo comercial, que também considerou a pós-colheita (0,9 m³ eq/kg de manga embalada) (Müller Carneiro et al., 2019). Isso se deveu, principalmente, à menor produção de manga por hectare na área experimental (6.379 kg/ha, com menos mangueiras para comportar a área com

adubação verde), em relação às áreas comerciais, cuja média foi de 34.700 kg/ha.

Reduzindo as pegadas de carbono e de escassez hídrica do coco verde

O cálculo das pegadas de carbono e hídrica orienta a redução desses impactos recomendando a instalação de pomares em áreas já ocupadas com agricultura e a adoção de maior eficiência no uso da água de irrigação e de fertilizantes nitrogenados.

O estudo de Sampaio et al. (2021) sobre as pegadas de carbono e escassez hídrica de um quilograma de coco verde abrangeu a produção comercial em seis fazendas em sistema de monocultivo, localizadas nos estados do Ceará, Alagoas, Sergipe e Bahia. Esses estados responderam por 59% da produção nacional em 2023 (Associação Brasileira dos Produtores e Exportadores de Frutas e Derivados, 2025) e por 57% do valor das exportações de coco em 2024 (Brasil, 2024). Esse estudo considerou os processos de mudança de uso da terra, a produção e o transporte de insumos e a produção de coco, sendo que uma das fazendas no Ceará adotava sistema orgânico, enquanto as demais utilizavam sistema tradicional com diferentes agroquímicos. O cálculo da pegada de carbono baseou-se no GWP do IPCC (2007), enquanto a pegada de escassez hídrica foi estimada pelo método Aware (Boulay et al., 2018).

A pegada de carbono do coco variou de 0,12 (na fazenda em Alagoas) a 0,36 kg CO₂eq/kg de coco (em uma das quatro fazendas do Ceará com sistema tradicional), nos casos em que o pomar foi instalado em área com vegetação nativa da Caatinga. Essas fazendas apresentaram grandes diferenças na produtividade (60 t/ha em Alagoas e 19 t/ha no Ceará), nas emissões de GEE oriundas da mudança de uso da terra (maiores na fisionomia de Caatinga das regiões do Ceará e da Bahia) e nas quantidades aplicadas de fertilizantes (mais elevadas na fazenda do Ceará).

Em todas as fazendas, as emissões de GEE foram provenientes principalmente da mudança de uso da terra e do uso de fertilizantes nitrogenados. Se os pomares estivessem localizados em áreas anteriormente ocupadas com culturas anuais, haveria redução de 37 a 61% na pegada de carbono, de acordo com a região da fazenda. Com relação ao uso de fertilizantes, em todas as fazendas foram observadas discrepâncias entre as quantidades aplicadas de nitrogênio, fósforo e potássio e aquelas indicadas por Fontes e Ferreira (2006). Exemplificando, o uso de fertilizantes conforme essa recomendação, nas fazendas do Ceará, reduziria a pegada em pelo menos 51%, de acordo com a fazenda.

Com relação à pegada de escassez hídrica do coco verde, observou-se que ela variou de 0,3 a 0,7 m³ eq/kg, em fazendas no Ceará. Também nesse caso, o consumo de água para irrigação dos coqueiros foi o maior responsável, representando entre 68 e 92% da pegada, de acordo com a fazenda. Em cinco fazendas, o volume de água aplicado por planta foi superior ao necessário (entre 12 e 131%, a depender da fazenda), enquanto em duas foi inferior, impactando diretamente no menor tamanho de fruto e na produção de água de coco.

Além disso, verificou-se que a localização das fazendas em diferentes bacias hidrográficas em cada estado, com produção importante de coco, influenciou os valores da pegada de escassez hídrica do coco, em função das diferenças nos índices de escassez. Considerando o índice anual de escassez das bacias hidrográficas (Boulay et al., 2018), os resultados foram os seguintes: em Sergipe, a menor pegada ocorreu na bacia estadual de Sergipe (0,28 m³ eq/kg) e a maior em Vaza Barris (0,62 m³ eq/kg); no Ceará, o maior valor foi registrado na bacia metropolitana (0,76 m³ eq/kg) e o menor no Curu (0,33 m³ eq/kg); na Bahia, a maior pegada ocorreu na bacia Recôncavo Sul (0,67 m³ eq/kg) e a menor em Itapicuru (0,19 m³ eq/kg); e, em Alagoas, as bacias São Miguel, Coruripe e Piauí obtiveram a maior pegada (0,42 m³ eq/kg), enquanto Camaragibe registrou a menor (0,22 m³ eq/kg).

Avaliação de ciclo de vida do trigo – *Global Warming Potential*

A cadeia de produção do trigo e dos seus produtos derivados integra outras cadeias de produção de alimentos que causam emissões de GEE, ao mesmo tempo em que é influenciada pelas mudanças climáticas globais. Os estudos sobre os impactos ambientais do trigo cultivado em ambientes subtropicais e tropicais ainda são escassos, configurando uma lacuna de conhecimento a ser preenchida. Das diferentes iniciativas para promover o crescimento da produção brasileira de trigo, o País tem contribuído para o avanço do conhecimento científico e para a promoção da sustentabilidade da cadeia tritícola (Figura 6.7). Os esforços estão sendo concentrados para identificar os impactos ambientais do sistema brasileiro de cultivo e produção de farinha de trigo, bem como em propor estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

Nesse contexto, foi realizado o primeiro de uma sequência de estudos sobre a ACV do trigo e da farinha de trigo produzidos nas regiões homogêneas de adaptação de cultivares de trigo no Brasil. O foco inicial foi a categoria de impacto GWP ou

pegada de carbono, mas também estão sendo observadas outras, como ecotoxicidade, eutrofização, toxicidade humana, acidificação terrestre e consumo de água. Com base em dados primários de 61 fazendas, uma unidade de processamento e beneficiamento de grão e um moinho, localizados em uma das principais regiões produtoras de trigo do Brasil, Giongo et al. (2025) reportaram os impactos ambientais do trigo e da farinha de trigo considerando quatro processos: cultivo do trigo, transporte, processamento dos grãos e moagem para a produção de farinha. O ciclo de vida da produção de trigo, ou seja, do berço ao portão da propriedade, respondeu por 67 a 98% do potencial impacto nas categorias avaliadas para a produção de farinha.

Em relação à categoria de impacto GWP, a etapa de cultivo de trigo brasileiro emitiu, nas fazendas pequenas e grandes, em média 0,50 kg CO₂eq/kg de trigo (Giongo et al., 2025). O valor ainda é alto quando comparado ao trigo produzido na Alemanha (Riedesel et al., 2022) e na Austrália (Simmons et al., 2019), porém já está abaixo da média mundial (Feng et al., 2023) e é competitivo em relação a países europeus como a Itália (Verdi et al., 2022) (Figura 6.8).

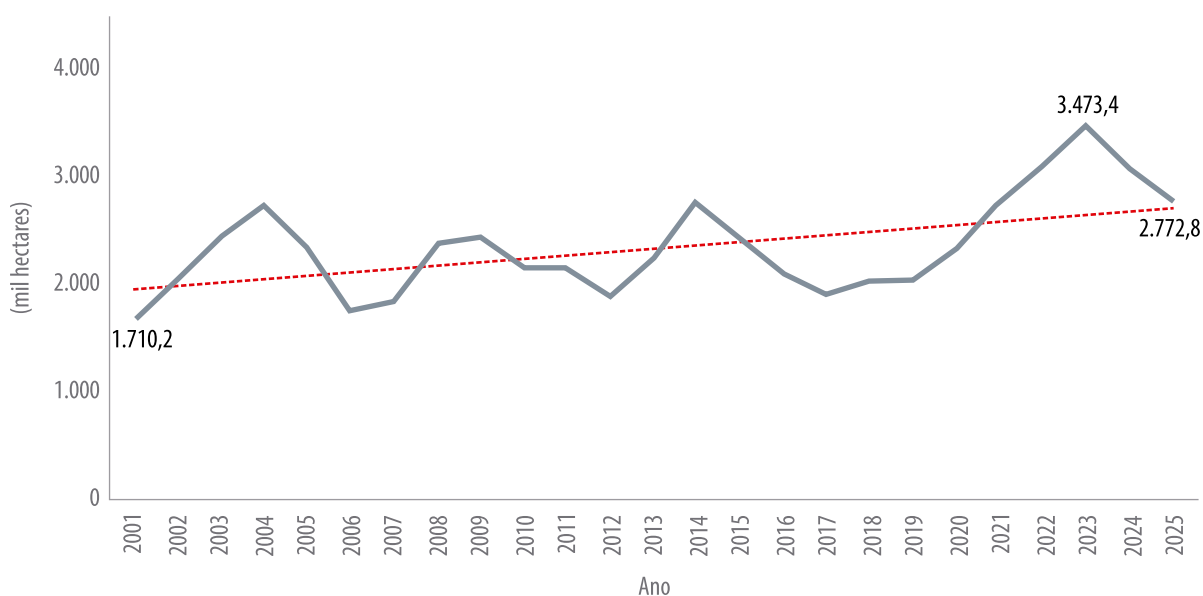


Figura 6.7. Área de trigo no Brasil (em mil hectares).

Fonte: Conab (2025b).

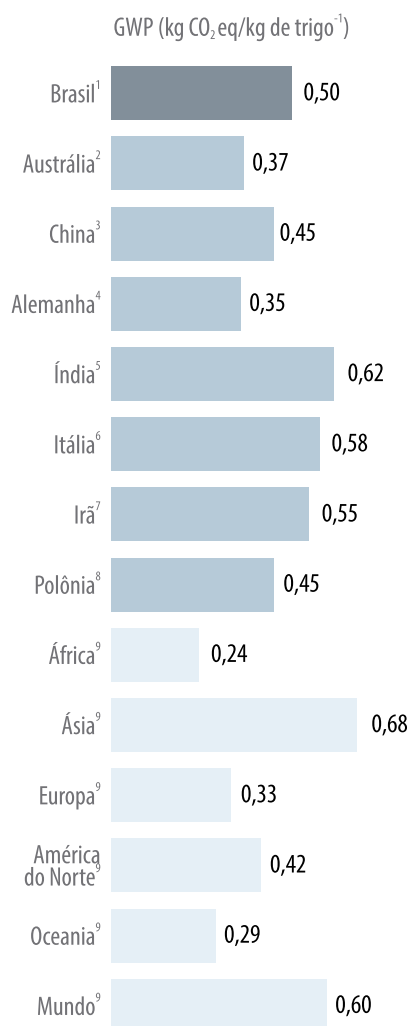


Figura 6.8. Comparação da pegada de carbono da produção de 1 kg de trigo em diferentes países do mundo.

Fonte: ¹Giongo et al. (2025), ²Simmons et al. (2019), ³Shao et al. (2024), ⁴Riedesel et al. (2022), ⁵Nayak et al. (2023), ⁶Verdi et al. (2022), ⁷Tahmasebi et al. (2018), ⁸Pishgar-Komleh et al. (2020) e ⁹Feng et al. (2023).

Por meio da análise de cenários, observou-se, ademais, que há oportunidades de reduzir a pegada de carbono na etapa de cultivo do trigo pela substituição de fontes de adubos nitrogenados (cenário 1) e pela utilização de cultivares mais produtivas (cenário 2), em até, aproximadamente, 36% (Giongo et al., 2025). No cenário 1, as fazendas grandes e pequenas que aplicavam 155 e 148 kg/ha de ureia, respectivamente, substituíram esse insumo por 265 e 253 kg/ha de CAN (*Calcium ammonium nitrate*) produzido na Europa. Essa

substituição gera menores impactos tanto pela produção dos fertilizantes quanto pelas emissões no campo. Entre outras tecnologias com potencial de mitigar a emissão de óxido nitroso e aumentar a eficiência de absorção de nitrogênio pelas plantas, destacam-se: a utilização de fontes nitrogenadas de liberação lenta, amônia verde (Galusnyak et al., 2023) e cultivares de trigo com capacidade de inibição biológica da nitrificação (BNi – *wheat*) (Wang et al., 2021; Lu et al., 2024).

Outra estratégia que pode ser tanto de mitigação quanto de adaptação às mudanças climáticas, com potencial de redução da pegada de carbono do trigo na etapa de cultivo, é o desafio emergente do melhoramento genético em aumentar a eficiência produtiva diante dos cenários climáticos previstos para as regiões Sul e Norte globais. No estudo brasileiro (Giongo et al., 2025), por meio do cenário 2 e com base em nove anos de avaliação de genótipos de trigo (Castro et al., 2023), as fazendas substituíram as cultivares que produziram, em média, 4.039 kg/ha e 3.569 kg/ha, nas fazendas grandes e pequenas, respectivamente, por uma cultivar cuja produtividade média é de 5.876 kg/ha. Os ganhos de produtividade atuais, no entanto, podem ser insuficientes para atender à demanda futura por trigo, o que exige esforços conjuntos para diversificar, aprimorar e intensificar o melhoramento genético (Cavalet-Giora et al., 2024), as práticas culturais e o manejo e a conservação do solo e da água, para aumentar a produtividade e assegurar a sustentabilidade. Com isso, entender os mecanismos genéticos que promovem sucesso adaptativo é fundamental para uma produção de trigo rentável e estável no futuro (Zhou et al., 2020), especialmente à medida que o clima se torna mais instável (Xiong et al., 2024). Embora a adaptação das variedades de trigo às condições climáticas futuras seja crucial, a compreensão completa desse processo permanece limitada (Han et al., 2025), e os avanços precisam ser incorporados aos cenários preditivos de impactos ambientais, como os utilizados na ACV.

A pegada de carbono da farinha brasileira variou entre 0,67 e 0,80 kg CO₂eq/kg de farinha, proveniente de trigo cultivado em fazendas grandes e pequenas, respectivamente (Giongo et al., 2025). Esses valores estão abaixo dos reportados para a farinha de trigo produzida na Espanha (0,89 kg CO₂eq/kg de farinha) (Câmara Salim et al., 2020) e na Itália (0,95 kg CO₂eq/kg de farinha) (Kulak et al., 2015). Os fertilizantes nitrogenados e fosfatados foram as fontes de emissão que mais impactaram a etapa de cultivo, cujos cenários consideraram a substituição de ureia por CAN (cenário 1) e o uso cultivares mais eficientes no aproveitamento de insumos e mais produtivas (cenário 2). As etapas de transporte, processamento de grãos e moagem de trigo para produção de farinha tiveram menores contribuições para a pegada de carbono. Porém, verificou-se que a substituição de energia hidroelétrica por energia fotovoltaica nas etapas de processamento de grãos (cenário 3) e de moagem de trigo (cenário 4) constitui oportunidades de aprimoramento para a redução da pegada da farinha de trigo produzida no Brasil. Após aplicados os quatro cenários, foi possível reduzir a pegada de carbono da farinha de trigo brasileira para 0,48 e 0,52 kg CO₂eq/kg de farinha, utilizando trigos provenientes de fazendas grandes e pequenas, respectivamente, demonstrando valores médios bastante competitivos em relação a outras regiões do mundo (Figura 6.9). Esses resultados estão próximos dos níveis mais baixos reportados na França e em Portugal, ambos com valor de 0,50 kg CO₂eq/kg de farinha (Kulak et al., 2015).

Os estudos realizados verificaram que as pegadas de carbono da farinha variaram entre 0,48 e 1,66 kg CO₂eq/kg de farinha (Kulak et al., 2015; Câmara Salim et al., 2020; Pourmehdi; Kheiralipour, 2020; Giongo et al., 2025). Essa variação é esperada em razão das diferentes condições edafoclimáticas e práticas de manejo, que variam em escala regional (Câmara Salim et al., 2020) e representam oportunidades para o aprimoramento.

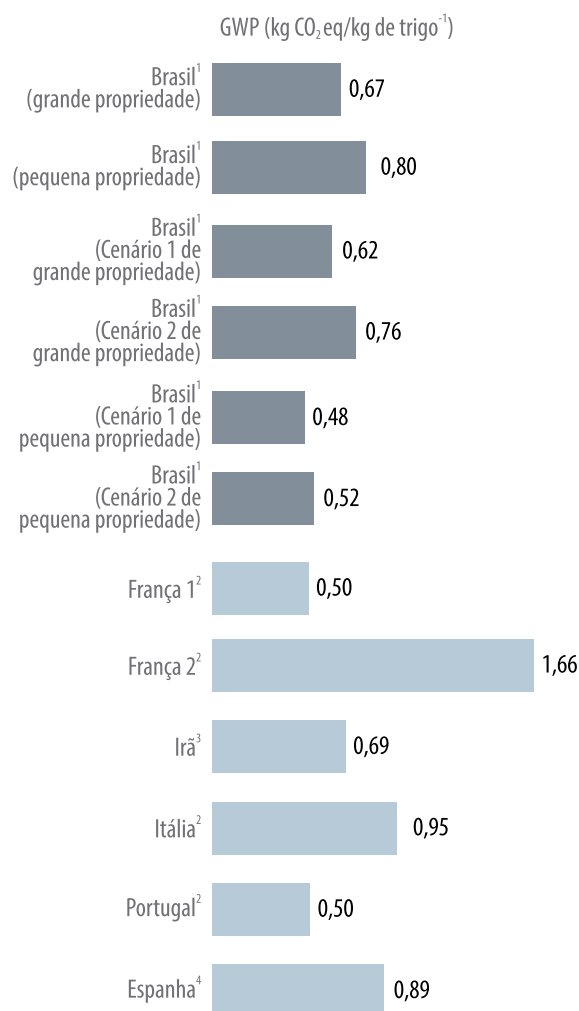


Figura 6.9. Comparação da pegada de carbono para a produção de 1 kg de farinha de trigo brasileira e em outros países.

Fonte: ¹Giongo et al. (2025), ²Kulak et al. (2015), ³Câmara Salim et al. (2020) e ⁴Pourmehdi e Kheiralipour (2020).

Avaliação de ciclo de vida do trigo – outras categorias de impacto ambiental

O GWP, expresso em CO₂ equivalente, é a categoria mais utilizada para avaliar o impacto ambiental dos sistemas agrícolas sobre o clima e também a mais utilizada para discutir políticas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Porém, é importante destacar que outras categorias de impacto ambiental são igualmente

te relevantes para uma análise multifatorial da sustentabilidade das cadeias agrícolas de produção de alimentos. No caso da cadeia de produção do trigo brasileiro, o estudo de ACV contempla outras categorias de impacto, como os potenciais de consumo de água, acidificação terrestre, eutrofização²¹ em água doce, eutrofização marinha, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade em água doce, ecotoxicidade marinha, toxicidade humana: câncer; e, toxicidade humana: não câncer, utilizando os métodos Aware e ReCiPe (Giongo et al., 2025). Destaca-se, por exemplo, o desempenho positivo da produção de farinha de trigo brasileira em relação à eutrofização de água doce e à eutrofização marinha. Essas duas categorias de impacto possuem relação direta com a quantidade de fertilizantes utilizados e seu potencial de lixiviação nas áreas agrícolas. O potencial²² de eutrofização marinha por lixiviação de compostos nitrogenados na produção de farinha de trigo no Brasil é de 500 a 1.500 vezes menor do que na produção em países como França, Itália e Portugal (Kulak et al., 2015; Giongo et al., 2025). A substituição de ureia por CAN pode reduzir ainda mais o potencial de impacto nessa categoria (Figura 6.10).

Outro exemplo do bom desempenho ambiental da farinha de trigo brasileira, quando cultivada em sequeiro, pode ser demonstrado pelos valores baixos dos potenciais de ecotoxicidade de água doce e de toxicidade humana, quando comparados aos observados em países como França e Itália. Por fim, nessa mesma análise comparativa, identificaram-se oportunidades de melhoria em relação aos potenciais de acidificação terrestre e de ecotoxicidade terrestre, que apresentaram valores superiores aos registrados em países europeus (Kulak et al., 2015; Giongo et al., 2025).

²¹ Eutrofização é um processo de enriquecimento excessivo de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, em corpos d'água (como lagos, represas, rios e reservatórios), que leva ao crescimento acelerado de algas e plantas aquáticas.

²² O uso do termo "potencial" é uma convenção, porque, na ACV, não se tratam impactos efetivos, mas sim o potencial de um dado produto ou serviço gerar impactos.

A análise integrada e sistêmica do GWP com outras categorias de impacto é essencial para desenvolver modelos de produção de trigo sustentáveis adequados para cada uma das regiões homogêneas de adaptação de cultivares de trigo no Brasil. Essa abordagem fortalece o desenho de programas, como o Programa Trigo Baixo Carbono, que busca promover a sustentabilidade da produção de trigo por meio de boas práticas agrícolas e de tecnologias que reduzem a intensidade líquida das emissões de GEE, elevam a eficiência produtiva, econômica e ambiental, e aumentam a resiliência adaptativa dos sistemas de cultivo.

Perspectivas futuras

A emergência climática e a necessidade de avançar no desenvolvimento sustentável, traduzidas nos compromissos assumidos no Acordo de Paris, requerem mudanças significativas nos sistemas agroalimentares. Novos padrões tecnológicos deverão ter como base sistemas de produção limpos, com balanço positivo de carbono, uso eficiente da água e fertilizantes na produção, e investimentos na conservação e uso sustentável da biodiversidade. O crescimento da agricultura deverá se pautar no equilíbrio entre desempenho produtivo e ambiental. O aumento da eficiência poderá garantir maior produção agropecuária, dispensando a abertura de novas áreas.

O caminho para uma agropecuária sustentável é pavimentado pelo arcabouço de políticas públicas brasileiras, incluindo o Plano ABC, a RenovaBio, o Programa Nacional de Solos do Brasil (PronaSolos), o Programa Nacional de Bioinsumos, o Zarc, a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais, a ratificação do Acordo de Negociação sobre Biodiversidade, a Lei de Proteção da Vegetação Nativa (também conhecida como Código Florestal), a Política Nacional de Recursos Hídricos, e os programas nacionais de prevenção e controle do desmatamento nos diferentes biomas.

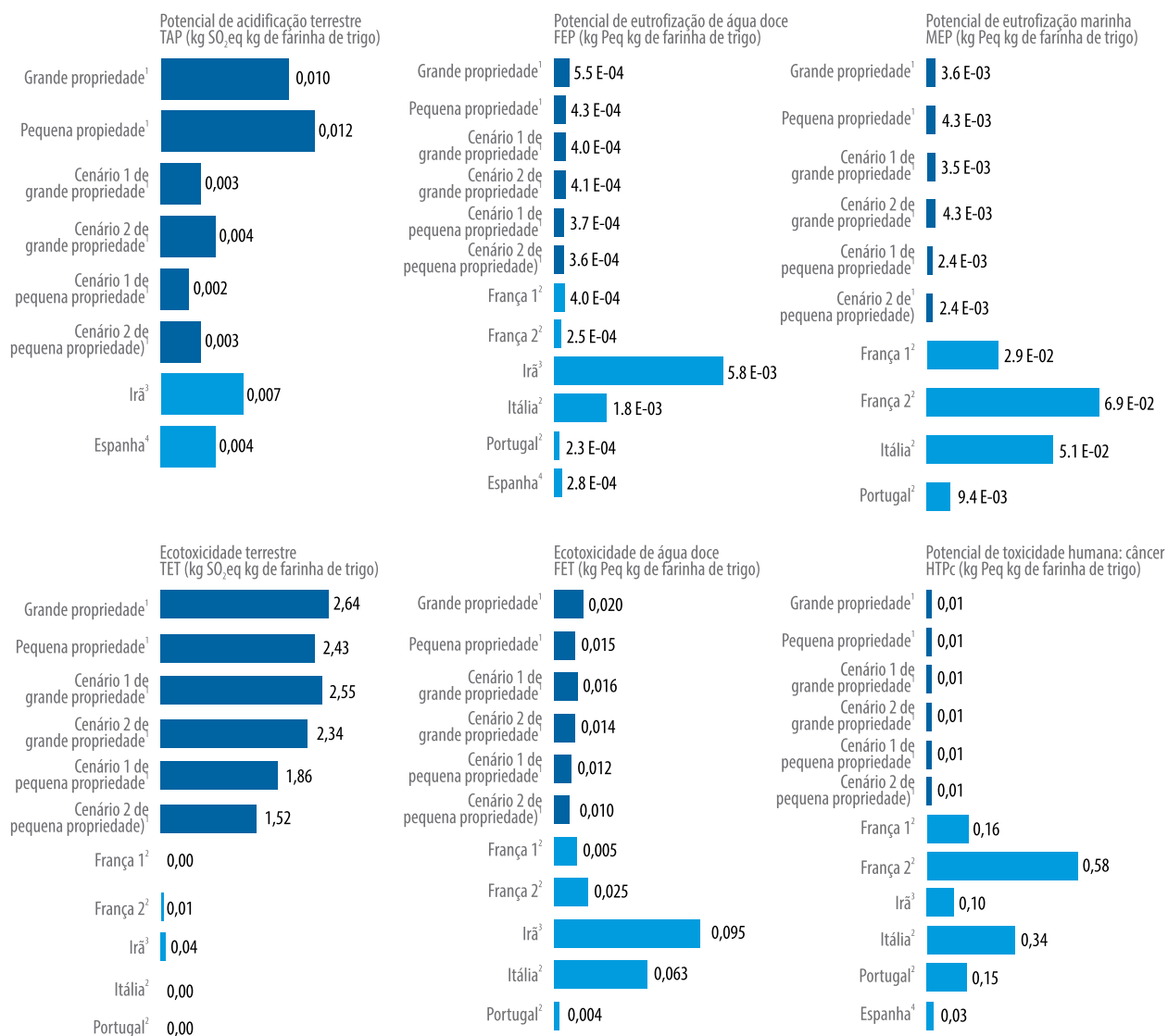


Figura 6.10. Comparação das categorias de impacto ambiental para a produção de 1 kg de farinha de trigo no Brasil e em outros países, no contexto atual e em cenários propostos.

Fonte: ¹Giongo et al. (2025); ²Kulak et al. (2015); ³Câmara Salim et al. (2020) e ⁴Pourmehdi e Kheiralipour (2020).

Nesse contexto, é fundamental o desenvolvimento e aprimoramento de métricas de avaliação de impactos que permitam destacar as vantagens competitivas da agricultura tropical e indicar os pontos de melhoria, contribuindo para a descarbonização, a eficiência no uso dos recursos hídricos e a minimização dos impactos ambientais.

A ACV, por sua completude, transparência, robustez e credibilidade científica, tem se tornado a base para muitas certificações, para o enfrenta-

mento de barreiras não tarifárias no comércio internacional e para investimentos.

Entre os principais desafios para o avanço da aplicação da ACV na agricultura tropical, destacam-se:

- **Aprimoramento** de modelos e ferramentas para mudança de uso da terra, incluindo a melhoria nas fontes de dados sobre a dinâmica do uso da terra e nos estoques de carbono no solo e na biomassa.

- **Aprimoramento** de modelos de dispersão e fatores de emissão para substâncias originadas dos processos agropecuários e destinadas aos compartimentos ambientais, nas condições de solo e clima tropical, considerando a complexidade dos sistemas produtivos.
- **Geração e inserção** de dados de inventários de ciclo de vida atualizados em fóruns e bancos de dados internacionais, para as principais cadeias de produtos e insumos agropecuários, assegurando maior confiabilidade e credibilidade nas avaliações de impacto. Isso é essencial para garantir a competitividade da agropecuária brasileira e corrigir percepções equivocadas sobre o setor, orientando políticas públicas e iniciativas tanto do governo quanto do setor produtivo.
- **Disponibilização** de ferramentas de apoio à ACV para produtos agropecuários, aumentando a eficiência e consistência das métricas e subsidiando ações assertivas para descarbonização e uso eficiente da irrigação.
- **Geração** da pegada de carbono, hídrica e perfil ambiental dos principais produtos de exportação brasileiros e indicação de recomendações e práticas de manejo para melhoria desses perfis.
- **Integração** das ferramentas de ACV com outros critérios e indicadores de sustentabilidade, incluindo a valoração das reservas de vegetação nativa associadas às paisagens rurais brasileiras.
- **Disseminação** da cultura de ACV nas cadeias agroalimentares, permitindo a integração e harmonização dos dados e da comunicação de impactos e externalidades.

A Embrapa, que desenvolve estudos de ACV para sistemas agropecuários desde 2009, destaca-se como referência sobre o tema no Brasil. Inventários, ferramentas e estudos de ACV, como os apresen-

tados neste capítulo, têm gerado intensa procura para sua aplicação nos mais diferentes contextos.

Este capítulo apresentou uma breve visão das soluções aplicáveis à mensuração e à orientação de ações para o alcance de uma agricultura com balanço de carbono mais favorável, além de diversos outros cobenefícios ambientais.

Referências

ACOSTA, A. da S.; RAMOS, M. Y. (ed.). **Lacunas de rendimento de grãos de trigo em áreas de atuação de cooperativas no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2021. 102 p. (Embrapa Trigo. Documentos, 197). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1135313>. Acesso em: 12 jun. 2025.

ACOSTA, A. S. (ed.). **Dinâmica e cenário para a produção de trigo em áreas de atuação de cooperativas no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2018. 51 p. (Embrapa Trigo. Documentos, 179). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1096935>. Acesso em: 12 jun. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **RenovaBio**. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/renovabio>. Acesso em: 9 maio 2025.

