



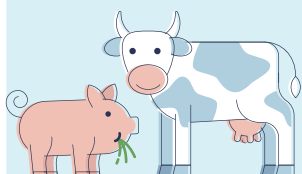
Descarbonização e Circularidade

Respostas dos Sistemas Alimentar e Agroindustrial aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

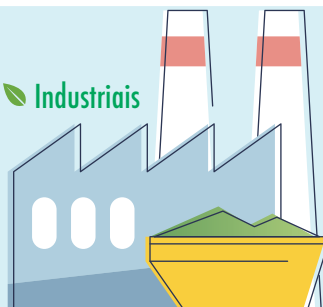
Ambiente

Aproveitamento de resíduos

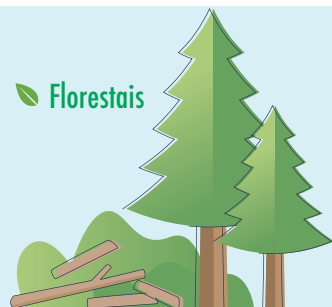
Animais



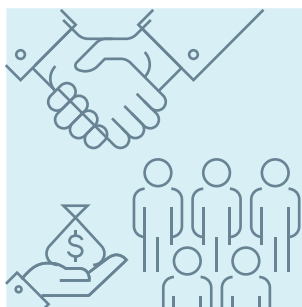
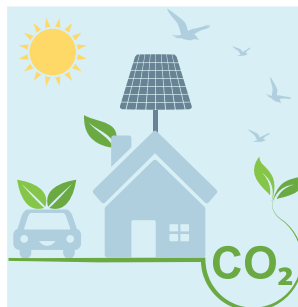
Industriais



Florestais



Sustentabilidade



Social

Governança



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agroenergia
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

DOCUMENTOS 47

Descarbonização e Circularidade

Respostas dos Sistemas Alimentar e Agroindustrial aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Maurício Antônio Lopes, Ph.D.

Embrapa Agroenergia
Brasília, DF
2022

Embrapa Agroenergia
Parque Estação Biológica (PqEB), s/nº
Ed. Embrapa Agroenergia
Caixa Postal 40315
CEP 70770-901, Brasília, DF
Fone: +55 (61) 3448-1581
Fax: +55 (61) 3448-1589
www.embrapa.br/agroenergia
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
da Embrapa Agroenergia

Presidente
Patrícia Verardi Abdelnur

Secretária-Executiva
Lorena Costa Garcia Calsing

Membros
*Alexandre Nunes Cardoso, Betulia de Moraes
Souto, João Ricardo Moreira de Almeida,
Leonardo Fonseca Valadares, Melissa Braga,
Patrícia Abrao de Oliveira Molinari, Priscila
Seixas Sabaini*

Revisão de texto
Everaldo Correia da Silva Filho

Normalização bibliográfica
Márcia Maria Pereira de Souza (CRB-1/1441)

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica e ilustração da capa
Maria Goreti Braga dos Santos

1ª edição
Publicação digital (2022): 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, Superintendência de Comunicação

Lopes, Maurício Antônio.

Descarbonização e circularidade : respostas dos sistemas alimentar e
agroindustrial aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável / Maurício Antônio
Lopes. – Brasília, DF : Embrapa Agroenergia, 2022.

PDF (82 p.) : il. color – (Documentos / Embrapa Agroenergia, ISSN 2177-
4439 ; 47)

1. ODS. 2. Agroenergia. 3. Antropoceno. I. Título. II. Série.

CDD (21. ed.) 633.85

Rejane Maria de Oliveira Cechinel Darós (CRB-1/2913)

© Embrapa, 2022

Autor

Maurício Antônio Lopes

Engenheiro-agrônomo, PhD em Biologia Molecular de Plantas,
pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

Apresentação

A Agenda 2030 representa uma das mais ousadas iniciativas de mobilização das forças da sociedade, e caminho para a criação de um planeta mais próspero, equitativo e saudável para todos. Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, (ODS) acordados em setembro de 2015 pelos líderes de 193 países, compõem a mais ambiciosa agenda de promoção do desenvolvimento humano até hoje elaborada. Agenda que foi desenhada para acelerar os avanços que o mundo tem experimentado nas últimas décadas, quando alcançamos progressos inegáveis em expectativa de vida, em educação e saúde, mas também para superar situações persistentes de pobreza e fome em várias partes do mundo, além dos riscos relacionados a mudanças climáticas - passivos que precisam ser superados para almejarmos um mundo mais pacífico, próspero e seguro para todos.

E o Brasil tem tudo para se destacar na implementação dessa agenda. Com o seu pujante sistema agroalimentar e agroindustrial, o país pode não só alcançar as suas próprias metas no horizonte de 2030, mas também contribuir para que outros países avancem, em especial na superação da pobreza, da desnutrição e da fome. Como país continental, com uma base de recursos naturais inigualável, o Brasil tem gradualmente se tornado referência na incorporação de práticas sustentáveis, tanto à sua agricultura quanto ao seu setor industrial, se tornando líder na produção de energias renováveis e de commodities alimentares, mas também em muitas outras vertentes da nova economia de base biológica, a chamada Bioeconomia, que já surge como a grande propulsora de um novo paradigma de desenvolvimento para o futuro. O presente documento sintetiza avanços importantes do sistema agroalimentar e agroindustrial do Brasil em descarbonização e circularidade – que são vertentes críticas para o redesenho do paradigma econômico corrente, e para

a consolidação no país de um modelo de desenvolvimento alinhado a muitas das ambições expressas na Agenda 2030. O texto apresenta em grande detalhe os enormes desafios representados pela crise climática e os riscos a ela associados, bem como a impossibilidade da manutenção de padrões de produção e consumo insustentáveis, o que tem levado muitos analistas a crer que já vivemos no “Antropoceno” – uma nova era marcada pela ação humana no planeta. O texto reúne também os muitos avanços importantes gerados e disseminados pela pesquisa agropecuária, com especial ênfase nos esforços da Embrapa e suas instituições parceiras na busca de um paradigma de produção agropecuária coerente com a Agenda 2030 e os ODS.

Há muito a Embrapa percebeu que a agricultura tende a ganhar grande destaque na Bioeconomia, por ser naturalmente amigável a práticas regenerativas – como rotação de cultivos, plantio direto sem revolvimento do solo, controle natural de pragas e doenças e sistemas mistos ou integrados – com lavouras, pecuária e floresta geridas em sinergia, num mesmo espaço, ao longo de todo o ano. Variadas fontes de biomassa oriundas da agricultura já podem ser transformadas para reduzir dependência por recursos externos e poluentes. Delas são produzidos insumos e matérias-primas de base biológica, como bioenergia, biofertilizantes, biodefensivos, bioaditivos, compostos bioativos, dentre muitos outros. A monumental produção de biomassa em áreas agrícolas tropicais também nos permite sonhar com um futuro em que biorefinarias se integrem a lavouras, criações animais e florestas, permitindo, através do aproveitamento econômico de biorecursos, a transformação de setores cada vez mais pressionados a descarbonizar seus processos, como as indústrias de energia, química, materiais, dentre outras.

Os temas e conceitos tratados neste documento estão profundamente embebidos na agenda de pesquisa e inovação da Embrapa Agroenergia, e seu detalhado conteúdo representa mais uma contribuição da Unidade à importante discussão sobre as novas possibilidades de produção que se descortinam para o setor agropecuário e agroindustrial do Brasil, com mais atenção ao desafio de se promover a descarbonização e a circularidade nos sistemas produtivos e cadeias de valor, que precisarão, inevitavelmente, ganhar grande sintonia com a agenda global pela sustentabilidade.

Alexandre Alonso Alves

Chefe-Geral da Embrapa Agroenergia

Sumário

Introdução.....	9
Contexto	11
Antropoceno – a “Era Recente do Homem”	12
Agenda global pela sustentabilidade.....	13
Crise climática e imperativo de descarbonizar a economia	15
Redução do consumismo e fortalecimento da circularidade.....	19
Estruturação do mercado global de carbono	23
Destaque de metano na agenda de descarbonização e da circularidade ..	25
Amazônia na agenda global de descarbonização.....	27
Descarbonização e circularidade na agricultura brasileira	29
Modernização tecnológica e mudanças no uso da terra.....	31
A política pública de descarbonização da agricultura brasileira.....	34
Outros avanços para a descarbonização e a circularidade na agricultura..	39
Desafios para o futuro	44

Bioeconomia como modelo de produção de base biológica, limpa e circular	46
Conformando um sistema alimentar descarbonizado, circular e resiliente.....	47
Impacto da agricultura na transformação de outros setores econômicos ...	50
Descrição, qualificação e valoração de serviços ambientais e ecossistêmicos	54
Fortalecimento da circularidade e da descarbonização no campo por sistemas de precisão.....	57
Sustentabilidade: é preciso medi-la antes de reivindicá-la.....	59
Métrica ESG de responsabilidade ambiental, social e de governança ...	60
Métrica ACV para Avaliação do Ciclo de Vida	62
Conclusões.....	65
Referências	68

Introdução

É cada vez mais generalizado o uso do termo desenvolvimento sustentável, que poucos conseguem definir com precisão (Sikdar, 2003) – razão por que grande número de significados vem sendo a ele atribuídos na medida em que cresce na sociedade a consciência de que o nosso planeta tem recursos finitos, que precisam ser usados com inteligência e parcimônia. Dentre muitas interpretações (Brundtland, 1987; Chichilnisky, 1997; Parris; Kates, 2003; Jabareen 2008), tem grande apelo aquela que descreve o desenvolvimento sustentável como um processo de reconciliação entre os sistemas humanos e a natureza – em especial a atmosfera, os recursos hídricos, os biomas e a diversidade de seres vivos que os povoam (Pan, 2021).

Um dos fatores que mais limitam tal reconciliação é o uso generalizado de recursos fósseis e as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), que aumentaram em dois terços desde que as negociações internacionais sobre as mudanças climáticas começaram, há 3 décadas. De acordo com o Painel Intergovernamental das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, limitar o aquecimento global à prudente marca de 1,5 °C exigirá o corte das emissões de dióxido de carbono – relativas aos valores de 2010 – em 45% até 2030, e 100% até 2050 (Frank et al., 2017; Masson-Delmotte et al., 2021). Um enorme desafio que se aplica a todos coletivamente – países, empresas e indivíduos, que precisarão se unir em torno de uma agenda de descarbonização em praticamente todos os setores da sociedade – energia, agricultura, transporte, infraestrutura, sistemas industriais, dentre outros.

A agricultura e o sistema alimentar estão no cerne desse desafio, por serem importantes usuários de recursos naturais, e setores ainda excessivamente carbonizados, frequentemente considerados impulsionadores da crise climática. Embora os humanos tenham sido hábeis em observar os sistemas naturais, fazendo intervenções para adaptar plantas, animais e os ecossistemas às suas necessidades (Herrero et al., 2020), em diversos momentos tais intervenções passaram a ignorar equilíbrios críticos, refinados por milhões de anos de tentativa e erro, que garantiram resiliência e estabilidade à natureza. O rompimento de tais equilíbrios com o fim de criar benefícios de interesse exclusivamente humano, em prazos cada vez mais curtos, coloca em risco a saúde do planeta e, no limite, poderá comprometer a própria viabilidade

de da sociedade (International Institute for Applied Systems Analysis, 2018; Rockström et al., 2020).

É por isso que os sistemas alimentares e agroindustriais estão pressionados a recompor alinhamentos a princípios que foram aperfeiçoados há milhões de anos e codificados nos seres vivos e nos sistemas naturais, muito antes da evolução humana e da criação da agricultura, das indústrias, do comércio ou de qualquer outro artefato moderno. Daí a urgência de buscarmos mimitar a natureza na sua capacidade de integrar sistemas complexos, usando recursos com eficiência, incorporando resíduos a processos e produtos úteis, conservando solo e água, fixando mais que emitindo carbono, maximizando eficiência energética, tudo de acordo com a lógica dos três R's da economia circular: reduzir, reutilizar e reciclar (Herrero et al., 2020; Lopes, 2021a).

Tais avanços facilitariam a nossa jornada na direção da tão almejada reconciliação entre os sistemas humanos e a natureza. Para a agricultura, tal reconciliação dependerá da revisão do conceito de performance, tradicionalmente associada à quantidade de alimentos ou matérias-primas produzidas em um determinado espaço e traduzida em ganho econômico. O mundo que clama por sustentabilidade já exige da agricultura medidas mais sofisticadas de performance, centradas não apenas em produção física e lucratividade, mas também em ecoeficiência, em benefícios sociais e práticas gerenciais eticamente aceitáveis, todos embebidos nas suas operações, processos e produtos (Lopes, 2021a, 2021b; Philippi; Andreoli, 2021).

Como é impossível gerir com eficiência o que não se pode medir, é crescente o interesse por métricas que indiquem que empresas e negócios estão comprometidos com ecoeficiência, processos limpos de base renovável, desenvolvimento de pessoas, transparência e outros valores caros para a sociedade. É por isso que o desenvolvimento de métricas vem ganhando cada vez mais espaço na agenda de governos, empresas e negócios, em especial aquelas associadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), aos conceitos Responsabilidade Ambiental, Social e de Governança (ESG) e Análise do Ciclo de Vida (ACV), que se consolidam como padrões globalmente aceitos para se medir e se comprovar avanços na direção da circularidade e, por consequência, da sustentabilidade.

Um enorme desafio para a ciência moderna é prover a base de conhecimento que dê sustentação e robustez às métricas de sustentabilidade, e é nessa perspectiva que o presente documento discutirá avanços e desafios para ampliar a circularidade e as contribuições para a descarbonização da economia, destacando contribuições da pesquisa agropecuária brasileira na geração de dados, conhecimentos e inovações que ajudem a consolidar sistemas agroindustrial e agroalimentar limpos e descarbonizados, em coerência com os preceitos da sustentabilidade.

Contexto

Não é de hoje que a relação da sociedade com a natureza desperta preocupações e até percepções extremas, alimentadas pelo temor de esgotamento dos recursos finitos que sustentam a vida no planeta. No ano 200 d.C., quando viviam na terra cerca de 180 milhões de pessoas, o filósofo Tertuliano de Cartago concluiu que os humanos eram um fardo que a natureza já não conseguia suportar (Nock, 1950). O economista, filósofo e clérigo inglês Thomas Malthus, que assistiu a população global atingir o seu primeiro bilhão, em 1804, especulou que as populações humanas cresciam exponencialmente, enquanto a produção de alimentos crescia a uma taxa aritmética, o que levaria ao colapso no abastecimento de alimentos, a conflitos por recursos, à fome e catástrofe (Weeks, 2015).

Tertuliano e Malthus erraram porque ignoraram que a criatividade e o engenho humanos seguiriam produzindo conhecimentos e recursos novos e aprimorados que, substituindo os antigos, criariam oportunidades de progresso e de superação de perigos, além de mudanças de comportamento que invalidariam suas previsões catastróficas. Mas, ainda assim, apreensões semelhantes às desses pensadores estão emergindo, com a antecipação de catástrofes associadas aos complexos desafios demográficos e climáticos, que levam muitos a duvidar que a criatividade e o engenho humanos sejam capazes de ajustar a trajetória da sociedade em direção a um futuro sustentável (Catton, 1998; Smith, 2015; International Institute for Applied Systems Analysis, 2018; Kallis, 2019; Naso et al., 2020).

O fato é que, em espaço de tempo muito curto, os humanos se tornaram capazes de extrair e usar, de forma massiva, recursos fósseis e minerais; promo-

veram profundas alterações nos oceanos e nas paisagens terrestres, com a expansão da agricultura e o avanço incessante das cidades (Rockstrom et al., 2009; Herrero et al., 2020; Sperling et al., 2020). As rodovias, ferrovias, rotas marítimas e aéreas cortam o planeta em todas as direções e acentuam a ação humana em todos os lugares (Khanna, 2016). Só o concreto consumido nos últimos 20 anos corresponde à metade de todo o concreto até hoje produzido (Waters; Zalasiewicz, 2018). Há, inclusive, um curioso movimento em curso, para mudar a linha do tempo geológico da Terra, de Holoceno, o período iniciado há cerca de 12 mil anos, para Antropoceno (Crutzen, 2002; Stephen et al., 2007; Lewis; Maslin, 2015), ou um novo tempo de mudanças profundas causadas pelas ações dos seres humanos em todos os cantos do planeta.

Antropoceno – a “Era Recente do Homem”

Definir uma nova era geológica de nossa própria autoria para caracterizar o curtíssimo período em que estamos por aqui pode parecer exagerado e até arrogante, considerando que as eras geológicas até agora descritas perduraram por períodos extremamente longos. Os dinossauros, por exemplo, reinaram absolutos no planeta durante 140 milhões de anos (Apaldetti et al., 2018), milhares de vezes o tempo da história humana até agora registrada. No entanto, é fácil constatar que nenhuma outra espécie alcançou a capacidade humana de subverter a escala geológica até então operando no planeta, o que justificaria uma mudança de era causada pela ação humana no planeta (Crutzen, 2002).

Mais que um significado cientificamente fundado na noção de tempo geológico, a proposição de uma “era recente do homem” tem, portanto, forte simbolismo e renova a atenção aos ambientes naturais e aos seus significados para o funcionamento do planeta e para o bem-estar dos seres vivos – um estímulo para se conhecer, manejar e extrair progresso e riqueza do nosso patrimônio natural de forma pragmática e sustentável. A expectativa é que, ao assumir que estamos no Antropoceno, os ambientes naturais e os seus significados para o funcionamento do planeta e para o bem-estar dos seres vivos ganhem atenção renovada e viabilizem um novo paradigma de progresso no futuro (Dods, 2019; Rockstrom et al., 2009; Subramanian, 2019).

Agenda global pela sustentabilidade

As duas primeiras décadas do século XXI têm sido marcadas por uma crescente mobilização pela sustentabilidade, em todos os cantos do globo. Em setembro de 2015, os líderes de 193 países concordaram em implementar uma ousada agenda de desenvolvimento com o objetivo de criar um planeta mais próspero, equitativo e saudável até o ano 2030 (United Nations, 2015). A Agenda 2030, com os 17 ODS acordados (Figura 1), inclui metas em grande diversidade de temas, como erradicação da pobreza, agricultura e segurança alimentar, educação, saúde, igualdade de gênero, redução das desigualdades, energia, água e saneamento, produção e consumo sustentáveis, mudança do clima, proteção e uso sustentável dos ecossistemas terrestres e dos oceanos, crescimento econômico inclusivo, infraestrutura e industrialização, cidades sustentáveis, governança e estratégias de implementação.



Figura 1. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

Fonte: United Nations (2015).

Essa agenda é singular por fornecer uma visão inclusiva e integrada de progresso sustentável – certamente a mais ambiciosa agenda de promoção do desenvolvimento humano até hoje elaborada. Os 17 objetivos eleitos pro-

metem acelerar os avanços que o mundo tem experimentado nas últimas décadas, focando os passivos a serem ainda superados para libertar as populações que ainda vivem na pobreza e ajudar a construir um mundo mais pacífico, próspero e sustentável (Biermann; Kanie, 2017).

Um grande avanço na construção dessa agenda é o fato de que a maioria dos alvos pretendidos se complementam e se reforçam, para evitar que o progresso em uma área não ocorra às custas de outra (International Institute for Applied Systems Analysis, 2018). Por exemplo, o aumento da produção de alimentos deverá ser buscado em sintonia com a gestão responsável dos recursos naturais; a expansão da energia renovável de base hídrica se dará respeitando o abastecimento de água das populações; e a proteção dos oceanos não deve sufocar o crescimento econômico e o desenvolvimento nas regiões costeiras.

Para isso, o alcance das metas definidas no âmbito dos ODS exigirá abordagens flexíveis, com compartilhamento de conhecimentos entre múltiplas áreas e temas, além de métricas para avaliação sistemática de progresso e correção de rumos, sempre que necessário. É, portanto, necessário que os governos, as empresas, as agências de fomento, os bancos multilaterais e a sociedade civil trabalhem em grande sintonia, reconhecendo a interdependência entre os vários objetivos e desenvolvendo competências e roteiros que os permitam navegar no complexo terreno de formulação e melhoria de políticas e estratégias de implementação (United Nations, 2015; Biermann; Kanie, 2017; International Institute for Applied Systems Analysis, 2018).

A Agenda 2030 é extraordinariamente oportuna para o Brasil, um país de dimensões continentais que ainda não conseguiu organizar seu processo de desenvolvimento a partir do empoderamento dos municípios, onde a vida da nação, de fato, pulsa. Promover o envolvimento e a liderança dos governos municipais é vital para que o Brasil experimente os benefícios dos ODS, cujas metas são diretamente relacionadas às responsabilidades dos governos locais, como gestão aprimorada para controle de despesas, busca de novas fontes de receita, captação de recursos e fortalecimento da credibilidade. Este é o caminho para que os municípios brasileiros cumpram bem o seu papel na prestação de serviços básicos em favor da inclusão produtiva, da segurança e da sustentabilidade, que estão no âmago dos ODS (Lopes, 2017 b).

A Agenda 2030 tem igual importância para o mundo da ciência, considerando o papel fundamental que informação, tecnologia e inovação têm na promoção do desenvolvimento sustentável e, também, na modelagem e na aplicação de métricas para acompanhamento e medição de progressos no âmbito dos 17 ODS. E como alimentação e agricultura têm relação com praticamente todos os ODS (FAO, 2018), é fundamental que a pesquisa agropecuária brasileira faça ampla avaliação de suas prioridades e escolhas, mapeando possíveis interfaces e sinergias com os ODS e suas metas (Lopes, 2017b; Embrapa, 2018, 2022; Oliveira et al., 2018).

Crise climática e imperativo de descarbonizar a economia

A crise climática é um dos temas que mais se destaca no processo de implementação da Agenda 2030, em especial a partir do ODS 13 – Combate às alterações climáticas. A razão é que as mudanças climáticas têm alcançado crescente prioridade na agenda da sociedade, mobilizando pensamento estratégico e diplomacia para a tão necessária mudança de comportamento que leve à descarbonização da economia global. O Acordo de Paris (United Nations, 2015), lançado de maneira quase que concomitante com a Agenda 2030 (United Nations, 2015), tornou-se o principal compromisso mundial sobre as alterações climáticas, envolve quase duas centenas de países, e busca implementar estímulos para que agendas e interesses individuais ganhem convergência para produzir mudanças na velocidade que a crise climática exige.

O ODS 13 concentra-se especificamente na ação climática no âmbito da Agenda 2030, e a declaração oficial da missão desse objetivo é "tomar medidas urgentes para combater as mudanças climáticas e seus impactos" (Doni et al., 2020). Mas a crise climática tem repercussões em múltiplos ODS, por exemplo, ameaçando o crescimento econômico (ODS 8), e atuando como um multiplicador da insegurança alimentar e da pobreza (ODS 1 e 2) e da desigualdade (ODS 10). Seus impactos não param aí, ela afeta as formas de energia que precisaremos usar para ajudar a descarbonizar a atmosfera (ODS 7), os meios de transporte (ODS 9 e 11), as práticas de uso da terra e produção de alimentos (ODS 2) e, enfim, todos os sistemas que precisem ser

modulados para se evitar o aquecimento do planeta (United Nations, 2015; International Institute for Applied Systems Analysis, 2018).

