

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E POLÍTICAS AGRÍCOLAS NO BRASIL: DESAFIOS E ESTRATÉGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE *CLIMATE CHANGE AND AGRICULTURAL POLICIES IN BRAZIL: CHALLENGES AND STRATEGIES FOR SUSTAINABILITY*

Milena Magalhães Oliveira

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo
milenamagalhaes@usp.br

Vitor Manoel Tomé do Nascimento

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo
vitortomenascimento@gmail.com

Sílvia Helena Galvão de Miranda

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo
shgdmira@usp.br

Aryeverton Fortes de Oliveira

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ary.fortes@embrapa.br

Grupo de Trabalho (GT): << GT4. Questão ambiental, agroecologia e sustentabilidade >>

Resumo

Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica sistematizada sobre a interseção entre agricultura, mudanças climáticas e inovação tecnológica, com foco nas estratégias de mitigação e adaptação adotadas no setor agropecuário. Foram analisadas 64 publicações, entre artigos científicos, relatórios institucionais, documentos de organismos multilaterais e boletins de política pública. Observa-se uma evolução marcante da produção acadêmica sobre o tema na última década, o que evidencia seu crescente destaque na agenda científica e política. Destaca-se, ainda, a importância de desenvolver tecnologias compatíveis com os sistemas produtivos, com base em abordagens integradas e inovadoras, que viabilizem uma transição justa para uma agricultura resiliente e de baixo carbono.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Agricultura sustentável; Mitigação; Políticas públicas

Abstract

This article presents a systematic literature review on the intersection of agriculture, climate change, and technological innovation, focusing on mitigation and adaptation strategies adopted in the agri-food sector. A total of 64 publications were analyzed, including peer-reviewed articles, institutional reports, multilateral documents, and policy bulletins. A notable growth in scientific output on the topic has been observed over the last decade, highlighting its increasing relevance in academic and policy arenas. It also emphasizes the need to develop technologies suited to production systems, grounded in integrated and innovative approaches, enabling a just transition to resilient, low-carbon agriculture.

Key words: Climate change; Sustainable agriculture; Mitigation; Public policy.

1. Introdução

A configuração atual dos sistemas agroalimentares exerce influência decisiva na formulação e implementação de políticas climáticas. A mitigação dos impactos mais intensos do aquecimento global exige transformações estruturais profundas ao longo de toda a cadeia de produção e consumo de alimentos. Embora o setor agroalimentar represente uma fonte

relevante de emissões de gases de efeito estufa, ele também figura entre os mais expostos aos efeitos adversos das mudanças climáticas — como secas prolongadas, ondas de calor e eventos extremos. Tal dualidade evidencia a urgência de estratégias integradas de mitigação e adaptação, com foco na construção de resiliência sistêmica. Nesse contexto, o fortalecimento da governança é necessário para lidar com as complexas interações entre segurança alimentar, sustentabilidade ambiental e estabilidade climática. A crescente interdependência entre esses domínios tem sido amplamente reconhecida tanto na literatura científica quanto nos fóruns internacionais de formulação de políticas públicas.

No Brasil, segundo dados do Sirene (MCTI, 2024), em 2022, cerca de 30,5% das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) eram decorrentes das atividades agropecuárias, sendo que ao se considerar o sistema agroalimentar, ainda se agregam contribuições do setor de processamento industrial dos produtos agropecuários e sua distribuição e geração de resíduos. O setor de uso de solo e mudança de uso de solo (LULUCF), nesse mesmo ano, respondeu por 39,5%, e o de Energia, por 20,5%, totalizando a maior parte das emissões no Brasil. No mundo, em termos médios, a maior fonte de emissões é o setor denominado de Energia, que responde por cerca de um terço das emissões globais (IPCC, 2022). Por outro lado, a atividade de produção de alimentos é essencial para a sobrevivência humana, e essa perspectiva se torna ainda mais relevante ao se considerar os dados apresentados pelo SOFI 2024, que apontam que 1 em cada 11 pessoas no mundo enfrentaram a fome em 2023 e 29% da população mundial, nesse mesmo ano, enfrentou insegurança alimentar grave ou moderada (FAO, 2024).