ALMEIDA, R. G.; ALVES, F. V. (ed.). **Diretrizes técnicas para produção de carne com baixa emissão de carbono certificada em pastagens tropicais: carne baixo carbono (CBC)**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2020. 36 p. (Embrapa Gado de Corte. Documentos, 280).

ALMEIDA, R. G.; MACEDO, M. C. M.; ARAÚJO, A. R. Soil carbon concentration and soil carbon stocks in integrated crop-livestock and crop-livestock-forestry systems in the Brazilian Cerrado: 14 years of establishment. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEMS, 4., 2023, Bento Gonçalves. **Proceedings** [...]. Bento Gonçalves: Aliança SIPA, 2023. v. 1. p. 242-247.

AMINI, M.; BIENSTOCK, C. C. Corporate sustainability: An integrative definition and framework to evaluate corporate practice and guide academic research. **Journal of Cleaner Production**, v. 76, p. 12-19, maio 2014. DOI: [10.1016/j.jclepro.2014.02.016](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.016).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO TRIGO. **Pesquisa de moagem de trigo 2022**: levantamento anual da moagem e produção de farinha no Brasil. São Paulo, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES E EXPORTADORES DE FRUTAS E DERIVADOS. **Estatísticas**: painéis de produção e painéis de exportação. Brasília, DF,

2025. Disponível em: <https://abrafrutas.org>. Acesso em: 6 jul. 2025.

BARCELLOS, R.; GASQUES, J. G.; BASTOS, E. T. **Produtividade e empregos na agricultura**: o caso da soja no Brasil. Brasília, DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2017. (Ipea. Texto para Discussão, n. 2317).

BARROS, V. S.; SANTOS, T. L.; FIGUEIRÊDO, M. C. B.; SILVA, E. O.; SOUSA, J. A.; ARAGÃO, F. A. S. Pegada de carbono de produtos agrícolas: estudo de caso do melão Amarelo. In: FIGUEIRÊDO, M. C. B.; GONDIM, R. S.; ARAGÃO, F. A. S. (ed.). **Produção de melão e mudanças climáticas**: sistemas conservacionistas de cultivo para redução das pegadas de carbono e hídrica. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 165-185.

BARROS, V. S.; SANTOS, T. L.; SILVA, E. O.; SOUSA, J. A.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. Agronomic and environmental performance of melon produced in the Brazilian semiarid region. **Revista Caatinga**, v. 32, n. 4, p. 877-888, 2019.

BARSOTTI, M. P.; ALMEIDA, R. G.; MACEDO, M. C. M.; GOMES, R. C.; PALHARES, J. C. P.; MAZZETTO, A.; DICKHOEFER, U. A pathway for decreasing the water footprint from grazing-based beef production systems in the Tropics. **Agricultural Systems**, v. 222, 104192, 2025.

BARSOTTI, M. P.; ALMEIDA, R. G.; MACEDO, M. C. M.; LAURA, V. A.; ALVES, F. V.; WERNER, J.; DICKHOEFER, U. Assessing the freshwater fluxes related to beef cattle production: a comparison of integrated crop-livestock systems and a conventional grazing system. **Agricultural Water Management**, v. 269, 107665, 2022.

BARSOTTI, M. P.; ALMEIDA, R. G.; MACEDO, M. C. M.; ZAWADA, P.; WERNER, J.; DICKHOEFER, U. Behavioural responses of beef cattle to different grazing systems and the influence of these responses on water productivity of livestock in a tropical savannah. **Animal**, v. 18, n. 4, 101117, 2024.

BASSET-MENS, C.; VANNIÈRE, H.; GRASSELLY, D.; HEITZ, H.; BRAUN, A.; PAYEN, S.; KOCH, P.; BIARD, Y. Environmental impacts of imported and locally grown fruits for the French market: a cradle-to-farm-gate LCA study. **Fruits**, v. 71, n. 2, p. 93-104, 2016.

BENETEL, G.; FAGUNDES, G. M.; MÉO-FILHO, P. de; SILVA, T. dos S.; WELTER, K. C.; MELO, F. A.; LOBO, A. A. G.; FRIGHETTO, R. T. S.; BERNDT, A.; MUIR, J. P.; BUENO, I. C. da S. Essential oils in nellore beef cattle: in vivo impact on rumen emissions. **Animals**, v. 14, n. 11, p. 1664, 2024.

BESKE, P.; LAND, A.; SEURING, S. Sustainable supply chain management practices and dynamic capabilities in the food industry: a critical analysis of the literature. **International Journal of Production Economics**, v. 152, n. 2, p. 131-143, 2014.

BLONK CONSULTANTS. **LUC impact tool**: full dataset: version 2021. Gouda, 2021. Disponível em: <https://www.blonkconsultants.nl/en/tools/luc-impact-tool>. Acesso em: 12 jun. 2025.

BOULAY, A.-M.; BARE, J.; BENINI, L.; BERGER, M.; LATHUILLIÈRE, M. J.; MANZARDO, A.; MARGNI, M.; MOTOSHITA, M.; NÚÑEZ,

M.; PASTOR, A. V.; RIDOUTT, B.; OKI, T.; WORBE, S.; PFISTER, S. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). **The International Journal Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 2, p. 368-378, 2018.

BOULAY, A.-M.; PFISTER, S.; MOTOSHITA, M.; SCHENKER, U.; BENINI, L.; GHEEWALA, S. H.; FIGUEIRÊDO, M. C. B.; HARDING, K. Part 1: Water scarcity. In: FRISCHKNECHT, R.; JOLLIET, O. (ed.). **Global guidance for life cycle impact assessment indicators**. Paris: Unep, 2016. v. 1, p. 101-115.

BRANDÃO, M.; AZZI, E.; NOVAES, R. M.; COWIE, A. The modelling approach determines the carbon footprint of biofuels: the role of LCA in informing decision makers in government and industry. **Cleaner Environmental Systems**, v. 2, 100027, p. 1-8, 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Sector de fruticultura que se destaca nas exportações brasileiras**. [Brasília, DF], 1 jul. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/setor-de-fruticultura-se-destaca-nas-exportacoes-brasileiras>. Acesso em: 1 maio 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Abastecimento e Pecuária. **Plan for adaptation and low carbon emission in agriculture**: strategic vision for a new cycle. Brasília, DF, 2021. 25 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura**: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Brasília, DF, 2012. 173a p.

BRASIL. Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovações. **Sistema de registro nacional de emissões (SIRENE)**. [Brasília, DF], 1 nov. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/sistema-de-registro-nacional-de-emissoes-sirene>. Acesso em: 9 maio 2025.

BRENTON, P.; EDWARDS-JONES, G.; JENSEN, M. F. (ed.) **Carbon footprints and food systems**: do current accounting methodologies disadvantage developing countries? Washington, DC: World Bank Publications, 2021. 71 p.

BRITO, T.; FRAGOSO, R.; MARQUES, P.; FERNANDES-SILVA, A.; ARANHA, J. LCA of soybean supply chain produced in the state of Pará, located in the Brazilian Amazon biome. **Biology and Life Sciences Forum**, v. 3, n. 1, p. 11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/IECAG2021-10072>.

BRUNETTI, H. B.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; GARCIA A. R.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; LELIS, A. L. J.; MEDEIROS, S. R. Silvopastoral system as a climate-smart alternative for beef production: enteric methane emission neutralization and animal thermal comfort increase. **Agricultural Systems**, v. 225, 104277, Apr. 2025.

- BUDEL, J. C. de C.; CASTRO, V. C. G. de; SOUZA, S. M. de; NAHÚM, B. de S.; BARBOSA, A. V. C.; RODRIGUES, L. S.; BERNDT, A.; RENNÓ, L. N.; MORAIS, E. de; SILVA, J. A. R. da; RODRIGUES, T. C. G. de C.; SILVA, A. G. M.; LOURENÇO-JUNIOR, J. de B. Methane emission, intake, digestibility, performance and blood metabolites in sheep supplemented with cupuassu and tucuma cake in the eastern Amazon. **Frontiers In Veterinary Science**, v. 10, 24 Apr. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1106619>.
- CALVO BUENDIA, E.; TANABE, K.; KRANJC, A.; BAASANSUREN, J.; FUKUDA, M.; NGARIZE, S.; OSAKO, A.; PYROZHENKO, Y.; SHERMANAU, P.; FEDERICI, S. (ed). **2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. [Geneva]: IPCC, 2019. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/0_Overview/19R_V0_00_Cover_Foreword_Preface_Dedication.pdf. Acesso em: 5 out. 2022.
- CAMARA-SALIM, I.; ALMEIDA-GARCIA, F.; GONZALEZ-GARCIA, S.; ROMERO-RODRIGUEZ, A.; RUIZNOGUEIRAS, B.; PEREIRA-LORENZO, S.; FEIJOO, G.; MOREIRA, M. T. Life cycle assessment of autochthonous varieties of wheat and artisanal bread production in Galicia, Spain. **Science of The Total Environment**, v. 713, 136720, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136720>.
- CASTANHEIRA, E. G.; FREIRE, F. Greenhouse gas assessment of soybean production: implications of land use change and different cultivation systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 54, n. 1, p. 49-60, 2013.
- CASTRO, R. L.; CAIERÃO, E.; PIRES, J. L. F.; TOIGO, M. C.; AIRES, R. F.; ROSA, A. C.; TOMAZZI, D. J.; SANTOS, F. M.; CORASSA, G. M.; FACCO, G.; HORBE, T. A. N. Ensaio estadual de cultivares de trigo: safra 2021. In: REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE, 15., 2022. **Atas e resumos** [...] Passo Fundo: Acervus, 2023. p. 220-224.
- CAVALET-GIORSA, E.; GONZÁLEZ-MUÑOZ, A.; ATHIYANNAN, N.; HOLDEN, S.; SALHI, A.; GARDENER, C.; QUIROZ-CHÁVEZ, J.; RUSTAMOVA, S. M.; ELKOT, A. F.; PATPOUR, M.; RASHEED, A.; MAO, L.; LAGUDAH, E. S.; PERIYANNAN, S. K.; SHARON, A.; HIMMELBACH, A.; REIF, J. C.; KNAUFT, M.; MASCHER, M.; STEIN, N.; CHAYUT, N.; GHOSH, S.; PEROVIC, D.; PUTRA, A.; PERERA, A. B.; HU, C.-Y.; YU, G.; AHMED, H. I.; LAQUAI, K. D.; RIVERA, L. F.; CHEN, R.; WANG, Y.; GAO, X.; LIU, S.; RAUPP, W. J.; OLSON, E. L.; LEE, J.-Y.; CHHUNEJA, P.; KAUR, S.; ZHANG, P.; PARK, R. F.; DING, Y.; LIU, D.-C.; LI, W.; NASYROVA, F. Y.; DVORAK, J.; ABBASI, M.; LI, M.; KUMAR, N.; MEYER, W. B.; BOSHOFF, W. H. P.; STEFFENSON, B. J.; MATNY, O.; SHARMA, P. K.; TIWARI, V. K.; GREWAL, S.; POSNIAK, C. J.; CHAWLA, H. S.; ENS, J.; DUNNING, L. T.; KOLMER, J. A.; LAZO, G. R.; XU, S. S.; GU, Y. Q.; XU, X.; UAUY, C.; ABROUK, M.; BOUGOUFFA, S.; BRAR, G. S.; WULFF, B. B. H.; KRATTINGER, S. G. Origin and evolution of the bread wheat D genome. **Nature**, v. 633, p. 848-855, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07808-z>.
- CHAGAS, J. H.; FRONZA, V.; SOARES SOBRINHO, J.; SUSSEL, A. A. B.; ALBRECHT, J. C. **Tecnologia de produção de trigo sequeiro no Cerrado do Brasil Central**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2021. 101 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1133483>. Acesso em: 12 jun. 2025.
- COLTRO, L.; KARASKI, T. U. Environmental indicators of banana production in Brazil: Cavendish and Prata varieties. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 363-378, 2019.
- COMPRE RURAL **Bioinsumos e ambiciosa meta de dobrar a produção agrícola do Brasil**. 10 maio 2023. Disponível em: <https://www.comprerural.com/bioinsumos-e-ambiciosa-meta-de-dobrar-a-producao-agricola-do-brasil/>. Acesso em: 12 jun. 2025.
- CONAB. **6º Levantamento**: safra [de Grãos] 2024/25. Brasília, DF, 2025a. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/6o-levantamento-safra-2024-25/6o-levantamento-safra-2024-25>. Acesso em: 12 jun. 2025.
- CONAB. **Trigo**: histórico mensal: fevereiro 2025. Brasília, DF, 2025b. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-trigo/item/download/53058_f5df7527d74b221dc5c67eb6070a1094. Acesso em: 12 jun. 2025.
- CONGIO, G. F. I.; BANNINK, A.; MOGOLLÓN, O. L. M. Enteric methane mitigation strategies for ruminant livestock systems in the Latin America and Caribbean region: A meta-analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, 127693, 20 Aug. 2021.
- DEFRIES, R. S.; FOLEY, J. A.; ASNER, G. P. Land-use choices: balancing human needs and ecosystem function. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 2, n. 5, p. 249-257, Jun. 2004.
- DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; LEMAINSKI, J. Converter plantio direto em Sistema Plantio Direto: um modelo à sustentabilidade agrícola. In: REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE, 12., 2018, Passo Fundo. **Ata e resumos** [...] Passo Fundo: Projeto Passo Fundo, 2019. p. 568-572.
- DIAS, A. F.; GIONGO, V.; BARROS, V. S.; MÜLLER-CARNEIRO, J.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. An agile approach for evaluating the environmental-economic performance of cropping systems at experimental stage: the case of Brazilian mango. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 8, p. 1-17, 2020.
- DINATO, R.; PICOLI, J. F.; FERNANDES, M.; KISS, B.; CHRYSSAFIDIS, J. **Pegada de carbono da carne bovina brasileira exportada para a união européia**: resultados e premissas para o cálculo das emissões do ciclo de vida do produto. São Paulo: Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas, 2019. 151 p.
- DONKE, A. C. G.; NOVAES, R. M. L.; PAZIANOTTO, R. A. A. Integrating regionalized Brazilian land use change datasets into the ecoinvent database: new data, premises and uncertainties have large effects in the results. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, p. 1027-1042, 20 May 2020.

DOSSA, A. A.; SANTI, A.; DALMAGO, G. A.; VIEIRA, O. V.; GIONGO, V. (ed.). **Programa Trigo Baixo Carbono**: um novo conceito de produção sustentável. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2023. 34 p. (Embrapa Trigo. Documentos, 206).

FARIAS, D. B. dos S.; RODRIGUES, L. N.; SANO, E. E.; MAGALHÃES, I. A. L. Atlas da agricultura irrigada no cerrado. In: RODRIGUES, L. N. (ed.). **Agricultura irrigada no cerrado**: subsídios para o desenvolvimento sustentável. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2024. p. 469-503. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1165698/atlas-da-agricultura-irrigada-no-cerrado>. Acesso em: 12 jun. 2025.

FENG, S.; LAKSHMANAN, P.; ZHANG, Y.; ZHANG, T.; LIANG, T.; WANG, W.; CHEN, X.; WANG, X. A comprehensive continental-scale analysis of carbon footprint of food production: Comparing continents around the world. **Journal of Cleaner Production**, v. 426, 138939, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138939>. Acesso em: 12 jun. 2025.

FIGUEIRÊDO, M. C. B.; DE BOER, I. J. M.; KROEZE, C.; BARROS, V. S.; SOUSA, J. A.; ARAGÃO, F. A. S.; GONDIM, R. S.; POTTING, J. Reducing the impact of irrigated crops on freshwater availability: the case of Brazilian yellow melons. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, p. 437-448, 2014.

FIGUEIRÊDO, M. C. B.; KROEZE, C.; POTTING, J.; BARROS, V. da S.; ARAGÃO, F. A. S. de; GONDIM, R. S.; SANTOS, T. de L.; BOER, I. J. M. de. The carbon footprint of exported Brazilian yellow melon. **Journal of Cleaner Production**, v. 47, p. 404-414, May 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.015>.

FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; CARDOSO, F. H.; PIGHINELLI, A. L. M. T.; MACIEL, V. G.; RAMOS, N. P.; GAROFALO, D. T.; MENDES, N. C.; MOORE, C. C. S.; NOVAES, R. M. L.; MORANDI, M. A. B. **ICVCalc**: ferramenta para construção de inventários agrícolas para estudos de avaliação de ciclo de vida. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2022. 47 p. (Embrapa Meio Ambiente. Circular técnica, 32).

FOLEGATTI-MATSUURAA, M. I. da S.; SILVA, O. R. R. F.; NOVAES, R. M. L.; PICOLI, J. F. Life cycle assessment of sisal produced in semiarid regions in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NATURAL FIBERS, 4., 2019, Porto. **Smart sustainable solutions**: book of abstracts. Minho: University of Minho, 2019. p. 416-417.

FONTES, H. R.; FERREIRA, J. M. S. (ed.). **A cultura do coco**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006. 102 p. (Coleção Plantar, 48; Série Vermelha. Fruteiras). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/122591/1/00078970.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2025.

FAO. **Environmental performance of large ruminant supply chains**: guidelines for assessment. Rome, 2015. 101 p. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d5835b2f-b44a-43a0-884f-27c52e203b4e/content>. Acesso em: 9 maio 2025.

FAO. **FAO Terminology Portal**: life cycle assessment. Disponível em: <https://www.fao.org/faoterm/viewentry/en?entryId=178605>. Acesso em: 10 jun. 2025.

FAO. **Irrigation potential in Africa**: a basin approach. Rome: FAO Land and Water Development Division, 1997. (FAO Land and Water Bulletin, 4). Disponível em: <https://www.fao.org/4/w4347e/w4347e00.htm>. Acesso em: 9 maio 2025.

FÓRUM AMAZÔNIA SUSTENTÁVEL. **Pacto setorial da pecuária**. 15 out. 2008. Documento de compromisso entre empresas do setor e organizações socioambientais, organizado pelo Fórum Amazônia Sustentável e com Secretaria Executiva exercida pelo Instituto Ethos. Disponível em: <https://akatu.org.br/pacto-setorial-da-pecuaria/>. Acesso em: 12 jun. 2025.

FURTADO, A. J. **Consórcio de feijão guandu com pastagens como estratégia de mitigação de gases de efeito estufa (GEE)**. 2022. 71 f. Dissertação (Mestrado em Nutrição e Produção Animal) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos.

FURTADO, A. J.; ABDALLA FILHO, A. L.; BRUNO, J. F.; PASQUINI NETO, R.; LOBO, A. A. G.; SILVA, G. V.; PERNA JÚNIOR, F.; ALVES, T. C.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; MEDEIROS, S. R.; OLIVEIRA, P. P. A.; RODRIGUES, P. H. M. Pigeon pea intercropped with tropical pasture as a mitigation strategy for enteric methane emissions of nellore steers. **Animals**, v. 13, n. 8, 1323, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani13081323>.

GALUSNYAK, S. C.; PETRESCU, L.; SANDU, V.-C.; CORMOS, C.-C. Environmental impact assessment of green ammonia coupled with urea and ammonium nitrate production. **Journal of Environmental Management**, v. 343, 118215, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118215>.

GAROFALO, D. F. T.; NOVAES, R. M. L.; PAZIANOTTO, R. A. A.; MACIEL, V. G.; BRANDÃO, M.; SHIMBO, J. Z.; FOLEGATTI-MATSUURAA, M. I. S. Land-use change CO₂ emissions associated with agricultural products at municipal level in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 364, 132549, 2022.

GIONGO, V.; ACOSTA, A. da S.; DOSSA, A. A.; SANTI, A.; AMARAL, A. J. do; CAIERÃO, E.; DENARDIN, J. E.; VIEIRA, O. V.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. de; FOLEGATTI, M. I. da S. F.; SAVIOLI, J. P. das D.; MARTINS, T. B.; SILVA, B. R.; PIRES, B. S.; SANTANA, M. da S. How can the environmental impacts of wheat cultivation and wheat flour production be reduced? A life cycle assessment of Brazilian wheat. **Journal of Cleaner Production**, v. 489, 144650, 2025.

GIUDICE, A. L.; MBOHWA, C.; CLASADONTE, M. T.; INGRAO, C. Environmental assessment of the citrus fruit production in Sicily using LCA. **Italian Journal of Food Science**, v. 25, p. 202-212, 2013.

GRAZIANO DA SILVA, J. **O novo rural brasileiro**. Campinas: Unicamp, 2004. 151 p.

GREENHOUSE GAS PROTOCOL. **Land sector and removals guidance**: part 1 accounting and reporting requirements and guidance: supplement to the GHG Protocol Corporate Standard and Scope 3 Standard: draft for pilot testing and

review (september 2022). [S.l.]: World Resources Institute, 2022. 271 p. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/Land-Sector-and-Removals-Guidance-Pilot-Testing-and-Review-Draft-Part-1.pdf>. Acesso em: 20 maio 2025.

HAN, W.; LIU, Y.; WANG, S.; FRAZ ALI, M.; MA, L.; LIN, X.; WANG, D. Adaptation progress and challenges of winter wheat breeding in China under climate warming. **Field Crops Research**, v. 326, 109889, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109889>.

HIRAKURI, M. H.; DEBIASI, H.; PROCÓPIO, S. de O.; FRANCHINI, J. C.; CASTRO, C. de. **Sistemas de produção**: conceitos e definições no contexto agrícola. Londrina: Embrapa Soja, 2012. 24 p. (Embrapa Soja. Documentos, 335).

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALDAYA, M. M.; MEKONNEN, M. M. **The water footprint assessment manual**: setting the global standard. London: Earthscan, 2011. 203 p.

HOMEM, B. G. C.; BORGES, L. P. C.; LIMA, I. B. G. de; GUIMARÃES, B. C.; SPASIANI, P. P.; FERREIRA, I. M.; MÉO FILHO, P.; BERNDT, A.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; CASAGRANDE, D. R. Forage peanut legume as a strategy for improving beef production without increasing livestock greenhouse gas emissions. **Animal**, v. 18, n. 5, 101158, May 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agropecuária**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/>. Acesso em: 1 maio 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040**: 2006: environmental management: life cycle assessment: principles and framework. Geneva, 2006a. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/37456.html>. Acesso em: 29 maio 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044**: 2006: environmental management: life cycle assessment: requirements and guidelines. Geneva, 2006b. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/38498.html>. Acesso em: 29 maio 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14046**: 2014: environmental management: water footprint: principles: requirements and guidelines. Geneva, 2014. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/43263.html>. Acesso em: 29 maio 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14067**: 2018: greenhouse gases: carbon footprint of products: requirements and guidelines for quantification. Geneva, 2018. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/71206.html>. Acesso em: 29 maio 2025.

IPCC. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**: volume 4: agriculture, forestry and other land use. Eggborough: IGES, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4>. Acesso em: 12 jun. 2025.

IPCC. **Climate change 2007**: synthesis report. Geneva, 2007. 104 p.

IPCC. **Climate change 2013**: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.

IPCC. **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. Geneva, 2020. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_Updated-Jan20.pdf. Acesso em: 10 jan. 2022.

IPCC. **Special report**: special report on the ocean and cryosphere in a changing climate: glossary. Disponível em: https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/glossary/?utm_source=chatgpt.com%20p%3%A1gina%20697. Acesso em: 12 jun. 2025.

JACINTHO, M. A. C.; PROCOPIO, F. R.; ALVES, F. V.; ALMEIDA, R. G.; PIMENTA, S. C. **Diretrizes técnicas para produção de couro carbono neutro e couro baixo carbono**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2024. 20 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 147).

KNUDSEN, M. T.; ALMEIDA, G. F.; LANGER, V.; ABREU, L. S.; HALBERG, N. Environmental assessment of organic juice imported to Denmark: a case study on oranges (*Citrus sinensis*) from Brazil. **Organic Agriculture**, v. 1, p. 167-185, 2011.

KOCH, P.; SALOU, T. **AGRIBALYSE**: rapport méthodologique-volet agriculture. Version 3.0; Version initiale 1.0; 2014. Angers: Ed. Ademe, 2020. 319 p.

KULAK, M.; NEMECEK, T.; FROSSARD, E.; CHABLE, V.; GAILLARD, G. Life cycle assessment of bread from several alternative food networks in Europe. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 104-113, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.060>.

LAM, W. Y.; CHATTERTON, J.; SIM, S.; KULAK, M.; MENDOZA BELTRAN, A.; HUIJBREGTS, M. A. J. Estimating greenhouse gas emissions from direct land use change due to crop production in multiple countries. **Science of The Total Environment**, v. 755, part 2, 143338, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143338>.

LIMA, A. F. S.; BARROS, V. S.; SILVA, A. O.; GONGIM, R. S.; FIGUEIRÊDO, M. C. B.; COSTA, R. N. T.; LACERDA, C. F.; SALES, J. R. S.; SILVA, E. F. F. E. Carbon and water scarcity footprints of banana under current and future climate conditions in the Brazilian semiarid region. **Environmental Development**, v. 51, p. 1-10, 2024.

LU, Y.; KRONZUCKER, H. J.; YU, H.; SHABALA, S.; SHI, W. Nitrogen-loss and carbon-footprint reduction by plant-rhizosphere exudates. **Trends in Plant Science**, v. 29, n. 4, p. 469-481, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.09.007>.

MACIEL, V. G.; ZORTEA, R. B.; DA SILVA, W. M.; CYBIS, L. F. D.; EINLOFT, S.; SEFERIN, M. Life Cycle Inventory for the agricultural stages of soybean production in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 93, p. 65-74, 2015.

MARRAS, S.; MASIA, S.; DUCE, P.; SPANO, D.; SIRCA, C. Carbon footprint assessment on a mature vineyard. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 214/215, p. 350-356, 2015.

MATSUURA, M. I. da S. F.; CARDOSO, F. H.; PIGHINELLI, A. L. M. T.; MACIEL, V. G.; RAMOS, N. P.; GAROFALO, D. F. T.; MENDES, N. C.; MOORE, C. C. S.; NOVAES, R. M. L.; MORANDI, M. A. B. **ICVCalc**: ferramenta para construção de inventários agrícolas para estudos de avaliação de ciclo de vida. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2022. 47 p. (Embrapa Meio Ambiente. Circular técnica, 32).

MATSUURA, M. I. da S. F.; PICOLI, J. F. **Life cycle inventories of agriculture, forestry and animal husbandry**: Brazil. Zurich: Ecoinvent Association, 2019. 143 p.

MATSUURA, M. I. da S. F.; SCACHETTI, M. T.; CHAGAS, M. F.; SEABRA, J. E. A.; MOREIRA, M. M. R.; BONOMI, A.; BAYMA, G.; PICOLI, J. F.; MORANDI, M. A. B.; RAMOS, N. P.; CAVALETT, O.; NOVAES, R. M. L. **RenovaCalcMD**: método e ferramenta para a contabilidade da intensidade de carbono de biocombustíveis no Programa RenovaBio. 2018. 58 p. Nota técnica. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/consulta-audiencia-publica/2018/arquivos-consultas-e-audiencias-publicas-2018/cap-10-2018/cp10-2018_nota-tecnica-renova-calc.pdf. Acesso em: 15 jun. 2025.

MÉO FILHO, P.; BERNDT, A.; MARCONDES, C. R.; PEDROSO, A. F.; SAKAMOTO, L. S.; VILAS BOAS, D. F.; RODRIGUES, P. H. M.; RIVERO, M. J.; BUENO, I. C. S. Methane emissions, performance and carcass characteristics of different lines of beef steers reared on pasture and finished in feedlot. **Animals**, v. 10, n. 2, p. 303, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani10020303>.

MÉO FILHO, P.; BERNDT, A.; PEZZOPANE, J. R. M.; PEDROSO, A. F.; BERNARDI, A. C. C.; RODRIGUES, P. H. M.; BUENO, I. C. S.; CORTE, R. R.; OLIVEIRA, P. P. A. Can intensified pasture systems reduce enteric methane emissions from beef zattle in the Atlantic Forest Biome? **Agronomy**, v. 12, n. 11, p. 2738, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12112738>.

MORDINI, M.; NEMECEK, T.; GAILLARD, G. **Carbon & water footprint of oranges and strawberries**: a literature review. Switzerland: Federal Department of Economic Affairs, 2009. 76 p.

MOREIRA, M. M. R.; NOVAES, R. M. L.; SCACHETTI, M. T.; CHAGAS, M. F.; SEABRA, J. E. A.; MATSUURA, M. I. da S. F.; RAMOS, N. P.; MORANDI, M. A. B.; BONOMI, A. Proposta de contabilização da mudança de uso da terra na política nacional de biocombustíveis (RenovaBio). In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO DO CICLO DE VIDA, 6., 2018, Brasília, DF. **Anais [...]** Brasília, DF: Ibict, 2018. p. 155-161.

MORITA, A. M.; MOORE, C. C. S.; NOGUEIRA, A. R.; KULAY, L.; RAVAGNANI, M. A. S. Assessment of potential alternatives for improving environmental trouser jeans manufacturing performance in Brazil, **Journal of Cleaner Production**, v. 24, 119156, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119156>.

MOTTALEB, K. A.; GOVINDAN, V. How the ongoing armed conflict between Russia and Ukraine can affect the global wheat food security? **Frontiers in Food Science and Technology**, v. 3, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffst.2023.1072872>.