A 17ª edição do relatório de riscos globais (World Economic Forum, 2022), documento resultante de iniciativa do World Economic Forum, indica que, no longo prazo, os principais riscos para o mundo são os relacionados ao clima. O relatório, que examina os riscos em cinco dimensões – econômica, ambiental, geopolítica, social e tecnológica – integra a visão de mil especialistas e líderes, e sinaliza predominância dos riscos ambientais em todos os cenários de tempo: 0 a 2 anos, 2 a 5 anos, 5 a 10 anos e além de 10 anos. Dos cinco riscos predominantes, três são ambientais, com expectativa de agravamento no longo prazo: 1. Fracasso na ação climática, 2. Eventos climáticos extremos, 3. Perda da biodiversidade, 4. Erosão da coesão social, e 5. Crises de subsistência (Figura 2).

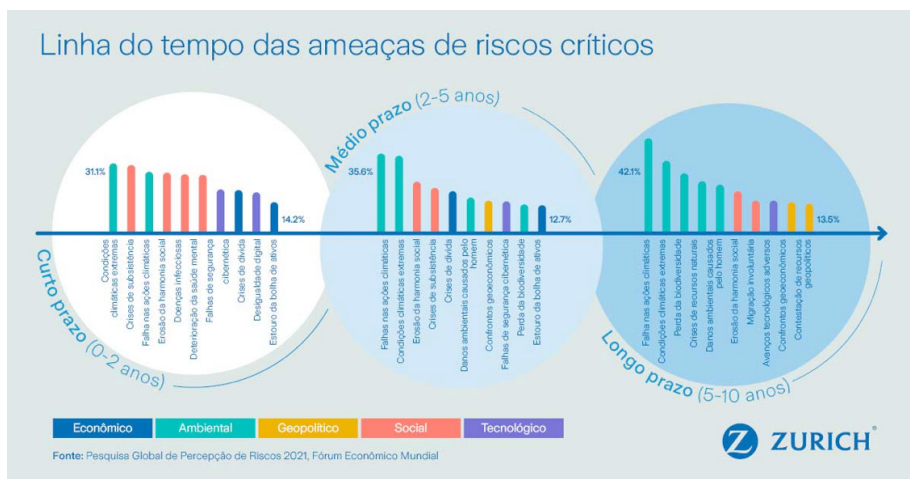


Figura 2. Riscos mais graves identificados em escala global, ao longo dos próximos 10 anos.

Fonte: World Economic Forum (2022).

A percepção de que há falhas na ação climática emerge como a principal ameaça a ser enfrentada pela sociedade durante a próxima década. Fica cada vez mais difícil negar a crise climática em função das secas, incêndios, inundações, escassez de recursos e perda de espécies, entre outros

impactos reportados de forma cada vez mais constante em todo o mundo. Em 2020, inúmeras cidades pelo mundo passaram por temperaturas extremas não vistas há anos – como uma alta recorde de 42,7 °C em Madri, na Espanha, e a temperatura mais baixa há 72 anos, de -19 °C em Dallas, nos EUA. Regiões como o Círculo Polar Ártico passaram, em 2020, por temperaturas médias de verão 10 °C mais altas do que nos anos anteriores (World Economic Forum, 2022).

Parte do pessimismo em relação à ação climática decorre do fato de que as emissões globais de GEE vêm aumentando há décadas, e há sinais de que progressos para limitar o aquecimento global à prudente marca de 1,5 °C têm sido insuficientes (Masson-Delmotte et al., 2021). Embora os esforços diplomáticos e os acordos internacionais sejam muito importantes para apontar direções e buscar consensos em torno do complexo desafio de descarbonizar a economia global, é cada vez mais claro que mecanismos assessórios serão necessários para tornar mais célere o processo de mudança (International Panel on Climate Change, 2022).

Relatório recente do International Panel on Climate Change (2022) aborda de maneira profunda os impactos das atividades humanas sobre o meio ambiente em escala global, com foco na interdependência entre clima, ecossistemas e biodiversidade e as sociedades humanas. Ao longo de mais de 3 mil páginas, o relatório integra, de maneira jamais feita, o conhecimento científico mais recente acerca do ambiente natural, ecológico, social e econômico. A avaliação dos impactos e riscos das mudanças climáticas foi realizada de maneira profunda em relação a outras mudanças simultâneas, como perda de biodiversidade, consumo insustentável de recursos naturais, degradação da terra e dos ecossistemas, rápida urbanização, mudanças demográficas, desigualdades sociais e econômicas, e a pandemia de covid-19.

Os impactos levantados por esse relatório em relação à agricultura e aos sistemas alimentares são múltiplos e extremamente preocupantes. Não há mais qualquer dúvida de que as mudanças climáticas têm influenciado de forma negativa a produção de alimentos em todo o mundo, o que requer esforços cada vez maiores e mais complexos para atendimento às necessidades humanas. O aquecimento global vem desacelerando avanços na produtividade agrícola ao longo das últimas 5 décadas, em especial no cinturão tropical do globo. Além de impactar cultivos, pastagens, florestas, aquicultura e pesca, o

aquecimento interfere na qualidade e na estabilidade das colheitas, limitando também os serviços ecossistêmicos essenciais para a agricultura e outras atividades humanas (International Panel on Climate Change, 2022).

O impacto do clima na disponibilidade de água é outro desafio crítico tratado pelo relatório, que detectou cerca da metade da população mundial submetida à grave escassez por pelo menos um mês por ano, em função de fatores climáticos. São crescentes os impactos sociais das secas e das inundações, em especial em países pobres, onde eventos extremos impactam negativamente a agricultura, a produção de energia e a saúde de populações expostas a doenças transmitidas pela água. Além do mais, eventos climáticos extremos usualmente provocam danos materiais à infraestrutura e podem levar a rupturas nas cadeias de suprimentos, agravando situações de insegurança alimentar, em especial nos países de menor grau de desenvolvimento. As mudanças projetadas no ciclo da água tenderão a agravar conflitos relacionados ao uso competitivo do recurso na agricultura, na geração de energia e na indústria (International Panel on Climate Change, 2022).

O fato é que os sucessivos e cada vez mais preocupantes relatórios elaborados pelo IPCC Masson-Delmotte et al. (2021) e International Panel on Climate Change (2022) indicam, de maneira inequívoca, que o atual modelo econômico se sustenta em premissa totalmente equivocada de que os recursos materiais do planeta são ilimitados. A persistirem as tendências atuais, o consumo de recursos materiais globais seguirá crescendo, colocando em sério risco recursos como água, ar, solo e biodiversidade. Essa realidade põe em evidência o erro de design na economia tradicional, lastreada em atividades que lançaram na atmosfera bilhões de toneladas de GEE, passivo que agora cobra seu preço.

O mais preocupante é que os estudos mais recentes já indicam que não será possível reverter a totalidade dos impactos negativos das mudanças climáticas, mesmo que consigamos reparar com celeridade todos os equívocos do modelo econômico que predomina em todo o mundo. As previsões são de que muitos impactos negativos previstos vão ocorrer independentemente do que se consiga avançar em termos de mitigação e adaptação a partir de agora (International Panel on Climate Change, 2022). Não há, portanto, alternativa à necessidade de redução acentuada nas emissões de GEE, pela via do cumprimento integral dos compromissos firmados pelos

países nos acordos internacionais, além da rápida adoção de práticas de mitigação e adaptação, em preparo para os impactos que inevitavelmente virão (Masson-Delmotte et al., 2021; International Panel on Climate Change, 2022; World Economic Forum, 2022).

Para lidar com países recalcitrantes em adotar medidas concretas contra a crise climática, mecanismos poderão ser implementados nos próximos anos, cobrando taxas sobre o carbono incorporado nas importações de regiões que insistem em não tomar medidas para a redução das suas emissões. Ao contabilizar as emissões incorporadas em bens comercializados, pode-se coibir a busca de competitividade pela via do não cumprimento de metas de descarbonização. Essa seria uma maneira de penalizar o não cumprimento dos compromissos voluntários assumidos pelos países no Acordo de Paris, visando limitar o aquecimento global bem abaixo de 2 °C, o que impede a consolidação de uma política climática globalmente eficiente (Böhringer et al., 2022).

Decisão recente da União Europeia (UE) prevê a implementação, nos próximos anos, de um mecanismo de ajuste de carbono na fronteira, que permita a países europeus importadores impor tarifas a empresas que se aproveitam de regulações ambientais frouxas nos seus países de origem. Após o anúncio da UE, o partido democrata nos Estados Unidos também propôs a criação de uma versão americana de imposto sobre as importações de carbono de países que carecem de políticas climáticas robustas. Canadá e Japão já sinalizam interesse em mecanismo semelhante. (Mörsdorf, 2022).

Redução do consumismo e fortalecimento da circularidade

A escalada no consumo das sociedades contemporâneas e sua relação com o desperdício e com a elevação das emissões são temas que cada vez mais ganham a atenção das lideranças e dos formuladores de políticas públicas em todo o mundo, como bem destacado no ODS 12 –Consumo e produção responsáveis. A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) alerta que um terço dos alimentos produzidos em todo o mundo é desperdiçado (FAO, 2019). Um estudo recente liderado pela Embrapa mostra que o desperdício anual no consumo familiar no Brasil chega, em média, a 41 kg de alimentos por pessoa, o equivalente a R\$ 323, sem contar o custo do preparo, com energia, água e outros recursos. Os valores serão ainda

maiores se considerarmos perdas em restaurantes, empresas, hotéis e escolas. A FAO estima ainda que a América Latina desperdiça, em média, 127 milhões de toneladas de alimentos a cada ano, a um custo próximo a US\$ 100 bilhões (FAO, 2018, 2019, 2020).

Um grande desafio na implementação da Agenda 2030 e no avanço do processo de descarbonização das economias – como bem explicitado nos ODS 6, 7, 12, 13, 14 e 15 – é a superação do modelo econômico baseado no consumo sem limites, com elevação dos níveis de poluição e desgaste das reservas de recursos essenciais – solo, água e biodiversidade – a patamares perigosos (FAO, 2018). Esse modelo é gerador de resíduos e rejeitos em volumes e complexidade crescentes, por causa do número e da diversidade de produtos que chegam aos mercados diariamente. Como apenas uma fração dos restos, descartes e detritos gerados em atividades produtivas e no consumo tem sido coletada e reciclada, poluentes estão se acumulando por todo o planeta, com crescentes riscos para o meio ambiente, a saúde e o bem-estar das pessoas (FAO, 2019; Koester; Galaktionova, 2021).

Muitos acreditam que o desenvolvimento tecnológico nos permitirá alcançar novos patamares de eficiência no uso de recursos, levando a reduções na sua demanda e uso. No entanto, um estudo do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) demonstrou exatamente o contrário (Magee; Devezas, 2016). Pesquisadores estudaram dezenas de bens e cadeias de valor para concluir que, apesar das enormes melhorias tecnológicas em produtos e processos, foram poucos os casos em que a inovação tecnológica tenha levado à redução de consumo. Na maioria das vezes, o efeito da inovação tecnológica é inverso, tornando custos menores, viabilizando a produção em larga escala e, quase sempre, induzindo mais consumo.

A mudança tecnológica precisa, portanto, vir acompanhada de mudança cultural e social, todas associadas a formas criativas de transição para um novo modelo econômico (Magee; Devezas, 2016). Uma possibilidade é a economia circular, que nasce inspirada na própria natureza, onde nada é perdido ou desperdiçado (Ellen Macarthur Foundation, 2017; Suchek et al., 2021; Velenturf; Purnell, 2021). A longevidade e a resiliência dos ecossistemas derivam exatamente dos ciclos naturais de reciclagem de recursos, como numa floresta, em que múltiplas espécies interagem e se alternam de forma harmônica. Por mimetizar a natureza, a economia circular poderá ajudar a

consolidar na sociedade um modelo mais inteligente de produção e consumo, baseado em três verbos: reduzir, reutilizar e reciclar (Lopes, 2021a).

Felizmente, um número crescente de pessoas se dá conta de que há uma bomba-relógio a ser desligada, pois é muito arriscado seguirmos em direção ao futuro conformados com o acúmulo de problemas gerados pelo consumismo. A escalada da obesidade, que acomete países pobres e ricos, alerta-nos para os males associados ao descontrole no consumo, em especial de alimentos ultraprocessados (Unicef et al., 2021; Moradi et al., 2021). Países já criminalizam a obsolescência planejada, estratégia usada para reduzir deliberadamente a vida útil dos produtos, forçando o consumo (Sinha, 2017). A economia compartilhada cresce em todos os lugares, com escritórios, automóveis, bicicletas, estadias, roupas, entretenimento, etc., que servem a múltiplos usuários (Hossain, 2020). Mas medidas fiscais inovadoras, como taxação do consumo exagerado e penalizações proporcionais à produção de resíduos, rejeitos e poluentes nas residências e indústrias, precisam ainda ganhar espaço nas agendas de líderes e legisladores.

Precisamos nos dar conta de que o consumismo desenfreado do mundo moderno tem consequências assustadoras para a sociedade. Mudanças culturais e o uso de lições de economia comportamental tornaram-se essenciais para tratar esse assunto, ainda mais frente às dificuldades reais que as democracias estão tendo em lidar com os impactos que um maior custo de combustíveis ou energia tem no custo de vida das populações. É hora de buscarmos modelos de desenvolvimento que nos afastem de práticas baseadas em extração de matérias-primas, fabricação, uso e descarte. Economia circular, economia colaborativa, economia criativa, economia verde e bioeconomia denominam algumas das iniciativas de redesenho da velha economia e sinalizam o desejo de releitura do modelo baseado no consumo de massa e na exploração imprudente e não sustentável dos recursos naturais (D'Amato et al., 2017, 2019; Ellen Macarthur Foundation, 2017).

O surgimento de tantas possibilidades de reconversão da economia tradicional para uma economia de baixo impacto e de base renovável (Figura 3) leva muitos a subestimar e considerar tais movimentos como modismos. Ainda que isso possa vir a se revelar verdadeiro para algumas dessas tendências, é fato que todos esses novos conceitos têm sido concebidos na busca de respostas para a crise na relação dos sistemas humanos com a

natureza. Como mudanças radicais na economia global exigem tempo, é possível que opções mais pragmáticas, capazes de coexistir com o atual modelo econômico, acabem por se consolidar, tornando o modelo econômico dominante mais permeável às noções de sustentabilidade, finitude de recursos, circularidade e compartilhamento.

As pressões para que tal coexistência seja aceita e praticada vêm de todos os lados: as revoluções na informação, na comunicação, nos hábitos alimentares e na demografia estão entre as mais visíveis. Adicione-se a revolução nas relações sociais, a revolução ética e a crescente exigência de transparência radical na sociedade, que estão permitindo a pessoas e comunidades amealharem parte do poder antes restrito ao Estado e às instituições.

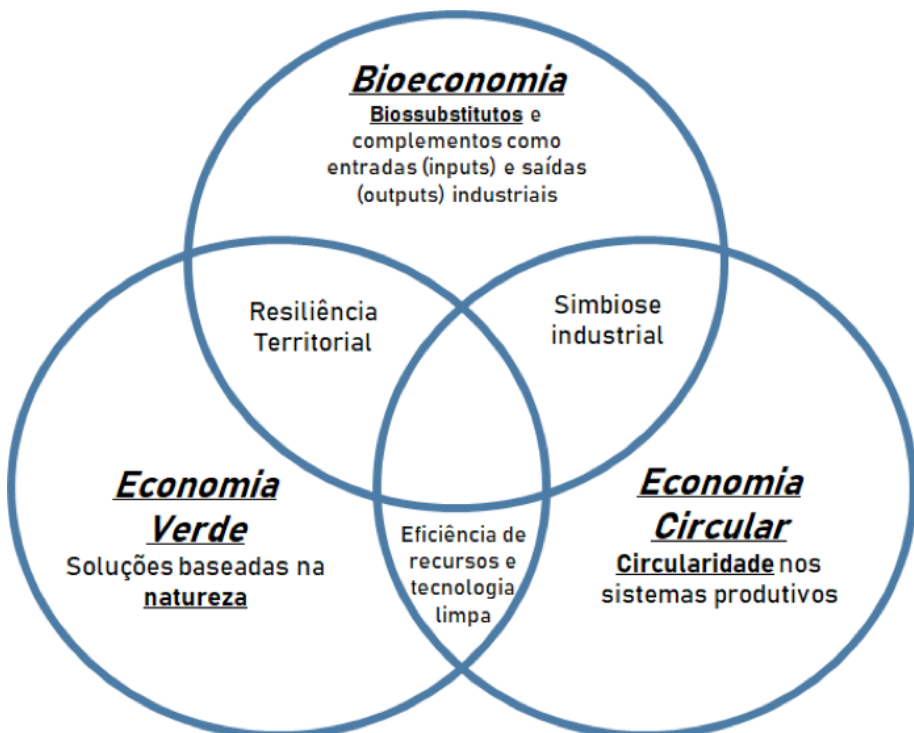


Figura 3. Tendências emergentes de produção e consumo sustentáveis – Bioeconomia, Economia Verde e Economia Circular.

Fonte: Adaptado de D’Amato et al. (2019).

Estruturação do mercado global de carbono

Uma das possíveis soluções para a crise climática é colocar um preço no carbono como forma de reduzir as emissões que teimam em aumentar em todo o globo. Cada vez mais, governos e líderes empresariais estão defendendo a estruturação de um mercado global que recompense aqueles que contribuem para que GEE não sejam lançados na atmosfera. Tal feito depende de mais práticas e tecnologias de baixa emissão de carbono, além de processos regulados por políticas públicas e operados por atores diversos, interessados de forma voluntária a compensar suas emissões.

Após 6 anos de difíceis negociações, a Conferência do Clima, realizada em Glasgow, na Escócia, em novembro de 2021 (*COP 26*), foi palco de decisões que podem finalmente viabilizar regras do Acordo de Paris, de 2015, para a configuração de mercados capazes de transformar reduções nas emissões de GEE em ativos confiáveis e comercializáveis (Ahonen et al., 2022; Depledge et al., 2022). Embora mercados de carbono existam há décadas, seus formatos são fragmentados, pouco robustos e carentes de transparência (Calel, 2013; Ahonen et al., 2022), defeitos que se buscará remover a partir de agora.

O que se espera nos próximos anos é o surgimento de um sistema confiável de comércio por meio do qual países, empresas, indivíduos ou outras entidades possam comprar ou vender ativos baseados em reduções efetivas de emissões de GEE (Depledge et al., 2022). A existência desse mercado facilitaria, por exemplo, a compensação das emissões em um local, reduzindo ou removendo as emissões em outros. Assim, países ou empresas que precisem de mais tempo para reduzir suas emissões podem fazê-lo pela compra de créditos.

Como o CO₂ é o mesmo gás em qualquer lugar e a crise climática é um desafio para todo o planeta, o importante é que se avance na redução do cômputo global de emissões. Acredita-se que, à medida que regras de contabilidade e transparência para as reduções de emissões transferidas entre os países sejam fortalecidas, tais ativos poderão dar origem a um pujante mercado, que se estima poder chegar a U\$ 250 bilhões por ano já em 2030 (Edmonds et al., 2019).

Com os efeitos destrutivos das mudanças climáticas se intensificando, agricultura e florestas terão parte essencial a cumprir na conformação desse mercado, considerando que, juntamente com os oceanos, o solo detém as maiores reservas de carbono em todo o planeta (Lenton, 2000), e sob as condições ecológicas corretas são as plantas que viabilizam potentes sumidouros terrestres para o CO₂ (Chen et al., 2018). Assim, as mudanças no uso da terra podem se tornar cada vez mais essenciais para sequestrar carbono atmosférico em escala e determinar prazos necessários para conter a crise climática (Post; Kwon, 2000; Rokityanskiy et al., 2007), o que poderá levar a mudanças sem precedentes nas estratégias de uso do solo, inclusive com risco de intensificar conflitos entre o meio ambiente e a produção de alimentos.

Além do mais, métricas cientificamente validadas associadas a gestão e ao monitoramento sofisticados serão necessárias para garantir a permanência dos estoques armazenados (Bell; Lawrence, 2009). Afinal, o carbono armazenado nas florestas ou no solo agrícola, a partir de práticas conservacionistas, pode, em determinadas circunstâncias, ser liberado para a atmosfera (Lal et al., 2004). Ação humana, catástrofes naturais ou intensificação do aquecimento global podem afetar a estabilidade desses sumidouros de carbono (Hubau et al., 2020; Qin et al., 2021), o que exige gestão cuidadosa que não comprometa sua efetividade e credibilidade.

Levando em conta tais cenários, um grande desafio para o futuro será evitar que um mercado global de tal complexidade seja conformado prioritariamente de acordo com as regras correntes do mercado financeiro (Michaelowa, 2012; Lo; Howes, 2013; Bryant, 2018). Como as que priorizam maximização de lucros, pedem regulação e controles mínimos e, pior, medidas de produtividade baseadas em maiores retornos sobre o investimento, em lugar do objetivo maior e mais nobre – de diminuir o CO₂ na atmosfera visando ao bem-estar da sociedade e à construção de meios de subsistência resilientes.

É preciso que todos estejam atentos ao risco de que tais mercados priorizem apenas grandes empreendimentos para reduzir custos de transação, promovendo concentração da terra e benefícios para segmentos economicamente favorecidos. No caso brasileiro, é fundamental que os mercados de carbono possam priorizar, além dos grandes empreendimentos agrícolas e do setor florestal, quase sempre os mais lembrados, também operações menores e mais diversificadas, em especial os pequenos e médios produtores que, ge-

ralmente, são os que menos impactam as mudanças de clima e os que mais sofrem suas consequências.

Destaque de metano na agenda de descarbonização e da circularidade

gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), sempre cumpriram funções importantes na atmosfera terrestre, retendo calor e evitando perda de radiação para o espaço, o que contribuiu para tornar a Terra habitável. Ao longo de milênios esses gases foram produzidos e decompostos em ritmo que mantinha o planeta moderadamente aquecido, equilíbrio que está sendo alterado pela ação humana, com graves consequências para o clima (Tuckett, 2019).

Até recentemente o grande vilão das mudanças climáticas era o CO_2 , pela quantidade emitida e longa persistência na atmosfera, por mais de mil anos (Knutti; Rogelj, 2015). No entanto, o metano vem despontando como um agente igualmente perigoso de desestabilização do clima (Harmsen et al., 2020), em razão da sua capacidade de aquecer a atmosfera com uma força 120 vezes superior àquela do CO_2 imediatamente após a sua emissão. Apesar da sua permanência na atmosfera ser curta, se degradando em cerca de 12,4 anos (Balcombe et al., 2018), sua concentração alcançou o nível mais alto dos últimos 800 mil anos (Masson-Delmotte et al., 2021).

O metano tem múltiplas origens (Schaefer, 2019), desde as indústrias de gás natural, carvão e petróleo, até os aterros sanitários, que concentram grande diversidade de materiais orgânicos em decomposição. Vegetação apodrecida em áreas pantanosas e cultivos como arroz inundado são também importantes fontes desse gás, assim como animais ruminantes como bovinos, e insetos como cupins, que ao digerirem material vegetal, emitem metano. Embora as crescentes emissões de metano representem grande risco para a humanidade, sua baixa persistência na atmosfera possibilita o combate dos seus efeitos em prazos curtos (Balcombe et al., 2018).

É por isso que cortes significativos nas emissões desse potente gás de efeito estufa poderão provocar redução do aquecimento em apenas uma década, a custos relativamente baixos (Cain et al., 2022). Motivados por essa possibi-

lidade, cerca de 100 países, incluindo o Brasil, anunciaram em novembro de 2021, durante a *COP 26*, em Glasgow, o “Compromisso Global de Metano” – uma meta coletiva de redução das emissões em 30%, a ser alcançada até 2030 (Ming et al., 2022; Brown, 2022).