O objetivo deste artigo é discutir o status atual e as perspectivas de inovação e de tecnologias para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) nas atividades agropecuárias voltadas à produção de alimentos, assim como aquelas que permitem mitigar os efeitos dessas emissões. Deste modo, buscar uma análise crítica de como esse setor, no Brasil, vem enfrentando as questões das mudanças climáticas, as estratégias já adotadas e como estas podem indicar ajustes em políticas públicas para acelerar o processo de adoção das ferramentas tecnológicas e de gestão que se coadunem com esse enfrentamento.

O presente artigo se estrutura como uma revisão crítica da literatura sobre os principais temas que articulam agricultura e mudanças climáticas, com ênfase na economia ambiental aplicada ao setor agropecuário. São abordadas, inicialmente, as bases conceituais e empíricas da economia das mudanças climáticas e os impactos projetados sobre os sistemas agrícolas. Em seguida, examinam-se práticas de manejo sustentáveis e seu potencial mitigador, discutindo a inserção de tecnologias e inovações voltadas à redução de emissões e ao aumento da resiliência climática no campo. Complementarmente, explora-se o papel das negociações e acordos internacionais como vetores indutores de políticas ambientais no Brasil, com destaque para sua influência na formulação de instrumentos normativos e econômicos que orientam a transição para uma agricultura de baixo carbono. Por fim, são analisadas as principais políticas públicas ambientais adotadas no país, limitações, avanços e lacunas, com vistas a identificar direções estratégicas para seu aprimoramento e alinhamento às exigências do contexto climático contemporâneo.

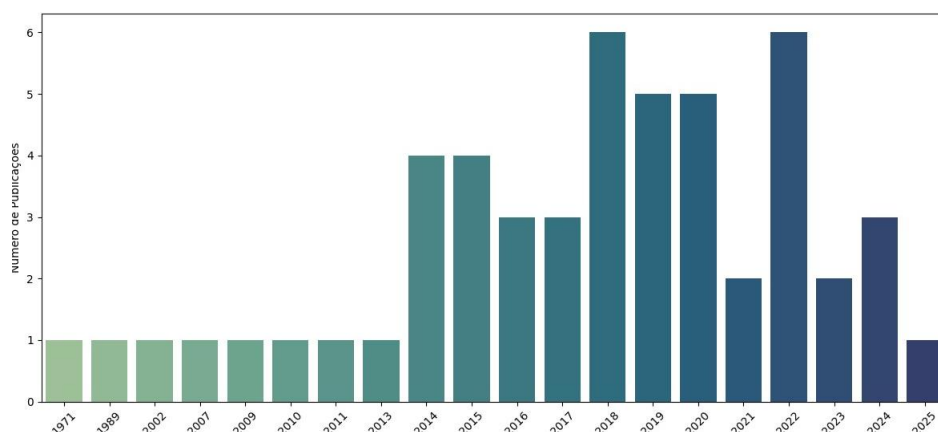
2. Metodologia

A presente investigação adota uma abordagem metodológica fundamentada na revisão sistemática da literatura e na análise qualitativa de políticas, com o objetivo de sintetizar e contrastar o arcabouço normativo e teórico relacionado ao setor agroindustrial. A coleta de dados foi conduzida em bases de reconhecida relevância científica, incluindo Scielo, Web of Science e Google Scholar, complementada pela análise de documentos governamentais, de modo a garantir a robustez e a abrangência das informações examinadas.

A revisão bibliográfica sistematizada consistiu na análise crítica de um total de 64 publicações interdisciplinares na temática de mudanças climáticas, agricultura, inovação tecnológica e políticas ambientais compreendendo um escopo temporal de 1971 a 2025. O propósito foi reunir, examinar criticamente e sintetizar as evidências científicas e institucionais que contribuem para compreender os desafios e as soluções possíveis no contexto da transição para uma agricultura de baixo carbono.