MÜLLER CARNEIRO, J.; DIAS, A. F.; BARROS, V. D. S.; GIONGO, V.; FOLEGATTI, M. I. da S. F.; BRITO DE FIGUEIRÊDO, M. C. Carbon and water footprints of Brazilian mango produced in the semiarid region. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 4, p. 735-752, 2019.

NATIONAL MANGO BOARD. **Sustainability assessment**: baseline assessment findings & recommendations. [S.l.]: Common Fields, 2010. Disponível em: https://www.mango.org/wp-content/uploads/2017/10/Sustainability_Final_Report_Eng.pdf. Acesso em: 15 out. 2017.

NAYAK, A. K.; TRIPATHI, R.; DEBNATH, M.; SWAIN, C. K.; DHAL, B.; VIJAYKUMAR, S.; NAYAK, A. D.; MOHANTY, S.; SHAHID, M.; KUMAR, A.; RAJAK, M.; MOHARANA, K. C.; CHATTERJEE, D.; MUNDA, S.; GURU, P. KHANAM, R.; LAL, B.; GAUTAM, P.; PATTANAIK, S.; SHUKLA, A. K.; FITTON, N.; SMITH, P.; PATHAK, H. Carbon and water footprints of major crop production in India. **Pedosphere**, v. 33, n. 3, p. 448-462, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.06.045>.

NEMECEK, T.; FRICK, C.; DUBOIS, D.; GAILLARD, G. Comparing farming systems at crop rotation level by LCA. In: GEERKEN, T.; MATTSO, B.; OLSSON, P.; JOHANSSON, E. (ed.). **Proceedings of the International Conference on LCA in Foods**. Gothenburg: SIK VITO, 2001. p. 65-69.

NEMECEK, T.; KÄGI, T. **Life cycle inventories of agricultural production systems**: Data v2.0 (2007). Zurich: ART, 2007. 46 p. (Ecoinvent Report, n. 15).

NEMECEK, T.; SCHNETZER, J. **Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems**: Data v3.0 (2012). Zurich: ART, 2011. 34 p.

NOVAES, R. M. L.; AMARAL, D. R.; MORANDI, M. A.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. da S.; BRANDÃO, M. Comment on "The importance of GHG emissions from land use change for biofuels in Brazil: An assessment for current and 2030 scenarios". **Resources, Conservation and Recycling**, v. 201, n. 5, 107207, 2023.

NOVAES, R. M. L.; PAZIANOTTO, R. A. A.; BRANDÃO, M.; ALVES, B. J. R.; MAY, A.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. da S. Estimating 20-year land-use change and derived CO2 emissions associated with crops, pasture and forestry in Brazil and each of its 27 states. **Global Change Biology**, v. 23, n. 9, p. 3716-3728, 2017.

NOVAES, R. M. L.; TUBIELLO, F. N.; GAROFALO, D. F. T.; DE SANTIS, G.; PAZIANOTTO, R. A. A.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. da S. **Brazil's agricultural land, cropping frequency and**

second crop area: FAOSTAT statistics and new estimates. Jaguariúna: Embrapa Environment, 2022. 25 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 93).

OGLE, S. M.; WAKELIN, S. J.; BUENDIA, L.; MCCONKEY, B.; BALDOCK, J.; AKIYAMA, H.; KISHIMOTO, A. W. M.; CHIRINDA, N.; BERNOUX, M.; BHATTACHARYA, S.; CHUERSUWAN, N.; GOHEER, M. A. R.; HERGOUALC'H, K.; ISHIZUKA, S.; LASCO, R. D.; PAN, X.; PATHAK, H.; REGINA, K.; SATO, A.; VAZQUEZ-AMABLE, G.; WANG, C.; ZHENG, X. Cropland. In: BUENDIA, E. C.; TANABE, K.; KRANJC, A.; BAASANSUREN, J.; FUKUDA, M.; NGARIZE, S.; OSAKO, A.; PYROZHENKO, Y.; SHERMANAU, P.; FEDERICI, S. (ed.). **2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Hayama: IPCC, 2019. v. 4, p. 5.1-5.102. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch05_Cropland.pdf. Acesso em: 20 out. 2021.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; PERNA JÚNIOR, F.; TADINI, A. M.; MARTIN-NETO, L.; RODRIGUES, P. H. M. Potential of integrated trees-pasture-based systems for GHG emission mitigation and improving soil carbon dynamics in the Atlantic forest biome, Southeastern of Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 158, n. 32, 127219, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127219>.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. de F.; ALVES, T. C.; LEMES, A. P.; OLIVEIRA, B. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; RODRIGUES, P. H. M. Greenhouse gas balance and mitigation of pasture-based dairy production systems in the Brazilian Atlantic Forest biome. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 9, p. 1-15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.958751>.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; ALVES, T. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SAKAMOTO, L. S.; HENRIQUE, F. L.; RODRIGUES, P. H. M. Greenhouse gas balance and carbon footprint of pasture-based beef cattle production systems in the tropical region (Atlantic Forest biome). **Animal**, v. 14, p. 427-437, 2020. Supplement 3.

PASINATO, A.; CUNHA, G. R. da; FONTANA, D. C.; MONTEIRO, J. E. B. de A.; NAKAI, A. M.; OLIVEIRA, A. F. de. Área potencial e limitações para a expansão de trigo de sequeiro no bioma Cerrado do Brasil Central. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 7, p. 779-790, 2018.

PENA-BERMUDEZ, Y. A.; VINCENZI, R.; MEO-FILHO, P.; SAKAMOTO, L. S.; LOBO, R.; BENETEL, G.; LOBO, A.; MATOS, C.; BENETEL, V.; LIMA, C. G.; BERNDT, A.; CARDENAS, L. M.; BUENO, I. C. S. Effect of yerba mate extract as feed additive on ruminal fermentation and methane emissions in beef cattle. **Animals**, v. 12, n. 21, p. 2997, 2022.

PISHGAR-KOMLEH, S. H.; ZYLOWSKI, T.; ROZAKIS, S.; KOZYRA, J. Efficiency under different methods for incorporating undesirable outputs in an LCA+DEA framework: a case study of winter wheat production in Poland. **Journal of Environmental Management**, v. 260, 110138, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110138>.

POORE, J.; NEMECEK, T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. **Science**, v. 360, n. 6392, p. 987-992, 2018.

POURMEHDI, K.; KHEIRALIPOUR, K., 2020. Assessing the effects of wheat flour production on the environment. **Advances in Environmental Technology**, v. 6, n. 2, p. 111-117, 2020. DOI: <https://doi.org/10.22104/aet.2021.4704.1280>.

REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE (15. : 2022 : Brasília, DF). **Informações técnicas para trigo e triticale: safra 2023**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. 142 p.

RIBAL, J.; ESTRUCH, V.; CLEMENTE, G.; FENOLLOSA, M. L.; SANJUÁN, N. Assessing variability in carbon footprint throughout the food supply chain: a case study of Valencian oranges. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 2, p. 1515-1532, 2019.

RIDOUTT, B. G.; PFISTER, S. A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. **Global Environmental Change**, v. 20, n. 1, p. 113-120, 2010.

RIEDEL, L.; LAIDIG, F.; HADASCH, S.; RENTEL, D.; HACKAUF, B.; PIEPHO, H. P.; FEIKE, T. Breeding progress reduces carbon footprints of wheat and rye. **Journal of Cleaner Production**, v. 377, 134326, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134326>.

ROIBÁS, L.; ELBEHRI, A.; HOSPIDO, A. Evaluating the sustainability of Ecuadorian bananas: carbon footprint, water usage and wealth distribution along the supply chain. **Sustainable Production and Consumption**, v. 2, p. 3-16, 2015.

SAMPAIO, A. P. C.; SILVA, A. K. P.; AMORIM, J. R. de; SANTIAGO, A. D.; MIRANDA, F. R. de; BARROS, V. S.; SALES, M. C. L.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. de. Reducing the carbon and water footprints of Brazilian green coconut. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, n. 4, p. 707-723, 2021.

SANTOS, T. L.; NUNES, A. B. A.; GIONGO, V.; BARROS, V. S.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. Cleaner fruit production with green manure: the case of Brazilian melons. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 260-270, 2018.

SHAO, G.; ZHOU, J.; LIU, B.; ALHARBI, S. A.; LIU, E.; KUZAYKOV, Y. Carbon footprint of maize-wheat cropping system after 40-year fertilization. **Science of the Total Environment**, v. 926, 172082, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172082>.

SHUKLA, P. R.; SKEA, J. (ed.). **Climate change 2022: mitigation of climate change: working group III contribution to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [Cambridge]: Cambridge University Press, 2022. 2029 p.

SILVA, C. B.; VALENTE, L. M.; MATOS, E.; BRANDÃO, M.; NETO, B. Life cycle assessment of aquafeed ingredients. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 5, p. 995-1017, 2018.

SIMMONS, A. T.; MURRAY, A.; BROCK, P. M.; GRANT, T.; COWIE, A. L.; EADY, S.; SHARMA, B. Life cycle inventories for the Australian grains sector. **Crop & Pasture Science**, v. 70, n. 7, p. 575-584, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1071/CP18412>.

SOBEL, T. F.; COSTA, E. de F. Impactos na geração de empregos e renda da implantação do projeto pontal no Vale do São Francisco. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 35, n. 3, p. 405-423, 2004. DOI: <https://doi.org/10.61673/ren.2004.794>.

SUBEDI, S.; DENT, B.; ADHIKARI, R. The carbon footprint of fruits: a systematic review from a life cycle perspective. **Sustainable Production and Consumption**, v. 52, p. 12-28, 2024.

TAHMASEBI, M.; FEIKE, T.; SOLTANI, A.; RAMROUDI, M.; HA, N. Trade-off between productivity and environmental sustainability in irrigated vs. rainfed wheat production in Iran. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 367-379, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.305>.

TASSIELLI, G.; NOTARNICOLA, B.; RENZULLI, P. A.; ARCESE, G. Environmental life cycle assessment of fresh and processed sweet cherries in southern Italy. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 184-197, 2018.

THE EUROPEAN FEED MANUFACTURERS' FEDERATION. **The PEFCR feed for food producing animals**. [S.l.]: FEFAC, 2024. Disponível em: <https://fefac.eu/priorities/sustainability/pefcr-feed/>. Acesso em: 29 maio 2025.

TUBIELLO, F. N.; ROSENZWEIG, C.; CONCHEDDA, G.; KARL, K.; GÜTSCHOW, J.; XUEYAO, P.; OBLI-LARYEA, G.; WANNER, N.; QIU, S. Y.; BARROS, J. de.; FLAMMINI, A.; MENCOS-CONTRERAS, E.; SOUZA, L.; QUADRELLI, HEIÐARSDÓTTIR, H. H.; BENOIT, P.; HAYEK, M.; SANDALOW, D. Greenhouse gas emissions from food systems: building the evidence base. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 6, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac018e>.

VAN PAASSEN, M.; BRACONI, N.; KULING, L.; DURLINGER, B.; GUAL, P. **Agri-footprint 5.0**. Gouda: Mérieux NutriSciences, 2019. 134 p. Disponível em: <https://www.agri-footprint.com/wp-content/uploads/2019/11/Agri-Footprint-5.0-Part-2-Description-of-data-17-7-2019-for-web.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2025.

VÁZQUEZ-ROWE, I.; TORRES-GARCÍA, J. R.; CÁCERES, A. L.; LARREA-GALLEGOS, G.; QUISPE, I.; KAHHAT, R. Assessing the magnitude of potential environmental impacts related to water and toxicity in the Peruvian hyper-arid coast: a case study for the cultivation of grapes for *pisco* production. **Science of the Total Environment**, v. 601-602, p. 532-542, 2017.

VERDI, L.; DALLA MARTA, A.; FALCONI, F.; ORLANDINI, S.; MANCINI, M. 2022. Comparison between organic and conventional farming systems using Life Cycle Assessment (LCA): a case study with an ancient wheat variety. **European Journal of Agronomy**, v. 141, 126638, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126638>.

VINYES, E.; ASIN, L.; ALEGRE, S.; MUÑOZ, P.; BOSCHMONART, J.; GASOL, C. M. Life cycle assessment of apple and peach production, distribution and consumption in mediterranean fruit sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 313-320, 2017.

WANG, H.; MA, S.; SHAO, G.; DITTERT, K. Use of urease and nitrification inhibitors to decrease yield-scaled N₂O emissions from winter wheat and oilseed rape fields: a two-year field experiment. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 319, 107552, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107552>.

XIONG, W.; REYNOLDS, M. P.; MONTES, C.; CROSSA, J.; SNAPP, S.; AKIN, B.; MESUT, K.; OZDEMIR, F.; LI, H.; HE, Z.; WANG, D.; CHEN, F. New wheat breeding paradigms for a warming climate. **Nature Climate Change**, v. 14, p. 869-875, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02069-0>.

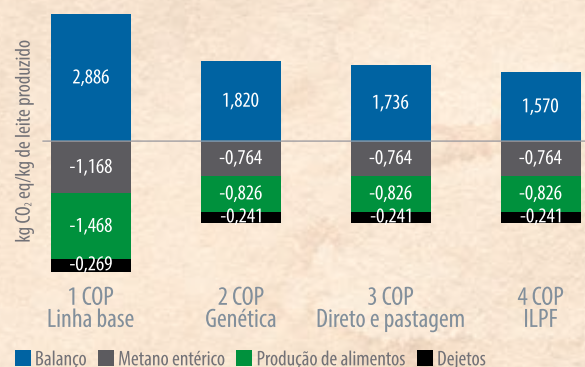
ZHOU, Y.; ZHAO, X.; LI, Y.; XU, J.; BI, A.; KANG, L.; XU, D.; CHEN, H.; WANG, Y.; WANG, Y.-G.; LIU, S.; JIAO, C.; LU, H.; WANG, J.; YIN, C.; JIAO, Y. LU, F. *Triticum* population sequencing provides insights into wheat adaptation. **Nature Genetics**, v. 52, p. 1412-1422, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41588-020-00722-w>.

Exemplo de resultado da calculadora de leite de baixo carbono da Embrapa

O balanço de carbono é calculado pela soma das emissões menos as remoções de carbono nos sistemas de produção de carne e leite. Para a soma das emissões, a calculadora de pecuária de baixo carbono da Embrapa estima as emissões de GEE resultantes da fermentação entérica, dos dejetos e da produção de alimentos. Para a subtração das remoções, a calculadora estima o sequestro de carbono nos solos agrícolas, nas pastagens e nos troncos de árvores em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta.

Na Figura ao lado são apresentadas simulações em que o balanço de carbono do leite é representado na cor azul, diminuindo conforme são adotadas diferentes tecnologias complementares.

- A **primeira barra** representa um resultado de produção convencional de leite, ou “linha de base”, caracterizado por pastejo com baixa adoção de tecnologias.
- Na **segunda barra**, a propriedade passou a utilizar genética superior especializada em produção de leite, resultando em uma pegada de carbono 37% menor.
- Na **terceira barra**, foi aprimorado o manejo dos solos, adotando o plantio direto nas lavouras destinadas para a alimentação animal e intensificação das pastagens, resultando em uma pegada 40% menor que a “linha de base”.
- Na **quarta barra**, foram incorporadas árvores ao sistema de produção de leite, que, além de contribuírem para o conforto e bem-estar das vacas, também sequestram carbono nos seus troncos, resultando numa pegada 46% menor que o sistema convencional.



Balanço de carbono do leite em sistemas com diferentes perfis tecnológicos.



CAPÍTULO 7

Monitoramento e inventário agrícola no Acordo de Paris

Desafios em médio e longo prazo

Gustavo Barbosa Mozzer – Walkyria Bueno Scivittaro – Josileia Acordi Zanatta – Marcos Cláudio Pinheiro Rogério – Vanessa Romário de Paula – Giampaolo Queiroz Pellegrino – Bruno José Rodrigues Alves – Alexandre Berndt – Ana Paula Contador Packer

Introdução

A construção de um sistema robusto de monitoramento e inventário de emissões de gases de efeito estufa (GEE) em médio e longo prazo é um desafio estratégico para o Brasil, especialmente no contexto das especificidades dos sistemas de produção agrícola tropicais e das obrigações assumidas no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) (Nações Unidas, 1992) e do Acordo de Paris. Desde a assinatura da UNFCCC em 1992, durante a *Rio-92*, o Brasil tem se destacado como protagonista na agenda climática global, sendo o primeiro país a ratificar a convenção e a estabelecer uma autoridade nacional designada, inicialmente vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Esse pioneirismo reflete a importância estratégica que o País atribui à transparência e à qualidade dos dados reportados em seus inventários nacionais, que servem tanto como instrumentos de gestão interna quanto como ferramentas de posicionamento no cenário internacional. O objetivo de estruturar um Plano e Infraestrutura de Monitoramento e Inventário em Médio e Longo Prazo surge nesse contexto, buscando alinhar as capacidades científicas e institucionais brasileiras

às demandas do mecanismo estrutura de transparência aprimorada¹ (ETF, da sigla em inglês) do Acordo de Paris (Nações Unidas, 2016), que entrou em vigor em 2024 com os relatórios bienais de transparência² (BTRs, da sigla em inglês).

O setor agropecuário, que nesse contexto integra o escopo mais amplo de agricultura, florestas e outros usos da terra (Afolu) nas diretrizes de 2006, do Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC, 2025), incluindo obviamente a pecuária, é um pilar central da economia brasileira e, ao mesmo tempo, uma das principais fontes de emissão de GEE no País. As emissões de metano (CH₄), provenientes da pecuária e da produção de arroz irrigado, e as de óxido nitroso (N₂O), originadas de solos manejados, bem como as mudanças no uso da terra associadas ao desmatamento e à expansão agrícola, evidenciam a complexidade de caracterizar esses sistemas tropicais. As Diretrizes de 2006 do IPCC, atualizadas em 2019, fornecem o arcabouço metodológico para os inventários, baseando-se nos princípios de Transparência, Acurácia, Completude, Comparabilidade e Consistência (TACCC). Contudo, a aplicação desses métodos em um país de dimensões continentais como o Brasil, contemplando vários biomas e inúmeras práticas agrícolas, exige um esforço contínuo de aprimoramento, que vai além das aborda-

gens genéricas do *Tier*³ 1 e demanda a transição para os níveis *Tier* 2 e *Tier* 3, conforme detalhado na Tabela 7.1, com dados e modelos adaptados à realidade nacional.

A história do envolvimento brasileiro na UNFCCC evidencia um compromisso de longa data com a geração de inventários nacionais confiáveis. Desde a primeira Comunicação Nacional (Natcom) em 2004, passando pelos Relatórios Bienais de Atualização (BURs) e avançando até o Primeiro BTR em 2024, o Brasil evoluiu na qualidade de seus relatórios, contando com a expertise da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) desde o início desse processo. A Embrapa tem desempenhado papel crucial no apoio ao MCTI, fornecendo dados de atividade e fatores de emissão específicos para o setor agropecuário, além de contribuir para estimativa de emissões e remoções dos subsetores como florestas plantadas e resíduos. Esse trabalho foi institucionalmente formalizado em 2024 por meio de um Acordo de Cooperação Técnica (ACT) entre o MCTI e a Embrapa, que visa à melhoria contínua do inventário e consolida a Embrapa como coordenadora técnico-científica do subsetor agropecuário no inventário nacional. Esse acordo reflete a necessidade de uma parceria de longo prazo para enfrentar os desafios de monitoramento e inventário, especialmente em um momento de transição para o ETF, que exige maior rigor e frequência na apresentação de dados.

Os desafios associados à caracterização dos sistemas de produção agrícola tropicais são múltiplos e decorrem tanto das limitações das metodologias IPCC quanto da complexidade inerente ao contexto brasileiro. O *Tier* 1, amplamente utilizado nos inventários iniciais, baseia-se em fatores de emissão padrão e dados globais, o que resulta

¹ A Estrutura de Transparência Aprimorada (ETF) é um aperfeiçoamento do mecanismo de transparência no âmbito do Acordo de Paris e visa assegurar comparabilidade, completude e consistência da estimativa de emissões de GEE de todos os países signatários.

² Os Relatórios Bienais de Transparência são instrumentos do ETF que visam estabelecer a base para comparabilidade de estimativas de emissões e remoções de GEE entre os países. A novidade desse instrumento, quando comparado aos inventários nacionais originalmente estabelecidos no âmbito da convenção, é o estabelecimento do formato tabular comum (CTF), ferramenta que assegura a comparabilidade entre os dados apresentados pelos diversos países signatários do Acordo de Paris.

³ *Tier* é o termo em inglês adotado no âmbito da convenção com o sentido de representar o nível de aproximação ou de detalhamento adotado pela parte para a estimativa da emissão de GEE de cada atividade constante de seu inventário e relatado nos seus BTRs. A Tabela 7.1 detalha características dos três níveis ou *Tiers*.

Tabela 7.1. Síntese de sensibilidades e características do inventário nacional de emissões de GEE considerando os princípios de TACCC⁽¹⁾ e suas peculiaridades por *Tier*.

Princípios (TACCC)	Consistência das séries de dados ao longo dos anos – princípio da Consistência.		
	Comparabilidade dos dados entre países – princípio da Comparabilidade.		
	Transparência dos dados apresentados assegurada por processo independente de revisão – princípio da Transparência.		
	Obrigatório para todos os países e categorias – princípio da Completude.	Obrigatório para todas as categorias classificadas como chave em razão de dois fatores 1) Nível, variável absoluta, razão das emissões, ou 2) Tendência, variável relativa, tendência de incremento de emissões futuras – princípio da Precisão.	Opcional e desenvolvido com base em métodos e modelos nacionais que precisam demonstrar incremento – objetivo da transparência, acurácia, completude e consistência, sem prejuízo da comparabilidade.

	Tier 1	Tier 2	Tier 3
Nível de acurácia	Pequeno.	Suficiente.	Superior.
Custo	Baixo.	Moderado.	Elevado.
Financiamento internacionalmente para países em desenvolvimento	Plenamente com recursos do Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF) acordado.	Plenamente com recursos GEF acordado.	Não financiado.
Contabilização de remoções	Remoções não são contabilizadas.	Remoções podem ser contabilizadas com limitações do método padrão <i>Tier 2</i> .	Remoções podem ser contabilizadas considerando as particularidades dos sistemas de produção nacional.
Dados domésticos	Pouco ou não necessários. Uso de padrões globais.	Necessário produzir algum tipo de dado doméstico, incluindo fator de emissão e/ou dados de atividade aplicados ao método padrão <i>Tier 2</i> .	Necessário estabelecer uma estratégia sistematizada de aquisição de dados que justifique a robustez e melhoria em termos de TACCC do método nacional proposto como <i>Tier 3</i> .
Nível de exposição de dados sensíveis	Baixo risco de exposição de dados sensíveis.	Elevado nível de exposição de dados sensíveis, particularmente pela melhoria da precisão das estimativas. Envolve um grande esforço de desagregação de dados.	Nível moderado/baixo de exposição de dados sensíveis uma vez que dados primários são utilizados para alimentar o modelo nacional, e usualmente o que se procura avaliar é a robustez da estratégia de aquisição de dados.
Escrutínio internacional	Atenção superficial, baixa prioridade.	Atenção elevada, revisão pormenorizada das recomendações.	Atenção elevada, porém representa um desafio maior para os revisores internacionais.

⁽¹⁾ Transparência, Acurácia, Completude, Comparabilidade e Consistência.

em estimativas conservadoras e pouco representativas das condições locais. Por exemplo, as emissões de metano da pecuária ou as remoções de

carbono em sistemas integrados como integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) não são adequadamente

capturadas sem dados domésticos refinados. A evolução para *Tier 2*, com fatores de emissão nacionais, e *Tier 3*, com modelos específicos, é essencial para refletir a realidade dos sistemas produtivos tropicais brasileiros, mas exige investimentos em pesquisa, infraestrutura de coleta de dados e capacitação técnica. Além disso, a baixa resolução espacial e a intermitência nas iniciativas de coleta de dados têm dificultado avanços estruturais, evidenciando a necessidade de um plano estratégico de médio e longo prazo que garanta continuidade e robustez.

Na Tabela 7.1, é apresentada uma síntese de sensibilidades e características do inventário nacional de emissões de GEE considerando os princípios de TACCC e suas peculiaridades por *Tier*.

Acerca das cores apresentadas na Tabela 7.1, elas representam uma hierarquia: verde corresponde à condição mais favorável ou menos restritiva; amarelo, a uma condição intermediária; e laranja, à condição mais desfavorável ou mais inacessível. Para cada linha específica da tabela, temos as seguintes representações:

TACCC: o *Tier 1* representa a condição verde, por ser menos restritiva; o *Tier 2* está em amarelo, pois corresponde a um nível intermediário de restrição; e o *Tier 3* aparece em laranja, em razão de um grau mais elevado de restrição.

Acurácia: a situação se inverte: a condição mais desejável é o *Tier 3* (classificado como superior), enquanto a menos favorável é o *Tier 1* (classificado como pequeno).

Custo: o *Tier 1* é representado em verde (classificado como pequeno); já o nível *Tier 3* é desfavoravelmente classificado em laranja (custo elevado).

Financiamento: segue a mesma lógica do custo — o *Tier 1* (verde) apresenta maior facilidade, enquanto o *Tier 3* (laranja) enfrenta maiores dificuldades.

Contabilização de remoções: o *Tier 1* é classificado desfavoravelmente (laranja), por não contabilizar

remoções. Já o *Tier 3* recebe a cor verde, pois permite estimativas mais objetivas.

Dados domésticos: o *Tier 1* está em verde pela facilidade de aplicação, enquanto o *Tier 3* exige investimentos maiores e dados mais acurados.

Nível de exposição de dados sensíveis: tanto o *Tier 1* quanto o *Tier 3* são representados em verde, pois, por razões distintas, protegem os dados sensíveis. Já o *Tier 2* expõe mais dados e, por isso, recebe a cor laranja.

Escrutínio internacional: o *Tier 3* aparece em amarelo, por sua complexidade, não ser verificado de forma tão detalhada. O *Tier 2* concentra o maior esforço de verificação por parte dos revisores internacionais e, por essa razão, recebe a cor laranja.

Os desafios de médio e longo prazo para desenvolvimento do monitoramento do setor agrícola no Acordo de Paris são objeto de reflexão deste documento, e as estratégias propostas nesse contexto visam apoiar a estruturação de um sistema nacional que fortaleça as instituições domésticas, com destaque para o papel da Embrapa na qualidade de coordenador técnico desse subcomponente do inventário. O objetivo deste trabalho é o estabelecimento de uma rede de colaboração com relevantes instituições de pesquisa doméstica e internacionais, academia, universidades, sociedade civil em apoio ao sistema nacional coordenado pelo MCTI.

Esse plano deve contemplar a geração contínua de dados primários com alta resolução espacial, o desenvolvimento de ferramentas analíticas avançadas e a transição para *Tier 3* em categorias-chave do setor agropecuário, como pecuária, solos manejados e uso da terra. A Embrapa, em parceria com o MCTI, o Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) e o setor privado, pode liderar esse processo, catalisando esforços de pesquisa e inovação para atender às peculiaridades dos trópicos. Nos itens que seguem, detalha-se como esse plano pode ser estruturado, os benefícios esperados e os desafios a serem enfrentados, considerando o histórico de transparência na UNFCCC e as lições aprendidas nas últimas décadas.

Contexto histórico e relevância estratégica

O compromisso do Brasil com a transparência nas emissões agrícolas remonta à assinatura da UNFCCC em 1992, consolidada pelo artigo 4 (Nações Unidas, 1992), que estabelece a obrigação de desenvolver e publicar inventários nacionais de GEE usando metodologias comparáveis. Desde então, o IPCC tem sido o principal responsável por fornecer essas metodologias, evoluindo das diretrizes de 1996 para as de 2006, que hoje formam a base do ETF do Acordo de Paris. O esforço do IPCC é contínuo no aprimoramento dessas metodologias, e essas diretrizes já foram resolvidas em 2019, contudo seu uso ainda não se tornou compulsório. O Brasil, como primeiro signatário da Convenção e pioneiro na institucionalização de uma autoridade nacional, demonstrou desde cedo sua intenção de liderar a agenda climática entre os países em desenvolvimento (não-Anexo I). Esse papel foi reforçado por três Natcoms (2004, 2010 e 2016) e três BURs (2014, 2017 e 2019), que incorporaram dados do setor agropecuário com apoio da Embrapa, utilizando inicialmente as diretrizes do IPCC de 1996 e, mais recentemente, as de 2006.

A transição para o ETF em 2024 marca um novo ciclo de exigências, com os BTRs demandando maior frequência e precisão nos relatórios. Para o setor agropecuário, isso significa aprimorar a qualidade dos dados de atividade (ex.: número de cabeças de gado, quantidade de fertilizantes nitrogenados) e dos fatores de emissão (ex.: metano entérico por animal, N_2O por quilograma de N aplicado), superando as limitações do *Tier 1*, que não captura os ganhos de eficiência ou as especificidades tropicais. O plano de monitoramento proposto busca responder a essa demanda, alinhando-se ao objetivo da UNFCCC de estabilizar as concentrações de GEE em níveis que protejam o sistema climático, a produção de alimentos e o desenvolvimento sustentável, conforme o artigo 2 da convenção. Nesse sentido, a infraestrutura

de longo prazo deve integrar ciência, tecnologia e políticas públicas para posicionar o Brasil como um líder em sustentabilidade agrícola.