Tal acordo impõe reduções substanciais das emissões de fontes como aterros sanitários, sistemas de óleo e gás, mineração de carvão, processos industriais e agricultura, com destaque para a pecuária (Ming et al., 2022). Estima-se que cerca de um bilhão de bovinos é criado em todo o mundo para produção de carne e laticínios, que combinado a outras criações animais liberam cerca de 44% do metano originado de atividades antropogênicas (de causa humana) em todo o planeta. Esses números destacam a pecuária no rol dos grandes emissores de GEE em todo o mundo (Gerber et al., 2013).

Um aspecto importante é que o metano é um gás valioso, que pode ser capturado e usado como combustível, reduzindo dependência de fontes fósseis. O gás natural, que consiste principalmente em metano, é um combustível fóssil considerado limpo. Quando o metano é produzido a partir dos aterros sanitários e dos abundantes resíduos animais e vegetais usualmente descartados na natureza, ele pode, como o gás natural, ser usado como fonte de energia para uso doméstico e transporte, ou como matéria-prima para múltiplos usos industriais (Environmental Protection Agency, 2012; Global Methane Initiative, 2022).

Os humanos geram direta ou indiretamente mais de 1,3 bilhão de toneladas de resíduos orgânicos em todo o mundo a cada ano, número que deverá crescer para 2,2 bilhões de toneladas até 2025, grande parte acumulada em aterros sanitários (Wainaina et al., 2020). Tecnologias para captura de metano de aterros sanitários já são dominadas, podendo viabilizar parques eco industriais produtores de bens e serviços, créditos de carbono e boa imagem para governos e organizações envolvidos. Ou o metano produzido pode ser simplesmente processado e vendido, substituindo o gás natural fóssil, ou usado para movimentar caminhões de coleta e processos de segregação, tratamento e agregação de valor ao lixo que chega aos aterros sanitários.

Apesar disso, a predominância de um modelo econômico linear, baseado na extração, no uso e no descarte inibe a necessária integração entre sistemas que viabilizariam a tão necessária circularidade (Kim et al., 2021; Maceno; Oliveira, 2022). Essa circularidade seria possível com a adoção de práticas

e tecnologias de recuperação de recursos a partir de resíduos como forma de maximizar o ciclo de vida dos materiais e, como resultado, minimizar os impactos ambientais negativos associados com benefícios para a sociedade e o meio ambiente (Varjani et al., 2017, Stegmann et al., 2020).

Os desafios para a agricultura são igualmente substanciais. A produção agrícola global quase triplicou nos últimos 50 anos e é provável que duplique na primeira metade do século XXI (FAO, 2013, 2021), gerando imensos volumes de resíduos orgânicos de alta emissão de gases. Atualmente, quase todo o resíduo agrícola produzido no mundo é manejado de forma incorreta, permitindo que o metano e outros gases de efeito estufa sejam liberados na atmosfera. Se manejados em digestores anaeróbicos, as emissões seriam minimizadas, com produção de biogás e biometano para uso energético e industrial, além de fertilizantes orgânicos que permitiriam retornar ao solo nutrientes valiosos e finitos (Environmental Protection Agency's, 2012; Gerber et al., 2013; Schaefer, 2019; Global Methane Initiative, 2022; Ming et al., 2022).

Amazônia na agenda global de descarbonização

É impossível discutir os desafios para a descarbonização da economia no Brasil e no planeta sem considerar a Amazônia, que é frequente e erroneamente descrita como espaço homogêneo de floresta tropical, um extremo de caracterização simplista, que impregnou o imaginário de todos. Componente de destaque na Agenda de Desenvolvimento Sustentável (ODS 13 e 15), a Amazônia é antes de tudo uma síntese, que engloba muitas realidades, de complexos quadros naturais, agrários, agrícolas e demográficos (IBGE, 2004). Os esforços para conter sua degradação e promover seu desenvolvimento sustentável demanda planejamento e intervenções que reconheçam tal complexidade (Brasil..., 2008; Embrapa, 2019; Vilela et al., 2019; Lopes; Hunt, 2021).

É, portanto, necessário reconhecer que os artefatos comumente usados para descrever e caracterizar a Amazônia não fazem justiça à sua extensão, complexidade e potencial (Clement; Junqueira, 2010). São mais de 13 mil anos de antropização, atestados por sítios arqueológicos (geoglifos, florestas de bambus, terras pretas, etc.) (Roosevelt, 2013). Em seguida, veio o povoamento europeu até a incorporação política definitiva da Amazônia ao território

nacional, com o Tratado de Madri, em 1750 (Cortesão, 1950). No desenvolvimento da região, sucederam-se diversos movimentos migratórios (nordestinos, japoneses, árabes, sulistas, etc.), ligados a ciclos econômicos da região e do País (Bueno et al., 2019; Embrapa, 2019).

O Brasil já acumulou um grande acervo de dados sobre a Amazônia, distribuídos em diferentes universidades, órgãos de pesquisa e agências de governo (Campos, 2009; Um projeto..., 2009). Contudo, ainda carecemos de sistemas de inteligência estratégica capazes de reunir e ordenar esses dados, gerando informações e conhecimentos que orientem o planejamento das muitas “Amazônias” que esses dados revelam. Sistematizar o conhecimento disponível e gerar mais conhecimento nas muitas áreas e temas nas quais perduram *gaps* é condição *sine qua non* para que nos afastemos de visões simplórias de uma Amazônia monolítica, um ecossistema homogêneo de florestas e rios, cultura e modo de vida elusivos, que muitos consideram pouco representativos da rica diversidade étnica e cultural do Brasil (Lopes; Hunt, 2021).

Muitos desconhecem que há Cerrado na Amazônia e que, apesar de onipresentes, as florestas e rios têm nuances que só as populações locais conhecem – seus mais de 220 povos indígenas, que falam 180 línguas. Incrível mesmo é a reserva de biodiversidade, com 427 espécies de mamíferos; 1,3 mil de aves; 427 de anfíbios; e 371 de répteis; além de mais de 3 mil espécies de peixes e 40 mil espécies de plantas, sem falar na riqueza de insetos e microrganismos, essencialmente desconhecidos (Bueno et al., 2019; Vilela et al., 2019). Se reconhecidas e tratadas de forma inteligente, as riquezas naturais e culturais da Amazônia brasileira poderão alavancar a economia, a nossa imagem e atratividade, além de contribuir para a disseminação de progresso de forma mais justa por todo o nosso imenso território (Um projeto..., 2009).

Obviamente não alcançaremos esse objetivo ignorando ou dilapidando esse patrimônio ou tentando protegê-lo com cercas de arame farpado. Conhecer e manejar essa riqueza, de forma arguta e pragmática, é um imperativo para conquistarmos um futuro melhor para a Amazônia e para o Brasil (Becker, 2008). Recuperar e fortalecer a imagem do Brasil como gestor eficiente e inteligente da Amazônia certamente beneficiará nossa economia como um todo. No entanto, os maiores beneficiados por um novo paradigma de desen-

volvimento, a economia da floresta em pé, preservada e produtiva, serão os estados amazônicos e seus habitantes (Nobre, 2019).

A Amazônia é também provedora de serviços como regulação do clima e dos ciclos hidrológicos, oferta de diversidade biológica, fixação de carbono, polinização, reciclagem dos resíduos, dentre muitos outros. Funções que ganham ainda maior relevância neste momento em que alterações climáticas e perda de diversidade biológica limitam a resiliência dos ecossistemas e a capacidade humana de responder a ameaças à segurança alimentar, à saúde das populações, ao comércio e à paz entre as nações (Lopes; Hunt, 2021).

São razões suficientes para que esse bioma seja considerado um dos componentes mais críticos na agenda de descarbonização da economia brasileira, que deve buscar com vigor a contenção da sua diminuição ou perda, minimizando impactos desastrosos para todos. Já sabemos que viabilizar a qualificação, a quantificação e o pagamento por serviços ambientais de uma região tão vasta é tarefa árdua, mas cada vez mais necessária, para que a utilidade e o valor dos recursos naturais da Amazônia não sigam sendo ignorados ou subvalorizados, e para que os esforços daqueles que contribuem para a sua manutenção e fortalecimento sejam reconhecidos pela sociedade (Lopes; Hunt, 2021).

Descarbonização e circularidade na agricultura brasileira

Os impactos negativos das mudanças climáticas, associados a processos de degradação ambiental e uso excessivo de recursos e práticas não sustentáveis, vão estimular o surgimento de inovações que contribuam para a viabilização de economias neutras em carbono no futuro. Até aqui vimos que praticamente todos os setores da sociedade estão pressionados a contribuir para a circularidade e a descarbonização dos seus processos – em linha com múltiplos ODS, o que repercute na vida de todos, produz alterações nos padrões de produção e consumo (ODS 12), e coloca em curso processos de transição para o desenvolvimento sustentável, com grande ênfase no cuidado com o meio ambiente, mas sem perder de vista o desenvolvimento

econômico socialmente justo e inclusivo, o que é a essência da Agenda 2030 e dos ODS (United Nations, 2015).

O sistema alimentar global está no cerne desse desafio por ser um dos maiores usuários de recursos naturais – solo, água e biodiversidade – e um dos impulsionadores do processo de mudança climática (Herrero et al., 2020; Rockström et al., 2009; International Institute for Applied Systems Analysis, 2018, Sperling et al., 2020). A agricultura, por sua dimensão e importância estratégica para o mundo, precisará exceder em resiliência frente aos riscos climáticos e suas repercussões, já amplamente documentados em diferentes instâncias (Masson-Delmotte et al., 2021; International Panel on Climate Change 2022; World Economic Forum, 2022). Resiliência que deverá ser traduzida em mais atenção ao desafio de descarbonização, que seguirá crescendo em importância, e resiliência também traduzida em robustez, para acesso rápido a recursos e apoio, e em mecanismos de backup, redundância e resposta para recuperação e adaptação a futuras crises, que certamente virão (Lopes, 2021a).

Esta é uma realidade desafiadora para o Brasil, único país no cinturão tropical do globo que foi capaz de conquistar a posição de potência agrícola. A boa notícia é que, na base da multiplicação da capacidade produtiva da agricultura brasileira, há um item essencial: densidade tecnológica. Foi graças à substancial elevação na densidade tecnológica da sua agricultura que o Brasil realizou dois feitos importantes em tempo recorde: alcançou a segurança alimentar e projetou-se como importante provedor de alimentos para o mundo (Lopes; Martha Júnior, 2016; Vieira Filho; Gasques, 2016; Vieira Filho, 2019). Hoje, cerca de 70% do que produzimos fica aqui, para alimentar a população brasileira, e os restantes 30% vão a centenas de mercados ao redor do mundo. A inserção da agricultura brasileira no sistema alimentar global teve o grande mérito de nos expor à crescente complexidade dos mercados, às necessidades e expectativas de consumidores em todos os cantos do mundo, o que aumentou a nossa visibilidade externa e forçou a contínua sofisticação dos nossos sistemas produtivos para garantir competitividade (Albuquerque et al., 2008; Lopes, 2013; Embrapa, 2018, Oliveira et al., 2018).

Tal exposição teve o enorme mérito de imprimir velocidade aos esforços de adaptação da agricultura à lógica da sustentabilidade, tema que aos poucos ganhou importância na agenda da sociedade, em todos os cantos do planeta.

Ao longo dos anos, o Brasil empreendeu grande esforço de geração e uso de tecnologias poupa-recursos, de baixa emissão de carbono, capazes de promover a expansão sustentável da produção agrícola. Expansão baseada mais em ganhos na produtividade da terra, com ampliação dos cultivos encadeados, como a segunda safra ou “safrinha”, a recuperação de pastagens degradadas, a integração lavoura-pecuária (ILP) e lavoura-pecuária-floresta (ILPF), o sistema de plantio direto (SPD), a fixação biológica de nitrogênio (FBN), florestas plantadas (FP), dentre outros avanços, todos com significativo impacto na redução de emissões de GEE pela agricultura (Telhado; Capdeville, 2021).

Muitos desses avanços foram viabilizados pela aliança vitoriosa entre ciência agropecuária e políticas públicas, que alcançou grande êxito no Brasil, com programas como o Zoneamento Agrícola de Riscos Climáticos (Zarc) (Assad et al., 2008) e o Plano ABC – Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Brasil, 2012) – que juntos compõem um conjunto articulado de políticas e programas de suporte à promoção da resiliência e da sustentabilidade na agricultura brasileira. A seguir, serão destacados programas, políticas, tecnologias e processos que melhor exemplificam tais avanços, com ênfase naqueles com contribuição significativa para a redução de emissões e avanços em circularidade na agricultura brasileira.

Modernização tecnológica e mudanças no uso da terra

O processo de modernização e expansão da agricultura brasileira, a partir de 1970, foi marcado por vários feitos e eventos que se somaram e tiveram sinergia ao longo do tempo. Compreender os solos tropicais, naturalmente ácidos e pobres em fertilidade, para então construir sua fertilidade, talvez tenha sido o grande ponto de partida desse processo, que foi seguido na década de 1980 com a tropicalização de diversos cultivos, que gradualmente se adaptaram ao bioma Cerrado dominado pelos oxissolos altamente intemperizados. Avanços na mecanização das lavouras e o desenvolvimento de cultivares melhoradas, de porte adequado e mais precoces, gradualmente permitiram a integração de diferentes espécies ao longo do ciclo produtivo, como é o caso da chamada safrinha que viabilizou substancial intensificação no uso da terra em várias regiões do País (Lopes; Martha Júnior, 2016; Vieira Filho; Gasques, 2016; Vieira Filho, 2019; Philipipi; Andreoli, 2021).

Um dos impactos mais marcantes da modernização tecnológica da agricultura brasileira foi a economia de recursos naturais, muitas vezes descrita como “efeito poupa-terra” que está na base dos ganhos de descarbonização auferidos pelo Brasil ao longo das décadas (Telhado; Capdeville, 2021). De acordo com a Tabela 1, entre 1985 e 2006, nas culturas de soja, milho, cana-de-açúcar, algodão, café, trigo e feijão, a produção em 2006 (503 milhões de toneladas) dividida pela produtividade em 1985 (7,2 toneladas por hectare) era igual à quantidade de terra necessária para se produzir usando o padrão tradicional de tecnologia do passado (70 milhões de hectares). Subtraindo-se desse valor a área utilizada por esses cultivos em 2016 (41 milhões de hectares), o efeito poupa-terra é estimado em torno de 29 milhões de hectares ao longo do período (Vieira Filho; Gasques, 2016).

Tabela 1. Efeito poupa-terra (EPT) relacionado à produção agrícola – soja, milho, cana-de-açúcar, algodão, café, trigo e feijão – e pecuária bovina (1985 e 2006).

	Atividade agropecuária	Variáveis	1985	2006	Δ%	(Milhões de hectares)	
			Tradicional	Moderno		EPT	Total EPT
Agrícola	Produção (milhões de toneladas)	P	276,3	503,4	82	29	
	Área colhida (milhões de hectares)	L	38,4	41,2	7		
	Produtividade (toneladas por hectares)	A	7,2	12,2	70		
Pecuária	Efetivo bovino (milhões de cabeças)	Na	128	176,1	38	142	171 (ou cerca de 20% do território nacional)
	Pastagens (milhões de hectares)	L	179,2	160,0	-11		
	Peso-carcaça (quilograma por animal)	G	185,1	226,6	22		
	Taxa de locação (animal por hectare)	S	0,71	1,1	54		
	Produtividade (quilograma por hectare)	A	132,3	249,5	89		
	Produção (mil toneladas)	P	23701,3	39923,4	68		

Fonte: Vieira Filho e Gasques (2016).

Por analogia, na pecuária o efeito poupa-terra depende da produtividade animal, que é derivada da taxa de lotação e do peso-carcaça do animal. Uma vez que a produtividade animal é calculada, a medição do efeito de poupança de terra é bastante semelhante à calculada para os cultivos agrícolas. Então, dividindo-se a produção em 2006 (39.923,4 mil toneladas) pela produtividade animal em 1985 (cerca de 132 quilogramas por hectare), a quantidade de terra necessária foi de aproximadamente 302 milhões de hectares. Removendo-se a partir desse resultado a área ocupada por pastos em 2006 (160 milhões de hectares), o efeito poupa-terra equivale a 142 milhões de hectares. A soma dos efeitos na produção agrícola e pecuária ficou em torno de 171 milhões de hectares, ou cerca de 20% do território nacional (Vieira Filho; Gasques, 2016). Esse efeito mostra o quanto a tecnologia contribuiu para economizar recursos naturais e emissões de GEE.

Estudos semelhantes foram realizados para o período de 1950 a 2017 (Tabela 2), utilizando dados do Censo Agropecuário Brasileiro e da Conab, para demonstrar as profundas mudanças ocorridas nos sistemas de produção de grãos e na pecuária de corte em termos de produção física, área ocupada e produtividade em período de 67 anos. Os enormes investimentos em pesquisa e inovação, além de políticas e programas de estímulo, permitiram a adoção de um considerável número de práticas e inovações nos processos produtivos, que resultaram, a longo das décadas, em substanciais ganhos em produção e produtividade, com economia de recursos naturais e redução de impactos ambientais (Telhado; Capdeville, 2021). Tais avanços garantiram o extraordinário efeito poupa-terra da agricultura no Brasil, feito que não encontra par no mundo tropical.

Tabela 2. Expansão da produção, área e produtividade na agropecuária brasileira de 1950 a 2017.

	Produção (m ton., mil tec)		Área (milhões ha)		Produtiv. (kg/ha, kg/ha ec)	
	1950	2017	1950	2017	1950	2017
"Grãos"	11,1	234,5	10,4	58,8	1.065,30	3.991,10
Pec. Corte	1.084	7.682	108	159	10,1	48,4

Fonte: Martha et al. (2012); Martha e Alves (2018).

Há também que se destacar os avanços em automação e modernização de máquinas e equipamentos usados no campo, processo que teve também impacto significativo nos ganhos de eficiência da produção agropecuária brasileira. Máquinas obsoletas e ineficientes gradualmente deram lugar a máquinas, equipamentos e serviços avançados, similares aos das mais desenvolvidas nações agrícolas do mundo, evolução viabilizada por políticas públicas e programas de suporte, com destaque para o Programa de Modernização da Frota de Tratores Agrícolas e Implementos Associados e Colheitadeiras (Moderfrota) (Salomão, 2002). Essa política pública permitiu a substituição da antiga frota por outra, no estado da arte da automação de lavouras, com impactos diretos nos aumentos de produtividade e eficiência produtiva observados nas últimas décadas, com destaque para a substancial redução de desperdícios, perdas de grãos e consequentes emissões de GEE.

A política pública de descarbonização da agricultura brasileira

O 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) é uma política pública aprovada em 2011 como estratégia do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) para incentivar e disseminar a adoção de boas práticas produtivas, promotoras da redução das emissões de GEE na agricultura brasileira. Essa política foi instituída em 2010, no âmbito do Plano Nacional sobre Mudança do Clima, aprovado em dezembro de 2008, e da Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei nº 12.187/2009), aprovada em dezembro de 2009. No conjunto, essas foram iniciativas do governo brasileiro em resposta à demanda por ações concretas na forma de políticas e programas para redução de emissões de GEE, favorecendo a adaptação às mudanças climáticas (Banco Central do Brasil, 2010).

O Plano ABC contempla um conjunto de tecnologias de baixo impacto – SPD, recuperação de pastagens degradadas (RPD), ILPF, fixação biológica do nitrogênio (FBN), FP, tratamento de dejetos animais (TDA). Essas são inovações comprovadamente capazes de adaptar os sistemas produtivos a uma realidade de mudanças de clima, não só no fortalecimento da resiliência e da produtividade, mas também na redução das emissões e no fortalecimento

da imagem da agricultura brasileira, como fomentadora de adaptação dos sistemas produtivos diante dos riscos e desafios representados pela crise climática (Banco Central do Brasil, 2010).

A viabilização do Plano ABC se deu por meio de vários instrumentos, dentre eles uma linha de crédito para incentivar a adoção de um conjunto de ações em favor da ampliação de uso de tecnologias agropecuárias sustentáveis com alto potencial de mitigação das emissões de GEE e o combate ao aquecimento global. Dos Planos Safra 2010/2011 até 2019/2020 (dados atualizados até o mês de maio de 2020), o Programa ABC financiou R\$ 19,6 bilhões, sendo a recuperação de pastagens degradadas, o SPD e os sistemas integrados ILPF, as práticas que mais demandaram recursos. Na Tabela 3, encontram-se listados os compromissos da agricultura que constituem a base do Plano ABC, bem como suas estimativas de mitigação da emissão de GEE.

Tabela 3. Processo tecnológico, compromisso nacional relativo (aumento da área de adoção ou uso) e potencial de mitigação por redução de emissão de GEE (milhões de Mg CO₂ eq.).

Processo Tecnológico	Compromisso (aumento de área/uso)	Potencial de Mitigação (milhões Mg CO ₂ eq)
Recuperação de Pastagens Degradadas ⁽¹⁾	15,0 milhões ha	83 a 104
Integração Lavoura-Pecuária-Floresta ⁽²⁾	4,0 milhões ha	18 a 22
Sistema Plantio Direto ⁽³⁾	8,0 milhões ha	16 a 20
Fixação Biológica de Nitrogênio ⁽⁴⁾	5,5 milhões ha	10
Florestas plantadas ⁽⁵⁾	3,0 milhões ha	-
Tratamento de Dejetos Animais ⁽⁶⁾	4,4 milhões m ³	6,9
Total	-	133,9 a 162,9

⁽¹⁾Por meio do manejo adequado e adubação. Base de cálculo foi de 3,79 Mg de CO₂ eq.ha⁻¹.ano⁻¹.

⁽²⁾Incluindo Sistemas Agroflorestais (SAFs). Base de cálculo foi de 3,79 Mg de CO₂ eq.ha⁻¹.ano⁻¹.

⁽³⁾Base de cálculo foi de 1,83 Mg de CO₂ eq.ha⁻¹.ano⁻¹.

⁽⁴⁾Base de cálculo foi de 1,83 Mg de CO₂ eq.ha⁻¹.ano⁻¹.

⁽⁵⁾Não está computado o compromisso brasileiro relativo ao setor da siderurgia; e, não foi contabilizado o potencial de mitigação de emissão de GEE.

⁽⁶⁾Base de cálculo foi de 1,56 Mg de CO₂ eq.m⁻³.

Na primeira etapa do plano, implementado entre 2010 e 2020, estima-se que foram mitigadas 170 milhões de toneladas de dióxido de carbono. Na segunda etapa, o Plano ABC+ propõe-se a reduzir as emissões de carbono em 1,1 bilhão de toneladas até 2030, um aumento de sete vezes se comparado ao valor definido originalmente. A nova versão do plano prevê ainda levar tecnologias de produção sustentável para quase 73 milhões de hectares em 9 anos, um aumento de 103% se comparado à meta anterior. No seu conjunto, a política pública brasileira integrou ações, projetos e iniciativas favoráveis a uma agricultura de baixo carbono, em alinhamento com a Agenda 2030 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, e com contribuições concretas para a descarbonização da agricultura, além de possibilidades de geração de créditos de carbono e benefícios financeiros extras para o produtor rural, na medida em que se consolide e se fortaleça o mercado global de carbono.

É, portanto, evidente que os mais de 10 anos de implementação do Plano ABC trouxeram contribuições substanciais para o desenvolvimento da agropecuária brasileira. Levando-se em conta os potenciais benefícios de se planejar a nova fase para o Plano ABC (denominado Plano ABC+), torna-se estratégico avaliar não somente o alcance da adoção das práticas do ABC em termos de área, mas a governança criada para promovê-lo, a nível federal, estadual e até municipal, além dos impactos relacionados à assistência técnica e extensão rural, o aprimoramento das práticas produtivas e consequentes medidas de adaptação, além naturalmente, da redução de emissões de GEE.