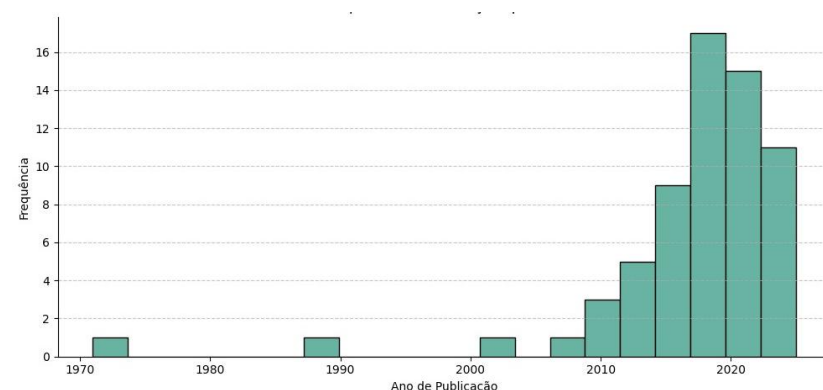
A análise das fontes revelou uma predominância de artigos científicos revisados por pares, os quais representam mais de 60% do corpus total. Essa concentração indica um forte embasamento empírico e metodológico, com destaque para periódicos de alto impacto como Nature, Environmental Research Letters, Journal of Agricultural Science, Agronomy Journal, Technological Forecasting & Social Change, entre outros. Tais publicações são fundamentais para embasar discussões quantitativas e qualitativas sobre impactos climáticos, práticas de manejo e estratégias de mitigação e adaptação. Ademais, foram incluídos relatórios institucionais e multilaterais, provenientes de fontes como Embrapa, IPCC, FAO, IPEA, ONU e Banco Central do Brasil, que trazem informações, cenários prospectivos e marcos regulatórios sobre a temática. De maneira adicional, boletins de política pública foram considerados, oferecendo uma perspectiva aplicada ao contexto brasileiro e internacional. Um aspecto digno de destaque é a evolução marcante no volume de publicações sobre mudanças climáticas na última década, evidenciando que o tema vem ganhando relevância na agenda científica e institucional contemporânea. As figuras 1, 2 e 3 abaixo mostram esse cenário:

Figura 1 - Evolução das Publicações por ano



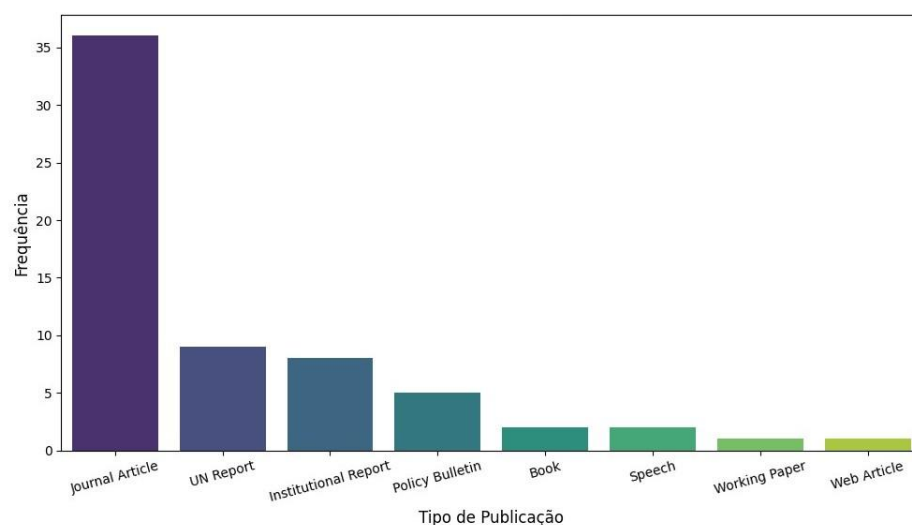
Fonte: elaborado pelos autores a partir de dados da pesquisa.

Figura 2 - Frequência das Publicações por Ano



Fonte: elaborado pelos autores a partir de dados da pesquisa.

Figura 3 - Perfil das Publicações sobre Mudanças Climáticas



Fonte: elaborado pelos autores a partir de dados da pesquisa.

Para a análise dos dados, empregou-se a técnica de análise de conteúdo, permitindo a identificação de padrões, categorias e recorrências temáticas nas políticas analisadas. Adicionalmente, foi realizada uma comparação sistemática entre as diferentes abordagens normativas e estratégicas, possibilitando a avaliação crítica dos impactos e das convergências entre os distintos modelos adotados.