Desafios dos sistemas de produção agropecuária tropicais e o papel da Embrapa

Os sistemas de produção agrícola tropicais apresentam características únicas que desafiam as metodologias do IPCC, como a alta variabilidade climática, a diversidade de solos e a intensidade das interações entre agricultura e floresta. No Brasil, essas especificidades são evidentes em práticas como o cultivo de arroz irrigado no Sul, a pecuária extensiva no Centro-Oeste e os sistemas integrados no Cerrado e Amazônia. As diretrizes de 2006, embora mais abrangentes que as de 1996, ainda dependem de dados locais para alcançar níveis superiores de precisão (*Tier 2* e 3), o que exige um sistema nacional robusto de coleta e análise de informações. A Tabela 7.2 apresenta uma análise comparativa da evolução dessas diretrizes do IPCC ao longo do tempo e fornece informações e estruturas a serem consideradas no avanço para *Tier* mais alto, com melhor atendimento aos princípios TACCC. A Embrapa tem sido essencial nesse processo, desenvolvendo tecnologias como o BioAS, o Netflora e o PlanejArroz, que podem contribuir, mesmo que indiretamente, para o aumento da precisão, consistência e completude dos inventários, embora a escala e a continuidade dessas iniciativas precisem ser ampliadas.

O plano de monitoramento deve abordar desafios, como a falta de dados primários desagregados, a dependência de fatores de emissão globais e a ausência de modelos adaptados às condições tropicais. Por exemplo, as emissões de metano da pecuária variam significativamente entre raças e sistemas de manejo, enquanto os estoques de

Tabela 7.2. Análise comparativa dos aprimoramentos entre as guias do IPCC de 1996 e 2006.

Abordagem	1996	2006
Escopo e estrutura das emissões agrícolas	As diretrizes revisadas de 1996 tratavam das emissões agrícolas principalmente em um único capítulo (Capítulo 4: Agricultura), focando em emissões diretas de solos agrícolas (ex.: óxido nitroso (N ₂ O) proveniente do uso de fertilizantes e metano (CH ₄) da fermentação entérica e manejo de esterco). As emissões indiretas e de mudanças no uso da terra eram tratadas separadamente ou de forma menos abrangente, muitas vezes nas seções sobre mudança no uso da terra e florestas (LUCF).	As diretrizes de 2006 introduziram um arcabouço mais integrado, combinando agricultura, florestas e outros usos da terra em um único setor: Afolu, abordado no Volume 4. Essa reestruturação reflete uma abordagem holística para emissões e remoções baseadas na terra, reconhecendo as interconexões entre atividades agrícolas e práticas de uso e manejo do solo. Emissões de gado, solos e queima de biomassa estão sistematicamente ligadas às categorias de uso da terra.
Refinamento da abordagem por níveis	A abordagem por <i>Tier</i> (<i>Tier 1</i> , <i>Tier 2</i> e <i>Tier 3</i>) estava presente, mas era menos detalhada. O nível 1 dependia fortemente de fatores de emissão padrão e dados de atividade simplificados, com orientações limitadas para os níveis superiores (<i>Tier 2</i> e 3), que exigiam dados específicos por país e modelo. Com foco em métodos básicos adequados para países com dados limitados.	A abordagem por níveis foi significativamente refinada e expandida. O <i>Tier 1</i> ainda usa fatores de emissão padrão, mas com valores atualizados baseados em dados científicos mais recentes. O <i>Tier 2</i> incorpora fatores de emissão específicos por região ou país e dados de atividade estratificados, oferecendo maior precisão. O <i>Tier 3</i> incentiva o uso de modelos avançados e medições adaptadas às condições locais. As diretrizes fornecem orientações mais detalhadas e exemplos para implementar níveis superiores, especialmente para sistemas agrícolas complexos.
Fermentação entérica (CH ₄)	As emissões de metano provenientes da fermentação entérica são estimadas com base nos fatores de emissão padrão do <i>Tier 1</i> , que se baseiam em categorias de gado (ex.: vacas leiteiras, gado de corte, ovelhas). Esses fatores de emissão são uniformes em grandes regiões e consideram aspectos como a dieta ou práticas de manejo.	A metodologia melhora a estimativa de CH ₄ da fermentação entérica ao refinar os fatores de emissão e expandir a abordagem do <i>Tier 2</i> . Incorpora fatores como digestibilidade do alimento, produtividade animal e sistemas de manejo (ex.: pastagem vs. confinamento). Isso permite estimativas mais precisas, refletindo as condições locais, com orientações detalhadas sobre a coleta de dados de atividade, como o consumo de ração.
Manejo de esterco (CH ₄ e N ₂ O)	As emissões provenientes do manejo de esterco eram calculadas separadamente para CH ₄ e N ₂ O, mas a metodologia utilizada era mais simples. As emissões de CH ₄ dependiam de fatores padrão ligados ao tipo de gado e zonas climáticas amplas, enquanto as emissões de N ₂ O eram estimadas apenas para esterco aplicado ao solo, com pouca atenção às emissões durante o armazenamento ou o manejo.	As diretrizes oferecem uma abordagem mais abrangente para o manejo de esterco. As emissões de CH ₄ são calculadas com base em sólidos voláteis, fatores de conversão de metano (FCMs) e sistemas de manejo específicos (ex.: lagoas anaeróbicas, compostagem, armazenamento sólido), com FCMs atualizados refletindo variabilidade climática e de sistema. As emissões de N ₂ O consideram emissões diretas (de armazenamento e tratamento) e indiretas (ex.: volatilização e lixiviação), oferecendo uma visão mais completa do ciclo do nitrogênio.

Continua...

Tabela 7.2. Continuação.

Abordagem	1996	2006
Solos agrícolas (N ₂ O)	As emissões de N ₂ O provenientes de solos agrícolas concentravam-se principalmente nas emissões diretas de fertilizantes sintéticos, aditivos orgânicos (ex.: esterco) e resíduos de culturas. As emissões indiretas (como as decorrentes de lixiviação ou deposição atmosférica) eram reconhecidas, mas calculadas com uma metodologia simplificada e fatores padrão limitados (ex.: uma fração fixa de nitrogênio perdido por lixiviação).	As diretrizes aprimoram a estimativa de emissões de N ₂ O dos solos ao distinguir mais claramente entre caminhos diretos e indiretos. As emissões diretas de N ₂ O incluem fontes adicionais, como urina e fezes de animais em pastagem, com fatores de emissão refinados. As emissões indiretas de N ₂ O são divididas em dois componentes: (1) volatilização de amoníaco e NO _x , seguida de redeposição, e (2) lixiviação/ escoamento de nitrogênio para corpos d'água. A metodologia usa fatores padrão atualizados e incentiva dados específicos por país para maior precisão.
Cultivo de arroz (CH ₄)	As emissões de CH ₄ provenientes do cultivo de arroz utilizavam fatores de emissão padrão sazonais, que consideram apenas o tipo de ecossistema, o alagamento padrão do solo antes e/ou durante o período de cultivo do arroz e a quantidade de material orgânico aportado ao solo.	As diretrizes aprimoraram as estimativas das emissões de CH ₄ provenientes do cultivo de arroz, incorporando fatores de emissão diários que consideram a duração do período de cultivo, além de fatores de escala estratificados para regimes hídricos durante e no período que antecede o cultivo, sistemas de preparo do solo, e tipos e quantidades de material orgânico aportado ao solo.
Queima de resíduos agrícolas	As emissões provenientes da queima de resíduos agrícolas (CH ₄ , N ₂ O e outros gases) eram abordadas brevemente, com fatores padrão básicos e pouca orientação sobre a coleta de dados de atividade. Essa categoria era frequentemente opcional para relatórios.	As diretrizes fornecem uma metodologia dedicada para a queima de biomassa dentro do setor Afolu, incluindo a queima de resíduos. Elas oferecem fatores de emissão padrão detalhados para CH ₄ , N ₂ O, CO e NO _x , e incentivam a estimativa com base na quantidade de biomassa queimada, eficiência de combustão e práticas locais, melhorando a consistência com outras estimativas de queima no uso da terra.
Dados e gerenciamento de incertezas	A incerteza era reconhecida, mas as orientações para quantificá-la eram mínimas. Os fatores de emissão padrão tinham amplas faixas de incerteza, e havia pouca ênfase em garantia/controle de qualidade (QA/QC).	As diretrizes colocam maior ênfase na avaliação e no gerenciamento de incertezas, fornecendo ferramentas para quantificar a incerteza em cada etapa (ex.: dados de atividade, fatores de emissão). Incluem procedimentos detalhados de QA/QC e orientações de boas práticas para aumentar a confiabilidade das estimativas de emissões agrícolas.
Integração de emissões indiretas	As emissões indiretas (por exemplo, provenientes de lixiviação ou volatilização) eram incluídas, mas tratadas com menos rigor, frequentemente por meio de um único fator agregado, e não eram consistentemente vinculadas às atividades agrícolas.	As emissões indiretas passaram a ser integradas de forma mais sistemática no subsetor agrícola. A metodologia considera explicitamente as perdas de nitrogênio por volatilização, lixiviação e escoamento, utilizando frações e fatores de emissão atualizados com base em pesquisas mais recentes, o que garante uma contabilidade mais completa do ciclo do nitrogênio.

carbono em solos tropicais dependem de práticas como o ILPF, que não são bem representadas no Tier 1. A Embrapa, por meio do seu ACT com o MCTI, está posicionada para liderar a geração desses dados, cooperando com plataformas oficiais como o Sistema de Registro Nacional de Emissões (Sirene)⁴ e integrando esforços, particularmente com o Mapa, Ministério do Desenvolvimento Agrário e Agricultura Familiar (MDA), Ministério da Pesca e Aquicultura (MPA) e o setor privado. Esse sistema nacional deve incluir parcerias estratégicas, treinamento de técnicos e engajamento da sociedade para garantir a legitimidade e a eficácia das melhorias propostas.

Benefícios esperados e integração com o setor produtivo

A implementação de um plano de monitoramento e inventário, em médio e longo prazo, trará benefícios concretos para o Brasil. Primeiro, porque aumentará a confiabilidade do inventário nacional, permitindo relatórios mais precisos e aderentes às condições tropicais, o que fortalece a credibilidade do País na UNFCCC. Segundo, porque melhorará a competitividade dos produtos agrícolas brasileiros no mercado internacional, atendendo às demandas por rastreabilidade e baixa pegada de carbono, como as impostas pela União Europeia. Terceiro, porque fornecerá informações sensíveis para o setor produtivo, orientando políticas públicas e investimentos em sustentabilidade. Por fim, porque promoverá a cooperação internacional, posicionando o Brasil como um modelo para outros países tropicais.

A integração com o setor privado é um pilar essencial desse plano, pois os produtores, além de fornecerem dados primários, são os usuários de tecnologias como o zoneamento de risco

climático (Zarc) e o TerraClass, que já demonstram impacto na gestão de riscos e na transparência. O envolvimento do Mapa, por sua vez, assegura a conexão entre ciência e política agrícola, enquanto o MCTI, como autoridade nacional, coordena a interface com a UNFCCC. Essa articulação tripartite – governo, pesquisa e setor produtivo – é a base para a infraestrutura de monitoramento proposta, garantindo que os avanços no inventário reflitam as prioridades nacionais e globais.

Caracterização de incertezas e limitações dos dados atuais

Os sistemas de produção tropicais brasileiros distinguem-se por sua ampla diversidade, abrangendo desde pastagens extensivas no Cerrado até cultivos de arroz irrigado no Sul e sistemas integrados na Amazônia. Tal heterogeneidade representa uma vantagem econômica significativa, mas também impõe desafios substanciais à quantificação precisa das emissões de GEE. As diretrizes de 2006 do IPCC, adotadas no BTR de 2024, fornecem um arcabouço metodológico para avaliar as incertezas em dados de atividade (como o tamanho do rebanho bovino) e em fatores de emissão (como as emissões de metano por animal). Contudo, a aplicação dessas diretrizes em ambientes tropicais, caracterizados por solos dinâmicos e processos biológicos intensos, revela limitações que demandam soluções adaptadas.

No âmbito do BTR, o Brasil demonstrou avanços ao detalhar as incertezas associadas ao setor agropecuário, uma das principais fontes de emissões nacionais. A fermentação entérica do gado bovino, por exemplo, constitui uma fonte expressiva de metano (CH₄), cujos valores variam conforme as condições climáticas e os tipos de pastagem. O relatório estima que os dados de atividade, como o número de cabeças de gado, apresentam incertezas relativamente baixas, entre 5 e 15%, graças

⁴ Disponível em: <http://sirene.mctic.gov.br>

a fontes estatísticas como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Todavia, os fatores de emissão exibem variações consideráveis, de 20 a 50%, devido às diferenças regionais nas características das pastagens e às influências do clima tropical.

As emissões de óxido nitroso (N_2O) provenientes de solos manejados representam outro desafio crítico. Nos trópicos, as condições de alta temperatura e umidade aceleram a liberação desse gás, especialmente em áreas com uso intensivo de fertilizantes nitrogenados. O BTR reconhece que as incertezas nessas estimativas podem atingir 70%, em decorrência da ausência de medições locais detalhadas para diferentes culturas, como soja e milho. Em regiões de clima temperado, os processos edáficos são mais previsíveis, mas, no Brasil, a variabilidade tropical exige uma abordagem mais específica e baseada em dados regionais.

As diretrizes de 2006 do IPCC preconizam a implementação de procedimentos de garantia e controle de qualidade (QA/QC) para assegurar a consistência e a confiabilidade das estimativas. No BTR, o Brasil descreve a aplicação de tais procedimentos, incluindo a validação cruzada de dados de atividade com fontes independentes, como o Mapa. Apesar disso, em sistemas tropicais, onde práticas como o sistema plantio direto (SPD) e a ILPF influenciam os estoques de carbono no solo, a dependência de fatores de emissão genéricos (*Tier 1*) compromete a precisão das estimativas.

O clima tropical, caracterizado por elevada temperatura e umidade, intensifica a atividade microbiana nos solos, afetando tanto as emissões de CO_2 quanto a capacidade de sequestro de carbono. O BTR utiliza métodos *Tier 1* para essas estimativas, mas tais abordagens não capturam adequadamente a dinâmica acelerada dos solos tropicais. A transição para o *Tier 2*, com fatores de emissão ajustados ao contexto brasileiro, como observado em parte do setor pecuário, reduz parcialmente as incertezas. Contudo, a ausência de uma infraes-

trutura nacional de monitoramento abrangente limita a extensão desses avanços.

O cultivo de arroz irrigado, predominante no Sul do País e em expansão na região Norte, exemplifica outro aspecto desafiador. Nessas áreas alagadas, a produção de CH_4 por bactérias metanogênicas é significativa, mas o BTR aponta incertezas elevadas devido à variabilidade nos períodos de inundação e nas condições climáticas locais. Em contraste com países de clima temperado, onde esses processos são mais estáveis, o ambiente tropical brasileiro exige medições específicas para aprimorar as estimativas.

A pecuária extensiva, amplamente praticada no Centro-Oeste, também apresenta particularidades tropicais. A qualidade das pastagens, influenciada pelas chuvas sazonais, altera as emissões de CH_4 entérico, mas o BTR utiliza fatores de emissão ajustados apenas parcialmente. Nos trópicos, o ciclo rápido de crescimento e degradação das pastagens difere marcadamente das condições de regiões temperadas, demandando estudos locais que ainda estão em estágio inicial (Cabral et al., 2024).

Os solos tropicais, frequentemente pobres em nutrientes, dependem de fertilizantes para sustentar a produtividade agrícola. Contudo, as chuvas intensas, características do clima tropical, promovem a lixiviação de nitrogênio, aumentando as emissões indiretas de N_2O (Swails et al., 2021). O BTR reconhece a insuficiência de dados regionais para quantificar esse processo, o que resulta em estimativas menos precisas em comparação com países que dispõem de redes de monitoramento avançadas.

Sistemas integrados como o ILPF, típicos do Brasil tropical, oferecem potencial para o sequestro de carbono, mas sua contribuição é subestimada no BTR em razão da falta de modelos adaptados. Nos trópicos, o crescimento acelerado das árvores e a interação complexa entre os componentes do sistema exigem abordagens específicas, distintas das preconizadas pelo IPCC para contextos genéricos (Costa et al., 2022).

A elevada umidade dos trópicos, especialmente em regiões como a Amazônia, amplifica as emissões indiretas de N_2O por lixiviação (Pérez et al., 2000). O BTR recorre a fatores padrão do IPCC, subestimando esse impacto em comparação com medições locais, que seriam mais adequadas ao regime hidrológico regional. Essa limitação evidencia a necessidade de investimentos em pesquisa focada nas condições tropicais.

A decomposição acelerada de dejetos animais nos trópicos, impulsionada pelo calor, constitui outra fonte de CH_4 e N_2O que o BTR não quantifica com precisão. Enquanto países como a Nova Zelândia utilizam medições diretas para esses processos, o Brasil ainda depende de médias globais, o que compromete a representatividade das estimativas no contexto tropical.

A diversidade de culturas tropicais, como a cana-de-açúcar, café e soja, introduz complexidade adicional. Cada cultivo interage de maneira distinta com o solo, mas o BTR agrega essas emissões em categorias amplas, ao contrário de países desenvolvidos, que desagregam os dados por tipo de cultura e clima. Essa generalização reflete a carência de uma infraestrutura de coleta de dados detalhada.

O BTR de 2024 representa um progresso significativo ao identificar essas lacunas e propor melhorias. Nos trópicos, a dinâmica intensa dos solos e do clima demanda um monitoramento contínuo e baseado em medições locais, em vez de depender exclusivamente de dados secundários ou suposições globais.

Comparado a países de clima temperado, o Brasil enfrenta um desafio estrutural decorrente da alta variabilidade de seus sistemas tropicais. As diretrizes de 2006 fornecem uma base sólida, mas não foram concebidas para capturar plenamente essas especificidades, o que reforça a necessidade de um enfoque adaptado no âmbito do plano proposto.

A caracterização do inventário nacional de agricultura no Brasil, utilizando o método do IPCC de 2006, enfrenta desafios específicos em razão das particularidades dos sistemas tropicais, como:

- A alta variabilidade climática, com regimes de chuva imprevisíveis e eventos extremos mais frequentes, que afetam a dinâmica das emissões.
- A diversidade de solos tropicais, muitos com alta sensibilidade à decomposição orgânica, exigindo ajustes nos fatores de emissão.
- A predominância de sistemas integrados, como o sistema ILPF, não totalmente contemplados nas categorias tradicionais do IPCC.
- As especificidades da pecuária tropical, incluindo dietas baseadas em pastagens nativas e adaptações fisiológicas do gado a climas quentes.
- A necessidade de incorporar práticas agrícolas locais, como queimadas controladas e manejo de vegetação secundária, que têm impactos distintos nos estoques de carbono.

Essas particularidades demandam adaptações metodológicas para garantir precisão no inventário. Por fim, a redução das incertezas no setor agropecuário tropical exige uma abordagem que transcenda a mera adoção de métodos internacionais. O plano de médio e longo prazo deve priorizar a geração de dados locais, o desenvolvimento de modelos ajustados ao clima brasileiro e a implementação de uma infraestrutura de monitoramento que reflita a realidade dos sistemas de produção agrícola tropicais.

Análise comparativa entre setores

O setor agropecuário brasileiro, com seus sistemas tropicais, destaca-se no BTR de 2024 como um dos setores com maior incerteza, mas essa característi-

ca não é exclusiva. Os setores de energia, Processos Industriais e Uso de Produtos (IPPU, da sigla em inglês), resíduos e Uso da Terra, Mudança no Uso da Terra e Florestas (LULUCF, da sigla em inglês) também enfrentam desafios específicos, permitindo uma análise comparativa que esclarece as particularidades tropicais e orienta o plano de monitoramento proposto. Esta seção examina as diferenças entre esses setores, com foco nas implicações para o agropecuário, sintetizadas na Tabela 7.3.

No setor de energia, que abrange fontes como usinas térmicas e combustíveis fósseis, as estimativas apresentam incertezas reduzidas, variando entre 5 e 10%. O BTR destaca a confiabilidade dos dados de atividade, como o consumo de combustíveis, obtidos de registros oficiais. Nos trópicos, as condições climáticas pouco afetam processos industriais, diferentemente do agropecuário, onde a incerteza pode atingir de 20 a 70%, por causa da influência direta do clima sobre os sistemas

Tabela 7.3. Comparativo entre o setor agropecuário e outros setores no BTR 2024.

Aspecto	Agropecuária	Energia	IPPU	Resíduos	LULUCF
Incertezas (%)	20–70% (maior variabilidade)	5–10% (baixa incerteza)	10–20% (incerteza moderada)	20–50% (alta variabilidade)	20–100% (maior faixa de incerteza)
Fonte de Dados	Dados dispersos (IBGE, Mapa), validação cruzada	Registros centralizados (consumo de combustíveis, produção energética)	Dados industriais padronizados (produção química, cimento)	Dados urbanos (aterros, efluentes), mas com lacunas rurais	Sensoriamento remoto (Prodes), mas fatores de emissão variáveis
Influência Tropical	Alta (clima afeta emissões biológicas: CH ₄ entérico, N ₂ O do solo)	Baixa (processos industriais pouco afetados)	Moderada (impactos indiretos, como logística)	Alta (decomposição acelerada de matéria orgânica em climas quentes)	Extremamente alta (desmatamento, queimadas, mudança no uso do solo)
Complexidade	Sistemas abertos, dependentes de clima, solo e biologia animal/vegetal	Processos mecânicos/controlados, previsíveis	Processos industriais fechados, monitorados	Mistura de fontes urbanas (mais controladas) e rurais (menos monitoradas)	Dinâmica de uso da terra, interação com agropecuária
Método IPCC	<i>Tier 1</i> (predominante) e <i>Tier 2</i> (parcial em pecuária)	<i>Tier 1</i> e <i>2</i> (dados precisos)	<i>Tier 1</i> e <i>2</i> (detalhamento industrial)	<i>Tier 1</i> e <i>2</i> (depende da qualidade dos dados de atividade)	<i>Tier 2/3</i> (sensoriamento remoto, mas fatores tropicais genéricos)
Desafios Principais	Falta de dados locais, fatores de emissão não adaptados a sistemas tropicais	Menor prioridade no monitoramento tropical	Baixa influência climática direta	Dados inconsistentes em áreas rurais e decomposição acelerada	Fatores de emissão variáveis em biomas tropicais
Recomendações BTR	Coleta de dados específicos, modelos adaptados, redução de dependência de <i>Tier 1</i>	Manutenção de sistemas consolidados	Aprimoramento de dados de processos químicos específicos	Aperfeiçoamento do monitoramento de resíduos rurais e efluentes	Integração de sensoriamento remoto com dados locais

biológicos, altamente sensíveis a variáveis climáticas (precipitação, temperatura e umidade), o que aumenta a variabilidade nas emissões de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) (IPCC, 2019).

A natureza biológica da agropecuária é um fator determinante de suas incertezas. As emissões de CH_4 entérico, por exemplo, dependem da dieta do gado, influenciada pelas chuvas sazonais, enquanto, no setor de energia, os processos são mecânicos e previsíveis. O BTR reflete essa diferença, destacando a necessidade de dados locais para capturar as variações tropicais.

No setor de energia, a consistência dos dados é assegurada por registros centralizados, enquanto, no setor agropecuário, o BTR recorre a validações cruzadas entre IBGE e Mapa, um esforço de QA/QC que reduz parcialmente os erros. Todavia, as condições tropicais exigem uma coleta de dados mais detalhada, que ainda está em desenvolvimento.

O setor IPPU, que inclui indústrias como a de cimento e produtos químicos, também apresenta incertezas moderadas, entre 10 e 20%. Os processos industriais são amplamente padronizados, e os dados de produção são bem documentados, conforme indicado no BTR. Nos trópicos, os impactos climáticos limitam-se a aspectos logísticos, como o transporte, enquanto, no setor agropecuário, a variabilidade biológica e ambiental introduz uma complexidade significativamente maior.

As emissões de N_2O no setor agropecuário, provenientes do uso de fertilizantes, são particularmente sensíveis às condições tropicais de calor e umidade, contrastando com o setor IPPU, onde o N_2O é gerado em processos controlados. O BTR aponta que, enquanto a indústria utiliza medições diretas, o agropecuário depende de fatores genéricos, o que eleva as incertezas em solos tropicais.

O IPPU beneficia-se de processos fechados e monitorados, contrastando com a agropecuária, em que os sistemas abertos são influenciados por variáveis climáticas e biológicas imprevisíveis. O BTR utiliza *Tier 2* para algumas categorias agropecuá-

rias, como a pecuária, mas em solos e dejetos persiste a dependência de *Tier 1*, refletindo a carência de dados tropicais específicos.

O setor de resíduos, que compreende emissões de aterros sanitários e tratamento de efluentes, apresenta incertezas comparáveis às do setor agropecuário, variando entre 20 e 50%. O clima tropical acelera a decomposição de matéria orgânica, aumentando as emissões de CH_4 , mas os dados de atividade, como o volume de resíduos descartados, carecem de precisão. No setor agropecuário, a dispersão dos dejetos animais em sistemas extensivos tropicais agrava esse desafio, demandando abordagens distintas.

No setor de resíduos, a decomposição acelerada pelo clima tropical assemelha-se à observada no setor agropecuário, especialmente no manejo de dejetos animais. Contudo, o BTR indica maior precisão nos dados urbanos de resíduos em comparação com os rurais, em que a dispersão geográfica dificulta o monitoramento. Essa distinção sublinha a necessidade de uma infraestrutura específica para o setor agropecuário tropical.

A similaridade entre os setores de resíduos e agropecuário reside na influência do clima tropical sobre a decomposição orgânica. Contudo, enquanto os resíduos concentram-se em áreas urbanas, o setor agropecuário abrange vastas extensões rurais, dificultando a aplicação de métodos uniformes. O BTR reconhece essa limitação, sugerindo melhorias na coleta de dados.

O setor LULUCF, responsável pelas emissões associadas ao uso da terra e florestas, registra as maiores incertezas, variando entre 20 e 100%. Nos trópicos, o desmatamento motivado pela especulação imobiliária ou pela expansão agropecuária e os incêndios naturais criam uma dinâmica complexa, conforme detalhado no BTR. Embora os dados de desmatamento sejam precisos graças a ferramentas como o Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (Prodes), os fatores de emissão variam amplamente devido

à diversidade de biomas, um desafio que também se reflete nas estimativas do setor agropecuário.

A interseção entre os setores LULUCF e agropecuário nos trópicos é evidente, uma vez que muitas áreas de pastagem derivam de florestas desmatadas. O BTR tenta separar as emissões de carbono do solo das emissões de CH₄ provenientes do gado, mas os modelos *Tier 1* utilizados não refletem adequadamente essa interação complexa, aumentando as incertezas em ambos os setores.

O setor LULUCF utiliza tecnologias avançadas, como o sensoriamento remoto, para monitorar o desmatamento; no entanto, os fatores de emissão permanecem incertos nos trópicos. Já no setor agropecuário, o BTR depende de mapas menos precisos para o manejo do gado e do solo, o que indica a necessidade de integrar ferramentas similares ao plano de monitoramento.

A análise comparativa revela que o setor agropecuário tropical é o mais dinâmico e incerto, devido à sua dependência de processos biológicos fortemente influenciados pelo clima. Enquanto os setores de energia e IPPU apresentam maior estabilidade, o plano de monitoramento deve priorizar o agropecuário, com adaptações às condições tropicais que o caracterizam.

Por fim, o BTR sugere que a redução das incertezas no setor agropecuário requer dados locais e modelos ajustados às particularidades tropicais. Nos demais setores, os avanços são mais lineares, mas, no agropecuário, o plano deve enfrentar a complexidade biológica e climática, garantindo uma abordagem específica e robusta.

O binômio da degradação florestal

A relação entre os sistemas de produção tropicais e as florestas é intrínseca no Brasil, e o BTR de 2024 aborda essa interação por meio do binômio “de-

gradação florestal decorrente da atividade humana versus degradação decorrente da perda natural por incêndios florestais e dinâmica ecossistêmica”. Essa dualidade é essencial para o plano de monitoramento, pois as ações antrópicas e os processos naturais se entrelaçam nos trópicos, intensificando seus efeitos e impactos, especialmente em regiões ecotonais como o Cerrado e a Amazônia, além de transições entre outros biomas, como a Caatinga, o Pantanal, a Mata Atlântica e o Pampa (Pellegrini et al., 2023).

A degradação florestal impulsionada por atividades humanas, como o desmatamento para especulação imobiliária ou expansão agropecuária, é a principal fonte de emissões no setor LULUCF (Assunção et al., 2023). O BTR estima que, em 2020, essas atividades geraram aproximadamente 1,2 Gt de CO₂ equivalente, com perdas significativas de carbono em biomas como a Amazônia e o Cerrado. Nos trópicos, a conversão de florestas em pastagens ocorre rapidamente, e os solos expostos liberam carbono em taxas mais elevadas do que nas regiões de clima temperado.