O estudo Mitigação das Emissões de Gases de Efeitos Estufa pela Adoção das Tecnologias do Plano ABC (Manzatto et al., 2020), com estimativas parciais realizadas pela Embrapa, faz um diagnóstico do total da mitigação de GEE pelas tecnologias do Plano ABC (Tabela 4). Os autores apresentam a sistematização dos dados utilizados e as estimativas de expansão de área de adoção, redução de emissões com seus respectivos coeficientes por tecnologia incorporada, mitigação total e qualidade geral das estimativas.

Tabela 4. Metas voluntárias, estimativas de expansão da adoção, mitigação e critérios de avaliação decorrentes do fomento às tecnologias de baixa emissão de carbono no âmbito do Plano ABC.

Tecnologias ABC	Recuperação de Pastagens Degradada (RPD)	Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF)	Sistema Plantio Direto (SPD)	Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN)	Florestas Plantadas (FP)	Tratamento de Dejetos Animais (TDA - milhões m ³)	TOTAL
1) Metas do Plano ABC							
1.1) Compromissos ⁽¹⁾ (Milhões ha)	15	4	8	5,5	3	4,4	35,5
1.2) Potencial de Mitigação da Tecnologia (Milhões Mg CO ₂ eq.) ⁽¹⁾	83 a 104	18 a 22	16 a 20	10	N.E.	6,9	132,9 a 162,9
2.1) Área total estimada (Milhões ha)	3,30 ⁽²⁾	26,14 ⁽⁴⁾	32,88 ⁽⁵⁾	33,98 ⁽⁵⁾	0,63 ⁽²⁾	7,84 ⁽⁶⁾	91,04 a 113,88
2.2) Expansão da adoção no período (milhões ha)	3,30 ⁽²⁾	10,45 ⁽³⁾	12,72 ⁽⁵⁾	10,64 ⁽⁵⁾	0,63 ⁽²⁾	0,71 ⁽⁶⁾	33,12 a 40,86 ⁽¹⁶⁾
2.3) % atingida em relação à meta do Plano ABC	22%	70%	159%	193%	21% 41%	39%	103% 93% a 115%
2.4) Período considerado	2010 a 2018	2010 a 2017	2010 a 2017	2010 a 2017	2010 a 2016/2018	2013 a 2018	2010 a 2018

Continua...

Tabela 4. Continuação.

Tecnologias ABC	Recuperação de Pastagens Degradada (RPD)		Integração Lavoura Pecuária Floresta (LLPF)		Sistema Plantaio Direto (SPD)		Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN)		Florestas Plantadas (FP)		Tratamento de Dejetos Animais (TDA - milhões m³)		TOTAL	
3.1) Fator emissão (Mg CO ₂ eq. ha ⁻¹ . ano ⁻¹)	3,79 ⁽⁹⁾	5,50 ⁽¹⁾	3,79 ⁽⁹⁾	6,24 ⁽¹¹⁾	1,83 ⁽⁹⁾	1,83 ⁽⁹⁾	1,83 ⁽⁹⁾	1,69 ⁽²⁾	0,80 ⁽⁴⁾	3,89 ⁽³⁾	1,57 ⁽⁹⁾	-		
3.2) Mitigação (Milhões Mg CO ₂ eq.)	12,54	18,23	39,57	57,52	22,11 ⁽⁹⁾	36,40 ⁽¹¹⁾	23,28	19,74 ⁽⁹⁾	18,03 ⁽¹²⁾	25,37 ⁽¹³⁾	2,67 ^(8a)	7,08 ^(8b)	106,25 ⁽¹⁵⁾	144,56 ⁽¹⁵⁾
3.3) % média atingida em relação à média da meta do Plano ABC	13%	20%	42%	62%	111%	182%	129%	197%	180%	N.E.	39%	103%	72%	98%
4.1) Dados da Atividade*	1	3	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2
4.2) Fatores de Remoção de GEE*	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	1	2
4.3) Qualidade Geral da Estimativa*	2	3	2	2	2	2	2	1	1	2	2	3	2	3

⁽¹⁾ Compromissos voluntários (NAMA) estabelecidos no Plano ABC para expansão da adoção das tecnologias e redução das emissões de GEE. ⁽²⁾ Dados do Banco Central (BACEN) referentes aos financiamentos do Programa ABC. ⁽³⁾ Estimativas de Azevedo (2018) com base na estimativa de lotação de pastagens bem manejadas. ⁽⁴⁾ Dados da Associação Rede LPF e da Plataforma ABC (2016). ⁽⁵⁾ Dados oriundos do Censo Agropecuario (2006 e 2017). ⁽⁶⁾ Dados da Indústria Brasileira de Árvores (2019). ⁽⁷⁾ Total de FP financiadas pelo Plano ABC e outros cultivos florestais (Indústria Brasileira de Árvores, 2019) para a estimativa de sequestro C no solo. ⁽⁸⁾ Dados estimados pela expansão de capacidade de TODA financiada pelo Programa ABC/BACEN. ⁽⁹⁾ Baseado na estimativa de produção média de estercor por categoria animal por Oliveira (1983) e et al. (2010). ⁽¹⁰⁾ Volume diário de dejetos líquidos produzidos em sistemas de produção de suíno para UPL pela Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina (Santa Catarina, 2014). ⁽¹¹⁾ Bustamante et al. (2006). ⁽¹²⁾ Carvalho et al. (2010). ⁽¹³⁾ Plataforma ABC – adaptado de Sá et al. (2017). ⁽¹⁴⁾ Sequestro de carbono na biomassa vegetal (Bustamante et al., 2015). ⁽¹⁵⁾ Sequestro de C no solo sob cultivo florestal – Lima et al. (2006). ⁽¹⁶⁾ Soma das estimativas de redução das emissões, excluindo RPD financiadas pelo Programa ABC e sequestro de C na biomassa de FP. ⁽¹⁷⁾ Soma das estimativas de redução das emissões, excluindo estimativa de RPD financiada pelo Programa.

⁽¹⁸⁾ Não se aplica.

⁽¹⁹⁾ Não se aplica.

Fonte: Manzatto et al. (2020).

O estudo mostra que as tecnologias priorizadas pelo Plano ABC ocupam, atualmente, uma área da ordem de 91 a 114 milhões de hectares, com uma área de expansão nos últimos 7 a 8 anos entre 33 e 41 milhões de hectares, correspondendo a 93% a 115% da meta de compromisso de 35,5 milhões de hectares, comprovando as previsões de adoção do Plano ABC. Calculando-se as taxas de expansão das tecnologias ABC relacionadas ao processo de intensificação produtiva, observa-se uma expansão no período considerado para RPD, ILPF e SPD de 66%, 86% e 45%, respectivamente, e uma taxa de crescimento anual 7,5% para RPD, 9,2% para ILPF e 5,5% para SPD.

Entretanto, as metas setoriais de RPD e FP não foram atingidas com base nas estimativas realizadas, situando-se entre 22% a 70% e 21% a 41%, respectivamente. Ao se considerar as estimativas de especialistas sobre a evolução da recuperação de pastagens no período considerado, da ordem de 10 a 19 milhões de hectares e a parcialidade dos dados de adoção disponíveis até o momento, pode-se afirmar que as metas setoriais já tenham sido atingidas. Porém, necessita-se de um esforço metodológico adicional para a quantificação da evolução da recuperação de pastagens no País, bem como o levantamento do tratamento de dejetos animais nas cadeias de suínos e de pecuária leiteira (Manzatto et al., 2020).

Os autores do estudo argumentam ainda que, apesar das limitações metodológicas do estudo, reflexo da deficiência de coeficientes de emissões regionalizados, a qualidade geral das estimativas foi classificada como nível 2, em sua maioria (Tabela 4). E concluem que os números evidenciam a sustentabilidade ambiental do setor agropecuário e demonstram, para a sociedade brasileira, o forte engajamento dos diferentes atores do setor agropecuário, produtores, técnicos, extensionistas e pesquisadores que trabalharam para a adoção das tecnologias ABC como estratégia de intensificação produtiva para o enfrentamento das mudanças climáticas globais.

Outros avanços para a descarbonização e a circularidade na agricultura

O 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) foi construído sobre uma sólida base científica, resultante de

mais de 50 anos de investimentos em pesquisa na agricultura tropical, e uma intensa participação de diversificado conjunto de atores públicos e privados. No entanto, antes mesmo do advento do Plano ABC já se consolidava no Brasil uma visão mais ampla de desenvolvimento sustentável, em modelo sistêmico de agricultura com abertura cada vez maior para a incorporação de práticas regenerativas e conservacionistas.

Estudo recente da Embrapa comprovou que o uso de tecnologias sustentáveis na agricultura vem de longa data e tem contribuído com a economia de recursos e terras de cultivo da ordem de milhões de hectares (Telhado; Capdeville, 2021). Somente no caso da soja, o uso dessas tecnologias, que incluem a produção de variedades adaptadas à realidade tropical, plantio direto, fixação biológica de nitrogênio, uso de bioinsumos, incluindo controle biológico de pragas, entre várias outras, foi capaz de gerar uma economia de 71 milhões de hectares de áreas plantadas, o que corresponde à soma dos territórios de Irlanda e França (Figura 4). Outros exemplos aliam-se a esse, como a produção de suínos e a avicultura de corte, nas quais o progresso tecnológico obtido entre as décadas de 1970 e 2000 levou à economia de 1,00 milhão e 1,55 milhão de hectares, respectivamente.

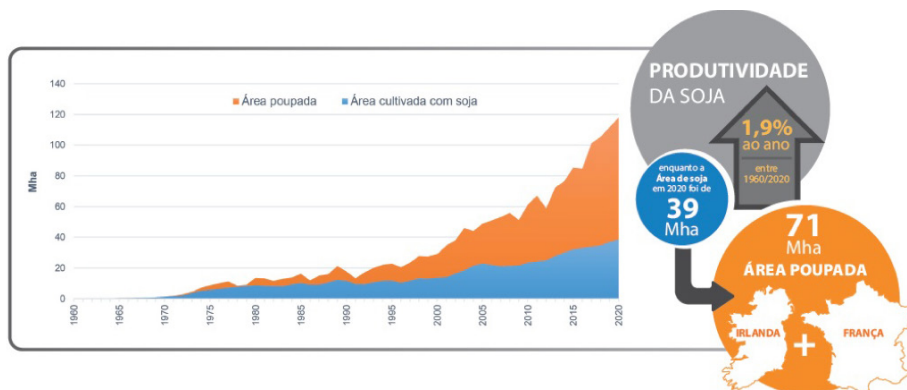


Figura 4. Impactos poupa-terra decorrentes dos avanços tecnológicos incorporados pelos sistemas de produção de soja no Brasil, desde os anos 1970.

Fonte: Telhado e Capdeville (2021).

Além dos impactos na cultura da soja, as tecnologias poupa-terra tiveram também impacto significativo em múltiplos sistemas produtivos no Brasil, como, por exemplo, o setor de frutas, que se beneficiou de tecnologias sustentáveis como o melhoramento genético para adaptar cultivares à realidade brasileira, produção integrada, gestão da cobertura do solo, manejo de água e nutrientes, controle de pragas e doenças e gestão pós-colheita. A estimativa do efeito poupa-terra na produção de frutas para exportação, de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), aponta para um aumento de produtividade de 64% entre a década de 1990 e o ano de 2018.

A área poupada pelo segmento de produção de frutas no Brasil, em 2018, foi superior a 900 mil hectares considerando o cultivo de 11 fruteiras – laranja, banana, melancia, manga, limão, uva, maçã, melão, tangerina, abacaxi e mamão – que correspondem a aproximadamente 38% da área cultivada com fruteiras no Brasil. Dados de 2018 apontam que a produção mundial de frutas é de cerca de 930 milhões de toneladas em aproximadamente 80 milhões de hectares, sendo a produção brasileira de 42,4 milhões de toneladas, 4,6% do total em uma área 2,5 milhões de hectares. Para cada hectare cultivado com frutas, em média dois empregos são criados, totalizando 5 milhões de empregos (Telhado; Capdeville, 2021).

Com o algodão, em cerca de quatro décadas, a produção mais do que triplicou enquanto a área plantada encolheu a menos da metade. Entre os anos de 1976 e 2019, a produção cresceu de 1,2 milhão para 4,3 milhões de toneladas, enquanto a área foi reduzida de 4 milhões de hectares para 1,7 milhão, resultado de grande número de avanços tecnológicos incorporados às lavouras, como cultivares avançadas e sofisticação do manejo das lavouras. Na avicultura e suinocultura, o progresso tecnológico contínuo nas últimas 4 décadas garantiu às atividades lugar no ranking das melhores do mundo, resultado direto dos progressos obtidos ao longo dos anos em vários segmentos, como o melhoramento genético, nutrição, sanidade animal, manejo e ambiência (Telhado; Capdeville, 2021).

No caso da avicultura de corte, em 1975, o frango precisava de 2,1 kg de ração para ganhar 1 kg de peso vivo. Em 2020, esse mesmo quilo de peso foi obtido com 1,7 kg de ração. Considerando a produtividade atual do milho e da soja no País, caso o desenvolvimento tecnológico não tivesse dotado os frangos de maior capacidade de conversão de ração em ganho de peso,

a avicultura de corte demandaria um adicional de 1.551.056,40 ha de terra para entregar as mesmas 16,4 milhões de toneladas de peso vivo de frango produzidas em 2020. Na suinocultura comercial brasileira, a melhora na conversão alimentar entre os anos de 1975 e 2020 permitiu reduzir o consumo de ração de 3,5 kg para 2,6 kg. Sem o aporte tecnológico, seriam necessários 1.007.745,70 ha de terra para produzir as 5,3 milhões de toneladas de carne suína produzidas hoje (Telhado; Capdeville, 2021).

Gestão de riscos na agropecuária é tema de importância estratégica para o Brasil, considerando que grande parte da atividade é desenvolvida a céu aberto, exposta a estresses e intempéries que são mais severos no cinturão tropical do globo (Ray et al., 2015). Nada é simples ou trivial quando se fala de um país-continente como o Brasil. Temos quase 17 mil quilômetros de divisas terrestres, grande parte em florestas, mais de 7.300 km de fronteiras marítimas e um espaço aéreo de mais de 8 milhões de quilômetros quadrados. É por isso que riscos e desafios no Brasil precisam ser, cada vez mais, interpretados e tratados com a melhor ciência, levando em conta a diversidade e a complexidade de relações e interações no espaço rural brasileiro (Biudes, 2005; Monteiro, 2009; Arias et al., 2015; Lopes, 2017a).

O Zoneamento agrícola de risco climático (Zarc) é um exemplo de sucesso da integração de políticas públicas, pesquisa e setor privado (Assad et al., 2008; Santos; Martins, 2016; Monteiro et al., 2021). O Zarc é a ferramenta central para a política agrícola e gestão de risco na agricultura, e é fundamental para minimizar os riscos relacionados a fenômenos climáticos negativos. Permite que as informações locais identifiquem melhor tempo de plantio, por características ambientais e climáticas, categorias de solo e ciclos das cultivares disponíveis. A Embrapa tem papel central na implementação do Zarc, e as informações fornecidas por essa política tornaram-se estratégicas e têm sido instrumentais para desdobrar oportunidades e apoiar outras políticas específicas, como crédito e seguro sob medida para os agricultores (Lopes, 2017a).

Usando modelos ajustados por cultivos e séries de dados de uma expressiva rede meteorológica, o Zarc informa, em âmbito municipal, as probabilidades de sucesso, melhor época para plantar e colher, cobrindo no presente cerca de 50 cultivos diferentes. A implementação desse sistema catalisou uma redução dramática nas perdas por causa dos riscos climáticos e aumentou o desempenho das propriedades, induzindo tanto à adoção quanto ao desen-

volvimento de novas tecnologias, muitas com impacto na redução de emissões. A metodologia e as informações resultantes são de fácil compreensão e adoção pelos agricultores, agentes financeiros e quaisquer outros usuários (Assad et al., 2008; Santos; Martins, 2016).

Duas décadas atrás, a falta de gestão de riscos na condução das lavouras levava a perdas severas e filas de agricultores nos bancos, renegociando dívidas. Em curto espaço de tempo, o Zarc se consolidou como um instrumento de uso fácil pelos agentes financeiros, técnicos e produtores e trouxe uma economia de cerca de R\$ 16,8 bilhões para o agronegócio brasileiro só no ano de 2018. São prejuízos que o País deixou de sofrer com as perdas de safras e as indenizações securitárias que elas provocariam. O sucesso do Zarc teve enorme impacto na modernização, incluindo a descarbonização dos sistemas produtivos, e atesta a capacidade brasileira de inovar para construção de um futuro menos arriscado e mais sustentável para os nossos agricultores e consumidores (Lopes, 2017a; Monteiro et al., 2021).

O Brasil conta ainda com um dos melhores exemplos de economia circular no seu setor sucroenergético (Alves; Lopes, 2021; Coelho et al., 2021). Aqui a cana-de-açúcar é cultivada com grande economia de insumos químicos, via controle biológico de pragas e adubação orgânica. A palha permanece no campo para proteger e enriquecer o solo. Produzidos açúcar e etanol, a vinhaça é aproveitada como fertilizante, e o bagaço produz bioeletricidade. Do bagaço e do melaço derivam-se componentes utilizados por múltiplas indústrias, e novas tecnologias enzimáticas já transformam resíduos celulósicos da cana em mais etanol.

Portanto, as agroindústrias de cana se destacam pela produção concomitante de alimentos (açúcar), biocombustíveis (etanol de primeira e segunda geração, biogás), bioenergia (bioeletricidade), além de matéria-prima para a produção de variada gama de químicos verdes, por meio de biorrefinarias (Vandenbergh et al., 2022). Isso foi possível graças às biotecnologias embarcadas nos materiais genéticos adaptados às diferentes regiões de cultivo, às tecnologias embarcadas nos sistemas de plantio, esquemas de fertilização, métodos de controle de pragas e doenças, colheita e processamento, além de grande número de inovações na área industrial, que trouxeram enormes progressos e deram grande competitividade ao setor sucroenergético brasileiro.

Desafios para o futuro

Os desafios que se descortinam perpassam múltiplos domínios e só podem ser tratados adequadamente quando se amplia o conhecimento sobre a natureza interconectada dos sistemas naturais, sociais, econômicos, políticos e tecnológicos. O que já pode ser comprovado pelas crises que o mundo vive no presente – mudanças climáticas, pandemia, guerra no leste Europeu, inflação e distúrbios nos fluxos globais de insumos e alimentos – além de suas inter-relações, das quais emergem variados tipos de riscos e situações antes improváveis que, de repente, se tornam reais (Lopes, 2022).

O conflito que emergiu em 2022 com a inesperada invasão da Ucrânia pela Rússia nos oferece exemplo cristalino do erro de design do modelo econômico corrente, que tolera equilíbrios extremamente tênues e cultiva dependências perigosas (Choudhary et al., 2022; Behnassi et al., 2022). É constrangedor que muitos, ao serem confrontados com a escalada nos preços da energia, com os cortes nos fluxos de fertilizantes e os riscos de desabastecimento de alimentos em escala global, concluam simploriamente que esses são males inevitáveis, por estarmos submetidos à lógica dos mercados em uma economia capitalista e globalizada (Lopes, 2022).

Nesse complexo quadro, destaca-se a pandemia de covid-19, um infortúnio de grandes proporções e natureza sistêmica, com crises de saúde, econômica e social, ocorrendo em sinergia e atingindo todos no mundo, ao mesmo tempo, por um período prolongado (Bisoffi et al., 2021; Carducci et al., 2021; Roubik et al., 2022; Sperling et al., 2022). Crise que tornou dolorosamente claros os erros de design, não só dos sistemas de saúde, mas também dos sistemas alimentares. A crise sanitária mostrou que o sistema alimentar global é hoje movido mais por interesses econômicos que pela missão de fornecer alimentos acessíveis, seguros, nutritivos e aceitáveis para todos (Lopes, 2022).

No preparo para a retomada pós-pandemia, muitos países fizeram movimentos na direção do chamado *Green New Deal*, ou retomada verde, uma espécie de acordo social para reinvenção de práticas de produção e consumo com foco na sustentabilidade, o que exige mudanças econômicas significativas. Diversos estudos focalizados na sustentabilidade indicam possibilidades de redução de emissões de GEE, redução de desigualdade de renda e eleva-

ção dos níveis de desenvolvimento humano quando se promove elevação da criatividade e da complexidade na economia (Rowan; Pogue, 2021).

Ao contrário de muitos outros problemas, como drogas, violência e pobreza, a crise climática tem alcançado crescente prioridade na agenda da sociedade, mobilizando pensamento estratégico e diplomacia para a tão necessária mudança de comportamento que leve à descarbonização da economia global. E a engenharia de sistemas de baixa emissão tem dado sinais animadores de progresso, na medida em que empresas, governos e consumidores estão cada vez mais dispostos a testar e implantar inovações. Avanços tecnológicos já são observados em setores como geração de eletricidade, agricultura, automóveis, edifícios, navegação, aviação e siderurgia, que juntos produzem cerca de 80% das emissões mundiais (Mehta et al., 2021; Deng et al., 2022).

Embora os esforços diplomáticos e os acordos internacionais sejam muito importantes para apontar direções e buscar consensos em torno do complexo desafio de descarbonizar a economia global, é cada vez mais claro que mecanismos assessórios serão necessários para tornar mais célere o processo de mudança, evitando substanciais frustrações no âmbito da Agenda 2030. O Acordo de Paris (United Nations, 2015), principal compromisso mundial sobre as alterações climáticas, envolve quase duas centenas de países, cada um com suas próprias agendas e interesses, o que limita a capacidade da diplomacia para produzir mudanças na velocidade que a crise climática exige (Ahonen, 2022). É por isso que tais acordos globais terão, cada vez mais, a função de definir referências e trajetórias possíveis, assumindo, no aspecto operacional, mais o papel de norteadores de mudanças que de liderança na implementação de ações concretas e impactantes.

A despeito da difícil situação que o mundo vive, é preciso acreditar que líderes mais visionários conseguirão canalizar a energia que emerge da crescente preocupação da sociedade com a crise climática para o desenvolvimento de inovações, de políticas públicas e de incentivos à descarbonização e à circularidade na economia (Patermann and Aguilar, 2021; Sudain et al., 2021). A resposta às crises sanitária, climática e geopolítica pode criar uma oportunidade sem precedentes para construção de um mundo melhor, caso governos se disponham a investir em capital humano, inteligência estratégica, sistemas de proteção social e em infraestrutura e tecnologia resilientes e sustentáveis.

Bioeconomia como modelo de produção de base biológica, limpa e circular

a bioeconomia entra com vantagem na complexa equação da sustentabilidade, por ser capaz de combinar de forma sinérgica recursos naturais e tecnologias inovadoras, em modelo de produção de base biológica, limpo e renovável. Por meio da bioeconomia, o modelo de produção linear, gerador de resíduos, descartes e poluição, é substituído por um modelo limpo e circular, em que materiais são devolvidos ao ciclo produtivo pela reutilização, recuperação e reciclagem. Essa característica faz da bioeconomia uma plataforma capaz de produzir sinergia entre múltiplas atividades de interesse da sociedade, integrando de forma nunca imaginada as indústrias de energia, alimentos, química, materiais, saúde, dentre muitas outras, criando convergência e complexidade que prometem dominar e fortalecer a economia do futuro (D'Amico et al., 2022; Von Braun, 2020).