Solos tropicais que perdem sua cobertura florestal tornam-se fontes rápidas de CO₂, especialmente em ecótonos, onde as transições vegetacionais são abruptas. O BTR reconhece que os modelos atuais subestimam esses impactos, uma vez que o clima tropical acelera a decomposição em comparação às regiões temperadas, exigindo ajustes metodológicos específicos.

O setor agropecuário está diretamente ligado a esse binômio, pois muitas áreas degradadas por ação antrópica são convertidas em pastagens ou cultivos. O BTR tenta quantificar as emissões de CH₄ entérico do gado e de carbono do solo nessas áreas, mas os modelos genéricos do IPCC não capturam plenamente a complexidade tropical, resultando em incertezas elevadas que o plano de monitoramento deve abordar.

Os dados de atividade para a degradação antrópica, obtidos por sensoriamento remoto, como os

do Prodes, apresentam incertezas relativamente baixas, entre 5 e 15% (Almeida et al., 2023). Contudo, conforme já mencionado, os fatores de emissão, que estimam o carbono liberado por diferentes tipos de vegetação e solos tropicais, variam de 20 a 100%, em razão da diversidade ecológica e da falta de medições locais detalhadas, conforme registrado no BTR.

A degradação antrópica predomina como fonte de emissões no LULUCF, mas a degradação natural ganha relevância com as mudanças climáticas. Decorrente de incêndios florestais espontâneos e processos ecossistêmicos, a degradação natural possui menor impacto, mas não é negligenciável. Nos trópicos, as condições de calor e seca favorecem a combustão de biomassa, especialmente durante eventos climáticos como o El Niño (Aragão et al., 2018). O BTR destaca a dificuldade de distinguir as causas naturais das amplificadas por ações humanas, uma vez que ambas coexistem e se retroalimentam em ambientes tropicais. O relatório também identifica os ecótonos como áreas críticas, que demandam maior atenção no plano de monitoramento.

A degradação natural, monitorada a partir de imagens de satélites pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), apresenta incertezas moderadas nos dados de atividade (10 a 20%), mas os fatores de emissão associados a incêndios variam entre 20 e 50% (Aguilar et al., 2012). Nos trópicos, a intensidade do fogo e a composição da vegetação diferem entre os biomas, e o BTR destaca que, em ecótonos, essas incertezas aumentam pela falta de dados específicos.

A atividade humana amplifica os processos naturais nos trópicos, conforme evidenciado no BTR. O desmatamento deixa biomassas secas, que servem como combustível para incêndios, um fenômeno menos comum em climas frios. O plano de monitoramento deve considerar essa sinergia, priorizando estratégias que reduzam as emissões antrópicas ao mesmo tempo que mitiguem os impactos naturais exacerbados. Nas regiões

ecotonais, a interação entre os dois fatores é particularmente pronunciada. O BTR aponta que o desmatamento cria bordas florestais vulneráveis, mais suscetíveis a incêndios devido à redução da umidade local. Nos trópicos, esse processo é agravado pelo clima quente, que intensifica a degradação em um ciclo vicioso, diferentemente de ecossistemas temperados em que tais dinâmicas são menos severas.

O calor tropical torna os incêndios naturais mais intensos do que em florestas temperadas, e o BTR aponta a necessidade de dados granulares para capturar essa dinâmica em ecótonos. A integração do setor agropecuário nessas áreas exige uma abordagem que combine sensoriamento remoto com medições locais. Os incêndios naturais no Cerrado, parte da dinâmica ecossistêmica, tornam-se mais severos com secas prolongadas, intensificadas pelas mudanças climáticas. O BTR destaca que esse agravamento ultrapassa a capacidade de regeneração natural, um desafio que o plano deve enfrentar com estratégias de manejo adaptadas às condições tropicais.

A regeneração natural de florestas secundárias, entretanto, oferece potencial de remoção de CO₂, mas o BTR estima incertezas de 30 a 70%, em razão da variabilidade do crescimento vegetal nos trópicos. A agropecuária pode contribuir por meio de sistemas como o sistema ILPF, mas a falta de medições precisas limita a inclusão desses benefícios nos inventários. A mitigação da degradação antrópica, como o controle do desmatamento ilegal, é prioritária segundo o BTR; todavia, o manejo da degradação natural, como a restauração de ecótonos, também é essencial. Nos trópicos, o plano deve abordar ambos os aspectos de forma integrada, refletindo a interdependência entre os fatores.

Por fim, o setor agropecuário tropical opera nesse contexto interligado, com pastagens substituindo florestas e solos altamente sensíveis ao clima. O BTR evidencia os desafios de quantificação, e o plano de monitoramento deve desenvolver uma

infraestrutura que contemple essa realidade, capturando as emissões e remoções de maneira holística e adaptada ao ambiente tropical.

Propostas de aprimoramento

As particularidades dos sistemas tropicais brasileiros tornam o setor agropecuário um desafio singular no BTR. Entretanto, a comparação com países desenvolvidos, como Estados Unidos, União Europeia e Nova Zelândia, oferece lições valiosas. Esses países reduzem suas incertezas com infraestrutura avançada, métodos ajustados, e o plano de médio e longo prazo pode adaptar essas práticas ao contexto tropical, fortalecendo o inventário nacional e a competitividade brasileira.

Nos Estados Unidos, o modelo Daycent estima emissões de N_2O em solos com incertezas reduzidas a cerca de 10%, utilizando dados locais de clima e manejo. No Brasil, o BTR ainda depende de metodologias de *Tier 1* para essa categoria, com incertezas de até 70%. Nos trópicos, a dinâmica acelerada dos solos demanda modelos adaptados ao calor e ao regime de chuvas local, uma prioridade para o plano proposto.

A União Europeia centraliza dados agrícolas na plataforma Eurostat e utiliza satélites como o Sentinel para monitoramento. No Brasil, embora o Prodes atenda ao setor LULUCF, o monitoramento agropecuário depende de fontes como o IBGE, que carecem de granularidade. O plano deve estabelecer uma rede nacional de dados tropicais, integrando sensoriamento remoto e medições de campo.

Na Nova Zelândia, as emissões de CH_4 entérico são medidas diretamente com câmaras de fluxo, reduzindo as incertezas para 15%. Nos trópicos brasileiros, onde as pastagens variam sazonalmente, o BTR estima incertezas de 20 a 50%. O plano pode implementar tecnologias similares,

adaptadas às condições tropicais, para aprimorar a precisão.

Enquanto os países desenvolvidos investem significativamente em pesquisa e infraestrutura, o Brasil avança com recursos limitados. O BTR já utiliza metodologias de *Tier 2* na pecuária, mas as categorias de solos e dejetos permanecem no *Tier 1*. O plano deve buscar financiamento contínuo, o que dificilmente ocorrerá apenas com apoio internacional, como o oferecido pelo Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF), para sustentar medições tropicais detalhadas.

O clima tropical intensifica as emissões de N_2O e CH_4 em comparação com regiões temperadas. O BTR tenta promover ajustes, mas os modelos do IPCC não foram projetados para isso. Nos Estados Unidos, os modelos são calibrados localmente; o plano brasileiro deve seguir esse exemplo, adaptando ferramentas como o Century para biomas específicos, como o Cerrado.

A União Europeia assegura a consistência entre os países-membros, enquanto o Brasil, com sua diversidade continental, requer uma abordagem regionalizada. O BTR ainda agrega dados amplamente, mas o plano pode avançar na elaboração de inventários específicos por bioma, capturando as variações tropicais entre a Amazônia, o Cerrado e a região Sul.

A Nova Zelândia alinha suas políticas agrícolas às metas climáticas, ajustando incentivos com base em dados precisos. No Brasil, o Plano ABC+⁵ promove práticas sustentáveis, mas o BTR ainda carece de indicadores detalhados. O plano de monitoramento deve integrar essas políticas, quantificando, por exemplo, os benefícios do sistema ILPF nos trópicos.

Nos Estados Unidos, programas de extensão rural capacitam os produtores a coletar dados, enquanto, no Brasil tropical, o acesso a tais ferra-

⁵ Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais>

mentas é limitado. O plano pode contemplar o treinamento de agricultores na adoção das metodologias e protocolos do IPCC, ampliando a base de dados sobre emissões e remoções em sistemas tropicais.

Os solos tropicais têm potencial de sequestro de carbono por meio do sistema ILPF (Vogado et al., 2024), mas o BTR subestima esse benefício. Nos países de clima temperado, o carbono no solo é mais estável, enquanto nos trópicos o ciclo é mais acelerado (Lal, 2008). O plano deve investir em sensores e modelos que capturem essa dinâmica específica.

As chuvas tropicais intensas aumentam as emissões indiretas de N_2O por lixiviação (Hey et al., 2025), mas o BTR ainda utiliza fatores genéricos. A União Europeia realiza medições diretas desse processo. O plano brasileiro deve instalar redes de sensores em lavouras como as de café e soja, refletindo as condições locais.

A Nova Zelândia valoriza sua carne com dados precisos de emissões, um modelo aplicável ao Brasil tropical. O plano pode detalhar raças e pastagens, fortalecendo a competitividade no mercado global com uma agropecuária sustentável adaptada ao clima quente.

Nos Estados Unidos da América, a integração de satélites e sensores reduz as incertezas. No Brasil, esse papel tem sido desempenhado pelo Inpe; contudo, a agropecuária brasileira apresenta desafios e demandas complexas, dada a sua extensão e a diversidade de biomas e climas. O plano deve se basear numa plataforma integradora de esforços voltados ao setor agropecuário, como a iniciativa Integra Carbono Embrapa⁶ (Figura 7.1),

⁶ Lançada no aniversário da Embrapa de 2024, essa iniciativa visa integrar esforços da Embrapa e de instituições parceiras, públicas e privadas, no tema da mudança climática e agricultura, de forma evolutiva gradual, tanto no que se refere a balanço de carbono quanto a métodos e indicadores de adaptação, resiliência e sustentabilidade dos sistemas agrícolas, pecuários, florestais e suas integrações.

que possa ser interoperável com o Sirene do MCTI, para consolidar os dados tropicais.

As condições tropicais são um desafio, mas também uma oportunidade. Embora o BTR apresente avanços, o plano deve ir além, com uma infraestrutura que traduza a realidade do ambiente agrícola em números confiáveis, posicionando o Brasil como líder em sustentabilidade tropical.

A *Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2025 (COP30)* será uma vitrine para esse plano. Com incertezas reduzidas e dados robustos, o Brasil pode demonstrar que o setor agropecuário tropical é um exemplo global, apoiado pela colaboração entre a Embrapa e o MCTI e por uma visão adaptada às suas particularidades.

Soluções para inovação

Como destacado ao longo dos itens anteriores, a transparência é um pilar fundamental do regime multilateral de mudança do clima no âmbito das Nações Unidas. O foco está no estabelecimento de métricas transparentes, capazes de assegurar a comparabilidade entre os países de forma completa, consistente e com precisão.

Esse pilar é estrutural e, nesse sentido, conta com o apoio do IPCC, que, ao longo dos anos, tem produzido e revisado diretrizes metodológicas para orientar os países no desenvolvimento, monitoramento e verificação das estimativas de emissões e remoções de GEE. Atualmente, o Acordo de Paris utiliza as diretrizes do IPCC de 2006 para a elaboração dos BTRs, havendo a possibilidade de utilização dos aprimoramentos metodológicos publicados em 2019, caso o país julgue apropriado.

Desde o princípio do processo de construção das diretrizes, a transparência foi abordada pelo UNFCCC como um pilar fundamental, originalmente estruturado em documentos preparatórios e, posteriormente, detalhado nas diretrizes do



Figura 7.1. Lançada no aniversário da Embrapa de 2024, essa iniciativa visa integrar esforços da Embrapa e de instituições parceiras, públicas e privadas, no tema da mudança climática e agricultura, de forma evolutiva gradual, tanto no que se refere a balanço de carbono quanto a métodos e indicadores de adaptação, resiliência e sustentabilidade dos sistemas agrícolas, pecuários, florestais e suas integrações.

Fonte: Embrapa (2025).

IPCC de 1996 na forma de cinco componentes: Transparência, Acurácia, Comparabilidade, Completude e Consistência. Esses componentes foram utilizados para classificar as soluções tecnológicas apresentadas neste item, com base nas seguintes definições:

Transparência: refere-se à clareza e acessibilidade das informações, permitindo que os métodos, dados e pressuposições usados nas estimativas sejam compreensíveis e verificáveis por terceiros.

Acurácia: busca minimizar incertezas e erros, fornecendo estimativas o mais próximas possíveis dos valores reais, com base em dados confiáveis e métodos robustos.

Comparabilidade: garante que os dados e métodos sejam consistentes entre países ou períodos, permitindo comparações justas e padronizadas.

Completude: assegura que todas as fontes relevantes de emissões e remoções sejam incluídas, abrangendo todos os setores e gases necessários.

Consistência: refere-se à uniformidade dos métodos e dados ao longo do tempo, evitando discrepâncias injustificadas nas séries temporais.

O regime de transparência refere-se a esse conjunto de características, denominado TACCC, que, ao longo das últimas décadas, tem promovido o desenvolvimento de ferramentas e pacotes metodológicos que visam assegurar que os países possam inventariar as emissões inerentes aos seus processos econômicos. Tais aprimoramentos permitem o uso de métodos simplificados e, ao mesmo tempo, oferecem oportunidades para investir na sofisticação das metodologias, de forma a assegurar a precisa caracterização das particularidades, práticas e processos típicos do ambiente local, bem como de características sociais e econômicas.

A seguir, são apresentadas dez soluções de inovação desenvolvidas pela Embrapa e por seus inúmeros parceiros, catalogadas e classificadas conforme seu alinhamento aos princípios TACCC.

Solução 1 – TerraClass

A tecnologia TerraClass, desenvolvida para mapear e monitorar o uso da terra no Brasil, particularmente em áreas desmatadas, oferece benefícios práticos significativos para a sociedade e pode contribuir para o aumento da transparência no inventário nacional de GEE. O aprimoramento da adoção dessa tecnologia ampliará a capacidade nacional de utilização de informações de sensoriamento remoto e análise geoespacial. Assim, o TerraClass fornece insights detalhados sobre o uso da terra pós-desmatamento – como agricultura, pastagem ou regeneração natural –, permitindo o rastreamento preciso das práticas de manejo da terra em sistemas agrícolas tropicais.

Essa capacidade fortalece o cumprimento, por parte do Brasil, dos compromissos climáticos internacionais, como a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, da sigla em inglês) do Acordo de Paris, ao apoiar o desenvolvimento de estimativas de emissões de nível 3 para o setor de LULUCF.

Durante a análise técnica do BTR, conforme estabelecido nas modalidades, procedimentos e diretrizes (MPGs, da sigla em inglês) do Acordo de Paris, a tecnologia TerraClass poderá ser apresentada como um esforço doméstico voltado à geração de dados robustos e ao uso da informação para gestão e tomada de decisão baseada em evidências. Dessa forma, favorecerá iniciativas nacionais de formulação de políticas que apoiem uma compreensão mais acurada da trajetória de redução de emissões do Brasil, fornecendo dados consistentes e transparentes sobre a dinâmica do fluxo de carbono em sistemas agrícolas. Para a sociedade, a tecnologia TerraClass promove o uso sustentável da terra, apoia a segurança alimentar por meio da otimização das áreas agrícolas e reforça a credibilidade do Brasil nos mercados glo-

bais, alinhando-se a regulamentações como o Regulamento de Desmatamento da União Europeia (EUDR, da sigla em inglês). Ao ampliar a capacidade de rastreabilidade dos produtos e a resiliência aos impactos da mudança do clima, o TerraClass consolida a liderança do Brasil na agricultura tropical sustentável e na ação climática global.

Como contribui para a competitividade nacional

O TerraClass fortalece a competitividade do Brasil no cenário global ao fornecer uma base confiável e transparente para o monitoramento do uso da terra, essencial em um contexto de crescente pressão internacional por sustentabilidade e rastreabilidade nas cadeias produtivas agropecuárias:

- Certificação e acesso a mercados internacionais: os mapas gerados pelo TerraClass têm potencial para contribuir com o esforço nacional de demonstrar efetiva conformidade com compromissos climáticos, como os da NDC do Acordo de Paris, bem como para atender às exigências de mercados como o da União Europeia, que implementa regulamentações como o EUDR, exigindo produtos livres de desmatamento. Isso valoriza commodities brasileiras, como soja, carne e madeira, ampliando sua aceitação e competitividade.
- Atração de investimentos: a transparência proporcionada pelo TerraClass, alinhada às diretrizes de 2006 do IPCC, eleva a credibilidade do Brasil em relatórios como o BTR, atraindo financiamentos climáticos e investimentos verdes de instituições internacionais e fundos privados interessados em apoiar países com práticas sustentáveis.
- Eficiência na gestão territorial: ao identificar o uso da terra pós-desmatamento (ex.: agricultura, pecuária e regeneração), o TerraClass subsidia políticas públicas e estratégias do setor privado para otimizar o uso de áreas já aber-

tas, reduzindo custos de expansão da fronteira agrícola e reforçando a posição do Brasil como líder em agricultura tropical sustentável.

Como reduz a exposição ao risco e aumenta a capacidade adaptativa

O TerraClass desempenha um papel crucial na mitigação de riscos climáticos e socioeconômicos, ao mesmo tempo em que fortalece a resiliência do setor agropecuário brasileiro frente às mudanças climáticas:

- Redução de riscos regulatórios e comerciais: a capacidade de monitorar e reportar o uso da terra com precisão reduz o risco de sanções comerciais ou barreiras impostas por países importadores que exigem garantias contra o desmatamento ilegal. A robustez técnico-científica associada aos dados produzidos por soluções de inovação dessa natureza protege o agronegócio brasileiro, salvaguarda o pequeno produtor brasileiro e contribui para um ambiente de negócios favorável, além de obviamente fomentar a segurança alimentar, a renda do pequeno produtor e os predicados de sustentabilidade do produto agrícola brasileiro.
- Prevenção de desastres ambientais: ao mapear áreas desflorestadas e seus usos, o TerraClass permite identificar regiões vulneráveis à degradação (ex.: erosão, perda de fertilidade), possibilitando intervenções preventivas, como a recuperação de áreas degradadas ou a adoção de sistemas agroflorestais, que aumentam a resiliência do solo e dos ecossistemas.
- Capacidade adaptativa: os dados do TerraClass ajudam a direcionar o planejamento agrícola, ajustando o uso da terra às condições climáticas e às projeções de mudanças futuras (ex.: secas no Cerrado ou chuvas intensas na Amazônia). Isso permite ao Brasil adaptar sua produção às variações climáticas, mantendo a produtividade em cenários adversos.

Como pode ser percebida e compreendida pela sociedade a importância estratégica de seu desenvolvimento

A comunicação eficaz dos benefícios do TerraClass pode aumentar sua aceitação e reconhecimento pela sociedade brasileira e global, destacando sua relevância estratégica:

- Educação e conscientização: a disponibilização de mapas acessíveis e visuais (ex.: via plataformas online ou relatórios públicos) pode ser usada em campanhas educativas para mostrar como o Brasil monitora e gere seus biomas, promovendo uma imagem de responsabilidade ambiental. Essa ação é particularmente importante em um contexto de crescente preocupação com as mudanças climáticas entre jovens e consumidores.
- Engajamento comunitário: para agricultores e comunidades locais, o TerraClass pode ser apresentado como uma ferramenta que protege seus meios de subsistência, ao evitar o uso insustentável da terra. Para o público urbano, pode ser associado à preservação de serviços ecossistêmicos, como água e clima, que afetam a qualidade de vida nas cidades.
- Narrativa nacional de liderança: a sociedade pode compreender o TerraClass como um símbolo do pioneirismo brasileiro em tecnologias de monitoramento ambiental, reforçando o orgulho nacional e a percepção de que o País lidera esforços globais contra o desmatamento, independentemente das políticas adotadas por outras nações.

Impacto para a sustentabilidade da produção de alimentos no Brasil e no mundo

O TerraClass tem impactos diretos na sustentabilidade da produção de alimentos no Brasil, além de gerar externalidades positivas em escala

global, consolidando a liderança do País em práticas agrícolas sustentáveis.

Impactos diretos no Brasil

Uso eficiente da terra: ao mapear áreas desflorestadas e seus usos, o TerraClass incentiva a intensificação sustentável em terras já abertas (ex.: sistemas ILP/ILPF), reduzindo a necessidade de novos desmatamentos e preservando a capacidade produtiva do solo em longo prazo.

Segurança alimentar: a identificação de áreas aptas para agricultura ou pastagem sustentável garante a continuidade da produção de alimentos essenciais (ex.: soja, milho, carne), atendendo à demanda interna e às exportações, que representam uma parcela significativa da economia brasileira.

Redução de emissões: o monitoramento da regeneração natural ou do uso agrícola em áreas desmatadas contribui para estimativas mais precisas de emissões e remoções de GEE no setor de uso da terra (LULUCF), apoiando metas climáticas nacionais e a agricultura de baixo carbono.

Externalidades globais

Modelo replicável: o TerraClass, integrado ao Prodes, é um exemplo de tecnologia de monitoramento que pode ser adaptada por outros países tropicais com desafios semelhantes, como Indonésia ou República Democrática do Congo, ampliando seu impacto na redução do desmatamento global.

Contribuição ao clima global: a preservação de biomas como Amazônia e Cerrado, facilitada pelo TerraClass, beneficia o mundo ao manter ambientes naturais preservados que influenciam padrões de chuva e microclimas, impactando a agricultura em outras regiões (ex.: América do Sul e África).

Liderança independente: o investimento contínuo no TerraClass demonstra que o Brasil prioriza a sustentabilidade independentemente das políticas de outros países, posicionando-se como

líder proativo em um cenário global de ação climática desigual. Isso reforça a influência brasileira em negociações internacionais, como a *COP*, e em cadeias de suprimento globais.

Solução 2 – Zoneamento agrícola de risco climático

A tecnologia Zarc (Zoneamento agrícola de risco climático) é uma ferramenta estratégica que mapeia as melhores épocas e regiões para o plantio no Brasil, promovendo benefícios práticos para a sociedade e aprimorando a transparência do inventário nacional de emissões. Ao indicar períodos de menor risco climático para culturas como soja, milho e trigo, o Zarc reduz perdas agrícolas causadas por secas, chuvas intensas ou geadas, garantindo segurança alimentar, estabilidade de preços e proteção financeira aos produtores, por meio de programas como o Proagro e o Seguro Rural.

O uso dessa tecnologia baseia-se em um arcabouço metodológico de agregação de dados agrometeorológicos detalhados, que contribui para uma compreensão precisa dos sistemas agrícolas tropicais e que possibilita estimativas mais robustas de emissões e remoções de GEE no setor agrícola. Essa ferramenta metodológica representa uma importante fonte de dados que, no futuro, poderá apoiar a evolução para o nível *Tier 3* das diretrizes do IPCC.

Durante a análise técnica do BTR, conforme definido pelas MPGs do Acordo de Paris, o desenvolvimento desse arcabouço metodológico pelo Zarc poderá contribuir para uma compreensão acurada da trajetória de redução de emissões nacionais, ao fornecer dados confiáveis sobre práticas agrícolas sustentáveis. Entre elas, destacam-se o uso eficiente de recursos e a adoção de práticas agromômicas avançadas que favorecem a sustentabilidade ambiental e a regeneração florestal.

Para a sociedade, o Zarc fortalece a resiliência do setor agropecuário, promove a sustentabilidade e reforça a liderança do Brasil em agricultura

climaticamente inteligente, alinhando-se a exigências globais e favorecendo o acesso a mercados internacionais.

Como contribui para a competitividade nacional

O Zarc fortalece a posição do Brasil como líder na produção agrícola sustentável, fornecendo uma ferramenta estratégica que otimiza a produtividade e reduz perdas, alinhando-se às demandas globais por eficiência e responsabilidade ambiental:

- Aumento da eficiência produtiva: ao indicar as melhores épocas e regiões para o plantio de diversas culturas, o Zarc minimiza perdas por eventos climáticos (ex.: secas, geadas), reduzindo custos para agricultores e aumentando a oferta de produtos agrícolas no mercado interno e externo. Isso reforça a competitividade de commodities brasileiras, como soja, milho e café, em mercados internacionais.
- Apoio a políticas de seguro agrícola: Integrado a programas como o Proagro, Proagro Mais e o Programa de Subvenção ao Prêmio do Seguro Rural (PSR), o Zarc reduz o risco financeiro dos produtores e incentiva investimentos no setor agropecuário. Essa estabilidade econômica atrai investidores nacionais e estrangeiros, fortalecendo a economia rural.
- Credibilidade internacional: a transparência do Zarc, baseada em dados agrometeorológicos detalhados e metodologia padronizada, alinha-se às exigências de relatórios como o BTR e às diretrizes de 2006 do IPCC. Isso demonstra o compromisso do Brasil com a gestão climática, melhorando sua reputação em negociações internacionais e facilitando o acesso a mercados exigentes, como a União Europeia.

Como reduz a exposição ao risco e aumenta a capacidade adaptativa

O Zarc é, essencialmente, uma ferramenta de gestão de riscos climáticos que amplia a resiliência do setor agropecuário brasileiro frente às mudanças climáticas e a eventos extremos:

- Redução de perdas agrícolas: ao mapear zonas de risco e recomendar períodos de plantio com menor probabilidade de adversidades climáticas, o Zarc diminui a exposição dos produtores a prejuízos econômicos causados por secas, chuvas excessivas ou temperaturas extremas. Isso é particularmente relevante em biomas vulneráveis, como o Cerrado e o Semiárido.
- Aumento da capacidade adaptativa: o Zarc viabiliza ajustes proativos no planejamento agrícola, como a seleção de culturas mais resilientes ou a alteração dos calendários de plantio de acordo com projeções climáticas. Essa flexibilidade é crucial para responder às mudanças de longo prazo, como o aumento da frequência de eventos extremos previstos por modelos climáticos.
- Mitigação de riscos financeiros: a integração com programas de seguro agrícola reduz a vulnerabilidade econômica dos agricultores, garantindo compensação em caso de perdas e incentivando a continuidade da produção mesmo em cenários adversos. Isso protege tanto os pequenos produtores quanto as grandes cadeias de suprimento.

Como pode ser percebida e compreendida pela sociedade a importância estratégica de seu desenvolvimento

A comunicação clara dos benefícios do Zarc pode aumentar sua aceitação pela sociedade, destacando seu papel na segurança alimentar, na economia e na adaptação climática.

- **Conexão com a vida cotidiana:** para o público urbano, o Zarc pode ser apresentado como uma ferramenta que assegura a disponibilidade de alimentos essenciais (ex.: arroz, feijão, milho) a preços acessíveis, mesmo em anos de clima desfavorável. Campanhas educativas podem usar exemplos práticos, como a proteção contra perdas de safras que afetam o abastecimento nos supermercados.
- **Valor para os produtores rurais:** para as comunidades agrícolas, o Zarc é uma garantia de subsistência e lucratividade, facilmente compreendida por meio de treinamentos e demonstrações práticas (ex.: dias de campo). Associá-lo a programas de seguro reforça sua percepção como um “escudo” contra imprevistos.
- **Narrativa de inovação e liderança:** a sociedade pode reconhecer o Zarc como um exemplo do pioneirismo brasileiro em ciência agrícola, mostrando como o País usa tecnologia para enfrentar desafios globais. Isso pode ser destacado em mídias e eventos como a COP, promovendo orgulho nacional e conscientização sobre a importância da adaptação climática.

Impacto para a sustentabilidade da produção de alimentos no Brasil e no mundo

O Zarc exerce impactos diretos na segurança alimentar e na sustentabilidade agrícola do Brasil, com externalidades positivas que reverberam globalmente, evidenciando a liderança do País em práticas agrícolas resilientes.

Impactos diretos no Brasil

Segurança alimentar nacional: ao reduzir perdas de safras, o Zarc garante a produção contínua de alimentos básicos, atendendo à demanda de uma população superior a 200 milhões de habitantes e mantendo a estabilidade de preços no mercado interno.

Sustentabilidade agrícola: o Zarc incentiva o uso eficiente de recursos (ex.: água, solo) ao evitar plantios em períodos ou áreas de alto risco, contribuindo para a preservação da fertilidade do solo e para a redução de emissões associadas a práticas agrícolas mal planejadas (ex.: uso excessivo de combustíveis ou fertilizantes).

Apoio à agricultura de baixo carbono: ao otimizar o calendário agrícola, o Zarc reduz indiretamente as emissões de GEE relacionadas a replantios ou perdas que exigem mais insumos, alinhando-se às metas do Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono).

Externalidades globais

Modelo para outros países: o Zarc é uma tecnologia replicável em nações tropicais ou em desenvolvimento que enfrentam riscos climáticos semelhantes, como Índia, México ou países africanos. Sua metodologia pode ser adaptada para culturas locais, ampliando seu impacto na segurança alimentar global.

Contribuição ao clima global: ao aumentar a resiliência da produção agrícola brasileira, o Zarc ajuda a manter o Brasil como um dos maiores exportadores de alimentos (ex.: soja, carne, açúcar), estabilizando o suprimento global em um cenário de mudanças climáticas que ameçam outras regiões produtoras.

Liderança independente em sustentabilidade: o investimento contínuo no Zarc, que evolui desde sua criação na década de 1990, demonstra o compromisso do Brasil com a sustentabilidade, independentemente das políticas de outros países. Isso posiciona o País como um líder em agricultura climaticamente inteligente, influenciando padrões globais e negociações climáticas, como na UNFCCC.

Solução 3 – PlanejArroz

A tecnologia PlanejArroz é um software desenvolvido para otimizar o planejamento e a tomada de

decisão sobre as diversas práticas de manejo da cultura de arroz irrigado, fornecendo, ainda, uma estimativa da produtividade das lavouras para o Rio Grande do Sul, responsável por cerca de 70% da produção nacional do cereal.

A tecnologia fornece subsídios estratégicos, por meio de planejamento antecipado e tático, auxiliando na decisão sobre o momento mais apropriado para realizar as principais práticas de manejo da cultura. Oferece benefícios práticos à sociedade brasileira ao aumentar a eficiência produtiva, otimizar o uso de recursos naturais e de insumos, além de reduzir perdas e emissões de GEE. Dessa forma, contribui para que os dados de atividade e fatores de emissão reforcem a completude e acurácia do inventário nacional de emissões.

Ao integrar dados climáticos e de manejo, o PlanejArroz (Figura 7.2) orienta os produtores de arroz irrigado do Sul do Brasil quanto ao uso eficiente de recursos naturais e insumos, como água, fertilizantes, defensivos químicos e combustíveis, reduzindo custos e perdas no sistema solo-planta e garantindo maior oferta de arroz de forma sustentável. A tecnologia facilita o planejamento das lavouras e confere previsibilidade à

produção orizícola gaúcha, contribuindo para a segurança alimentar. Seus dados padronizados aprimoram a compreensão dos sistemas agrícolas, permitindo estimativas mais precisas de emissões de GEE, especialmente metano (CH_4), no cultivo do arroz, configurando-se como instrumento estratégico para a geração de dados robustos que reforcem a qualidade dos fatores de emissão e dados de atividade, essenciais para o nível *Tier 2*, segundo as diretrizes do IPCC.

Durante a análise técnica do BTR, conforme definido pelas MPGs do Acordo de Paris, a robustez no acesso a informações estratégicas promovida pelo PlanejArroz deverá contribuir para esclarecer a trajetória de redução de emissões nacionais, ao viabilizar a adoção de práticas sustentáveis de produção, como a otimização do uso de recursos naturais e insumos, refletindo-se em incremento de produtividade.

Para a sociedade, a tecnologia contribui para a sustentabilidade da produção, minimiza a suscetibilidade a riscos climáticos e posiciona o Brasil como líder em agricultura resiliente, apoiando a rastreabilidade exigida por mercados globais e negociações climáticas.

Como contribui para a competitividade nacional

O PlanejArroz eleva a competitividade do setor orizícola brasileiro ao otimizar a produção e alinhar-se às demandas globais por eficiência e sustentabilidade:

- Redução de custos e aumento da eficiência: ao otimizar o uso de recursos naturais, insumos e combustíveis fósseis e promover a gestão eficiente da lavoura, o PlanejArroz reduz os custos de produção, permitindo que os produtores ofereçam arroz a preços mais competitivos nos mercados interno e externo. Isso é crucial em um setor onde o Brasil compete com grandes exportadores, como Tailândia e Vietnã.

Foto: Paulo Lanzetta

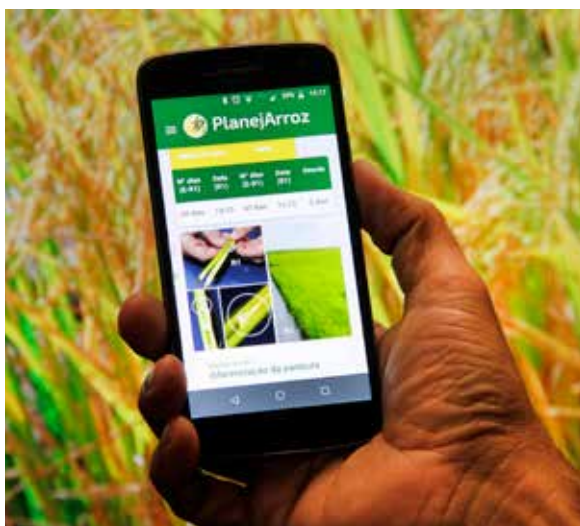


Figura 7.2. PlanejArroz - software para o planejamento do manejo e estimativa da produtividade em arroz irrigado.

- Apoio à rastreabilidade e certificação: a capacidade do PlanejArroz de gerar dados padronizados sobre manejo e produtividade facilita a certificação de práticas sustentáveis, atendendo às exigências de mercados internacionais (ex.: padrões de emissões baixas ou uso eficiente de recursos), o que valoriza o arroz brasileiro em negociações globais.
- Fortalecimento da imagem do agronegócio: a comparabilidade proporcionada pelo PlanejArroz, alinhada com as diretrizes de 2006 do IPCC, reforça a credibilidade do Brasil em relatórios como o BTR, destacando o compromisso com a agricultura de baixo carbono e atraindo investimentos e parcerias internacionais.

Como reduz a exposição ao risco e aumenta a capacidade adaptativa

O PlanejArroz é uma ferramenta de planejamento e gestão, que proporciona previsibilidade à produção e pode minimizar riscos climáticos e econômicos, ao mesmo tempo em que aumenta a resiliência da produção de arroz irrigado frente às mudanças climáticas:

- Redução de riscos operacionais: o software auxilia no planejamento e na escolha do momento correto para a implementação das melhores práticas de manejo, particularmente a adubação nitrogenada em cobertura, aumentando a eficiência produtiva e diminuindo a exposição a perdas por eventos climáticos adversos.
- Planejamento adaptativo: ao estimar a produtividade com base em dados climáticos e de manejo, o PlanejArroz permite ajustes em tempo real ou sazonais, como alterar as épocas de semeadura e das principais práticas de manejo, bem como dimensioná-las ao potencial produtivo sazonal, adaptando a produção às variações climáticas e às projeções de longo prazo (ex.: aumento da temperatura ou mudanças nos padrões de chuva).
- Estabilidade econômica: a otimização do uso de recursos e de insumos, além de promover a eficiência produtiva e o incremento da rentabilidade, viabiliza investimentos seguros e compatíveis com os retornos projetados, protegendo os produtores contra flutuações de preços no mercado global e crises de abastecimento, o que é essencial para a continuidade da produção em cenários de incerteza.

Como pode ser percebida e compreendida pela sociedade a importância estratégica de seu desenvolvimento

A comunicação dos benefícios do PlanejArroz como ferramenta de planejamento e gestão destaca sua relevância para a previsibilidade da produção e segurança alimentar, tornando-o mais compreensível e valorizado pela sociedade.

- Relevância para a segurança alimentar: para o público em geral, o PlanejArroz pode ser apresentado como uma ferramenta que subsidia a otimização da produção de arroz – alimento básico na dieta brasileira – mesmo em condições climáticas desafiadoras, conectando seu desenvolvimento à mesa dos consumidores.
- Benefício direto aos produtores: para os agricultores, o PlanejArroz pode ser promovido como um aplicativo prático que viabiliza o planejamento e a gestão eficiente da lavoura, refletindo-se em investimentos compatíveis com o potencial produtivo e, consequentemente, na otimização do retorno econômico.
- Símbolo de inovação sustentável: a sociedade pode compreender o PlanejArroz como parte do esforço da pesquisa nacional para liderar a agricultura inteligente para o clima, usando tecnologia para uma produção eficiente, resiliente e sustentável. Isso pode ser destacado em campanhas de mídia ou eventos como a COP, reforçando a percepção de que o Brasil investe em soluções práticas e sustentáveis.

Impacto para a sustentabilidade da produção de alimentos no Brasil e no mundo

O PlanejArroz exerce impactos diretos na sustentabilidade da produção de arroz no Brasil, além de gerar externalidades positivas globais, consolidando a liderança do País em agricultura resiliente e de baixo impacto ambiental.

Impactos diretos no Brasil

Eficiência no uso de recursos naturais e insumos: a promoção do uso eficiente de recursos naturais, como água, e de insumos, sejam fertilizantes, defensivos químicos e combustíveis fósseis, resulta na mitigação das emissões de GEE associadas ao cultivo de arroz irrigado, que é uma fonte expressiva de metano (CH₄) para a atmosfera, em razão de a produção ocorrer prioritariamente em solo inundado. Isso alinha-se ao Plano ABC+ e às metas climáticas nacionais.

Segurança alimentar: ao viabilizar o manejo adequado da cultura, a tecnologia PlanejArroz contribui para incrementos em produtividade e redução de perdas. Dessa forma, assegura a oferta estável de arroz para o mercado interno, alimento essencial para a dieta básica de milhões de brasileiros. E, havendo excedentes de produção, o País poderá incrementar sua participação no mercado internacional, especialmente quando a produção for acompanhada de certificação ambiental.

Preservação ambiental: a otimização das práticas de manejo reduz a pressão por expansão de áreas agrícolas, ajudando a preservar biomas, particularmente as terras baixas do Sul do Brasil, que são fundamentais para serviços ecossistêmicos (ex.: regulação hídrica).

Externalidades globais

Modelo replicável: o PlanejArroz pode ser adaptado e estendido para outros países produtores de arroz irrigado, particularmente no Cone Sul das Américas, que desenvolvem a atividade sob con-

dições climáticas e de solo semelhantes às do Sul do Brasil e enfrentam desafios análogos relativos às emissões de metano e às mudanças climáticas. Sua metodologia, baseada em dados climáticos e de manejo, é exportável, ampliando seu impacto na sustentabilidade global.

Contribuição ao clima global: a redução de emissões no setor arrozeiro brasileiro beneficia o mundo ao mitigar o aquecimento global, enquanto a estabilidade na produção de arroz ajuda a equilibrar o suprimento alimentar em um cenário de crises climáticas que afetam outras regiões.

Liderança independente: o desenvolvimento do PlanejArroz reflete o compromisso do Brasil com a inovação sustentável, independentemente das políticas de outros países. Isso posiciona o país como líder em tecnologias agrícolas que conciliam produtividade e responsabilidade ambiental, influenciando padrões globais e negociações climáticas.

O PlanejArroz foi desenvolvido em parceria entre a Embrapa Clima Temperado, o Instituto Rio-Grandense do Arroz (Irga), a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e o Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet). O software está disponível nas versões WEB (planejarroz.cpact.embrapa.br) e aplicativos iOS (disponível na App Store) e Android (disponível no Google Play).

Solução 4 - Qualidade de solo, estoque de carbono, produção em diferentes sistemas de produção agropecuária

A tecnologia Qualidade de Solo, Estoque de Carbono, Produção em Diferentes Sistemas de Produção Agropecuários, focada em ILP/ILPF, oferece benefícios práticos à sociedade por meio do aprimoramento de modelos físicos que quantificam a qualidade do solo, os estoques de carbono e a produtividade. Essa tecnologia permite otimizar a produção de grãos, carne e madeira em áreas

tropicais, reduzindo custos e aumentando a resiliência contra desastres climáticos, como secas e erosão.

Os dados detalhados contribuem para uma compreensão mais precisa dos sistemas agrícolas tropicais, fornecendo estimativas robustas de emissões e remoções de GEE no setor agropecuário, em conformidade com o nível *Tier 2* das diretrizes do IPCC.

Durante a análise técnica do BTR, conforme definido pelas MPGs do Acordo de Paris, essa tecnologia poderá ser estratégica para apoiar a avaliação da trajetória de redução de emissões nacionais, ao demonstrar o sequestro de carbono em solos e biomassa, além da mitigação de emissões por práticas integradas.

Para a sociedade, a solução respalda processos de tomada de decisão que favorecem a segurança alimentar, a preservação de biomas e o fortalecimento da competitividade do Brasil em mercados globais.

Tecnologias dessa natureza valorizam e fortalecem indicadores de sustentabilidade tropicais, estratégicos para a consolidação da posição do Brasil, ao caracterizar as particularidades dos sistemas de produção nacionais frente a exigências de sustentabilidade como o EUDR, reforçando, assim, a liderança em agricultura resiliente e adaptada aos impactos da mudança do clima.

Como contribui para a competitividade nacional

Essa solução fortalece a competitividade do agro-negócio brasileiro ao integrar produtividade, sustentabilidade e valor agregado, alinhando-se às demandas globais por sistemas agrícolas resilientes e de baixo impacto ambiental:

- **Diversificação e eficiência produtiva:** os modelos ILP/ILPF permitem a produção simultânea de grãos, carne e madeira em uma mesma área, otimizando o uso da terra e reduzindo

custos operacionais. Isso aumenta a rentabilidade por hectare, tornando os produtos brasileiros (ex.: soja, carne bovina, eucalipto) mais competitivos nos mercados nacionais e internacionais.

- **Acesso a mercados exigentes:** a capacidade de quantificar estoques de carbono e melhorar a qualidade do solo, conforme demonstrado por essa tecnologia, atende a regulamentações como o EUDR e a certificações de baixa emissão (ex.: Carne Baixo Carbono). Isso valoriza as exportações brasileiras, sobretudo para países que priorizam a sustentabilidade.
- **Atração de investimentos verdes:** a completez dos dados sobre emissões e remoções, alinhada às diretrizes de 2006 do IPCC, eleva a credibilidade do Brasil em relatórios como o BTR, atraindo financiamentos climáticos e parcerias com instituições internacionais interessadas em sistemas agropecuários sustentáveis.

Como reduz a exposição ao risco e aumenta a capacidade adaptativa

A solução reduz vulnerabilidades climáticas e econômicas ao promover sistemas produtivos mais resilientes e diversificados, fortalecendo a capacidade de adaptação do setor agropecuário:

- **Redução de riscos climáticos:** sistemas ILP/ILPF, suportados por essa tecnologia, melhoram a fertilidade do solo e aumentam os estoques de carbono, tornando as áreas menos suscetíveis a eventos extremos, como secas ou erosão. A presença de árvores (ILPF) e a rotação de culturas (ILP) também regulam o microclima e a umidade, protegendo a produção.
- **Mitigação de riscos econômicos:** a diversificação da produção (grãos, carne, madeira) reduz a dependência de uma única fonte de renda, amortecendo os impactos de oscilações de mercado ou falhas de safra. Isso é especial-

mente valioso em regiões como o Cerrado, onde o monocultivo pode ser mais vulnerável.

- Capacidade adaptativa: os modelos físicos permitem testar diferentes arranjos espaciais e temporais, adaptando os sistemas às condições locais e às projeções climáticas (ex.: aumento da temperatura ou mudanças nos padrões de chuva). Essa flexibilidade assegura a continuidade da produção em cenários adversos.

Como pode ser percebida e compreendida pela sociedade a importância estratégica de seu desenvolvimento

A comunicação eficaz dos benefícios dessa solução pode destacar seu papel na segurança alimentar, na preservação ambiental e na inovação, ganhando apoio da sociedade brasileira e global:

- Conexão com a segurança alimentar e o meio ambiente: para o público urbano, a tecnologia pode ser apresentada como uma forma de produzir mais alimentos (grãos e carne) enquanto preserva o solo e o clima, garantindo a oferta de produtos essenciais e a saúde dos ecossistemas que influenciam diretamente a qualidade de vida (ex.: água, ar).
- Valor prático para os produtores: para os agricultores, a solução pode ser demonstrada como uma estratégia que aumenta a lucratividade e protege as terras contra a degradação, com exemplos concretos (ex.: fazendas-modelo ILPF) demonstrados em feiras ou programas de extensão rural.
- Narrativa de liderança sustentável: a sociedade pode perceber essa tecnologia como um marco do pioneirismo brasileiro em integrar agricultura, pecuária e floresta, mostrando como o País enfrenta as mudanças climáticas com soluções práticas. Esse potencial pode ser explorado em campanhas educativas ou eventos internacionais, como a *COP*, reforçando a relevância estratégica da ciência agrícola tropical.

Impacto para a sustentabilidade da produção de alimentos no Brasil e no mundo

Essa solução tem impactos diretos na sustentabilidade da produção agropecuária no Brasil, com externalidades positivas que posicionam o País como líder global em sistemas integrados e resilientes.

Impactos diretos no Brasil

Produtividade sustentável: a melhoria da qualidade do solo e o aumento dos estoques de carbono em sistemas ILP/ILPF garantem a produção de longo prazo de grãos, carne e madeira, reduzindo a necessidade de desmatar novas áreas e preservando biomas como o Cerrado e a Amazônia.

Segurança alimentar: a diversificação e a resiliência dos sistemas asseguram a oferta contínua de alimentos básicos (ex.: milho, soja, carne), atendendo à demanda interna e às exportações, que representam parcela significativa da economia brasileira.

Redução de emissões: ao capturar carbono no solo e na biomassa (árvores no ILPF), a solução mitiga as emissões de GEE do setor agropecuário, alinhando-se às metas do Plano ABC e aos compromissos climáticos nacionais, como a NDC.

Externalidades globais

Modelo replicável: os modelos físicos de ILP/ILPF podem ser adaptados por outros países tropicais (ex.: Colômbia, Nigéria), oferecendo alternativa sustentável ao monocultivo e ao desmatamento, com impactos positivos na redução global de emissões e na segurança alimentar.

Contribuição ao clima global: o sequestro de carbono em solos brasileiros beneficia todo o planeta ao mitigar o aquecimento global, enquanto a produção diversificada contribui para estabilizar a oferta de alimentos em mercados internacionais.

Solução 5 – Netflora

A tecnologia Netflora (Figura 7.3), voltada para inventários florestais semiautomatizados e para o monitoramento de sistemas de manejo na Amazônia, oferece benefícios práticos à sociedade ao promover a gestão sustentável de recursos florestais e aprimorar a transparência do inventário nacional de emissões.



Foto: Evandro Orfanó

Figura 7.3. O Netflora, metodologia desenvolvida pela Embrapa, reúne um conjunto de algoritmos treinados com inteligência artificial (IA) para reconhecer espécies florestais. Realizado com base em características botânicas, disponíveis em um banco de dados, esse aprendizado permite identificar árvores de interesse comercial e indicar a sua localização exata na floresta.

Ao gerar dados precisos sobre estoques de carbono, emissões e uso da terra, o Netflora facilita a certificação de produtos florestais, como madeira e castanha, sob padrões internacionais, apoiando a economia local e a segurança alimentar de comunidades amazônicas. Esses dados detalhados contribuem para uma compreensão mais precisa dos sistemas agrícolas tropicais, especialmente em interfaces floresta-agricultura, ao quantificar remoções e emissões de GEE no setor de LULUCF, em conformidade com o nível *Tier 2* das diretrizes do IPCC.

Durante a análise técnica do BTR, conforme definido pelas MPGs do Acordo de Paris, o Netflora poderá ser um instrumento estratégico para conferir robustez às extrapolações associadas ao uso de recursos florestais, o que pode contribuir para a compreensão, por parte dos revisores internacionais, sobre o impacto do manejo florestal sustentável no sequestro de carbono na NDC nacional.

Para a sociedade, a tecnologia preserva a Amazônia, reduz pressões sobre terras agrícolas e fortalece a credibilidade do Brasil em mercados globais, contribuindo para o entendimento internacional acerca de indicadores de sustentabilidade tropicais e, assim, reduzindo pressões regulatórias como as definidas pelo EUDR.

Essa é uma, entre várias tecnologias, que apoiam a consolidação da liderança do Brasil em bioeconomia tropical e ação climática global do Brasil.

Como contribui para a competitividade nacional

O Netflora fortalece a competitividade do Brasil ao aprimorar a gestão florestal sustentável e a rastreabilidade ambiental, atendendo às demandas globais por produtos tropicais de origem responsável:

- Valorização de produtos florestais: ao permitir inventários florestais precisos e consistentes, o Netflora facilita a certificação de madeira e produtos florestais não madeireiros (ex.: castanha, açaí) sob padrões internacionais como o Forest Stewardship Council (FSC). Essa certificação aumenta o valor de mercado desses produtos e amplia o acesso a mercados exigentes, como os da Europa e dos Estados Unidos.
- Credibilidade em relatórios climáticos: a consistência dos dados gerados pelo Netflora, em conformidade com as diretrizes de 2006 do IPCC, reforça a confiabilidade do Brasil em relatórios como o BTR, elemento essencial para negociações internacionais e para a prevenção de barreiras comerciais relacionadas ao desmatamento.

- Atração de investimentos: a capacidade de espacializar emissões e monitorar estoques de carbono em sistemas de manejo florestal atrai financiamentos climáticos (ex.: REDD+, do inglês *Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*) e parcerias com organizações globais interessadas em conservação e agricultura sustentável, consolidando a posição do Brasil como líder em bioeconomia tropical.

Como reduz a exposição ao risco e aumenta a capacidade adaptativa

O Netflora reduz vulnerabilidades associadas à exploração florestal e às mudanças climáticas, promovendo uma gestão mais resiliente dos recursos naturais na Amazônia:

- Redução de riscos regulatórios e ambientais: o monitoramento preciso do uso da terra e das emissões evita práticas ilegais ou insustentáveis, diminuindo o risco de sanções internacionais e multas por desmatamento. Isso protege a economia florestal brasileira de perdas associadas a restrições de mercado ou reputação.
- Prevenção de degradação florestal: ao planejar e executar inventários de forma semiautomatizada, o Netflora otimiza o manejo florestal, evitando a exploração excessiva que compromete a regeneração natural e aumenta a vulnerabilidade a incêndios ou à perda de biodiversidade, riscos comuns em sistemas tropicais.
- Capacidade adaptativa: a espacialização das emissões e dos estoques de carbono permite ajustes no manejo florestal com base em dados atualizados (ex.: mudanças climáticas que afetam o crescimento das árvores ou a umidade do solo), garantindo a sustentabilidade da produção em longo prazo e apoiando a adaptação às variações climáticas na Amazônia.

Como pode ser percebida e compreendida pela sociedade a importância estratégica de seu desenvolvimento

A comunicação dos benefícios do Netflora pode destacar seu papel na conservação da Amazônia, na economia local e na liderança ambiental brasileira, ganhando apoio da sociedade nacional e internacional:

- Preservação da Amazônia: para o público urbano, o Netflora pode ser apresentado como uma ferramenta que protege a floresta amazônica – essencial para o clima e a biodiversidade – ao mesmo tempo em que permite o uso sustentável de seus recursos, conectando essa proteção a questões como qualidade do ar e chuvas que afetam todo o País.
- Benefício para comunidades locais: para populações rurais e indígenas da Amazônia, o Netflora pode ser compreendido como um apoio direto à economia florestal (ex.: madeira manejada, produtos da sociobiodiversidade), promovendo meios de subsistência sem destruir a floresta, com exemplos práticos em treinamentos ou cooperativas.
- Imagem de inovação e responsabilidade: a sociedade pode ver o Netflora como um símbolo do compromisso brasileiro com a ciência e a sustentabilidade, mostrando como o País lidera a gestão de florestas tropicais em um contexto global de crise climática. Isso pode ser enfatizado em campanhas educativas ou eventos como a COP, fortalecendo o orgulho nacional.

Impacto para a sustentabilidade da produção de alimentos no Brasil e no mundo

Embora o Netflora esteja focado em sistemas florestais, seus efeitos indiretos contribuem para a sustentabilidade da produção de alimentos no Brasil e geram externalidades positivas em escala global, especialmente em regiões tropicais.

Impactos diretos no Brasil

Sustentabilidade da bioeconomia: o manejo florestal de precisão, apoiado pelo Netflora, garante a oferta sustentável de produtos florestais que complementam a produção de alimentos (ex.: castanha-do-pará, óleos vegetais), essenciais para a segurança alimentar e para a economia de comunidades amazônicas.

Redução de pressões sobre terras agrícolas: ao promover o uso sustentável de florestas, o Netflora diminui a necessidade de conversão de áreas florestais em pastagens ou lavouras, preservando solos e ecossistemas que prestam serviços ecossistêmicos fundamentais à agricultura (ex.: polinização, regulação hídrica).

Mitigação climática: a espacialização das emissões e o aumento dos estoques de carbono em áreas manejadas contribuem para as metas do Plano ABC+ e da NDC brasileira, reduzindo o impacto climático do setor LULUCF, que afeta a produção agrícola.

Externalidades globais

Modelo para florestas tropicais: o Netflora pode ser adaptado por outros países com florestas tropicais (ex.: Indonésia, Congo), oferecendo uma metodologia consistente para inventários florestais e manejo sustentável, com impacto direto na redução global de emissões e na conservação da biodiversidade.

Contribuição ao clima e à agricultura global: a preservação da Amazônia, facilitada pelo Netflora, beneficia o mundo ao manter um dos maiores sumidouros de carbono do planeta e regular padrões climáticos que afetam a produção de alimentos em outras regiões (ex.: chuvas na América do Sul e na África).

Liderança independente: o investimento no Netflora reflete o compromisso do Brasil com a sustentabilidade tropical, independentemente das políticas de outros países. Essa iniciativa posiciona o País como líder em tecnologias de mane-

jo florestal, influenciando padrões globais e negociações climáticas, como na UNFCCC.

Solução 6 – Tecnologia de bioanálise de solo

A tecnologia de Bionanálise de Solo (BioAS), que integra análises biológicas (enzimas) e químicas para avaliar a saúde do solo, oferece benefícios práticos à sociedade ao otimizar o manejo agrícola e aprimorar a transparência do inventário nacional de emissões (Figura 7.4).



Foto: Fabiano Bastos

Figura 7.4. A tecnologia Embrapa de Bioanálise de Solo ou BioAS agrega o componente biológico às análises de rotina de solos e tem como base a análise da atividade das enzimas arilsulfatase e beta-glicosidase, respectivamente associadas aos ciclos do enxofre e do carbono.

Ao fornecer dados detalhados sobre fertilidade, ciclagem de nutrientes e estoques de carbono em solos tropicais, o BioAS permite ajustes precisos na aplicação de fertilizantes, reduzindo custos e aumentando a produtividade de culturas como soja, milho e cana-de-açúcar, essenciais para a segurança alimentar.

Esses dados contribuem para uma compreensão mais precisa dos sistemas agrícolas tropicais, possibilitando estimativas robustas de emissões e remoções de GEE no setor agropecuário, e certamente contribuirão com avanços futuros do inventário na direção de incorporação de métodos

tropicais compatíveis com o nível *Tier 3* das diretrizes do IPCC.

Durante a análise técnica do BTR, conforme definido pelas MPGs do Acordo de Paris, o BioAS é um exemplo de avanço técnico-científico que fortalece os dados domésticos, incluindo fatores de emissão e dados de atividade. Esses insumos podem contribuir para extrapolações e avaliações acerca da qualidade das informações disponíveis para tomadores de decisão. A disponibilidade desse tipo de dado e ferramenta representa um subsídio relevante para o desenvolvimento de políticas que promovam a redução de emissões nacionais, ao quantificar o sequestro de carbono em solos mais saudáveis e a diminuição do uso de insumos.

Para a sociedade, a tecnologia promove a sustentabilidade, protege contra a degradação do solo e fortalece a competitividade do Brasil em mercados globais, ampliando o entendimento acerca dos processos biológicos que ocorrem em solos agrícolas tropicais e, assim, reduzindo a pressão internacional pela definição unilateral de indicadores de sustentabilidade como ocorre com as exigências do EUDR.

Enquanto isso o BioAS, compondo um repertório de tecnologias desenvolvidas pela ciência agrícola nacional, reforça a liderança do País em agricultura tropical resiliente e adaptada aos impactos negativos da mudança do clima.

Como contribui para a competitividade nacional

O BioAS fortalece a competitividade do agronegócio brasileiro ao oferecer uma análise detalhada e precisa da saúde do solo, otimizando a produção e alinhando-se às demandas globais por práticas agrícolas sustentáveis.

- Aumento da eficiência agrícola: ao integrar parâmetros biológicos (enzimas) e químicos, o BioAS permite um manejo mais preciso do solo, ajustando a aplicação de fertilizantes e outros insumos às reais necessidades das cul-

turas. Isso reduz custos e aumenta a produtividade por hectare, tornando produtos tropicais brasileiros (ex.: soja, milho, café) mais competitivos no mercado global.

- Certificação e rastreabilidade: a precisão na avaliação da qualidade do solo e dos estoques de carbono (um subproduto do manejo sustentável) facilita a certificação de práticas de baixo impacto ambiental, atendendo a exigências de mercados internacionais, como a União Europeia, que valoriza a sustentabilidade na origem dos produtos.
- Diferencial tecnológico: o BioAS posiciona o Brasil como líder em tecnologias de análise de solo tropical, um diferencial competitivo em negociações internacionais e parcerias com países que buscam soluções para solos degradados ou de alta complexidade, típicos de regiões tropicais.

Como reduz a exposição ao risco e aumenta a capacidade adaptativa

O BioAS reduz vulnerabilidades relacionadas à degradação do solo e às mudanças climáticas, promovendo sistemas agrícolas mais resilientes e adaptáveis.

- Redução de riscos de degradação: a avaliação precisa da saúde do solo (via enzimas e índice de qualidade do solo – IQS) identifica áreas em risco de perda de fertilidade ou erosão, permitindo intervenções preventivas, como rotação de culturas ou adição de matéria orgânica. Isso é crucial em solos tropicais, naturalmente pobres em nutrientes e suscetíveis ao desgaste.
- Mitigação de riscos climáticos: solos mais saudáveis, com maior capacidade de ciclagem e armazenagem de nutrientes, são mais resilientes a eventos extremos (ex.: secas prolongadas ou chuvas intensas), comuns em regiões tropicais como o Cerrado. O BioAS ajuda a manter a produtividade mesmo sob estresse climático.