O sofisticado embasamento técnico da biologia avançada e da biotecnologia moderna já possibilita a criação de imensa gama de novos produtos e processos, tais como energia renovável, alimentos funcionais e biofortificados, biopolímeros, novos materiais, medicamentos e cosméticos, dentre muitos outros. Isso faz com que o Brasil tenha uma janela de oportunidade para participar de maneira significativa desse desafio, garantindo espaço competitivo para inovadores produtos e processos de base biológica, em segmentos vitais como a agricultura, a saúde, e as indústrias química, de materiais e de energia. O que vemos é apenas a ponta do iceberg, comparado ao que se anuncia, por exemplo, com a biologia sintética, resultado da convergência do mundo digital com o mundo biológico, que abrirá caminhos para uma inusitada gama de biofármacos, bioinsumos e bioprodutos (Lopes, 2020b).

A bioeconomia abre também espaços para avançarmos no entendimento e na gestão dos serviços ambientais e ecossistêmicos que os recursos naturais proveem à sociedade. Além de alimentos, água e matérias-primas, a natureza também nos provê de serviços como regulação do clima e dos ciclos hidrológicos, oferta de diversidade biológica, fixação de carbono, polinização, reciclagem dos resíduos, recreação, dentre muitos outros. Viabilizar a qualificação, a quantificação e o pagamento por serviços ambientais é tarefa árdua, mas cada vez mais necessária, para que a utilidade e o valor dos recursos

naturais não sejam ignorados ou subvalorizados e para que os esforços daqueles que contribuem para a sua manutenção e fortalecimento sejam reconhecidos pela sociedade (D'Amato et al., 2020; Lopes, 2020 b).

A bioeconomia cria, portanto, inúmeras possibilidades de transformação e dinamização de setores estratégicos para o Brasil, como a agricultura, que já posiciona o País na vanguarda da produção de alimentos, fibras e energia no mundo. Os avanços em tecnologia de biomassa já permitem antever um futuro em que as usinas de açúcar e álcool brasileiras se associem a biorrefinarias, produzindo ampla linha de químicos renováveis (Alves; Lopes, 2021). Sistemas integrados, combinando lavouras, pecuária e floresta, já nos permitem produzir carne, grãos, fibras e energia com emissões líquidas de carbono muito baixas ou, em algumas situações, com captura maior que emissão. E ao avançarmos no entendimento e na gestão dos serviços ambientais e ecossistêmicos associados aos nossos recursos naturais, ampliaremos também a contribuição dos ativos ambientais brasileiros na geração de mais benefícios econômicos e progresso para a sociedade (Embrapa, 2018, Oliveira et al., 2018; Vilela et al., 2019; Lopes, 2021a).

Mas, para ingressar de maneira fortalecida na nova vertente de desenvolvimento de base biológica, o Brasil precisará sofisticar processos e instituições na busca de entender possibilidades e riscos, de modelar trajetórias possíveis, e gerar informações cientificamente substanciadas para suporte à formulação, melhoria e efetivação de políticas e estímulos para o desenvolvimento da bioeconomia no País. É por isso que a ciência de sistemas precisa ser priorizada e fortalecida, para ganharmos capacidade de promover a colaboração intersetorial e multidisciplinar requerida pela nova economia de base biológica, quebrando os “silos” científicos e institucionais no processo de formular políticas e promover avanços em áreas estratégicas, que são usualmente complexas e demandam ação interdisciplinar e transversal.

Conformando um sistema alimentar descarbonizado, circular e resiliente

O Brasil precisará buscar melhor alinhamento com o conceito de “Sistema Alimentar Global” e nele consolidar seu espaço competitivo (Lopes, 2020 b). O conceito de sistema alimentar unifica as atividades de múltiplas cadeias de

suprimentos de alimentos, destaca suas interdependências (de ações e atores) e é contextualizado pelas prioridades sociais, econômicas, ambientais e de saúde (este último muito fortemente, após a pandemia). Esse conceito ganha importância e se consolida porque os sistemas alimentares estão crescentemente pressionados pelos desafios postos no âmbito de praticamente todos os ODS (Fan, 2021; Herrero et al., 2021; Steiner, 2021).

Uma visão sistêmica de alimento e saúde emergirá fortemente da crise atual, portanto não faz qualquer sentido ignorar o conceito de sistema alimentar e desconhecer suas implicações para uma grande nação agrícola e exportadora como o Brasil (Carducci et al., 2021; Fan, 2021). Não há mais espaço para que agricultura e alimentação sejam considerados e geridos a partir de uma visão verticalizada, definida por silos disciplinares e por noções já ultrapassadas que não conseguem conectar, integrar ou trazer sinergia aos processos de produção, processamento, distribuição e consumo de alimentos. Esse último marcado por desejos e expectativas cada vez mais sofisticados dos consumidores, que impactam todos os demais (Herrero et al., 2020, 2021; Sperling et al., 2022).

Muitos estudos vêm demonstrando que a crescente dependência das importações de alimentos combinada com uma queda no número de parceiros comerciais e a crescente especialização das cadeias de alimentos implicam em maior vulnerabilidade a choques (Fan, 2021; Herrero et al., 2020, 2021; Sperling et al., 2022). A crise consolidará a visão de que o modelo de agricultura e alimentação que temos agora já não funcionava para grande parte da população mundial em termos de fornecimento de dietas saudáveis e acessíveis, também não funciona para os países ricos do ponto de vista de garantia de abastecimento em situações de crise. E, somando tudo, é possível que venham à tona, ainda com mais força, os reclames sobre os impactos do setor agroalimentar sobre os recursos naturais, a biodiversidade e a poluição – em especial as emissões de gases que impactam clima (Anderson et al., 2022).

Portanto, é essencial que o Brasil abraçe com rapidez um conceito renovado de sistema alimentar, aceitando reconhecer e tratar interdependências e se esforçando para contextualizar prioridades sociais, econômicas, ambientais e de saúde, em sintonia com visões e práticas que emergirão muito fortemente, em âmbito global, na pós-pandemia (Bisoffi et al., 2021; Carducci et al., 2021; Roubik et al., 2022; Sperling et al., 2022). O Brasil precisará centrar

prioridade no fortalecimento da resiliência da agricultura, intimamente conectada a ganhos em circularidade e descarbonização, com ações que se traduzam em prioridade para “robustez”, “redundância”, “recursos”, “resposta” e “recuperação”, para que a agricultura siga contribuindo com o fortalecimento da sociedade brasileira e com a segurança alimentar nacional e global, em coerência com a agenda de desenvolvimento sustentável e os ODS, como a seguir descrito.

- **Robustez:** dependente da existência e da funcionalidade de sistemas de inteligência estratégica, capazes de sistematicamente antecipar futuros possíveis e orientar resposta e adaptação às crises e aos desafios imprevistos, quando surjam. Tal capacidade permite detecção precoce de falhas e fortalecimento da proteção às cadeias de comando para tomada de decisões e resposta tempestiva a quaisquer situações de perigo ou instabilidade. Por exemplo, um sistema de inteligência para consolidar o conceito e a prática de saúde única (Zhang et al., 2022) e o rastreamento de riscos de novas zoonoses é essencial para mostrar ao mundo que os nossos sistemas de produção de proteínas animais são robustos e seguros.
- **Redundância:** um erro recorrente em benefício da eficiência e do menor custo em tudo o que fazemos é a remoção de mecanismos de redundância e backup, porque, sempre considerados custosos, acabam relegados a segundo plano ou muitas vezes sequer lembrados. No entanto, a atual crise demonstra que a existência de capacidade e sistemas de backup é fundamental para manter a funcionalidade de infraestruturas críticas durante situações de estresse e distúrbios.
- **Recursos:** como sistema que contribui com mais de 20% do produto interno bruto (PIB) brasileiro e, mais que isso, com a saúde e o bem-estar de milhões de pessoas no País e no exterior, a agricultura precisa ter recursos prontamente acessíveis, que lhe deem capacidade de se adaptar de maneira flexível às crises, para que a população, as indústrias e os clientes internacionais possam criar confiança na nossa capacidade de resolver desafios imprevistos. Aqui, o setor privado precisa ser instado a compor e gerir, com o Estado brasileiro, fundos que garantam recursos estratégicos para resposta tanto a novas oportunidades quanto a riscos inesperados.

- **Resposta:** a agricultura precisa contar com capacidade rápida de mobilização diante de crises, com métodos sólidos para coleta de informações relevantes de todas as partes da sociedade, e capacidade de usá-las para produzir soluções rápidas para problemas, além de comunicá-las com celeridade a outros entes que são parte das soluções e respostas a crises. A revolução digital precisará estar na base de um potente sistema de rastreamento, análise e resposta célere a riscos e crises, quando surjam.
- **Recuperação:** é o mecanismo de governança do sistema alimentar que definirá sua capacidade de reagir e responder, com celeridade, para que uma situação de crise e estresse possa rapidamente recuperar um certo grau de normalidade no menor espaço de tempo possível.

Esses são os elementos mínimos para a construção de um conceito de sistema alimentar resiliente para o Brasil (Lopes, 2020a). Com isso o Mapa e o governo federal garantirão a confiança da sociedade para agir de maneira eficaz e eficiente, e o setor privado será compelido a se alinhar, garantindo a preparação e a resposta no âmbito da sua atuação. O sistema alimentar brasileiro ganhará ainda mais resiliência na medida em que a sociedade civil seja estimulada a se tornar vigilante sobre os destinos da agricultura e do agronegócio, em todos os seus componentes, com especial atenção aos públicos mais vulneráveis, tanto no contexto da produção como da segurança alimentar, buscando cada vez maior alinhamento com a agenda global de desenvolvimento sustentável.

Impacto da agricultura na transformação de outros setores econômicos

A agricultura brasileira já vem se destacando com avanços essenciais para habilitar o País a endereçar frontalmente os riscos decorrentes da crise climática, galgando posição de grande destaque na agenda global pela descarbonização. O investimento em um modelo de agricultura baseado em ciência nos permitiu elevar substancialmente a produtividade das lavouras, com expressiva redução na demanda por terras, enquanto o País alcançava a sua segurança alimentar e se projetava como grande exportador de alimentos. O País tem também uma história de excelência na produção e uso de bio-

combustíveis e, mais recentemente, na produção de químicos verdes (Hellvig et al., 2021). Hoje, cerca de 46% da energia produzida no País provém de fontes renováveis, sendo que mais de 18% são produzidos a partir de biomassa da cana (Silva et al., 2021).

O Brasil é um dos poucos países em condições de modelar uma agricultura inteiramente dedicada à biomassa para fins energéticos e industriais, focalizada no desenvolvimento e na produção de grande diversidade de fontes viabilizadoras de uma potente vertente industrial, na lógica da bioeconomia. Vertente sustentada não apenas em energia renovável, mas também em biorrefinarias capazes de derivar de biomassa praticamente tudo o que hoje se destila do petróleo (Vandenberghe et al., 2022). Se o País incorporar uma visão assim ousada, e for capaz de compor legislação e estímulos condizentes, suas bioindústrias poderiam alimentar cadeias de alto valor agregado, sustentadas na transformação de biomassa em energia, química verde e materiais renováveis cada vez mais demandados.

O setor sucroenergético do País é, possivelmente, um dos principais exemplos de biorrefinaria de sucesso, em âmbito global. As agroindústrias de cana produzem concomitantemente alimentos (açúcar), biocombustíveis (etanol de primeira e segunda geração, biogás), bioenergia (bioeletricidade), além de matéria-prima para a produção de químicos verdes *drop in*. Isso foi possível graças à biotecnologia embarcada nos materiais genéticos adaptados às diferentes regiões de cultivo, às tecnologias embarcadas nos sistemas de plantio, esquemas de fertilização, métodos de controle de pragas e doenças, colheita, etc. (Bordonal et al., 2018; Klein et al., 2019; Alves; Lopes, 2021; Karp et al., 2021; Vandenberghe et al., 2022).

Assim como no campo, nas indústrias há também um número abundante de tecnologias em uso no dia a dia das usinas, desde os processos fermentativos e insumos industriais utilizados na produção do bioetanol, aos processos químicos empregados na produção de químicos verdes *drop-in*, como o polietileno e o EVA verdes. Sem falar nos componentes de engenharia e automação que permitem que as usinas e refinarias operem no limite de sua eficiência. O desenvolvimento tecnológico, tanto agrícola quanto industrial, foi um dos principais fatores que posicionaram o setor sucroenergético na vanguarda, permitindo ao País alcançar uma posição de destaque na agenda bioeconômica global (Klein et al., 2019; Vaz, 2020; Alves; Lopes, 2021; Karp et al., 2021).

E as perspectivas para o futuro são igualmente auspiciosas, considerando o desenvolvimento tecnológico em áreas como a biotecnologia vegetal, incluindo aqui a revolucionária técnica de edição gênica reconhecida com o Prêmio Nobel de Química em 2020 (Strzyz, 2020), a biotecnologia industrial (Kircher, 2021), química de renováveis (Souza; Silvestre, 2022), dentre outras. Inovações nessas frentes permitirão que sigamos produzindo novas variedades cada vez mais produtivas, com características que fortaleçam a produtividade e a sustentabilidade da produção agrícola, com produção aprimorada de biocombustíveis e mais bioprodutos a partir da biomassa vegetal (Hickey et al., 2019; Boha et al., 2020; Varshney et al., 2020; Alves; Lopes, 2021; Crisp et al., 2022). No setor sucroenergético, atores importantes da ciência e tecnologia nacional, como a Embrapa Agroenergia e o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), vêm trabalhando no desenvolvimento de novas variedades de cana-de-açúcar, convencionais, geneticamente modificadas ou editadas, com maior teor de açúcar, maior digestibilidade da parede celular (melhorando a liberação de açúcares para produção de etanol 2G, ou palatabilidade da silagem para alimentação animal), além de tolerância a pragas importantes da cultura, como a broca e o bicudo. Estão sendo desenvolvidas também variedades mais tolerantes a vários estresses bióticos, como toxidez de alumínio (problema recorrente em vários solos nacionais), seca e herbicidas, que permitirão uma ampla expansão nas áreas de plantio da cultura (Alves; Lopes, 2021).

Atentos ao potencial da biotecnologia industrial para produção de biocombustíveis de segunda geração, a Embrapa Agroenergia e o CTC investem também no desenvolvimento de tecnologias enzimáticas para desconstrução da biomassa lignocelulósica, que ampliam a possibilidade de se expandir a produção de etanol e outros componentes industriais. Investimento na área de química de renováveis permitirá que, em futuro próximo, a indústria petroquímica possa ser descarbonizada a partir da biomassa. Uma usina que hoje produz açúcar, etanol, bioeletricidade e biogás, a partir de cana-de-açúcar, poderá, com a tecnologia adequada, produzir praticamente qualquer tipo de molécula e/ou produtos que hoje são produzidos usando matérias-primas não renováveis, em especial o petróleo (Alves; Lopes, 2021).

A Embrapa vem atuando também por meio do seu Portfólio de PD&I em Energia, Química e Tecnologia da Biomassa (TecBiomassa) no desenvolvi-

mento de processos industriais avançados e produtos inovadores de base renovável, sustentados na imensa capacidade brasileira de produção de biomassa. A Embrapa considera que a agricultura poderá assumir papel estratégico na descarbonização de indústrias que estão sob grande pressão por extrema dependência de recursos fósseis – como as indústrias de energia, química e materiais. Ao contribuir para a descarbonização de tais indústrias, a agricultura ampliará interação com cadeias de valor de alto impacto econômico, ambiental e social, ao mesmo tempo respondendo às expectativas de uma sociedade ávida por sustentabilidade.

O Portfólio TecBiomassa da Embrapa opera em um campo relativamente novo e desafiador para a pesquisa agropecuária, que procura posicionar o Brasil como gerador de conhecimentos, processos e produtos inovadores que contribuam para ampliar o aproveitamento da biomassa no âmbito da nova economia de base biológica, limpa e renovável, que ganha força em todo o mundo. Biomassa definida aqui como qualquer material de base biológica, resíduo ou não, incluindo a própria biodiversidade. Para alcançar esse objetivo, o portfólio definiu desafios de inovação (Tabela 5) concentrados no domínio tecnológico de processos industriais e avanços do conhecimento que não são usualmente priorizados pela pesquisa agropecuária.

Tabela 5. Desafios de inovação que orientam a composição do Portfólio de Pesquisa e Inovação em Energia, Química e Tecnologia da Biomassa (TecBiomassa) da Embrapa.

Ampliar a eficiência de processos agroindustriais para espécies não-tradicionais na produção de combustíveis e energia

Ampliar a produção de etanol e de energia renovável a partir do processamento de sorgo sacarino, milho e cana-de-açúcar

Ampliar o uso da biomassa vegetal para a produção de plásticos e materiais renováveis e/ou biodegradáveis

Ampliar o uso de resíduos da produção ou de agroindústrias de animais e vegetais para geração de energia renovável por processos de digestão anaeróbia

Continua...

Tabela 5. Continuação.

Aumentar a eficiência energética e econômica nos processos industriais de produção de açúcar e álcool de segunda geração
Disponibilizar processos agroindustriais mais eficientes na produção de bioenergia e biolubrificantes a partir de óleos vegetais, gorduras animais e outras fontes lipídicas
Viabilizar métodos e procedimentos para obtenção de produtos e processos com aplicações nas indústrias de alimentos, química, materiais, fármacos e cosméticos a partir da biomassa, com ênfase na atividade agropecuária e na biodiversidade
Viabilizar o aproveitamento de CO ₂ emitindo pela transformação da biomassa (combustão, pirólise, fermentação) em ativos úteis e emissões negativas de carbono
Viabilizar procedimentos, indicadores e inventários aplicáveis e certificações baseadas na avaliação e quantificação de impactos gerados ao longo do ciclo de vida de processos e produtos derivados de biomassa
Viabilizar processos agroindustriais, novos produtos e energia limpa a partir de soja e de resíduos de indústrias de açúcar, álcool, papel, celulose, coco e mamona
Viabilizar soluções de suporte à análise de dados e tomada de decisão para o planejamento e gestão da produção na indústria de base biológica

Fonte: Embrapa (2022).

Descrição, qualificação e valoração de serviços ambientais e ecossistêmicos

nenhum país bate o Brasil no quesito riquezas naturais (IBGE, 2004; Bueno et al., 2019; Vilela et al., 2019; Lopes; Hunt, 2021). Quinta maior nação do globo, com 8,5 milhões de quilômetros quadrados, nosso território cobre 5,6% das terras do planeta e 48% da América do Sul. Nossa vasta superfície de terra contínua é agraciada por grande oferta de água-doce, abundante energia solar e a maior reserva de biodiversidade do globo. Nossas riquezas naturais ganham ainda maior relevância nesse momento em que alterações climáticas e perda de diversidade biológica limitam a resiliência dos ecossistemas

e a capacidade humana de responder a ameaças à segurança alimentar, à saúde das populações, ao comércio e à paz entre as nações, como amplamente enfatizado pela Agenda 2030 (ODS 15).

É por isso que o desenvolvimento do Brasil no futuro poderá ser impactado por nossa capacidade de transformar esse manancial em respostas aos riscos à frente e em mais progresso para a sociedade. Se manejada de forma inteligente, nossa riqueza natural poderá alavancar a economia, a nossa imagem e atratividade, e a disseminação de progresso de forma mais justa por todo o nosso imenso território. Obviamente, não alcançaremos esse objetivo dilapidando nosso patrimônio natural ou tentando protegê-lo com cercas de arame farpado. Conhecer e manejar essa imensa riqueza, de forma arguta e pragmática, é um imperativo para conquistarmos um futuro melhor para o Brasil (Lopes, 2016, 2017a; Embrapa, 2018; Lopes; Hunt, 2021).

O novo Código Florestal Brasileiro é exemplo do que nenhum outro país do mundo foi capaz de fazer para proteger a vegetação nativa e as fontes e cursos d'água nas propriedades rurais privadas (Soterroni et al., 2018). O Brasil está, na verdade, construindo um ativo único por meio dessa legislação, e se diferenciando pela forma corajosa e ousada com que trata sua riqueza natural. O Código Florestal já destaca o Brasil como nação capaz de gerir eficiente e diferenciadamente propriedades rurais, o que, infelizmente, a maioria dos países dificilmente conseguirá (Embrapa, 2018, Oliveira et al., 2018).

Apesar dos avanços que acumulamos, há ainda um passivo de entendimento, até entre os brasileiros, do quanto a nossa agricultura migrou para uma lógica sistêmica, respondendo e se ajustando às três dimensões da sustentabilidade. Muitos brasileiros desconhecem que o País é líder global na geração e no uso de tecnologias poupa-recursos, de baixa emissão de carbono, que tem sido a base da expansão sustentável da nossa produção agropecuária (Parron et al., 2015, Embrapa, 2018; Telhado; Capdeville, 2021). Expansão baseada mais em ganhos na produtividade da terra, de estímulo à incorporação de práticas sustentáveis à sofisticação tecnológica da agricultura, que removeu estacionalidade de produção, reduziu custo dos alimentos e deu enorme contribuição à segurança alimentar e nutricional da população brasileira (Lopes; Martha Júnior, 2014, 2016; Vieira Filho; Gasques, 2016).

É por isso que um dos maiores desafios para o Brasil é avançar no entendimento e na gestão dos serviços ambientais e ecossistêmicos que a vasta extensão de recursos naturais que permanecem intocados e as áreas dedicadas à agropecuária proveem à sociedade. Além de alimentos, água e matérias-primas, a natureza também nos provê de serviços como regulação do clima e dos ciclos hidrológicos, oferta de diversidade biológica, fixação de carbono, polinização, reciclagem dos resíduos, recreação, etc. (Lopes, 2021a, 2019b). Identificar, qualificar e mensurar os impactos de tais serviços é a única forma de incluí-los de modo permanente nos processos de tomada de decisão da sociedade. E assim ampliaremos também a contribuição dos nossos ativos ambientais na geração de mais benefícios econômicos e progresso para os agricultores e a sociedade (Lima; Martins, 2022).

Encarar esse desafio se tornou essencial porque todas as opções alternativas de uso da terra e dos recursos naturais envolverão interesses, muitas vezes antagônicos, e, por isso, cada vez mais difíceis de gerenciar. Já sabemos que viabilizar a qualificação, a quantificação e o pagamento por serviços ambientais é tarefa árdua, mas cada vez mais necessária, para que a utilidade e o valor dos recursos naturais não sejam ignorados ou subvalorizados, e para que os esforços daqueles que contribuem para a sua manutenção e fortalecimento sejam reconhecidos pela sociedade (Lopes, 2019, 2021b).

Entre todos os países tropicais, o Brasil dispõe das melhores condições para incorporar com sucesso essa agenda, agregando uma marca positiva e diferenciada à imagem dos seus setores mais estratégicos – agricultura e meio ambiente. Demonstrar coragem e capacidade de abraçar desafio tão arrojado vai solidificar uma marca de contemporaneidade e uma imagem fortalecida do Brasil para os brasileiros e para um mundo sedento por avanços mais ousados na direção da sustentabilidade.

Para isso, é necessário que se organize um grande esforço de análise dos fatores que estão na base dos serviços ambientais e ecossistêmicos associados aos sistemas de produção agrícola, aos padrões de consumo de alimentos e matérias-primas derivadas da agricultura, ao uso energético e material de biomassa, à economia de reciclagem e ao uso em cascata, além de novas tecnologias e práticas que conduzam à preservação e ao fortalecimento dos serviços da natureza, como regulação do clima e dos ciclos hi-

drológicos, oferta de diversidade biológica, fixação de carbono, polinização, reciclagem dos resíduos, etc.