- Capacidade adaptativa: ao fornecer dados detalhados sobre o solo, o BioAS permite ajustes no manejo agrícola com base em condições locais e projeções climáticas (ex.: aumento da temperatura ou redução da umidade), adaptando a produção às mudanças de longo prazo e garantindo a sustentabilidade em cenários adversos.

Como pode ser percebida e compreendida pela sociedade a importância estratégica de seu desenvolvimento

A comunicação dos benefícios do BioAS pode destacar seu papel na produtividade agrícola, na conservação ambiental e na inovação, fortalecendo o apoio da sociedade brasileira e internacional.

- Conexão com a alimentação e o meio ambiente: para o público urbano, o BioAS pode ser apresentado como uma tecnologia que assegura a produção de alimentos ao cuidar da “base” da agricultura – o solo – enquanto protege o meio ambiente. Essa abordagem o conecta a questões como segurança alimentar, qualidade da água e proteção da biodiversidade.
- Valor prático para os agricultores: para os produtores rurais, o BioAS pode ser promovido como uma ferramenta que aumenta a produtividade e reduz custos com fertilizantes, com exemplos concretos apresentados em dias de campo ou por meio de cooperativas (ex.: “mais soja com menos insumos”).
- Símbolo de liderança científica: a sociedade pode compreender o BioAS como uma prova do pioneirismo brasileiro em agricultura tropical sustentável, demonstrando como o País usa ciência avançada para enfrentar desafios globais, como a degradação do solo e as mudanças climáticas. Isso pode ser enfatizado em campanhas educativas ou eventos internacionais.

Impacto para a sustentabilidade da produção de alimentos no Brasil e no mundo

O BioAS tem impactos diretos na sustentabilidade da produção agrícola no Brasil, com externalidades positivas que reforçam a liderança do País em práticas agrícolas resilientes e de baixo carbono.

Impactos diretos no Brasil

Produtividade de longo prazo: a melhoria da saúde do solo, avaliada pelo BioAS, garante a fertilidade e a capacidade produtiva ao longo do tempo, aspecto essencial para culturas tropicais como soja, milho e cana-de-açúcar, que sustentam a economia e a segurança alimentar nacional.

Remoção de carbono: solos mais saudáveis, com maior atividade biológica (enzimas) e capacidade de armazenagem, sequestram mais carbono, reduzindo as emissões líquidas do setor agropecuário e alinhando-se às metas do Plano ABC e da NDC brasileira.

Redução de insumos: o manejo mais preciso diminui a dependência de fertilizantes químicos, reduzindo custos e impactos ambientais (ex.: lixiviação de nitrogênio), ao mesmo tempo que contribui para a preservação de ecossistemas tropicais como o Cerrado e a Amazônia.

Externalidades globais

Modelo replicável: o BioAS pode ser adaptado por outros países tropicais (ex.: Tailândia, Quênia) que enfrentam desafios semelhantes com solos frágeis, oferecendo uma abordagem inovadora para a gestão sustentável e fortalecendo a resiliência alimentar global.

Contribuição ao clima global: o aumento do estoque de carbono em solos agrícolas brasileiros beneficia o planeta ao mitigar o aquecimento global, enquanto a produção eficiente de alimentos tropicais estabiliza o suprimento em um cenário de crises climáticas que afetam outras regiões.

Liderança independente: o investimento no BioAS reflete o compromisso do Brasil com a sustentabilidade, independentemente das políticas de outros países. Isso posiciona o País como líder em tecnologias de precisão para solos tropicais, influenciando padrões globais e negociações climáticas, como na UNFCCC.

Solução 7 - Inventários de ciclo de vida de produtos agropecuários

A tecnologia Inventários de Ciclo de Vida (ICV) de produtos agropecuários oferece benefícios práticos à sociedade ao quantificar os impactos ambientais de produtos como milho, soja, leite e carne, promovendo a sustentabilidade e aprimorando a interoperabilidade de bases de dados. Essas bases podem alimentar o sistema nacional de informação e, assim, apoiar a transparência do inventário nacional de emissões.

Ao avaliar detalhadamente as emissões de GEE desde a produção até o destino final, o ICV identifica pontos críticos e oportunidades de eficiência, permitindo aos produtores otimizar o uso de recursos, reduzir custos e minimizar impactos ambientais. Esses dados robustos contribuem para uma compreensão mais precisa dos sistemas agrícolas tropicais, fornecendo estimativas detalhadas de emissões e remoções no setor agropecuário. A interoperabilidade de bases de dados e o desenho coordenado de experimentos e análises potencializam o esforço analítico nacional e podem representar uma importante área de aprimoramento e cooperação.

Durante a análise técnica do BTR, conforme definido pelas MPGs do Acordo de Paris, a existência de protocolos corporativos, como a Plataforma Integrada Carbono Embrapa, poderá unificar esforços para reduzir as emissões de GEE no Brasil e aproximar as estratégias de aquisição de dados realizadas no contexto do ICV do esforço de inventário e transparência observados no BTR.

Para a sociedade, a tecnologia garante a disponibilidade de escolher alimentos com menor pegada

ambiental, fortalece o desenvolvimento de indicadores tropicais de sustentabilidade e aumenta a competitividade do Brasil em mercados globais. Além disso, amplia o debate sobre sustentabilidade, destacando a natureza estratégica dos sistemas de produção agrícola tropical, em consonância com instrumentos de mercado como o EUDR.

O desenvolvimento de ICV reforça a liderança em agricultura tropical sustentável baseada em dados robustos e evidências científicas, apoiando políticas públicas e oferecendo para a sociedade ferramentas robustas de rastreabilidade, exigência cada vez mais premente de consumidores conscientes.

Como contribui para a competitividade nacional

Os ICV dos produtos agropecuários fortalecem a competitividade do agronegócio brasileiro ao oferecer dados detalhados, acurados e rastreáveis, alinhando-se às demandas globais por transparência na comprovação de produção agropecuária sustentável

Como reduz a exposição ao risco e aumenta a capacidade adaptativa

A construção de ICV viabiliza a quantificação das emissões de GEE dos sistemas de produção, a identificação de pontos críticos e de oportunidades para aumento de eficiência e mitigação das emissões.

- Redução ao risco: a avaliação dos impactos ambientais de um produto, desde sua produção até o destino final, permite identificar áreas críticas, como o uso excessivo de recursos ou as emissões de GEE, possibilitando melhorias na eficiência de recursos, redução de custos e mitigação de impactos ambientais.
- Capacidade adaptativa: o ICV é um norteador de adoção de práticas agropecuárias mais sustentáveis, tendo como base o aumento da eficiência e a ampliação da resiliência às mudanças climáticas.

Além disso, ele antecipa riscos regulatórios e de mercado, contribuindo para atender a demandas por produtos mais sustentáveis e promovendo uma produção mais eficiente e competitiva.

Como pode ser percebida e compreendida pela sociedade a importância estratégica de seu desenvolvimento

A solução favorece a disponibilização de dados concretos sobre o impacto ambiental dos produtos agropecuários, permitindo que ações direcionadas à mitigação sejam tomadas para ter mais eficiência na gestão de recursos naturais em diferentes processos e fases do ciclo de vida, por exemplo, no caso do leite. Também pode orientar políticas públicas voltadas à sustentabilidade e à redução de riscos ambientais e econômicos no setor.

- Conexão com a alimentação e o meio ambiente: os ICV são ferramentas para compreender os impactos ambientais da produção agropecuária e nortear a implementação de práticas e tecnologias para mitigação das emissões de GEE e aumento da eficiência produtiva, garantindo a disponibilidade de alimentos.
- Valor prático para os agricultores: para os produtores, a solução oferece informações detalhadas sobre os sistemas de produção de referência, que indicam os pontos de melhorias de eficiência e redução de custos, como o aumento da circularidade no uso dos insumos e na destinação de resíduos gerados.
- Símbolo de liderança científica: os ICV são reconhecidos globalmente por seguir normas e diretrizes internacionais de padronização da metodologia. O Brasil possui inventários das principais commodities agrícolas (milho, soja, cana-de-açúcar, café), que representam sistemas de produção típicos caracterizados por regiões produtoras, e também de inventários de produtos pecuários, como leite e carne.

Impacto para a sustentabilidade da produção de alimentos no Brasil e no mundo

Impactos diretos no Brasil

Os ICV permitem quantificar as emissões ao longo do ciclo de vida e nortear estratégias de mitigação, de forma a otimizar o uso dos recursos, o que reduz custos e diminui a pressão sobre o meio ambiente, como os riscos associados à escassez ou aumento das emissões de GEE. Além disso, fornecem subsídios para o atendimento a regulamentos ambientais mais rigorosos e a demandas de mercado por produtos com menor impacto ambiental.

Externalidades globais

Os ICV conferem identidade aos produtos brasileiros e transparência às informações acerca dos impactos ambientais e práticas sustentáveis aplicadas aos sistemas de produção, promovendo a competitividade no mercado

A construção de ICV de produtos agropecuários coloca o Brasil em destaque por gerar informações acuradas que demonstram o desempenho ambiental da produção. A solução é informação estratégica para a efetiva implementação do desenvolvimento sustentável nas práticas do setor agropecuário brasileiro e oferece dados para subsidiar milhares de estudos que consideram a perspectiva de ciclo de vida de produtos associados ao agronegócio nacional e internacional.

Solução 8 – RumenGases

A tecnologia RumenGases, desenvolvida no Laboratório Multiusuário de Bioeficiência e Sustentabilidade da Pecuária (LMBS) da Embrapa Gado de Leite, oferece benefícios práticos à sociedade ao quantificar e mitigar as emissões de metano entérico em ruminantes, promovendo a sustentabilidade e aprimorando a transparência do inventário nacional de emissões. Utilizando métodos de ponta, como câmaras respirométricas e técnicas

de gás traçador, o RumenGases gera dados precisos sobre emissões em sistemas pecuários tropicais, permitindo a avaliação de estratégias de alimentação e de aditivos naturais que reduzem o metano, além de simular condições de estresse climático para aumentar a eficiência produtiva.

Esses dados contribuem para avançar no diagnóstico e nas estratégias de mitigação do metano entérico em ruminantes no Brasil, possibilitando uma compreensão mais precisa dos sistemas agrícolas tropicais e fornecendo estimativas detalhadas de emissões de GEE no setor pecuário, alinhadas ao nível *Tier 2* das diretrizes do IPCC.

Durante a análise técnica do BTR, conforme definido pelas MPGs do Acordo de Paris, o RumenGases é um exemplo de investimento nacional no aprimoramento científico de ponta, que fortalece a geração de dados estratégicos para apoiar o processo de tomada de decisão. A capacidade analítica e instrumental oferecida pelo RumenGases coloca o País em posição de liderança competitiva para sistemas tropicais de pecuária e constitui uma ferramenta estratégica para apoiar ajustes na trajetória de redução de emissões nacionais, ao demonstrar o impacto de práticas sustentáveis, como dietas otimizadas e manejo adaptado.

Para a sociedade, a tecnologia garante a produção de alimentos nutritivos, como leite e carne, com menor impacto ambiental; fortalece a competitividade do Brasil; amplia o entendimento acerca dos predicados de sistemas de produção tropical em mercados globais; e reforça a liderança em pecuária sustentável, apoiando a segurança alimentar e a mitigação climática.

Como contribui para a competitividade nacional

O LMBS, construído no campo experimental da Embrapa Gado de Leite, representa um dos setores com as mais importantes estruturas de pesquisa para avaliação de metano entérico, incluindo a metodologia *Gold Standard* das câmaras respiro-

métricas, o gás traçador hexafluoreto de enxofre (SF_6), técnicas *in vitro* e coleta *spot* por máscara facial. Trata-se de uma das referências mundiais entre os laboratórios que estudam esse gás. As pesquisas executadas permitiram a padronização de métodos e a criação de um banco de dados nacional sobre emissões de metano em ruminantes em clima tropical.

Como reduz a exposição ao risco e aumenta a capacidade adaptativa

A estrutura do LMBS contempla quatro grandes áreas de pesquisa de ruminantes: metabolismo e impactos ambientais da pecuária; biotecnologia e ambiência; pecuária de precisão; e saúde animal. Com linhas de pesquisas em cada uma dessas áreas, dispõe de equipamentos de alta tecnologia para realização de análises.

- Redução ao risco: as pesquisas em avaliação e mitigação de emissões de GEE, alinhadas às exigências nutricionais e à eficiência alimentar, visam ao estabelecimento de estratégias para a melhoria da eficiência dos sistemas de produção pecuária e à redução das emissões de GEE. Além disso, possibilitaram a avaliação de mais de 300 compostos naturais com potencial para se tornarem aditivos alimentares mitigadores de metano entérico, bem como de várias estratégias de alimentação voltadas à redução das emissões desse gás.
- Capacidade adaptativa: a estrutura possui capacidade de pesquisa para simular condições de estresse nos sistemas de produção, antecipando e buscando soluções para a adaptação desses sistemas frente às adversidades climáticas. As linhas de atuação incluem o direcionamento para o melhoramento genético, a eficiência reprodutiva, a saúde e o bem-estar animal, bem como a eficiência da produção.

A solução também dispõe de uma câmara climática para bovinos adultos, que permite estudos sobre estresse térmico, avaliando o efeito de con-

dições estressantes sobre o desempenho dos animais e testando estratégias para reduzir os impactos desse estresse. Dessa forma, contribui-se para a diminuição da intensidade das emissões de GEE por unidade de produto gerado (leite ou carne).

Como a importância pode ser percebida e compreendida pela sociedade

A solução possui alcance nacional, caráter aberto e abordagem interdisciplinar, sendo capaz de criar e prover soluções integradas para projetos científicos e tecnológicos. É um dos poucos laboratórios no mundo com câmaras respirométricas em operação atualmente, o que possibilita a execução de pesquisas com a metodologia mais precisa para estimar as exigências energéticas de ruminantes criados em condições tropicais, bem como as emissões de metano em diferentes estratégias de manejo, tanto para grandes quanto para pequenos ruminantes.

- Conexão com a alimentação e o meio ambiente: a solução tem um papel fundamental na análise dos impactos ambientais da produção de alimentos em escala global. A pecuária, embora responsável por uma parcela das emissões de GEE, também é essencial para a produção de alimentos de alto valor nutritivo. Ao quantificar essas emissões, as pesquisas fornecem dados essenciais para compreender como os sistemas alimentares contribuem para as mudanças climáticas e permitem desenvolver estratégias de mitigação mais eficazes e sustentáveis. Assim, a integração entre ciência climática e segurança alimentar se torna crucial para promover práticas agrícolas que reduzam os impactos ambientais sem comprometer a produção e o abastecimento de alimentos à população.
- Valor prático para os agricultores: a solução oferece para os produtores acesso a informações e estratégias que aumentam a eficiência da produção de leite em sistemas tipicamente brasileiros, considerando raças, dietas e clima carac-

terísticos do País. Também favorece a adoção de tecnologias adaptadas às condições locais para a mitigação das emissões de GEE.

Impacto para a sustentabilidade da produção de alimentos no Brasil e no mundo

Impactos diretos no Brasil

A solução é um alicerce para avançar na construção de inventários nacionais de emissão da pecuária para *Tier 3*. A estrutura possui capacidade de gerar informações contínuas sobre as emissões de GEE, resultando em dados mais refinados e específicos para as estimativas do Brasil. Isso contribui para a definição de estratégias assertivas para mitigação, baseadas em informações adaptadas às características de clima, rebanho e sistemas de produção brasileiros.

Externalidades globais

O reconhecimento das pesquisas avançadas sobre emissões, mitigação e adaptação da pecuária tem promovido parcerias internacionais.

A solução busca posicionar o Brasil na vanguarda da eficiência em produção animal, geração de dados acurados e mitigação das emissões.

O projeto RumenGases, conduzido pela Embrapa Gado de Leite entre 2011 e 2016, teve como objetivo avançar no diagnóstico e nas estratégias de mitigação do CH₄ entérico em ruminantes no Brasil. O projeto viabilizou a criação do Complexo Multiusuário de Bioeficiência, referência em avaliação de CH₄ entérico, especializado em metodologias como câmaras respirométricas, gás traçador SF₆, técnicas *in vitro* e coleta *spot* por máscara facial (Figura 7.5).

Isso permitiu a padronização de métodos e a criação de um banco de dados nacional sobre emissões de CH₄ em ruminantes. A capacidade do laboratório de gerar informações continuamente constitui uma base sólida para a construção de inventários nacionais da pecuária em nível *Tier 3*.

Foto: Márcio Brigatto



Figura 7.5. Laboratório Multiusuário de Bioeficiência e Sustentabilidade da Pecuária (LMBS) da Embrapa Gado de Leite, Coronel Pacheco, MG.

O custo de implementação dos ICV representa um desafio, especialmente para pequenos produtores tropicais. No Brasil, empresas agroalimentares estão investindo na ampliação da coleta de dados para a construção de ICV. A Embrapa, em parceria com o Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, vem desenvolvendo e disponibilizando ICV de produtos agropecuários para acesso público e gratuito, em formato reconhecido internacionalmente.

Solução 9 - Novos indicadores de alteração do estoque de carbono de solos florestais

A tecnologia Novos Indicadores de Alteração do Estoque de Carbono de Solos Florestais oferece benefícios práticos à sociedade ao fornecer dados nacionais precisos sobre os estoques de carbono em solos de florestas plantadas, promovendo a sustentabilidade e aprimorando a transparência do inventário nacional de emissões.

Ao desenvolver índice nacionais de alteração de carbono (IAC) para plantios florestais e para conversões de pastagem para eucalipto, a tecnologia revela que os sistemas florestais brasileiros sequestram mais carbono do que se estimava, reduzindo a percepção de perdas no solo. Esses dados detalhados contribuem para uma compreensão mais pre-

cisa dos sistemas agrícolas tropicais, especialmente em interfaces floresta-agricultura, ao quantificar remoções e emissões de GEE no setor de LULUCF, alinhados ao nível *Tier 2* das diretrizes do IPCC.

Durante a análise técnica do BTR, conforme definido pelas MPGs do Acordo de Paris, o esforço nacional para a adequada caracterização dos processos de mudança do uso da terra e florestas, com o desenvolvimento de índices nacionais, reforça a robustez do processo de tomada de decisão nacional. Essa iniciativa apoia a demonstração do impacto positivo do reflorestamento no sequestro de carbono como ação estratégica, que deveria ser ampliada e apoiada ao longo dos próximos anos.

Para a sociedade, a solução fortalece a competitividade de produtos florestais em mercados globais, atende a exigências como o EUDR, reduz pressões sobre desmatamento e apoia políticas públicas como o Plano ABC+, consolidando a liderança do Brasil na produção florestal sustentável e na mitigação climática.

Como contribui para a competitividade nacional

Para a estimativa dos estoques de carbono do setor de reflorestamento, o Brasil atualmente adota um índice de alteração de estoques de carbono do solo (IAC) de 0,673, originalmente indicado para culturas agrícolas em estudos internacionais. Esse fator penaliza os plantios florestais, sugerindo que mais de 30% do carbono armazenado no solo é perdido pela conversão de uso. Um conjunto de dados nacionais foi analisado, contemplando nove estados (RS, SC, PR, SP, ES, MG, BA, PA e MS), cuja área total de florestas plantadas soma atualmente mais de 8,6 milhões de hectares. Com base nesses dados, o IAC para conversão de uso para plantio florestal é de 0,95; em conversões específicas, como pastagem para eucalipto, observa-se um ganho de 11% no estoque de carbono do solo (IAC 1,11). O novo índice foi aplicado no quarto inventário nacional. A adoção de valores que refletem a realidade nacional quanto ao sequestro de carbono é es-

sencial para a confiabilidade dos dados nacionais oficiais de emissões e remoções de GEE, além de servir de base para orientar a elaboração e a execução das políticas públicas de controle e mitigação das mudanças climáticas, agregando melhorias contínuas às ferramentas de gestão dessas políticas. No contexto das crescentes exigências dos mercados consumidores quanto às políticas e aos compromissos ambientais, essas novas informações são cruciais para construir cenários quantitativos de emissões para transações comerciais, garantindo a competitividade nacional.

Como reduz a exposição ao risco e aumenta a capacidade adaptativa

A representação da realidade nacional, em termos de sistema de produção e emissões de GEE, é primordial para orientar políticas públicas e ações efetivas de controle das mudanças do clima, seja na vertente de mitigação, seja na vertente de adaptação climática. Os parâmetros que comprovam o uso dessas informações em favor da capacidade adaptativa e redução do risco agrícola envolvem, entre outros aspectos, o estímulo à ampliação da área desses sistemas de produção mais resilientes, fundamentados na sua capacidade de mitigação e adaptação climática, como preconizado pelo Plano ABC+. Isso contribui para reduzir a pressão sobre a abertura de novas áreas e sobre a exploração de espécies nativas e, conseqüentemente, o desmatamento. Além disso, esses parâmetros mitigam riscos financeiros, auxiliando no cumprimento das exigências de reporte de emissões de GEE relacionadas a produtos de exportação, o que garante acessibilidade e competitividade nos mercados internacionais; além de possibilitar compensações de emissões e incentivos à continuidade da produção. Esses benefícios são importantes tanto para pequenos produtores quanto para grandes empreendimentos florestais.

Como pode ser percebida e compreendida pela sociedade a importância estratégica de seu desenvolvimento

Um número cada vez maior de organizações está atento aos pactos globais relacionados à mudança do clima e ao desenvolvimento sustentável, buscando novos padrões de produção que minimizem os impactos no ambiente e aumentem a eficiência ambiental dos processos. Cada vez é mais importante comunicar as ações de sustentabilidade por parte de organizações, como reflexo de consumidores mais exigentes, da necessidade de transparência e de responsabilidade socioambiental. Diante da crescente cobrança internacional por métricas de sustentabilidade mais transparentes e atualizadas, principalmente para os produtos de exportação e frente aos novos mecanismos de taxaço de carbono, esses indicadores mais precisos e representativos são apropriados pelo setor produtivo por meio de ferramentas e outros mecanismos que incorporam as novas informações. A geração desses novos indicadores é parte das ações da Embrapa, que assegura respaldo científico e técnico indispensável para sua aceitação frente às exigências legais e regulatórias dos processos.

Impacto para a sustentabilidade da produção de alimentos no Brasil e no mundo

Aqui são destacados impactos diretos e externalidades em outros países/global. O Brasil lidera e investe em sustentabilidade independentemente das visões ou rumos adotados por outros países.

A solução busca trazer transparência e representatividade na construção de inventários fidedignos à realidade nacional, avançando também metodologicamente rumo ao nível mais detalhado de informações – *Tier 3*. Contribui, ainda, para a definição de estratégias orientadas e assertivas para a mitigação das emissões de GEE, baseadas em informações geradas em território nacional,

que refletem as tecnologias e as condições edafoclimáticas brasileiras. Especificamente em termos de externalidades globais, os novos indicadores fornecem subsídios para a defesa da produção sustentável no País, com geração de renda, justiça social e cuidado com o ambiente. Dessa forma, junto com outras informações, têm o potencial de posicionar o Brasil na vanguarda da produção florestal de alta tecnologia e controle das mudanças do clima, por meio da geração de dados acurados e do fomento à mitigação das emissões de GEE.

Solução 10 - Carbon Matte

A tecnologia Carbon Matte estabelece um sistema de base de dados que registra, organiza e calcula estoques de carbono e emissões de GEE em sistemas de produção de erva-mate, oferecendo benefícios práticos à sociedade ao promover a gestão sustentável e aprimorar a transparência do inventário nacional de emissões.

A solução apoia a quantificação de emissões de CO₂, CH₄ e N₂O, bem como a avaliação dos estoques de carbono em ervais, permitindo que produtores e empresas identifiquem pontos críticos, otimizem o uso de insumos e reduzam impactos ambientais, garantindo a produtividade e a valorização de produtos derivados da erva-mate.

Esses dados detalhados contribuem para uma compreensão mais precisa dos sistemas agrícolas tropicais, especialmente dos sistemas agroflorestais, ao fornecer estimativas robustas de remoções e emissões no setor de LULUCF dessa espécie nativa de relevância social, alinhadas ao nível *Tier 2* das diretrizes do IPCC.

Durante a análise técnica do BTR, conforme definido pelas MPGs do Acordo de Paris, a disponibilidade da base de dados gerada pelo Carbon Matte apoia o desenvolvimento de fatores de emissão e de dados de atividade domésticos, o que fortalece as estimativas de emissões e apoia o processo de tomada de decisão necessário para justificar a trajetória de redução de emissões nacionais. A tecnologia apoia o esforço nacional para caracterizar

a sustentabilidade dos sistemas de produção tropical e contribuir para a redução de emissões, ao demonstrar o potencial mitigador da erva-mate e apoiar políticas como o Plano ABC+.

Para a sociedade, a tecnologia fortalece a competitividade em mercados globais, demonstrando predicados específicos dos sistemas de produção tropical em face das exigências de sustentabilidade, como EUDR, e reforça a liderança do Brasil em bioeconomia tropical, promovendo a sustentabilidade e a valorização da biodiversidade.

Como contribui para a competitividade nacional

A Carbon Matte é uma planilha eletrônica para registro, organização, cálculo, por meio de uma rotina computadorizada automática, e análise de dados de sistemas de produção de erva-mate, com aplicação para estimativas dos estoques de carbono e dos fluxos de GEE.

A ferramenta foi desenvolvida de forma completa, incluindo todos os compartimentos que armazenam carbono, bem como as fontes de emissão dos principais GEE (CO₂ – dióxido de carbono; CH₄ – metano; e N₂O – óxido nitroso). A erva-mate é uma espécie nativa de importância econômica e social. Ambientalmente, representa uma opção para exploração florestal sustentável em áreas de preservação permanente e de reserva legal, com alto potencial para a geração de serviços ecossistêmicos, como o armazenamento de carbono. A política nacional de mudança do clima e o próprio Plano ABC+ elencaram a cultura da erva-mate como potencialmente mitigadora, o que suscita maior entendimento sobre a relação entre a produção da erva-mate e a mitigação das emissões de GEE. Essa perspectiva justifica a necessidade de uma ferramenta de cálculo específica.

Nessa perspectiva, a ferramenta destina-se ao uso por profissionais da área de avaliação de impacto ambiental, produtores rurais que queiram gerenciar suas remoções e emissões de carbono, bem

como empresas e certificadoras que busquem mensurar seus ativos, contabilizar emissões e estoques de carbono ou participar de campanhas corporativas que visem atender aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. As aberturas de novos mercados implica num gerenciamento não apenas da produção, mas também de como o produto é produzido.

Como reduz a exposição ao risco e aumenta a capacidade adaptativa

A Carbon Matte quantifica as emissões de GEE dos sistemas de produção com erva-mate, diagnosticando pontos críticos e identificando oportunidades de melhoria da eficiência produtiva e da mitigação das emissões. Quanto ao risco, um diagnóstico acurado do ciclo de produção permite identificar quais insumos são os responsáveis pela maior parte das emissões, buscando alternativas menos impactantes que garantam a produtividade, possibilitando melhorias na eficiência do uso dos recursos, redução de custos produção e mitigação dos impactos ambientais. Quanto à capacidade adaptativa, a Carbon Matte é um norteador de práticas agropecuárias mais sustentáveis, que promovem tanto a eficiência quanto a resiliência dos sistemas produtivos diante das mudanças climáticas. Além disso, subsidia e antecipa a gestão de riscos regulatórios e de mercado, contribuindo para atender a demandas que garantam a competitividade do setor florestal.

Como pode ser percebida e compreendida pela sociedade a importância estratégica de seu desenvolvimento

A ferramenta está disponível para uso pelo setor produtivo e já tem servido de referência para grandes empresas que industrializam a matéria-prima da erva-mate, garantindo transparência ambiental à produção e indicando aspectos que demandam intervenção para melhorar a performance do sistema produtivo. A ferramenta vem sendo incorpora-

da pelos agricultores por meio da assistência técnica e de organizações não governamentais (ONGs) que atuam no setor. Entre os benefícios do seu uso para gerar parâmetros de sustentabilidade dos ervais, destaca-se a possibilidade de construir cenários para avaliar práticas e técnicas empregadas no cultivo, considerando a sensibilidade das intervenções nas remoções de carbono e nas emissões de GEE. O uso da ferramenta, além de ser um mecanismo de apoio à gestão climática na propriedade, também pode subsidiar a valoração dos produtos derivados da erva-mate, culminando em maior retorno financeiro para o produtor.

Impacto para a sustentabilidade da produção de alimentos no Brasil e no mundo

O setor ervateiro passa por um momento ímpar, considerando a valorização da espécie no mercado interno, a descoberta de novas propriedades nutracêuticas e o desenvolvimento de novos produtos, fatores que têm culminado no aumento da demanda global, ampliando o mercado consumidor e até mesmo impulsionando pedidos de registro de origem. Esse panorama, sem dúvida, estimula novas oportunidades para que os benefícios ambientais, principalmente no enfrentamento da mudança do clima, também sejam reconhecidos. A Carbon Matte reflete essa possibilidade de forma objetiva, ao quantificar os estoques de carbono e as emissões de GEE, posicionando o Brasil como protagonista na valorização da sua biodiversidade e na geração de informações acuradas que demonstram o desempenho ambiental da produção.

Perspectivas futuras

Avanço para *Tier 3* – Oportunidades e desafios nos sistemas tropicais

A transição do Brasil para métodos *Tier 3* nas estimativas de emissões de GEE no setor agropecuá-

rio constitui um avanço estratégico para a consolidação de um plano e de uma infraestrutura de monitoramento e inventário em médio e longo prazo, sobretudo no novo contexto do Acordo de Paris e dos BTRs. Conforme as diretrizes de 2006 do IPCC, o *Tier 3* utiliza modelos específicos e dados locais de alta resolução, oferecendo maior precisão em comparação com os métodos *Tier 1* (fatores padrão) e *Tier 2* (fatores nacionais). Nos sistemas tropicais, caracterizados por elevada variabilidade climática e biológica, essa abordagem é essencial para capturar a dinâmica de processos como a fermentação entérica do gado e as emissões de óxido nitroso (N_2O) de solos manejados, que frequentemente são subestimadas pelos métodos atuais.

Uma das principais oportunidades do *Tier 3* reside na possibilidade de refletir as especificidades dos trópicos, como o rápido ciclo de carbono em solos de regiões de clima quente e úmido e as interações complexas em sistemas integrados, como o sistema ILPF. O BTR de 2024 já sinaliza avanços no uso de *Tier 2* para a pecuária, mas a adoção de modelos regionais calibrados, como o Century ou DNDC (do inglês *DeNitrification-DeComposition*) adaptados ao Brasil, poderá reduzir incertezas de 20 a 70%, aproximando-se dos níveis observados em países desenvolvidos (10 a 15%). Esse avanço fortalecerá a credibilidade do inventário nacional e o alinhamento com as metas da NDC, além de potencialmente ampliar a aceitação dos produtos agrícolas brasileiros no comércio internacional.

Os sistemas tropicais, no entanto, impõem desafios significativos à implementação do *Tier 3*. A diversidade de biomas – Amazônia, Cerrado, Caatinga, Pampa – e a heterogeneidade das práticas agrícolas, como o cultivo de arroz irrigado e a pecuária extensiva, demandam uma infraestrutura robusta de coleta de dados primários. A ausência de redes de monitoramento contínuo, como câmaras de fluxo para medir metano (CH_4) ou sensores de N_2O no solo, limita a geração de dados representativos (Assis et al., 2020), um obstá-

culo que o plano deverá superar com investimentos estratégicos.

Outro desafio é o custo elevado associado ao desenvolvimento e à validação de modelos *Tier 3*. Nos trópicos, a variabilidade sazonal das chuvas e a intensa atividade microbiana exigem medições frequentes e espacialmente detalhadas, contrastando com os sistemas temperados, em que os processos são mais estáveis (Davidson; Artaxo, 2004). Conforme destacado anteriormente neste capítulo, países como a Nova Zelândia superaram essa barreira por meio de parcerias público-privadas e financiamento contínuo, um modelo que o Brasil poderia adaptar, possivelmente com apoio do GEF.

A oportunidade de posicionar o Brasil como líder em agricultura tropical sustentável é um incentivo poderoso. O *Tier 3* permitiria quantificar com precisão os benefícios de práticas como o sistema ILPF, que sequestram carbono em solos tropicais a taxas superiores às de regiões de clima frio (Medeiros et al., 2022). Essa evolução não apenas apoiaria o processo de transparência exigido no Acordo de Paris, mas também reforçaria a competitividade dos produtos brasileiros no mercado internacional, onde a rastreabilidade de emissões é cada vez mais valorizada.

A capacitação técnica representa um desafio adicional. A transição para *Tier 3* exige profissionais treinados em modelagem avançada e análise de dados, uma lacuna no Brasil tropical, onde a formação ainda se concentra em abordagens convencionais. O plano deve incluir programas de treinamento, aproveitando a expertise da Embrapa, que desde 1992 contribui para os inventários nacionais, a fim de criar uma força de trabalho alinhada às demandas do ETF.

A integração de tecnologias avançadas, como sensoriamento remoto e redes de sensores, oferece uma oportunidade para superar as limitações espaciais dos trópicos (Bustamante et al., 2016). O BTR já utiliza ferramentas como o Prodes para o

setor de LULUCF, mas o setor agropecuário carece de sistemas similares. O plano pode expandir plataformas como o Sirene, do MCTI, interoperáveis com iniciativas da Embrapa, para consolidar dados tropicais em tempo real, reduzindo incertezas e ampliando a cobertura.

Por fim, o avanço para *Tier 3* nos trópicos enfrenta o desafio da continuidade política e financeira. A experiência do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (Nações Unidas, 1998), que perdeu força após 2012 em razão de instabilidades econômicas e políticas, serve de alerta. O plano deve estabelecer um arcabouço institucional resiliente, com compromissos de longo prazo entre o governo, a Embrapa e o setor privado, para garantir que os avanços científicos se traduzam em benefícios climáticos e econômicos sustentáveis.

Utilização dos dados do BTR para o cumprimento do Acordo de Paris

Os dados do BTR de 2024, submetido à UNFCCC, são um recurso fundamental para avaliar o cumprimento dos compromissos brasileiros no Acordo de Paris, especialmente no setor agropecuário tropical. O ETF exige relatórios bienais detalhados, e o BTR oferece uma base para monitorar o progresso das metas da NDC, como a redução de emissões e a promoção de práticas sustentáveis. Nos trópicos, onde a agropecuária é tanto uma fonte de GEE quanto um pilar econômico, e fonte estratégica de produção de alimentos e nutrição, esses dados podem orientar políticas públicas e investimentos estratégicos (Cabral et al., 2024).

Uma oportunidade clara é o uso do BTR para identificar lacunas nas estimativas de emissões tropicais, como as de CH₄ provenientes da pecuária e de N₂O oriundas de solos manejados, que ainda dependem de *Tier 1* em muitas categorias. O relatório quantifica incertezas (20 a 70%) e destaca a necessidade de dados locais, permitindo ao plano priorizar categorias-chave para o *Tier 3*. Isso alinharia o Brasil ao objetivo do Artigo 2 da UNFCCC

(Nações Unidas, 1992), de estabilizar as concentrações de GEE sem comprometer a produção de alimentos.

O clima tropical, com sua alta variabilidade, complica a avaliação do progresso. O BTR estima emissões brutas do setor agropecuário, mas subestima as remoções de carbono em sistemas como a ILPF, por falta de modelos adaptados (Carvalho et al., 2020). O plano pode usar esses dados como ponto de partida para desenvolver indicadores específicos, monitorando práticas sustentáveis que respondam às metas da NDC e às demandas do 6º Relatório do IPCC (2021) (AR6) para neutralizar as emissões líquidas [de CO₂] até 2050.

Um desafio significativo é a integração dos dados do BTR com políticas nacionais, como o Plano ABC+. Cabe destacar que a Ação Nacional de Mitigação Apropriada – Nama (da sigla em inglês) brasileira, apresentada na *COP15*, em Copenhague, incluiu a agricultura por influência da Embrapa, mas o BTR ainda não reflete plenamente os impactos dessas políticas. O plano deve estabelecer uma ponte entre ciência e implementação, usando os dados para calibrar incentivos e medir resultados em sistemas tropicais dinâmicos.

A transparência internacional oferece uma oportunidade para o Brasil destacar suas soluções tropicais. O BTR, ao detalhar fontes como a fermentação entérica (com *Tier 2* em algumas regiões), pode ser usado para negociar apoio técnico e financeiro no âmbito do Acordo de Paris. O plano deve estruturar submissões à UNFCCC, inspirando-se em exemplos como o de Fiji (4/CP.23), enfatizando a resiliência da agricultura tropical e atraindo investimentos para o monitoramento avançado.

A complexidade dos sistemas tropicais, como o arroz irrigado e a pecuária extensiva, representa um desafio para a consistência temporal dos dados do BTR (Cerri et al., 2024). As chuvas sazonais e as altas temperaturas alteram as emissões anualmente, dificultando comparações com paí-

ses temperados. O plano pode investir em séries históricas refinadas, integrando dados do IBGE e da Embrapa, para assegurar a comparabilidade exigida pelo ETF.

O uso do BTR para engajar o setor privado é uma oportunidade pouco explorada. Nos trópicos, onde a agropecuária é altamente relevante no contexto econômico, os dados podem orientar estratégias de mercado, como a certificação de produtos com baixa pegada de carbono. O plano deve criar canais de comunicação bidirecionais, inspirados no MDL, para que produtores tropicais contribuam com dados e se beneficiem de políticas alinhadas ao Acordo de Paris.

Por fim, o desafio da escala nacional exige uma abordagem pragmática. O BTR abrange um país continental, mas os sistemas tropicais variam entre biomas. O plano deve desagregar os dados por região, usando o BTR como base para políticas locais que cumpram a NDC, enquanto mantêm a segurança alimentar – um dos pilares do Artigo 2 da UNFCCC (Nações Unidas, 1992) – em um cenário climático cada vez mais instável.

Inventários de Ciclo de Vida e Pegada de Carbono nos trópicos

Os ICV são a base para as estimativas de pegada de carbono de produtos agrícolas e representam uma ferramenta promissora para um plano e uma infraestrutura de monitoramento e inventário no médio e longo prazo. Nos sistemas tropicais, onde produtos como carne, soja e arroz têm alta demanda global, os ICV permitem quantificar emissões desde o cultivo até o consumo, atendendo às exigências de rastreabilidade do mercado internacional. O BTR de 2024 oferece uma base inicial, mas o plano deve expandi-la para refletir as particularidades tropicais.

Uma oportunidade significativa é o uso de ICV para valorizar produtos sustentáveis dos trópicos. O Brasil é um dos poucos países que possui ICV para seus principais produtos agropecuários,

apresentados em nível regional. Sistemas como ILPF, que combinam produção e sequestro de carbono, podem ser certificados com base em dados precisos de emissões e remoções. Este capítulo destaca a transição para uma economia descarbonizada como uma janela de competitividade, na qual o plano pode posicionar o Brasil como fornecedor de alimentos de baixa pegada de carbono, alinhado às metas do Acordo de Paris.

Os desafios tropicais, como a variabilidade climática e a diversidade de práticas produtivas, dificultam a unificação de ICV nacionais. Os ICV de produtos agropecuários brasileiros foram e estão sendo construídos em âmbito estadual ou regional. O BTR estima emissões agregadas, mas não detalha etapas do ciclo de vida, como transporte ou processamento de produtos agrícolas. O plano deve adotar metodologias fundamentadas nas diretrizes do IPCC para o cálculo de emissões da pecuária, possibilitando gerar fatores de emissão tropicalizados que capturem a dinâmica ambiental regional.

A integração de dados locais é uma oportunidade altamente relevante. Nos trópicos, as emissões de CH₄ da pecuária e de N₂O dos fertilizantes variam por região e os ICV baseados em Tier 3 poderiam refletir isso com precisão. O plano pode aproveitar a expertise da Embrapa, que desde 1992 contribui para os inventários nacionais, para criar uma base de dados tropicais que sustente certificações reconhecidas globalmente e, ao mesmo tempo, possa dar suporte à elaboração do inventário nacional e do BTR como um todo.

O custo de implementação dos ICV representa um desafio, especialmente para pequenos produtores tropicais. Diferentemente de países desenvolvidos, onde o financiamento é abundante, o Brasil enfrenta limitações orçamentárias. O plano deve buscar parcerias com o setor privado e incentivos do Plano ABC+, reduzindo barreiras financeiras e promovendo a adesão em larga escala.

Por fim, a demanda internacional por transparência oferece uma oportunidade estratégica. O BTR já atende ao ETF, mas os ICV podem ir além, respondendo a regulações como as da União Europeia sobre cadeias de suprimentos livres de desmatamento. O plano deve alinhar os inventários tropicais a esses padrões, usando tecnologias como *blockchain* para rastrear produtos desde os sistemas agrícolas até o consumidor final.

A complexidade biológica dos trópicos, como a rápida decomposição de resíduos e o crescimento acelerado de culturas, é um desafio para os ICV. O BTR subestima esses processos, e o plano deve incorporar medições diretas, como sensores de fluxo, para criar inventários que reflitam a realidade tropical, diferenciando o Brasil de sistemas temperados mais previsíveis.

As estratégias de aprimoramento do BTR devem ser formuladas de forma dinâmica, concomitantemente com um planejamento de prioridades a serem implementadas conforme a capacidade de mobilização de recursos financeiros previsíveis e suficientes. Parceiras com o setor produtivo podem ser estratégicas para acelerar avanços e ampliar resultados.

Para aprimorar o plano de monitoramento e refletir as particularidades tropicais nos próximos ciclos bianuais do BTR, podem ser implementadas, em médio e longo prazo, as seguintes estratégias:

- Desenvolvimento de fatores de emissão regionais, utilizando medições diretas de fluxo de CO₂, CH₄ e N₂O em sistemas como arroz irrigado, pecuária extensiva e ILPF, de modo a capturar a variabilidade sazonal e a intensa atividade microbiana dos trópicos, em vez de depender de fatores genéricos do IPCC.
- Identificação de lacunas de informação e desenvolvimento de estratégias para aprimoramento de dados de atividade. Fortalecimento da infraestrutura corporativa de bases de dados da Embrapa, com aprimoramento da gestão da informação, na consolidação de indica-

dores e no desenvolvimento de ferramentas (APIs) que permitam a interoperabilidade de bases e a geração de relatórios para suporte à gestão e comunicação nacional.

- Expansão de redes de monitoramento contínuo, integrando sensoriamento remoto (ex.: satélites Sentinel-2, LiDAR) com sensores in situ em biomas como Amazônia, Cerrado e Pantanal, para mapear emissões e sequestro de carbono com alta acurácia, especialmente em regiões ecotonais e sistemas integrados como ILPF, reduzindo incertezas nos dados de atividade (atualmente estimadas em 5 a 15% para pecuária, 10 a 20% para degradação).
- Integração de ICV, padronizando metodologias para produtos como carne, soja e arroz, desde o cultivo até o consumo, para atender à rastreabilidade exigida pelo mercado internacional, com validação por meio de estudos de caso em diferentes regiões tropicais.
- Fortalecimento da capacidade técnica e da colaboração internacional, investindo em treinamento de pesquisadores e parcerias com instituições como a Embrapa e redes globais (ex.: FLUXNET), para desenvolver modelos adaptados às dinâmicas tropicais, como a lixiviação de N₂O amplificada por chuvas intensas.
- Atualização contínua do BTR com validação cruzada, incorporando dados de monitoramento em tempo real e revisões bienais dos ICV, para refletir mudanças no uso da terra, práticas agrícolas e impactos climáticos (ex.: secas por El Niño), garantindo consistência temporal e alinhamento com as metas da NDC. Combinadas e apoiadas por investimentos em tecnologia e cooperação científica, essas estratégias permitirão que o BTR evolua para um sistema robusto, capaz de refletir com precisão as particularidades tropicais e promover a sustentabilidade no setor agropecuário brasileiro.

Por fim, os ICV podem catalisar uma revolução tecnológica nos trópicos. Ao integrar dados do BTR e

avançar para *Tier 3*, o plano poderá desenvolver ferramentas digitais que empoderem os produtores e fortaleçam a segurança alimentar, cumprindo o Artigo 2 da UNFCCC (Nações Unidas, 1992), e posicionando o Brasil como referência global em sustentabilidade tropical no século XXI.

Referências

- AGUIAR, A. P. D.; OMETTO, J. P.; NOBRE, C.; LAPOLA, D. M.; ALMEIDA, C.; VIEIRA, I. C. G.; SOARES, J. V.; ALVALA, R.; SAATCHI, S.; VALERIANO, D.; CASTILLA-RUBIO, J. C. Modeling the spatial and temporal heterogeneity of deforestation-driven carbon emissions: the INPE-EM framework applied to the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, v. 18, n. 11, Nov. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02782.x>.
- ALMEIDA, C. A.; MAURANO, L. E. P.; SOLER, L.; MESSIAS, C. G.; CARVALHO, A. F. A.; MONTEIRO, E. Degradação florestal na Amazônia brasileira: ocorrência, permanência e conversão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 20., 2023, Florianópolis. **Anais [...]**. [S.l.]: Inpe, 2023. v. 20, p. 2019-2022. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr/sbsr-2023/trabalhos/degradacao-florestal-na-amazonia-brasileira-ocorrencia-permanencia-e-conversao>. Acesso em: 15 ago. 2025.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; FONSECA, M. G.; ROSAN, T. M.; VEDOVATO, L. B.; WAGNER, F. H.; SILVA, C. V. J.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; ARAI, E.; AGUIAR, A. P.; BARLOW, J.; BERENGUER, E.; DEETER, M. N.; DOMINGUES, L. G.; GATTI, L.; GLOOR, M.; MALHI, Y.; MARENGO, J. A.; MILLER, J. B.; PHILLIPS, O. L.; SAATCHI, S. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, n. 536, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-02971-y>.
- ASSIS, T. O. de; AGUIAR, A. P. D.; RANDOW, C. V. de; GOMES, D. M. P.; KURY, J. N.; OMETTO, J. P. H. B. CO₂ emissions from forest degradation in Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 10, artigo 104035, 2020. DOI: [10.1088/1748-9326/ab9cfc](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9cfc).
- ASSUNÇÃO, J.; GANDOUR, C.; ROCHA, R. DETERring deforestation in the Amazon: environmental monitoring and law enforcement. **American Economic Journal: Applied Economics**, v. 15, n. 2, p. 125-156, 2023. Disponível em: <https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2019/11/Assuncao-Gandour-Rocha-WP2019-DETERring-Deforestation-in-the-Amazon-1.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2025.
- BUSTAMANTE, M. M. C.; ROITMAN, I.; AIDE, T. M.; ALENCAR, A.; ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L.; ASMUS, M. L.; BARLOW, J.; BERENGUER, E.; CHAMBERS, J.; COSTA, M. H.; FANIN, T.; FERREIRA, L. G.; FERREIRA, J.; KELLER, M.; MAGNUSSON, W. E.; MORALES-BARQUERO, L.; MORTON, D.; OMETTO, J. P.; PALACE, M.; PERES, C. A.; SILVER, W.; TRUMBORE, S.; VIEIRA, I. C. G. Toward an integrated monitoring framework to assess the effects of tropical forest degradation and recovery on carbon stocks and biodiversity. **Global Change Biology**, v. 22, n. 1, p. 92-109, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13087>.
- CABRAL, O. M. R.; FREITAS, H. M. de; CUADRA, S.; NOGUEIRA, S.; KOENIGKAN, L. V.; LIGO, M. A. V.; ANDRADE, C. A. de; GASH, J. H. C.; ROCHA, H. R. da; ROSSI, P. Eddy covariance fluxes of greenhouse gases observed in a renewed pasture in the southeast of Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 356, n. 110177, 2024. DOI: [10.1016/j.agrformet.2024.110177](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110177).
- CARVALHO, P. C. F.; PETERSON, C. A.; NUNES, P. A. A.; MARTINS, A. P.; LIMA, E.; AMARAL, M. F.; ANGHINONI, I.; KUNRATH, T. R.; SANTOS, D. T. Sistemas integrados de produção agropecuária: contribuições para a sustentabilidade e mitigação de gases de efeito estufa. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 3, p. 1-12, 2020. DOI: [10.5039/agraria.v15i3a8602](https://doi.org/10.5039/agraria.v15i3a8602).
- CERRI, C. E. P.; CHERUBIN, M. R.; VILLELA, J. M.; LOCATELLI, J. L.; CARVALHO, M. L.; VILLARREAL, F.; CASTRO MELLO, F. F. de; IBRAHIM, M. A.; LAL, R. Carbon farming in the living soils of the Americas. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 8, n. 1481005, 2024. DOI: [10.3389/fsufs.2024.1481005](https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1481005).
- COSTA, J. F.; RUZ, E. J. H.; SANTOS, G. G. A. Carbon stock and dynamic in the middle Xingu forests at eastern Amazonia. **Neotropical Biodiversity**, v. 8, n. 1, p. 371-380, 2022. DOI: [10.1080/23766808.2022.2148438](https://doi.org/10.1080/23766808.2022.2148438).
- DAVIDSON, E. A.; ARTAXO, P. Globally significant changes in biological processes of the Amazon Basin: results of the large-scale biosphere-atmosphere experiment. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 519-529, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00769.x>.
- EMBRAPA. **Integra carbono Embrapa**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/integra-carbono-embrapa>. Acesso em: 25 set. 2025.
- HEY, L.; MEURER, K. H. E.; JUNGKUNST, H. F. On the potential of biogeochemical models to predict hot moments of N₂O following dry-wet cycles. **Atmospheric Environment: Advances**, 2025. DOI: [10.1016/j.aeaoa.2025.100347](https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2025.100347).
- IPCC. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. [S.l.], 2019. v. 4, cap. 11.
- IPCC. Summary for policymakers. In: IPCC. **Climate change 2021: the physical science basis: contribution of working group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. p. 3-32. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- IPCC. **Task force on National Greenhouse Gas Inventories**. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/index.html>. Acesso em: 15 ago. 2025.

LAL, R. Carbon sequestration. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1492, p. 815-830, 2008. DOI: [10.1098/rstb.2007.2185](https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185).

MEDEIROS, A. de S.; SANTOS, T. C. dos; MAIA, S. M. F. Effect of long-term and soil depth on soil organic carbon stocks after conversion from native vegetation to conventional tillage systems in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 218, n. 105311, 2022. DOI: [10.1016/j.still.2022.105311](https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105311).

MOZZER, G. M.; PELLEGRINO, G. Q. The CDM and knowledge-building in the GHG emissions reductions quantification: From the initial proposal to the program of activities. In: FRAGETTO, F. W.; VEIGA, A. P. B.; LUEDEMANN, G. (ed.). **Legacy of the CDM: lessons learned and impacts from the clean development mechanism in Brazil as insights for new mechanisms**. Brasília, DF: Ipea, 2019. 417 p. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9534/1/Legacy_of_the_CDM.pdf. Acesso em: 15 ago. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. **Adoção do Acordo Paris**. [Rio de Janeiro: UNIC Rio], 2016. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-08/Acordo-de-Paris.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. **Convenção sobre mudança do clima**. [Brasília, DF]: Ministério da Ciência e Tecnologia, 1992. 27 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/08/convencaomudancadoclima.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. [S.l.], 1998.

Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2025.

PELLEGRINI, A. F. A.; REICH, P. B.; HOBBIE, S. E.; COETSEE, C.; WIGLEY, B.; FEBRUARY, E.; GEORGIOU, K.; TERRER, C.; BROOKSHIRE, E. N. J.; AHLSTRÖM, A.; NIERADZIK, L.; SITCH, S.; MELTON, J. R.; FORREST, M.; LI, F.; HANTSON, S.; BURTON, C.; YUE, C.; CIAIS, P.; JACKSON, R. B. Soil carbon storage capacity of drylands under altered fire regimes. **Nature Climate Change**, v. 13, p. 1089-1094, 2023. DOI: [10.1038/s41558-023-01800-7](https://doi.org/10.1038/s41558-023-01800-7).

PÉREZ, T.; TRUMBORE, S. E.; TYLER, S. C.; DAVIDSON, E. A.; KELLER, M.; CAMARGO, P. B. de. Isotopic variability of N₂O emissions from tropical forest soils. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, n. 2, p. 525-535, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1029/1999GB001181>.

SWAILS, E.; HERGOUALC'H, K.; VERCHOT, L. V.; NOVITA, N.; LAWRENCE, D. Spatio-temporal variability of peat CH₄ and N₂O fluxes and their contribution to peat GHG budgets in Indonesian Forests and oil palm plantations. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, n. 617828, 2021. DOI: [10.3389/fenvs.2021.617828](https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.617828).

VOGADO, R. F.; SOUZA, H. A.; SAGRILLO, E.; BRITO, L. C. R.; MATIAS, S. S. R.; TEIXEIRA NETO, M. L.; OLIVEIRA JUNIOR, J. O. L.; ANDRADE, H. A. F.; LEITE, L. F. C. Soil organic carbon stocks and fractions under integrated systems and pasture in the Cerrado of Northeast Brazil. **Catena**, v. 243, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108196>.

O Papel da Embrapa na Declaração de Meknes

Diplomacia científica em ação

A mudança do clima é um desafio global complexo, e, por quase uma década, desde a COP15 em Copenhague, em 2009, a agricultura esteve no centro de intensas negociações no âmbito da Convenção do Clima da Organização das Nações Unidas (ONU). Essas discussões buscavam alinhar o multilateralismo (negociações entre países que ocorrem usualmente no âmbito da ONU) com políticas nacionais, promovendo avanços em segurança alimentar, sustentabilidade e resiliência climática. No entanto, interesses divergentes entre países desenvolvidos e em desenvolvimento tornavam o progresso lento e ainda mais estratégico. Enquanto países desenvolvidos, com altas emissões em energia e indústria, defendiam maior responsabilidade do setor agrícola na remoção de gases estufa da atmosfera, atividade referida no jargão da Convenção como “mitigação”, países em desenvolvimento priorizavam a preocupação com os impactos reais correntes e futuros dos efeitos da mudança do clima, atividade referida no jargão da Convenção como “adaptação” para proteger sistemas produtivos vulneráveis, que respondem por apenas 10% das emissões globais, contra 70% dos combustíveis fósseis.

Nesse contexto, o Brasil se destacou como defensor dos interesses dos países em desenvolvimento, com a Embrapa desempenhando um papel crucial na diplomacia científica. Sua expertise em agricultura tropical, com soluções científicas inovadoras e tecnologias que ajudavam a reduzir o custo da produção, ampliar a capacidade adaptativa frente a estresses hídricos, térmicos e a regimes de seca, reduzir a dependência de fertilizantes fósseis e aumentar a produtividade, atraía atenção internacional. A Embrapa apoiou a delegação brasileira desde o início das negociações climáticas, oferecendo análises robustas em temas como agricultura e transparência, dialogando com parceiros da América Latina, África e Ásia.

Um momento decisivo ocorreu na COP21, em Paris, em 2015, durante uma reunião promovida pelo Banco Mundial com ministros da agricultura africanos, na presença do ex-secretário-geral da ONU, Kofi Anan. Países desenvolvidos, por meio da influência do Banco Mundial, buscavam apoio para priorizar a mitigação na agricultura, prometendo créditos de carbono. Essa abordagem, porém, era arriscada: a remoção de carbono em sistemas agrícolas é lenta, gerando créditos insuficientes, e eventos climáticos extremos poderiam comprometer os esforços de mitigação.

Foi nesse cenário que a equipe de pesquisadores da Embrapa, integrante da delegação brasileira, fez uma intervenção histórica. Com embasamento científico



e o peso institucional da Embrapa, os representantes questionaram a viabilidade da proposta de mitigação, destacando o risco de negligenciar a adaptação. A equipe apresentou o caso brasileiro, que priorizava estratégias adaptativas para enfrentar impactos climáticos, como secas e inundações, garantindo a segurança alimentar e a sustentabilidade. Sua intervenção gerou um debate intenso, suscitando dúvidas entre os ministros africanos e desafiando a narrativa dominante.

O impacto foi relevante. A intervenção pavimentou o caminho para a Declaração de Meknes sobre o Financiamento da Adaptação na Agricultura Africana (Iniciativa AAA), elaborada em preparação para a COP22 em Marrakesh, em 2016. Esse documento marcou um ponto de inflexão, enfatizando a adaptação como prioridade para a agricultura em países vulneráveis. O movimento culminou na COP23, em 2017, sob presidência de Fiji, com a adoção da Declaração Conjunta de Koronívia, um acordo histórico que consolidou a adaptação nos sistemas agrícolas como foco das negociações climáticas globais.

Ao final da reunião em Paris, Kofi Anan cumprimentou pessoalmente a equipe brasileira, reconhecendo o impacto de sua intervenção. Com uma combinação de rigor científico, carisma e o respaldo da Embrapa, a diplomacia científica brasileira resolveu um impasse que se arrastava por anos. A Declaração de Meknes e o Acordo de Koronívia reforçaram a importância da adaptação, beneficiando países em desenvolvimento e alinhando a agricultura às metas de sustentabilidade global. Esse “relato” exemplifica como a ciência, aliada à diplomacia estratégica, pode transformar negociações internacionais, promovendo um futuro mais resiliente para a agricultura global.

A agricultura ocupa posição central diante dos desafios climáticos: é essencial para a segurança alimentar e o futuro da humanidade, vulnerável a impactos e, ao mesmo tempo, decisiva para a construção de soluções sustentáveis.

Esta obra mostra como a ciência brasileira tem apontado caminhos para tornar os sistemas de produção mais resilientes e eficientes — tanto no presente quanto nas próximas décadas — frente às pressões das mudanças do clima. Da adaptação a eventos extremos ao controle de emissões de gases de efeito estufa, documenta soluções práticas já aplicadas no campo brasileiro. Também aborda o monitoramento de riscos e apresenta técnicas inovadoras de balanço de carbono, demonstrando que é possível produzir mais e melhor, conciliando produção de alimentos com os compromissos da agenda climática global.

Trata-se de um conteúdo de referência, acessível e relevante, que interessa a todos que buscam compreender e apoiar caminhos para um futuro sustentável.