Com esse conhecimento estaremos mais preparados a argumentar, de forma mais inteligente e assertiva, com aqueles que insistem que o Brasil deve se responsabilizar sozinho, e de graça, por uma enorme fatia da proteção ambiental do planeta. Usar a melhor ciência para qualificar e valorar tais ativos será essencial para mudarmos o rumo do debate e desmistificarmos percepções equivocadas acerca da gestão dos recursos naturais no Brasil, nos libertando de opiniões e julgamentos simplórios e pouco fundamentados sobre a nossa realidade, que, constantemente disseminados, só causam perplexidade e conflito.

É, portanto, imprescindível que o Brasil organize uma grande coalizão, com universidades, institutos de pesquisa, agências públicas, setor privado, agentes financiadores e parceiros internacionais para produzir avanços concretos na descrição, qualificação e valoração dos serviços ambientais e ecossistêmicos associados à imensidão de recursos naturais que permanece intocados, além da agropecuária sustentável que contribui significativamente para a segurança alimentar, nutricional e ambiental do Brasil e do planeta (Lopes; Hunt, 2021).

Fortalecimento da circularidade e da descarbonização no campo por sistemas de precisão

Cirurgiões, pilotos de avião, arquitetos, engenheiros, farmacêuticos, meteorologistas e outros profissionais são treinados a trabalhar com exatidão e precisão, uma vez que equívocos nas suas profissões podem colocar vidas em risco. A agricultura, pelas implicações que tem na saúde e bem-estar das pessoas, no meio ambiente e na economia dos países, é atividade que também exige cada vez mais precisão, profissionalismo e exatidão em todos os seus processos (Kuch et al., 2020). Tomemos como exemplo o controle de pragas em uma lavoura, com monitoramento para avaliar a pressão de ataque, o limiar de risco econômico, e as intervenções para controle. Na agricultura convencional, aplicações de defensivos são realizadas em todo o campo e não apenas nas áreas ou plantas afetadas, o que significa custos e impactos ambientais desnecessários (Bhakta et al., 2019).

Essa realidade vai mudar com o advento da inteligência artificial e da automação digitalmente pilotada, que viabilizarão o manejo sítio-específico nas lavouras com enorme redução de custos e riscos, além de avanços em sustentabilidade, como previsto no ODS 9 –Indústria, inovação e infraestrutura. Manejo sítio-específico é outro termo para caracterizar agricultura de precisão, que nas suas versões mais avançadas envolve o uso de algoritmos que analisam o estado geral das lavouras, as condições locais do solo e do clima para ajudar o agricultor, por exemplo, a definir a quantidade e o momento das aplicações de insumos, que são realizadas com grande precisão, usando equipamentos guiados por satélite, operando com grande exatidão por sensores e atuadores que permitem aplicação de quantidades corretas nos locais e momentos adequados (Bhakta et al., 2019).

A implementação de práticas de manejo sítio-específico nas fazendas vai provocar uma revolução na agricultura, por algumas razões óbvias: a) praticamente todas as áreas agrícolas têm variabilidade espacial significativa em fatores que afetam o rendimento das lavouras, como fertilidade, umidade, dispersão de pragas, etc.; b) hoje dispomos de conhecimentos e instrumentos para identificar e medir múltiplas fontes de variabilidade; e c) com esse conhecimento podemos usar ferramentas da tecnologia da informação e da comunicação, associadas à automação avançada, para modificar as práticas de manejo de forma a aumentar eficiência e reduzir impactos, como desgaste de recursos naturais e emissão de GEE, etc.

Com os avanços recentes em tecnologias de drones, nanotecnologias e inteligência artificial (Zhang et al., 2021), é possível imaginar para breve a disponibilidade de veículos aéreos não tripulados, comandados por algoritmos sofisticados, e munidos com variados sensores e atuadores, sobrevoando lavouras e aplicando insumos cada vez mais avançados, de forma autônoma, nos momentos mais adequados e de forma precisa. Tal modelo de automação digitalmente pilotada trará ganhos significativos em precisão, exatidão e sustentabilidade no campo, respondendo ao clamor da sociedade por uma agricultura menos impactante para o meio ambiente e para a saúde das pessoas.

Sustentabilidade: é preciso medi-la antes de reivindicá-la

Até aqui vimos que a agricultura e o sistema alimentar global têm migrado rapidamente para uma lógica sistêmica, para busca de avanços em todas as dimensões da sustentabilidade. A razão para tal mudança é relativamente simples: a sociedade moderna é cada vez mais urbanizada, educada e crítica, e não se convence mais com frases de efeito e argumentos pouco substantiados, e o fortalecimento da confiança na agricultura por essa sociedade cada vez mais exigente dependerá, cada vez mais, da existência de dados sólidos, capazes de qualificá-la de maneira inequívoca (Sikdar, 2003).

Ademais, a pandemia de covid-19, associada à crise climática, produziu impactos difíceis de prever, tanto em extensão quanto em magnitude (United Nations, 2020; Bisoffi et al., 2021; Carducci et al., 2021; Roubik et al., 2022; Sperling et al., 2022), o que contribuiu para inflar preocupações e ampliar expectativas por mais sintonia entre os sistemas humanos e naturais (Pan, 2021). A substituição de preocupações predominantemente econômicas por preocupações ambientais e sociais já está moldando estratégias corporativas, e muitos especialistas em investimentos acreditam que a riqueza tenderá a mudar para uma base de investidores socialmente mais conscientes, forçando empresas e negócios a buscar soluções para clientes, constituintes e consumidores cada vez mais exigentes em sustentabilidade (Cheema; Langa, 2022).

Como é impossível gerir com eficiência o que não se pode medir, é crescente o interesse por métricas que deem materialidade ao elusivo conceito de sustentabilidade. É por isso que atenção a métricas e análises de impactos precisarão crescer no campo da pesquisa e da inovação tecnológica, porque sustentável é um atributo que tenderá a significar a mesma coisa onde quer que se vá no futuro (United Nations, 2020, 2022; United Nations Development Programme, 2022; Sustaino-Metric, 2022). Assim, é imperativo antecipar impactos de ativos ou produtos inovadores, em seus diferentes graus de maturidade, sobre as dimensões da sustentabilidade. Não realizar tais avaliações pode levar a questionamentos ou até mesmo à inviabilidade de inovações, quando submetidas à avaliação dos mercados e da sociedade (Sikdar, 2003; Lopes, 2017b, 2020a, 2021c).

Métrica ESG de responsabilidade ambiental, social e de governança

a métrica de sustentabilidade que tem ganhado maior visibilidade é conhecida por Environment, Social and Governance (ESG – do inglês) e foi gestada para viabilizar a medição dos impactos de investimentos, empresas e negócios quanto à responsabilidade ambiental, social e de governança. O crescente entusiasmo por ESG está associado a sinais de rompimento na velha lógica de que investidores não sacrificam seus retornos financeiros e empresas sempre trabalharão para maximizar esses retornos aos acionistas. A expectativa agora é que investidores e acionistas estarão cada vez mais interessados em ganhos sustentáveis de longo prazo (Daugaard; Ding, 2022).

A implementação de métricas ESG exige abordagens flexíveis, compartilhamento de conhecimentos entre múltiplas áreas e temas, além de avaliação sistemática de progresso e correção de rumos, sempre que necessário. Como tal, métricas ESG poderão impactar positivamente a implementação da Agenda 2030 e dos 17 ODS até o final dessa década (Figura 5). Infelizmente poucas pessoas conhecem em detalhe os 17 ODS, suas metas e indicadores, e são raros os que se arriscam a explicar como alcançá-los no prazo programado (United Nations Development Programme, 2022; Sustaino-Metric-s, 2022; United Nations, 2022). Métricas ESG poderão oferecer caminhos mais pragmáticos para que governos, empresas, agências de fomento, bancos multilaterais e a sociedade civil trabalhem em maior sintonia, reconhecendo a interdependência entre os vários objetivos e desenvolvendo competências e roteiros que os permitam navegar no complexo terreno de formulação e melhoria de políticas e estratégias de implementação (Sikdar, 2003; Belinky, 2022; Sustaino-Metric, 2022).

A agricultura e o sistema alimentar serão inevitavelmente impactados na medida em que estratégias corporativas evoluam a favor do conceito ESG (Pirtea et al., 2021). Em especial por sua enorme dependência de recursos naturais, como água, solo e biodiversidade, além de serviços da natureza, como decomposição de resíduos, ciclagem de nutrientes, controle de erosão, polinização, sequestro de carbono, etc. Embora esses recursos e processos-chave para produção de alimentos sejam renováveis, seu uso predatório pode romper equilíbrios e comprometer sua persistência e efetividade, com

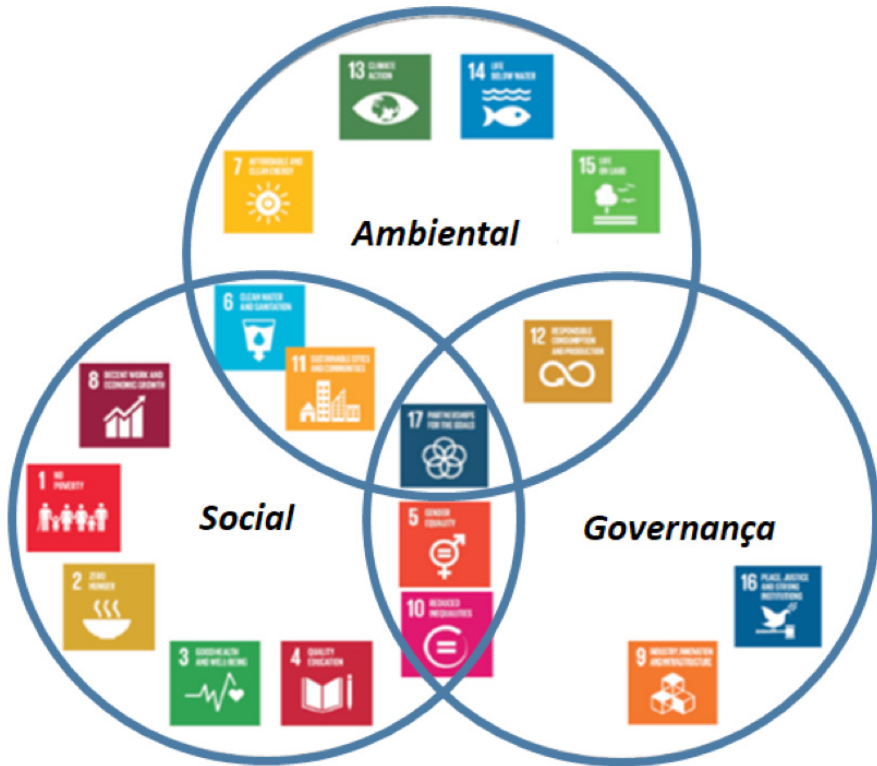


Figura 5. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas mapeados em relação às categorias ESG.

Fonte: Diligence Vault (2019).

impactos negativos nos sistemas econômicos, de saúde, de inclusão produtiva e bem-estar, responsáveis pela segurança humana no planeta.

É por isso que performance na agricultura, usualmente baseada em produtividade física e ganho econômico, precisará, sob a égide ESG, incorporar critérios e medidas que demonstrem que negócios e sustentabilidade são funções integradas e mensuráveis, sustentadas em governança robusta e comprometida com integridade e geração de valor (Pirtea et al., 2021). Simplesmente porque o mundo que demanda alimentos demanda também ecoeficiência, processos limpos de base renovável, gerenciamento de riscos, desenvolvimento de pessoas, diversidade e inclusão, transparência, prestação de con-

tas, etc. Tudo deságua em benefícios não só para constituintes, investidores, clientes e consumidores, mas também para o planeta.

É essencial, portanto, que uma grande nação agrícola como o Brasil, com enorme participação no sistema alimentar global, monitore essa realidade e promova ajustes tempestivos e inteligentes nas suas políticas e ações, para que a agricultura e o agronegócio ganhem sintonia com os preceitos de sustentabilidade que se consolidam globalmente (Embrapa 2014, 2018, 2022). Sintonia que será também essencial para o enfrentamento dos choques e consequências dos eventos climáticos extremos cada vez mais comuns. A intensificação de estresses climáticos já causa severas perdas na nossa agricultura, com impactos na segurança alimentar nacional e global, considerando que somos importantes provedores de alimentos para centenas de mercados ao redor do globo (Zilli et al., 2020).

A boa notícia é que o Brasil tem um excelente histórico de mobilização da melhor ciência, políticas e estímulos para fortalecimento da sua agricultura (Embrapa, 2014, 2018, 2022). O Código Florestal Brasileiro (Soterroni et al., 2018) e o Plano de Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (ABC+) (Manzatto et al., 2020), o Zarc (Monteiro et al., 2021), a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) (Brasil, 2017) são políticas públicas robustas, que poderão cada vez mais ser instrumentalizadas com mecanismos de estímulo, monitoramento e verificação alinhados ao conceito ESG. A Embrapa e parceiros já lideram o desenvolvimento de tecnologias e práticas carbono neutro concebidas para bem posicionar a agricultura e os alimentos do Brasil frente às étricas que definirão produção e consumo sustentáveis no futuro (Embrapa, 2014, 2018, 2022; Oliveira et al., 2018).

Métrica ACV para Avaliação do Ciclo de Vida

Métricas baseadas em Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) estão se tornando referência para a avaliação dos impactos da produção e do consumo, em alinhamento com o ODS 12 –Produção e consumo conscientes, podendo ser usada com vantagem para avaliações de ativos e produtos tecnológicos em instituições e programas de pesquisa e inovação. AACV é uma metodologia com forte embasamento científico e reconhecimento internacional, usada para avaliar os

aspectos ambientais e os impactos potenciais ao longo do ciclo de vida de um produto, desde a aquisição de matérias-primas, passando pelos processos de fabricação, armazenamento, distribuição, uso e disposição (Figura 6). A metodologia baseia-se em balanços de massa e energia em todas as etapas componentes do ciclo de vida do produto, daí muitos denominarem a ACV um processo que vai do “berço ao túmulo” (Cucurachi et al., 2019).



Figura 6. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

(Imagem: Embrapa Meio Ambiente).

Etapas iniciais de desenvolvimento de ativos e produtos tecnológicos nem sempre dispõem de dados para essa finalidade, o que aumenta o desafio da pesquisa. Por isso, para incorporar o pensamento do ciclo de vida à produção tecnológica será necessário modelar indicadores de sustentabilidade adequados às etapas de desenvolvimento – tanto para produtos, como para processos e ativos – o que representa um desafio metodológico que vem sendo cada vez mais abordado em estudos recentes dedicados ao tema (Moni et al., 2020; Thonemann et al., 2020).

Para superar esse desafio, organizações de pesquisa e inovação deverão priorizar diferentes abordagens e possibilidades de modelagem, com ferramentas, parâmetros e métricas que permitam mensurar atributos de sustentabilidade na sua produção tecnológica (Jesus et al., 2019). Dada a complexidade do processo de inovação tecnológica, em que raramente prevalece a lógica *one solution fits all*, tais modelagens precisam necessariamente ser customizadas para determinada situação ou conjuntos de situações similares.

As dificuldades metodológicas de mensuração são observadas especialmente em estágios iniciais de maturidade da tecnologia, em que há maior incerteza e limitação de dados. Tecnologias emergentes geralmente incluem novos materiais, novos processos, para os quais ainda não há referências em bases de dados, o que demanda esforço em adequação e busca de dados secundários, dados de literatura, consulta a experts, entre outros. Portanto, a avaliação *ex ante* da sustentabilidade de ativos tecnológicos requer, de modo geral, um esforço de customização de indicadores que melhor representem seus atributos (Wender et al. 2014; Jesus et al., 2019; Tsoy et al., 2020).

Um exemplo concreto da aplicação da métrica ACV no Brasil ocorreu no âmbito do RenovaBio, a Política Nacional de Biocombustíveis, aprovada pela Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, com o objetivo de fomentar o aumento da produção de biocombustíveis em padrões mais sustentáveis (Brasil, 2017; Grassi; Pereira, 2019). Essa política pública cria mecanismos diferenciados de mercado para os biocombustíveis com menor emissão de GEE em seu ciclo de vida. Para se alcançar esse fim, foi estabelecido um arcabouço metodológico e procedimentos para a contabilidade da intensidade da emissão de carbono dos biocombustíveis, baseado na ACV deles, e na sua comparação com os combustíveis fósseis. A nota de cada unidade de produção participante do programa, vinculada ao volume de biocombustível

produzido, refletirá na obtenção de créditos de descarbonização, denominados Cbio (Brasil, 2017; Matsuura et al., 2018).

Para apoiar o Renovabio, foi estabelecido um referencial metodológico com base na ACV atribucional, “do berço ao túmulo”, com alocação por critério energético. Uma ferramenta estruturada – denominada Renovacalc – foi desenvolvida para avaliar diferentes rotas de produção de biocombustíveis: etanol de cana-de-açúcar de primeira e de segunda geração, etanol de milho, biodiesel, biometano e bioquerosene. Para cada rota, dados de inventário de ciclo de vida de processos envolvidos são agregados aos parâmetros técnicos da produção agrícola e industriais informados pelo produtor de biocombustível. As emissões de GEE de cada processo do ciclo de vida do biocombustível são estimadas segundo o IPCC (Matsuura et al., 2018).

A somatória dessas emissões resulta na intensidade de carbono do biocombustível que, subtraída da intensidade de carbono do seu combustível fóssil equivalente, gera a nota de eficiência energético-ambiental do biocombustível e dá acesso a créditos de descarbonização, com valor de mercado. Assim, o governo brasileiro dispõe de ferramenta com robusta base científica, de fácil uso e aplicável aos principais parâmetros de produção de biocombustíveis, o que permite distinguir produtores que investem na melhoria do desempenho ambiental dos seus processos, promovendo a redução de emissões de GEE. Com esse instrumento, o RenovaBio já contribui para promover o aumento sustentável da produção de biocombustíveis no Brasil, com base em eficiência e qualidade ambiental (Brasil, 2017; Matsuura et al., 2018; Grassi; Pereira, 2019).

Conclusões

Mudança, adaptação, reinvenção e resiliência são conceitos que ganham cada vez mais força nesse tempo de rápida evolução tecnológica, economias voláteis e crescente preocupação com o clima e a estabilidade do planeta. O conceito de desenvolvimento sustentável já permeia praticamente todos os domínios da atividade humana, cristalizando em parcela cada vez maior da sociedade a percepção de que é preciso investir na reconciliação entre os sistemas humanos e a natureza, construindo visões e rotas alternativas para o futuro.

A Agenda 2030 e os 17 ODS, acordados em 2015 por 193 países, tratam exatamente esse desafio, ao buscar um modelo de progresso que cubra uma ampla gama de temas de desenvolvimento social, ambiental e econômico, incluindo pobreza, fome, saúde, educação, mudança climática, recursos naturais, energia, produção e consumo, igualdade de gênero, etc. As metas associadas aos ODS se complementam e se reforçam, para evitar que o progresso em uma área não ocorra às custas de outra. Essa agenda é singular por fornecer uma visão inclusiva, integrada e mais factível de progresso sustentável, alinhando mudanças de natureza econômica, política, tecnológica e social.

Mas, a despeito da sua lógica incontestável e enorme aceitação, é fácil perceber que ainda há muito que se avançar na ação integrada e cooperativa necessária para a implementação satisfatória da Agenda 2030 no curto prazo restante. O mundo segue demandando mudanças nos sistemas naturais para atender a uma população crescente que incorpora estilos de vida cada vez mais sofisticados e impactantes para o meio ambiente. A nossa dependência de energia fóssil alimenta a crise climática que reduz a resiliência dos ecossistemas e limita a nossa capacidade de adaptação, com ameaças à alimentação, à saúde das populações, ao comércio e à paz entre as nações.

A agricultura e o sistema alimentar global estão no centro dessa complexa equação. A grande pressão da agricultura sobre o meio ambiente e seu impacto sobre a crise climática indicam que é preciso buscar um novo patamar de conhecimento, um novo paradigma científico e tecnológico, a fim de romper limites, em especial na região tropical do globo, onde estão os ambientes mais desafiadores para a agricultura, além das nações mais pobres. E o bom senso também nos indica que os sistemas de inovação terão, cada vez mais, que se referenciar em aspectos que compreendam, além da visão utilitária da agricultura, como produtora de alimentos e matérias-primas essenciais para a sobrevivência e o progresso do homem, outras dimensões e valores.

É a partir dessa realidade que o presente documento analisou os riscos, os desafios e as oportunidades para a economia, a agricultura e os sistemas alimentares no futuro, na medida em que o interesse pela sustentabilidade cresce e se fortalece. Estamos vendo emergir na sociedade a consciência dos limites do modelo de desenvolvimento dependente de recursos não renováveis, o que estimula a busca de novas possibilidades de produção, com

mais atenção ao desafio de se promover a descarbonização e a circularidade na agricultura e no sistema alimentar, em sintonia com os 17 ODS.

A agricultura e o sistema alimentar que já estão sendo marcados de forma profunda pelas mudanças nos padrões de consumo e produção. É cada vez mais claro que o futuro exigirá produção de maior diversidade de alimentos, com maior densidade nutricional e atributos funcionais, a partir de tecnologias de baixo impacto e modelos circulares de produção, poupadores de recursos naturais. O Brasil tem experiência, capacidade e base inigualável de recursos naturais para responder a esses desafios, em sintonia com as expectativas de segurança alimentar e nutricional da nossa população e do mundo.

Embora a pesquisa agropecuária e os nossos produtores rurais tenham feito progressos substanciais no desenvolvimento e na incorporação de práticas sustentáveis ao longo das últimas décadas, o desafio adiante é consolidar uma agricultura conservacionista, competitiva e cada vez mais focada na intensificação inteligente e sustentável do uso da terra, necessária para reduzir expansão sobre áreas sensíveis, como a Amazônia, e pressões sobre a base de recursos naturais – em especial solo, água e biodiversidade. Agricultura de precisão com manejo sítio-específico de lavouras e criações, manejo e uso de resíduos, além da definição de métricas e indicadores para avaliação dos avanços na direção da sustentabilidade são desafios importantes que enfrentaremos.

A economia de base biológica e renovável pode se converter no promissor caminho para se mobilizar o que há de melhor na capacidade inovadora brasileira para, a partir da nossa rica base de recursos naturais, alavancar segmentos vitais como a produção de alimentos, a saúde, e as indústrias química, de materiais. Para isso, será necessário mobilizar a nossa infraestrutura de pesquisa e inovação, o ambiente regulatório e os investimentos privados para busca de especialização e sofisticação produtiva em setores que possam impactar a produtividade, a competitividade e a sustentabilidades da nossa economia, respondendo aos desafios de recuperação das crises sanitária e climática.

Por fim, o Brasil precisa seguir inovando em políticas, normas e regulamentos que consolidem o tratamento adequado e equilibrado dos desafios nos três componentes da sustentabilidade – econômico, ambiental e social –, garantindo uma agropecuária moderna, vibrante e sustentável, capaz de atender

aos anseios dos consumidores do Brasil e dos mercados globais cada vez mais regulados, exigentes e competitivos. Esse pode ser o caminho para consolidar o Brasil como uma economia desenvolvida, capaz de oferecer soluções coerentes, eficazes e concretas para grandes desafios da humanidade, como as mudanças climáticas, a substituição de insumos de origem fóssil, a segurança alimentar, a saúde e o bem-estar da sociedade.

Referências

AHONEN, H. M.; KESSLER, J.; MICHAELOWA, A.; ESPELAGE, A.; HOCH, S. Governance of fragmented compliance and voluntary carbon markets under the Paris Agreement. **Politics and Governance**, v. 10, n. 1, p. 235-245, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17645/pag.v10i1.4759>.

ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. (ed.). **Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 337 p.

ALVES, A. A.; LOPES, M. A. O setor sucroenergético na emergente bioeconomia. **Revista Opiniões**, ano 18, n. 69, divisão C, p. 58-59, ago./out. 2021. Cientistas e especialistas. OpAA69. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1138345>. Acesso em: 19/05/2022.

ANDERSON, M.; HOEY, L.; HURST, P.; MILLER, M.; WIT, M. M. de. Debrief on the United Nations Food Systems Summit (UNFSS). **Journal of Agriculture, Food Systems, and Community Development**, v. 11, n. 2, p. 13-17, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5304/jafscd.2022.112.008>.

APALDETTI, C.; MARTÍNEZ, R. N.; CERDA, I. A.; POL, D.; ALCOBER, O. An early trend towards gigantism in Triassic sauropodomorph dinosaurs. **Nature Ecology and Evolution**, v. 2, p. 1227-1232, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0599-y>.

ARIAS, D.; MENDES, P.; ABEL, P. **Revisão rápida e integrada da gestão de riscos agropecuários no Brasil**. Brasília, DF: Banco Mundial, 2015. 76 p.

ASSAD, E. D.; MARIN, F. R.; PINTO, H. S.; ZULLO JÚNIOR, J. Zoneamento agrícola de riscos climáticos do Brasil: base teórica, pesquisa e desenvolvimento. **Informe Agropecuário**, v. 29, n. 246, p. 47-60, set./out. 2008.

BALCOMBE, P.; SPEIRS, J. F.; BRANDON, N. P.; HAWKES, A. Methane emissions: choosing the right climate metric and time horizon. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 20, n. 10, p. 1323-1339. DOI: 10.1039/C8EM00414E.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Resolução nº 3.896 de 17 de agosto de 2010. Institui, no âmbito do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), o Programa para Redução da Emissão de Gases de Efeito Estufa na Agricultura (Programa ABC). **Diário Oficial da União**, 18 ago. 2010.

BECKER, B. K. **Articulando o complexo urbano e o complexo verde na Amazônia**. Brasília, DF: CGEE, 2008.

BEHNASSI, M.; EL HAIBA, M. Implications of the Russia–Ukraine war for global food security. **Nature Human Behaviour**, v. 6, p. 1-2, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41562-022-01391-x>.

BELINKY, A. **ODS ou ESG? A criação de um artefato para análise de instrumentos de avaliação ou orientação de negócios pela perspectiva da sustentabilidade**. 2022. 242 f. Tese (Doutorado em Administração de Empresas) – Fundação Getúlio Vargas, Escola de Administração de Empresas de São Paulo, São Paulo.

BELL, M.; LAWRENCE, D. Soil carbon sequestration-myths and mysteries. **Tropical Grasslands**, v. 43, n. 4, p. 227-231, 2009.

BHAKTA, I.; PHADIKAR, S.; MAJUMDER, K. State-of-the-art technologies in precision agriculture: a systematic review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 11, p. 4878-4888, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.9693>.

BIERMANN, F.; KANIE, N. (ed.). **Governing through Goals: sustainable development goals as governance innovation**. Cambridge: The MIT Press, 2017.

BISOFFI, S.; AHRNÉ, L.; ASCHEMANN-WITZEL, J.; BÁLDI, A.; CUHLS, K.; DECLERCK, F.; BRUNORI, G. COVID-19 and sustainable food systems: What should we learn before the next emergency. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, Article number 650987, Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.650987>.

BIUDES, F. **Tecnologias da informação e novos usos do território brasileiro: uma análise a partir do zoneamento agrícola de riscos climáticos para a soja**. 2005. 168 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BOHRA, A.; JHA, U. C.; GODWIN, I. D.; VARSHNEY, K. R. Genomic interventions for sustainable agriculture. **Plant Biotechnol Journal**, v. 18, p. 2388-2405, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/pbi.13472>.

BÖHRINGER, C.; FISCHER, C.; ROSENDAHL, K. E.; RUTHERFORD, T. F. Potential impacts and challenges of border carbon adjustments. **Nature Climate Change**, v. 12, p. 22-29, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01250-z>.

BORDONAL, R. D. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, n. 2, p. 1-23, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 4, 27 dez. 2017.

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: Mapa/ACS, 2012. 173 p.

BRASIL: a economia natural do conhecimento. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008.

BROWN, S. After COP26. **Natural Resources & Environment**, v. 36, n. 3, p. 64-64, 2022.

- BRUNDTLAND, G. H. What is sustainable development. **Our common future**, v. 8, n. 9, 1987.
- BRYANT, G. Nature as accumulation strategy? Finance, nature, and value in carbon markets. **Annals of the American Association of Geographers**, v. 108, n. 3, p. 605-619, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/24694452.2017.1375887>.
- BUENO, C. R.; GOMES, A. R.; CLEMENT, C. R.; ADAMI, M.; XAUD, H. A. M.; XAUD, M. R.; MARTINS, M. B.; COELHO, A. Bioma Amazônia: oportunidades e desafios de pesquisa para produção de alimentos e outros produtos. In: VILELA, E. F.; CALLEGARO, G. M.; FERNANDES, G. W. **Biomass e agricultura: oportunidades e desafios**. Rio de Janeiro: Vertente edições, 2019. 304 p.
- CAIN, M.; JENKINS, S.; ALLEN, M. R.; LYNCH, J.; FRAME, D. J.; MACEY, A. H.; PETERS, G. P. Methane and the Paris Agreement temperature goals. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, v. 380, Article number 20200456, 2022. DOI: 10.1098/rsta.2020.0456.
- CALEL, R. Carbon markets: a historical overview. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 4, n. 2, v. 107-119, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.208>.
- CAMPOS, L. **Base de Dados na Amazônia**. Rio de Janeiro: MCT/Inpa, 2009. Workshop GLOBO 3 – Rio de Janeiro, 24-26 mar. 2009
- CARDUCCI, B.; KEATS, E. C.; RUEL, M.; HADDAD, L.; OSENDARP, S. J. M.; BHUTTA, Z. A. Food systems, diets and nutrition in the wake of COVID-19. **Nature Food**, v. 2, n. 2, p. 68-70, Feb. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00233-9>.
- CATTON, W. If Malthus was so wrong, why is our world in trouble? **The Social Contract**, v. 8, n. 3, p. 231-238, 1998.
- CHEEMA, S.; LANGA, M. Environment, Social, and Governance (ESG) and Sustainability. In: A DIRECTOR'S Guide to Governance in the Boardroom. New York: Routledge, 2022. p. 135-171.
- CHEN, S.; WANG, W.; XU, W.; WANG, Y.; WAN, H.; CHEN, D.; BAI, Y. Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, n. 16, p. 4027-4032, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1700298114>.
- CHICHILNISKY, G. What is sustainable development? **Land Economics**, v. 73, n. 4, p. 467-491, 1997.
- CHOUDHARY, O. P.; SAIED, A. A.; ALI, R. K.; MAULUD, S. Q. Russo-Ukrainian war: an unexpected event during the COVID-19 pandemic. **Travel Medicine and Infectious Disease**, v. 48, Article number 102346, July-Aug. 2022. DOI: 10.1016/j.tmaid.2022.102346.
- CLEMENT, C. R.; JUNQUEIRA, A. B. Between a pristine myth and an impoverished future. **BioTropica**, v. 42, n. 5, p. 534-536, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2010.00674.x>.
- COELHO, S. T.; DIAZ-CHAVEZ, R.; CORTEZ, C. L.; PERECIN, D.; POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; SILVA, C. Circular economy in Brazil. In: CIRCULAR economy: recent trends in global perspective. Singapore: Springer, 2021. p. 459-496.
- CORTESÃO, J. **Alexandre de Gusmão e o Tratado de Madrid**. Rio de Janeiro: Instituto Rio Branco, 1950. 560 p. Parte I, Tomo I (1695-1735).

CRISP, P. A.; BHATNAGAR-MATHUR, P.; HUNDLEBY, P.; GODWIN, I. D.; WATERHOUSE, P. M.; HICKEY, L. T. Beyond the gene: epigenetic and cis-regulatory targets offer new breeding potential for the future. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 73, p. 88-94, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2021.07.008>.

CRUTZEN, P. J. Geology of mankind: the anthropocene. **Nature**, v. 415, n. 23, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1038/415023a>.

CUCURACHI, S.; SCHERER, L.; GUINÉE, J. B.; TUKKER, A. Life Cycle Assessment of Food Systems. **One Earth**, v. 1, n. 3, p. 292-297, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.014>.

D'AMICO, G.; SZOPIK-DEPCZYŃSKA, K.; BELTRAMO, R.; D'ADAMO, I.; IOPPOLO, G. Smart and Sustainable bioeconomy platform: a new approach towards Sustainability. **Sustainability**, v. 14, n. 1. p. 466, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14010466>.

D'AMATO, D.; DROSTE, N.; ALLEN, B.; KETTUNEN, M.; LÄHTINEN, K.; KORHONEN, J.; TOPPINEN, A. Green, circular, bio economy: A comparative analysis of sustainability avenues. **Journal of cleaner production**, v. 168, p. 716-734, Dec. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.053>.

D'AMATO, D.; GAIO, M.; SEMENZIN, E. A review of LCA assessments of forest-based bioeconomy products and processes under an ecosystem services perspective. **Science of the Total Environment**, v. 706, Article number 135859, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135859>.

D'AMATO, D.; KORHONEN, J.; TOPPINEN, A. Circular, green, and bio economy: how do companies in land-use intensive sectors align with sustainability concepts? **Ecological economics**, v. 158, p. 116-133, Apr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.026>.

DAUGAARD, D.; DING, A. Global Drivers for ESG Performance: The Body of Knowledge. **Sustainability**, v. 14, p. 1-21, Feb. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14042322>.

DENG, L.; NGO, H. H.; GUO, W.; CHANG, S. W.; NGUYEN, D. D.; PANDEY, A. HOANG, N. B. Recent advances in circular bioeconomy based clean technologies for sustainable environment. **Journal of Water Process Engineering**, v. 46, Article number 102534, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102534>

DEPLEDGE, J.; SALDIVIA, M.; PEÑASCO, C. Glass half full or glass half empty?: the 2021 Glasgow Climate Conference, **Climate Policy**, v. 22, p. 147-157, 2022. DOI: [10.1080/14693062.2022.2038482](https://doi.org/10.1080/14693062.2022.2038482).

DILIGENCE VAULT. Disponível em: <https://diligencevault.com/dv-looks-at-esg/>. Acesso em: 29 maio 2019.

DODDS, W. Global environment in the anthropocene. In: DODDS, W. (ed.). **The world's worst problems**. Charm: Springer NatureSwitzerland AG, 2019. p. 63-78. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-30410-2_7.

DONI, F.; GASPERINI, A.; SOARES, J. T.; "What is the SDG 13?" In: SDG13 – CLIMATE ACTION: Combating Climate Change and its Impacts. [Bingley, UK]: Emerald Publishing Limited, 2020. p. 21-30. DOI: <https://doi.org/10.1108/978-1-78756-915-720201006>.

EDMONDS, J.; FORRISTER, D.; CLARKE, L.; CLARA, S. de; MUNNINGS, C. **The economic potential of article 6 of the Paris agreement and implementation challenges**. Washington,

DC.: IETA, 2019. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/33523>. Acesso em: 13/05/2022.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **A circular economy in Brazil: an initial exploration**. A product of the collective expertise of members of the CE100 Brasil Network. Jan. 2017. Disponível em: <https://emf.thirdlight.com/link/em8x0hj8jko0-jyc775/@/preview/1?o>. Acesso em: 15 maio 2022.

EMBRAPA. **Visão de futuro do agro brasileiro**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. Disponível em <https://www.embrapa.br/visao-de-futuro>. Acesso em: 22 abr. 2022.

EMBRAPA. **SISTEMA de inteligência territorial estratégica do bioma Amazônia**. Campinas: Embrapa Territorial, 2019. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/siteamazonia/index.html>. Acesso em: 22 abr. 2022

EMBRAPA. **Visão 2014-2034: o futuro do desenvolvimento tecnológico da agricultura brasileira**. Brasília, DF. 2014. 194 p.

EMBRAPA. **Visão: o futuro da agricultura brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 220 p.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Global anthropogenic emissions of Non-CO2 greenhouse gases emission: 1990 2030**. Dec. 2012. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-08/documents/epa_global_nonco2_projections_dec2012.pdf. Acesso em: 18 abr. 2022

FAN, S. Economics in food systems transformation. **Nature Food**, v. 2, n. 4, p. 218-219, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00266-0>.

FAO **Tracking progress on food and agriculture-related SDG indicators 2020: a report on the indicators under FAO custodianship**. Rome, 2020.

FAO. **Methodological proposal for monitoring SDG target 12.3: sub-indicator 12.3.1.a the global food loss index design, data collection methods and challenges**. Rome, 2018.

FAO. **Statistical Yearbook 2013: world food and agriculture**. Rome, 2013.

FAO. **Statistical Yearbook 2021: world food and agriculture**. Rome, 2021.

FAO. **The state of food and agriculture: moving forward on food loss and waste reduction**. Rome, 2019. Disponível em: <https://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf>. Acesso em: 20 apr. 2022.

FRANK, S.; HAVLÍK, P.; SOUSSANA, J.-F.; LEVESQUE, A.; VALIN, H.; WOLLENBERG, E.; KLEINWECHTER, U. "Reducing Greenhouse Gas Emissions in Agriculture without Compromising Food Security?" **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 10, Oct. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8c83>.

GERBER, P. J.; STEINFELD, H.; HENDERSON, B.; MOTTET, A.; OPIO, C.; DIJKMAN, J.; FALCUCCI, A.; TEMPIO, G. **Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013.

GLOBAL METHANE INITIATIVE. **Global methane emissions and mitigation opportunities**. <https://www.globalmethane.org/documents/gmi-mitigation-factsheet.pdf>. Acesso em: 13 Mar. 2022.

GRASSI, M. C. B.; PEREIRA, G. A. G. Energy-cane and RenovaBio: Brazilian vectors to boost the development of Biofuels. **Industrial crops and products**, v. 129, p. 201-205, Mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.006>.

HARMSSEN, M.; VAN VUUREN, D. P.; BODIRSKY, B. L.; CHATEAU, J.; DURAND-LASSERVE, O.; DROUET, L.; FRICKO, F.; FUJIMORI, S.; GERNAAT, D. E. H.J.; HANAOKA, T.; HILAIRE, J.; KERAMIDAS, K.; LUDERER, G.; MOURA, M. C. P.; SANO, F.; SMITH, S. J.; WADA, K. The role of methane in future climate strategies: mitigation potentials and climate impacts. **Climatic Change**, v. 163, n. 3, p. 1409-1425, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02437-2>.

HELLVIG, E. L.; FLORES-SAHAGUN, T. H. S. Investments in Braskem green polymers: extraordinary profits instead of decarbonization of the environment. **International Journal of Sustainable Development Research**, v. 7, n. 1, p. 17-27, Apr. 2021. DOI: [10.11648/j.ijdsr.20210701.13](https://doi.org/10.11648/j.ijdsr.20210701.13).

HERRERO, M.; THORNTON, P. K.; MASON-D'CROZ, D.; PALMER, J.; BENTON, T. G.; BODIRSKY, B. L.; BOGARD, J.; HALL, A.; LEE, B.; NYBORG, P.; PRADHAM, P.; BONNET, G. D.; BRYAN, B. A.; CAMPBELL, B. M.; CHRISTENSEN, S.; CLARD, M.; COORK, M. T.; BOER, I. J. M.; DOWNS, C.; DIZYEE, K.; FOLBERTH, C.; GODDE, C. M.; GERBER, J. S.; GRUNDY, M.; HAVLIK, P.; JARVIS, A.; LOBOGUERRERO, A. M.; LOPES, M. A.; MCI NTYRE, C. L.; NAYLOR, R.; NAVARRO, J.; OBERSTEINER, M.; PARODY, A.; PEOPLES, M. B.; PIKAAR, I.; POPP, A.; ROCKTROM, J.; ROBERTSON, M. J.; SMITH, P.; STEHFEST, E.; SWAIN, S.; VALIN, H.; WIJK, M. van; ZANTEN, H. H. E. van; VERMEULEN, S.; VERVOORT, J.; WEST, P. C. "Innovation can accelerate the transition towards a sustainable food system". **Nature Food**, v. 1, n. 5, p. 266-72, May 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0074-1>.

HERRERO, M.; THORNTON, P. K.; MASON-D'CROZ, D.; PALMER, J.; BODIRSKY, B. L.; PRADHAN, P.; BARRETT, C. B.; BENTON, T. G.; HALL, A.; PIKAAR, I.; BOGARD, J. R.; BONNET, G. D.; BRYAN, B. A.; VAMPBELL, B. M.; CHISTENSEN, S.; CLARK, M.; FANZO, J.; GODDE, C. M.; ROCKSTRÖM, J. Articulating the effect of food systems innovation on the Sustainable Development Goals. **The Lancet Planetary Health**, v. 5, n. 1, p. e50-e62, 2021. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30277-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30277-1).

HICKEY, L. T.; HAFEEZ, A. N.; ROBINSON, H.; JACKSON, S. A.; LEAL-BERTIOLI, S. C. M.; TESTER, M.; GAO, C.; GODWIN, I. D.; HAYES, B. J.; WULFF, B. B. H. Breeding crops to feed 10 billion. **Nature Biotechnology**, v. 37, p. 744-754, June 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0152-9>.

HOSSAIN, M. Sharing economy: a comprehensive literature review. **International Journal of Hospitality Management**, v. 87, 102470, May 2020.

HUBAU, W.; LEWIS, S. L.; PHILLIPS, O. L.; AFFUM-BAFFOE, K.; BEECKMAN, H.; CUNÍ-SANCHEZ, A.; EWANGO, C. E. N.; FAUSET, S.; MUKINZI, J. M.; SHEIL, D.; SONKÉ, B.; SULLIVAN, M. J. P.; SUNDERLAND, T. C. H.; TAEDOUNG, H.; THOMAS, S. C.; WHITE, L. J. T.; ABERNETHY, K. A.; ADU-BREDU, S.; AMANI, C. A.; BAKER, T. R.; BANIN L.; BAYA, F.; BEGNE, S. K.; BENNETT, A. C.; BENEDET; BITARIHO, R.; BOCKO, Y. E.; BOECKS, Y. E.; BOUNDJA, P.; BRIENEN, R. J. W.; BRNCIC, T.; CHEZEAUX, E.; CHUYOUNG, G. B.; CLARAK, C. J.; COLLINS, M.; COMISKEU, J. A.; COOMES, D. A.; DARGIE, G. C.; HAYLLEVILL, T. de; KAMDEM, M. N. D.; DOUCET, J.-L.; ESQUIVEL-MUELBERT, A.; FELDPAUSH, T. de R.; FOFANAH, A.; FOLI, E. G.; GILPIN, M.; GLOOR, E.; GONMADJE, C.; GOURLET-FLEURY, S.; HALL, J. S.; HAMILTON, A. C.; HARRIS, D. J.; HART, T. B.; HOCKEMBA, M. B.; HLADIK, A.; IFO, S. A.; JEFFERY, K. J.; JUNCKER T.; YAKUSU, E. K.; KEARSLEY, E.; KENFACK, D.; KOCH, A.; LEAL, M. E.; LEVESLEY, A.; LINDSEL, J.; LISINGO, J.; LOPEZ-GONZALES, G.; MAKANA, J.-R.; MALHI, Y.; MARSHALL, A. R.; MARTIN, J.; MARTIN, E. H.; MBAYU,

F. M.; MEDJIBE, V.; MIHINDOU, V.; MITCHARD, E. T. A.; MOORE, S.; MUNISHI, P. K. T.; BENGONE, N. N.; OJO, L.; ONDO, F. E.; PEH, K. S.-H.; PICKAVANCE, G. C.; POULSEN, J. R.; QIE, L.; REITSMA, J.; ROVERO, F.; SWAINE, M. D.; TALBOL, J.; TAPLIN, J.; TAYLOR, D. M.; THOMAS, D. W.; TOIRAMBE, D. W.; MUKENDI, J. T.; TUAGBEN, D.; UMNAY, P. M.; HEIJDEIN, G. M. F. van der; VERBEECK, H.; VLEMINCKX, J.; WILLCOCK, S.; WOLL, H.; WOOKS, J.; ZEMAGHO, L. Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. **Nature**, v. 579, Article number 7797, p. 80-87, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0>.

IBGE. **Mapa de biomas e de vegetação**. Rio de Janeiro, 2004.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability: summary for policymakers: contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf. Acesso em: 18 Apr. 2022.

INTERNATIONAL INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEMS ANALYSIS. **TwI2050 - The World in 2050: Transformations to achieve the sustainable development goals. report prepared by the world in 2050 initiative**. Laxenburg: IIASA, 2018. DOI: <https://doi.org/10.22022/TNT/05-2019.15913>.

JABAREEN, Y. A new conceptual framework for sustainable development. **Environment, development and sustainability**, v. 10, n. 2, p. 179-192, Apr. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-006-9058-z>.

JESUS, K. R. E. de; TORQUATO, S. A.; MACHADO, P. G.; ZORZO, C. R. B.; CARDOSO, B. O.; LEAL, M. R. L. V.; MOREIRA, D. A. Sustainability assessment of sugarcane production systems: SustenAgro Decision Support System. **Environmental Development**, v. 32, Article number 100444, Dec. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2019.05.003>.

KALLIS, G. **Limits: Why Malthus was wrong and why environmentalists should care**. Stanford: Stanford University Press, 2019.

KARP, S. G.; MEDINA, J. D.; LETTI, L. A.; WOICIECHOWSKI, A. L.; CARVALHO, J. C. de; SCHMITT, C. C.; PENHA, R. DE O.; KUMIEHN, G. S.; SOCCOL, C. R. Bioeconomy and biofuels: the case of sugarcane ethanol in Brazil. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 15, n. 3, p. 899-912, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/bbb.2195>.

KHANNA, P. **Connectography: mapping the future of global civilization**. New York: Random House, 2016.

KIM, J. S.; JUN, Y. S.; JUN, J. H.; CHO, J. Y. Transition from Linear Economy to Circular Economy. **Resources Recycling**, v. 30, n. 3, p. 3-17, 2021.

KIRCHER, M. Making Money with Industrial Biotechnology. **Industrial Biotechnology**, v. 17, n. 5, p. 242-244, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1089/ind.2021.29264.mki>.

KLEIN, B. C.; MESQUITA SAMPAIO, I. L. de; MANTELATTO, P. E.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A. Beyond ethanol, sugar, and electricity: a critical review of product diversification in Brazilian sugarcane mills. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 13, n. 3, p. 809-821, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/bbb.1969>.

KNUTTI, R.; ROGELJ, J. The legacy of our CO₂ emissions: a clash of scientific facts, politics and ethics. **Climatic Change**, v. 133, n. 3, p. 361-373, 2015. DOI: DOI <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1340-3>.

KOESTER, U.; GALAKTIONOVA, E. FAO Food Loss Index methodology and policy implications. **Studies in Agricultural Economics**, v. 123, n. 1, p. 1-7, 2021.

KUCH, D.; KEARNES, M.; GULSON, K. The promise of precision: datafication in medicine, agriculture and education. **Policy Studies**, v. 41, n. 5, p. 527-546, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/01442872.2020.1724384>.

LAL, R.; GRIFFIN, M.; APT, J.; LAVE, L.; MORGAN, M. G. Managing soil carbon. **Science**, v. 304, 5669, p. 393-393, 2004. DOI: 10.1126/science.1093079.

LENTON, T. M. Land and ocean carbon cycle feedback effects on global warming in a simple Earth system model. **Tellus B: Chemical and Physical Meteorology**, v. 52, n. 5, p. 1159-1188, 2000. DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusb.v52i5.17097>.

LEWIS, S.; MASLIN, M. Defining the Anthropocene. **Nature**, v. 519, p. 171-180, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature14258>.

LIMA, L. A.; MARTINS, K. O marco legal do pagamento por serviços ambientais para o avanço de iniciativas agrosustentáveis. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 6, p. 45720-45738, jun. 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n6-204.

LO, A. Y.; HOWES, M. Powered by the state or finance? The organization of China's carbon markets. **Eurasian Geography and Economics**, v. 54, n. 4, p. 386-408, 2013.

LOPES, M. A. A agricultura mimetizando a natureza. **Correio Braziliense**, Brasília, DF, 12 set. 2021a. Opinião.

LOPES, M. A. Agronegócio do futuro será regido por métricas socioambientais e governança. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 25 maio 2021b.

LOPES, M. A. **Avanços e desafios na descarbonização da agricultura brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2021c. 37 p. (Nota Técnica. Diretoria Executiva de Pesquisa e Desenvolvimento).

LOPES, M. A. Criatividade e complexidade na nova economia. **Diário do Comércio**, Belo Horizonte, 11 nov. 2020b. Opinião.

LOPES, M. A. Da perplexidade à inteligência estratégica. **Revista de Política Agrícola**, ano 25, n. 4, p. 3-5, out./nov.dez. 2016.

LOPES, M. A. Escolhas estratégicas para o agronegócio brasileiro. **Revista de Política Agrícola**, ano 25, n. 1, p. 151-154, jan./fev./mar. 2017a.

LOPES, M. A. O Brasil na agenda global de desenvolvimento sustentável. Opinião. **Correio Braziliense**, Brasília, DF, 12 set. 2017b. Opinião.

LOPES, M. A. O Brasil na geopolítica do alimento. **Correio Braziliense**, Brasília, DF, 12 jun. 2022. Opinião

LOPES, M. A. Transformar riquezas naturais em progresso. **Correio Braziliense**, Brasília-DF, 12 maio 2019. Opinião.

LOPES, M. A. Uma indústria chamada agricultura. **Correio Braziliense**, Brasília, DF, 14 out. 2013. Opinião, p. 15.

LOPES, M. A.. O sistema alimentar que emergirá da crise. **Correio Braziliense**, Brasília, DF, 11 abr. 2020a. Opinião.

LOPES, M. A.; HUNT, J. D. Amazon in the natural knowledge economy. In: HERKENHOFF, P.; FINGUERUT, S. (org.). **Amazon 21**. Rio de Janeiro: FGV Conhecimento, 2021. p. 95-119.

LOPES, M. A.; MARTHA JÚNIOR, G. B. Embrapa: Development of Brazilian Agriculture. In: SADDY, F. (ed.). **The Arab World and Latin America: Economic and Political Relations in the 21st Century**. London: Tauris & Co. 2016. p. 306-327.

LOPES, M. A.; MARTHA JÚNIOR, G. B. Technology as a major driver for Brazilian agriculture. **Analyse Financière**, v. 50, p. 60-62, 2014.

MACENO, M. M.; OLIVEIRA, D. R. Life Cycle assessment and circular economy: a case study of a photovoltaic solar panel in Brazil. **Journal of Environmental Accounting and Management**, v. 10, n. 1, 91-111, 2022.

MAGEE, C. L.; DEVEZAS, T. C. A simple extension of dematerialization theory: incorporation of technical progress and the rebound effect. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 117, p. 196-205, Apr. 2016. DOI: 10.1016/j.techfore.2016.12.001.

MANZATTO, C. V.; ARAUJO, L. S. de; ASSAD, E.; SAMPAIO, F.; SOTTA, E.; VICENTE, L.; PEREIRA, S. E. M.; LOEBAMANN, D. G. dos S. W.; VICENTE, A. **Mitigação das emissões de gases de efeitos estufa pela adoção das tecnologias do Plano ABC**: estimativas parciais. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2020. 35 p.

MARTHA, G. B., ALVES, E., AND CONTINI, E. Land-saving approaches and beef production growth in Brazil. **Agricultural Systems**, v. 110, p. 173-177, 2012. DOI: 10.1016/j.agsy.2012.03.001

MARTHA, G. B.; ALVES, E. "Brazil's Agricultural Modernization and Embrapa," in **Brazil's Agricultural Modernization and Embrapa**, eds. E. Amann, C. R. Azzoni, and W. Baer (Oxford University Press). 2028. DOI: 10.1093/oxfordhb/9780190499983.013.15

MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇI, O.; YU, R.; ZHOU, B. (ed.). **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]. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf. Acesso em: 14 fev. 2022.

MATSUURA, M. D. S.; SEABRA, J. E. A.; CHAGAS, M. F.; SCACHETTI, M. T.; MORANDI, M. A. B.; MOREIRA, M. M. R.; BONOMI, A. RenovaCalc: a calculadora do Programa RenovaBio. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO DO CICLO DE VIDA, 6., 2018, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF: Ibict, 2018.

MEHTA, N.; SHAH, K. J.; LIN, Y. I.; SUN, Y.; PAN, S. Y. Advances in circular bioeconomy technologies: from agricultural wastewater to value-added resources. **Environments**, v. 8, n. 3, Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments8030020>.

MICHAELOWA, A. **Carbon markets or climate finance?**: Low carbon and adaptation investment choices for the developing world. London: Routledge, 2012.

MING, T.; LI, W.; YUAN, Q.; DAVIES, P.; RICHTER, R.; PENG, C.; ZHOU, N. Perspectives on removal of atmospheric methane. **Advances in Applied Energy**, v. 5, Feb. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2022.100085>.

MONI, S. M.; MAHMUD, R.; HIGH, K.; CARBAJALES-DALE, M. Life cycle assessment of emerging technologies: a review. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 1, p. 52-63, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.12965>.

MONTEIRO, J. D. A.; COSTA, F. D. S.; BEZERRA, M.; COMUNELLO, E.; ZOLIN, C.; PEREIRA, J.; MONTEIRO, J. E. B. de A.; COSTA, F. de S.; BEZERRA, M. A.; COMUNELLO, E.; ZOLIN, C. A.; PEREIRA, J. R.; MELEM JUNIOR, N. J.; ANTONIO, I. C.; SANTIAGO, A. V.; SILVA, S. C. da; SILVA, F. A. M. da; STEINMETZ, S.; KLEPKER, D.; COELHO FILHO, M. A.; CABRAL, O. M. R.; ANDRADE JUNIOR, A. S. de; GUIMARAES, D. P.; SORIANO, B. M. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; EVANGELISTA, B. A.; ALVES, A. B.; MOURA, M. S. B. de; FARIAS, J. R. B.; BARROS, A. H. C.; TEIXEIRA, W. G.; SILVA, A. A. G. da; CUNHA, G. R. da; CONCEIÇÃO, M. A. F.; HIGA, R. C. V.; PELLEGRINO, G. Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC). In: SOTTA, E. D.; SAMPAIO, F. G.; MARZALL, K.; SILVA, W. G. da. (org.) **Estratégias de adaptação às mudanças do clima dos sistemas agropecuários brasileiros**. Brasília, DF: Mapa, 2021. p. 102-103.

MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília, DF: Inmet, 2009. 530 p.

MORADI, S.; ENTEZARI, M. H.; MOHAMMADI, H.; JAYEDI, A.; LAZARIDI, A. V.; KERMANI, M. A. H.; MIRAGHAJANI, M. Ultra-processed food consumption and adult obesity risk: a systematic review and dose-response meta-analysis. **Critical reviews in food science and nutrition**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1946005>.

MÖRS DORF, G. A simple fix for carbon leakage? Assessing the environmental effectiveness of the EU carbon border adjustment. **Energy Policy**, v. 161, Article number 112596 Feb. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112596>.

NASO, P.; LANZ, B.; SWANSON, T. The return of Malthus? Resource constraints in an era of declining population growth. **European Economic Review**, v. 128, Article number 103499, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurocorev.2020.103499>.

NOBRE, C. A. Projeto 'Amazônia 4.0': Definindo uma Terceira Via para a Amazônia. **Revista Futuribles**, n. 2, set. 2019. Disponível em: https://www.futuribles.com/media/uploads/futuribles_pt_ed_02_.pdf. Acesso em: 22 abr. 2022.

NOCK, A. D. "Tertullian and the Ahori". **Vigiliae Christianae**, v. 4, n. 3, July 1950. DOI: <https://doi.org/10.2307/1582625>.

OLIVEIRA, Y. M. M. de; HAMMES, V. S.; LOPES, D. B.; SANTOS, A. C. C. dos; COSTA, J. R. de. (ed.). **Pesquisa e inovação agropecuária na Agenda 2030**: contribuições da Embrapa e parceiros. Brasília, D: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1090722/1/ODS18.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2022.

PAN, J. Harmonious coexistence between humans and nature must be promoted. In: CHINA's global vision for ecological civilization. Singapore: Springer, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-4534-1_4.

PARRIS, T. M.; KATES, R. W. Characterizing and measuring sustainable development. **Annual Review of environment and resources**, v. 28, n. 1, p. 559-586, 2003. DOI: 10.1146/annurev.energy.28.050302.105551.

PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B. de; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (ed.). Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/131969/1/Livro-Servicos-Ambientais-Embrapa.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2022

PATERMANN, C.; AGUILAR, A. A bioeconomy for the next decade. **EFB Bioeconomy Journal**, v. 1, Article number 100005, Nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioeco.2021.100005>.

PHILIPPI JÚNIOR, A.; ANDREOLI, C. V. (ed.). **Sustentabilidade no agronegócio**. [S. l.]: Manole, 2021.

PIRTEA, M. G.; NOJA, G. G.; CRISTEA, M.; PANAIT, M. Interplay between environmental, social and governance coordinates and the financial performance of agricultural companies. **Agricultural Economics**, v. 6, n. 12, p. 479-490. <https://doi.org/10.17221/286/2021-AGRICECON>.

POST, W. M.; KWON, K. C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. **Global change biology**, v. 6, n. 3, p. 317-327, Oct. 2000. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x>.

QIN, Y.; XIAO, X.; WIGNERON, J. P.; CIAIS, P.; BRANDT, M.; FAN, L.; LI, X.; CROWEL, S.; WU, X.; DOUGHTY, R.; ZANG, Y.; LIU, S.; MOORE, B. Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 5, p. 442-448, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01026-5>.

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, n. 5989, 2015. DOI: 10.1038/ncomms6989.

ROCKSTRÖM, J.; EDENHOFER, O.; GAERTNER, J.; DeCLERCK, F. Planet-proofing the global food system. **Nature Food**, v. 1, n. 1, p. 3-5, Jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43016-019-0010-4>.

ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, Å.; CHAPIN, F. S.; LAMBIN, E. F.; LENTON, T. M.; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H. J.; NYKVIST, B.; WIT, C. S. de; HUGHES, T.; LEEUW, S. van der; RODHE, H.; SÖRLIN, S.; SNYDER, P. K.; COSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORELL, R. W.; FABRY, V. J.; HANSEN, J.; FOLEY, J. A. A safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461, Article number 7263, p. 472-475, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1038/461472a>.

ROKITYANSKIY, D.; BENÍTEZ, P. C.; KRAXNER, F.; MCCALLUM, I.; OBERSTEINER, M.; RAMETSTEINER, E.; YAMAGATA, Y. Geographically explicit global modeling of land-use change, carbon sequestration, and biomass supply. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 74, n. 7, p. 1057-1082, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.022>.

ROOSEVELT, A. C. The Amazon and the Anthropocene: 13,000 years of human influence in a tropical rainforest. **Anthropocene**, v. 4, p. 69-87 Dec. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2014.05.001>.

ROUBÍK, H.; LOŠŤÁK, M.; KETUAMA, C. T.; PROCHÁZKA, P.; SOUKUPOVÁ, J.; HAKL, J.; KARLIK, P.; HEJCMAN, M. Current Coronavirus Crisis and Past Pandemics-what can happen in post-COVID-19 agriculture? **Sustainable Production and Consumption**, v. 30, p. 752-760, Mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.01.007>.

ROWAN, N. J.; POGUE, R. Editorial overview: Green new deal era — Current challenges and emerging opportunities for developing sustaining and disruptive innovation. **Current Opinion Environmental Science Health**, v. 22, Article number 100294, 2021. DOI:10.1016/j.coesh.2021.100294.

SALOMÃO, J. A. F. O Moderfrota e a política de modernização da agricultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, ano. 11, n, 1, p. 15-21, out./nov./dez. 2002.

SANTOS, W. G. D; 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, 2016.

SCHAEFER, H. On the causes and consequences of recent trends in atmospheric methane. **Current Climate Change Reports**, v. 5, n. 4, p. 259-274, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40641-019-00140-z>.

SIKDAR, S. K. Sustainable development and sustainability metrics. **AIChE journal**, v. 49, n. 8, p. 1928-1932, Aug. 2003.

SILVA, S. P. da; COSTA, A. S. V. da; SANTOS, S. L. B. dos; LAIA, M. L. de. A importância da biomassa na matriz energética brasileira. **Pensar Acadêmico**, v. 19, n. 2, p. 557-583, 2021.

SINHA, J. E-waste and its impact on the environment. **Coherence**, v. 2, n. 2, p. 35-46, Dec. 2017.

SMITH, P. Malthus is still wrong: we can feed a world of 9–10 billion, but only by reducing food demand. **Proceedings of the Nutrition Society**, v. 74, n. 3, p. 187-190, Aug. 2015.

SOTERRONI, A. C.; MOSNIER, A.; CARVALHO, A. X.; CÂMARA, G.; OBERSTEINER, M.; ANDRADE, P. R.; SOUZA, R. C.; BROCK, R.; PIRKER, J.; KRAXNER, F.; HAVILIK, P.; KAPOS, V.; ERMGASSEM, E. K, H. J.; VALIN, H.; Ramos, F. M. Future environmental and agricultural impacts of Brazil's Forest Code. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 7, Article number 074021, July 2018.

SOUSA, A. F.; SILVESTRE, A. J. Plastics from renewable sources as green and sustainable alternatives. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 33, Article number 100557, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100557>.

SPERLING, F.; HAVLIK, P.; DENIS, M; VALIN, H.; PALAZZO, A.; GAUPP, F.; VISCONTI, P. Toward resilient food systems after COVID-19. **Current Research in Environmental Sustainability** v. 4, Article number 100110, 2022. DOI: 10.1016/j.crsust.2021.100110.

SPERLING, F.; LOPES, M.; MALHOTRA, R.; FERNANDES, A. M. Systems-based Approaches for Development Co-operation to Meet Diverse Needs and Aspirations in an Interdependent World. In: HYNES, W.; LEES, M.; MÜLLER, J. M. (ed.). **Systemic Thinking for Policy Making: The Potential of Systems Analysis for Addressing Global Policy Challenges in the 21st Century**. Paris: OECD Publishing, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1787/4bcb6099-en>.

STEFFEN, W.; CRUTZEN, P. J.; MCNEILL, J. R. The Anthropocene: Are humans now overwhelming the great forces of nature? **Ambio**, v. 36, n. 8, p. 614-621, 2007. DOI: [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[614:TAAHNO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[614:TAAHNO]2.0.CO;2).

STEGMANN, P.; LONDO, M.; JUNGINGER, M. The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters. **Resources, Conservation & Recycling**: X, v. 6, Article number 100029, May 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100029>.

STEINER, R. Our food systems need inspiring and actionable vision. **Nature Food**, n. 2, 3, p. 130-131, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00246-4>.

STRZYZ, P. CRISPR–Cas9 wins Nobel. **Nature Reviews Molecular Cell Biology**, v. 21, p. 714, Oct. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41580-020-00307-9>.

SUBRAMANIAN, M. Humans versus Earth. **Nature**, v. 572, p. 168-170, 2019. DOI: [10.1038/d41586-019-02381-2](https://doi.org/10.1038/d41586-019-02381-2).

SUCHEK, N.; FERNANDES, C. I.; KRAUS, S.; FILSER, M.; SJÖGRÉN, H. Innovation and the circular economy: A systematic literature review. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, 8, Article number 3686-3702, May, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/bse.2834>.

SUDIAN, D. A. P. B.; SUTOPO, W.; HISJAM, M. Global business strategy in electric car vehicle industry: a comparative study between Tesla Inc. vs Rivian LLC. In: ASIA PACIFIC INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT SURAKARTA, 2., 2021, Indonesia. **Proceedings...** Indonesia, Sept. 2021

SUSTAINO-METRIC. 2022. Disponível em: <https://sustainometric.com/>. Acesso em: 13 May 2022.

TELHADO, S. F. P.; CAPDEVILLE, G. de. **Tecnologias poupa-terra**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. 162 p.

THONEMANN, N.; SCHULTE, A.; MAGA, D. How to conduct prospective life cycle assessment for emerging technologies? A systematic review and methodological guidance. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 1192, Jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12031192>.

TSOY, N.; STEUBING, B.; GIESEN, C. van der; GUINÉE, J. Upscaling methods used in ex ante life cycle assessment of emerging technologies: a review. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 9, p. 1680-1692, Sept. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01796-8>.

TUCKETT, R. Greenhouse gases. In: **ENCYCLOPEDIA of Analytical Science**. [S. l.]: Elsevier, 2019.

UM PROJETO para a Amazônia no século 21: desafios e contribuições. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2009.

UNICEF.; FAO; IFAD; WFP; WHO. **The state of food security and nutrition in the world 2021: transforming food systems for food security, improved nutrition and affordable healthy diets for all**. Rome, 2021.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. **SDG Impact: manage for impact - Redefining business as usual**. Disponível em: <https://sdgimpact.undp.org/>. Acesso em: 22 Apr. 2022.

UNITED NATIONS. General Assembly. **Resolution 70/1. transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. Disponível em: https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf. Acesso em: 11 Apr. 2022.

UNITED NATIONS. **Paris agreement**. Disponível em: <https://heinonline.org/HOL/LandingPage?handle=hein.journals/intlm55&div=46&id=&page=>. Acesso em: 19 May 2022.

UNITED NATIONS. **UN Global Compact**: CEO commitments to implement universal sustainability principles. Disponível em: <https://www.unglobalcompact.org/about>. Acesso em: 13 Apr. 2022.

UNITED NATIONS. **UN Research Roadmap guides investments in research to support global recovery from COVID-19 pandemic**. Leveraging the Power of Science for a More Equitable, Resilient and Sustainable Future. Nov. 2020. Disponível em: <https://www.un.org/en/pdfs/UNCOVID19ResearchRoadmap.pdf>. Acesso em: 12 Apr. 2022.

VANDENBERGHE, L. P. S.; VALLADARES-DIESTRA, K. K.; BITTENCOURT, G. A.; TORRES, L. Z.; VIEIRA, S.; KARP, S. G.; SYDNEY, E. B.; CARVALHO, V.; THOMAZ SOCCO, V.; SOCCOL, C. R. Beyond sugar and ethanol: The future of sugarcane biorefineries in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 167, Article number 112721, Oct. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112721>.

VARJANI, S. J.; GNANSOUNOU, E.; PANDEY, A. Comprehensive review on toxicity of persistent organic pollutants from petroleum refinery waste and their degradation by microorganisms. **Chemosphere**, v. 188, p. 280-291, Dec. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.005>.

VARSHNEY, R. K.; SINHA, P.; SINGH, V. K.; KUMAR, A.; ZHANG, Q.; BENNETZEN, J. L. 5Gs for crop genetic improvement. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 56, p. 190-196, Aug. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.12.004>.

VAZ, S. Sugarcane for renewable chemistry. In: SUGARCANE Biorefinery, Technology and Perspectives. [S.l.]: Academic Press, 2020. p. 165-178.

VELENTURF, A. P.; PURNELL, P. Principles for a sustainable circular economy. **Sustainable Production and Consumption**, v. 27, p. 1437-1457, July 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.018>.

VIEIRA FILHO, J. E. R. **Diagnóstico e desafios da agricultura brasileira**. Rio de Janeiro: Ipea, 2019. 340 p.

VIEIRA FILHO, J. E. R.; GASQUES, J. G. **Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade**. Brasília, DF: Ipea, 2016.

VILELA, E. F.; CALLEGARO, G. M.; FERNANDES, G. W. **Biomass e agricultura: oportunidades e desafios**. Rio de Janeiro: Vertente edições, 2019. 304 p.

VON BRAUN, J. Bioeconomy and its set of innovations for sustainability. **Industrial Biotechnology**, v. 16, n. 3, p. 142-143, 2020.

WAINAINA, S.; AWASTHI, M. K.; SARSAIYA, S.; CHEN, H.; SINGH, E.; KUMAR, A.; TAHERZADEH, M. J. Resource recovery and circular economy from organic solid waste using aerobic and anaerobic digestion technologies. **Bioresource Technology**, v. 301, Article number 122778, April 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122778>.

WATERS, C. N.; ZALASIEWICZ, J. Concrete: the most abundant novel rock type of the Anthropocene. In: DELLASALA, D. A.; GOLDSTEIN, M. I. (ed.). **The Encyclopedia of the Anthropocene**. Oxford: Elsevier, 2018. p. 75-85.

WEEKS, J. R. Malthus, Thomas Robert (1766–1834). **The Blackwell Encyclopedia of Sociology**. Oct. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781405165518.wbeosm008.pub2>.

WENDER, B. A.; FOLEY, R. W.; HOTTLE, T. A.; SADOWSKI, J.; PRADO-LOPEZ, V.; EISENBERG, D. A.; LAURIN, L.; SEAGER, T. P. Anticipatory life-cycle assessment for responsible research and innovation. **Journal of Responsible Innovation**, v. 1, p. 200-207, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/23299460.2014.920121>.

WORLD ECONOMIC FORUM. **The Global Risks Report 2022**. 17th Edition. Zurich, 2022. Disponível em: <https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2022>. Acesso em: 9 ago.2022.

ZHANG, P.; GUO, Z.; ULLAH, S.; MELAGRAKI, G.; AFANTITIS, A.; LYNCH, I. Nanotechnology and artificial intelligence to enable sustainable and precision agriculture. **Nature Plants**, v. 7, n. 7, p. 864-876, June 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41477-021-00946-6>.

ZHANG, R.; TANG, X.; LIU, J.; VISBECK, M.; GUO, H.; MURRAY, V.; MCGILLYCUDDY, C.; KE, B.; KALONJI, G.; ZHAI, P.; SHI, X.; LU, J.; ZHOU, J.; KAN, K.; HAN, O.; YE, Q.; LUO, Y.; CHEN, J.; CAI, W.; OUYANG, W.; DJALANTE, R.; BAKLANOV, A.; REN, LU; BRASSEUR, G.; GAO, G. F.; ZHOU, L. From concept to action: a united, holistic and One Health approach to respond to the climate change crisis. **Infectious Diseases of Poverty**, v. 11, n. 1, 1-6, Feb. 2022.

ZILLI, M.; SCARABELLO, M.; SOTERRONI, A. C.; VALIN, H.; MOSNIER, A.; LECLERE, D.; HAVLIK, P.; KRAXNER, F.; LOPES, M. A.; RAMOS, F. M. The impact of climate change on Brazil's agriculture. **Science of the Total Environment**, v. 740, Article number 139384, Oct. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139384>.

Embrapa

Agroenergia