3. Revisão de Literatura

3.1. Economia de Mudanças Climáticas

A dinâmica dos impactos econômicos das mudanças climáticas pode ser analisada sob duas óticas principais: os efeitos de um aquecimento global gradual e as consequências diretas de eventos climáticos extremos (Batten, 2018). Esses choques afetam tanto a demanda quanto a oferta de bens e serviços e se manifestam através de repercussões distintas sobre diferentes setores da economia.

No âmbito da demanda, o aquecimento global gradual pode gerar incertezas sobre a demanda futura, aumentam os riscos climáticos que afetam os investimentos. Nesse sentido, o Banco Central do Brasil já debateu sobre a introdução de testes de estresses climáticos, com o objetivo da manutenção da estabilidade do poder de compra e solidez das instituições financeiras diante de condições climáticas adversas e o potencial impacto do mercado (Bacen, 2024).

Esse contexto de instabilidade climática induz mudanças nos padrões de consumo, uma vez que agentes econômicos tendem a aumentar sua propensão à poupança como estratégia de precaução frente a períodos de maior adversidade. Ademais, a evolução do comércio global pode ser impactada por transformações nos sistemas de transporte e na atividade econômica em geral, fato esse que pode gerar novos padrões de comércio (Gassebner et al, 2010). É o caso da tendência de buscar produtos locais e regionais, por parte de uma parcela do consumidor europeu, de modo a reduzir sua pegada de carbono ou na substituição de transporte aéreo pelo ferroviário.

A incerteza associada aos eventos climáticos extremos pode ser analisada sob a perspectiva das distribuições de caudas grossas (fat-tailed distributions), conforme destacado por Weitzman (2011). A partir desse entendimento, Weitzman apresenta o “Teorema Sombrio” e argumenta que eventos de baixa probabilidade, mas que apresentam consequências

catastróficas, desempenham um papel desproporcionalmente alto na formulação de políticas econômicas e ambientais. Precisamente, o autor procede uma análise de risco que detecta que as incertezas associadas às mudanças climáticas não seguem distribuições estatísticas convencionais, mas sim distribuições que permitem a ocorrência de eventos extremos com impactos devastadores, ainda que sua frequência seja baixa.

Essa característica da incerteza climática tem implicações diretas para os investimentos e a precificação de riscos. No contexto econômico, a incerteza atribuída ao formato fat-tailed implica que modelos tradicionais de avaliação de risco podem subestimar a probabilidade de colapsos sistêmicos associados a eventos climáticos extremos (Stern, Stiglitz, Taylor, 2022). A consequência desse fato reside na precificação errática por parte dos mercados dos ativos expostos ao risco climático, ocasionando uma alocação subótima de capital e uma possível subestimação dos custos de inação. Desse modo, a incerteza sobre a magnitude dos danos climáticos pode levar a um viés na tomada de decisões econômicas, seja na esfera pública ou privada, resultando em investimentos insuficientes em adaptação e mitigação.

No setor imobiliário, essa dinâmica se traduz em um aumento da vulnerabilidade devido à amplificação dos riscos de enchentes, tempestades e outros desastres naturais. Um exemplo recente dessa tendência foram as enchentes catastróficas no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, em 2024, que resultaram em destruição massiva de infraestruturas urbanas, deslocamento populacional em larga escala e elevados custos econômicos para recuperação. Esse evento evidencia como eventos climáticos extremos podem gerar impactos financeiros e sociais profundos, agravados pela crescente exposição de áreas urbanizadas a padrões meteorológicos cada vez mais imprevisíveis.

Além do impacto urbano e securitário, as enchentes também tiveram consequências severas para a agricultura, sendo este um dos setores mais vulneráveis a eventos climáticos extremos. O Rio Grande do Sul, um dos principais produtores agrícolas do Brasil, especialmente em grãos como soja, arroz e milho, enfrentou perdas expressivas devido à destruição de lavouras e à degradação da infraestrutura rural. A inundação de grandes áreas produtivas reduziu a oferta agrícola local e impactou cadeias de suprimentos nacionais e internacionais, resultando em elevação de preços e escassez temporária de produtos (IPEA, 2024; Ferreira, Kreter e Garcia, 2024). Eventos climáticos extremos podem desarticular cadeias produtivas globais de maneira inesperada, gerando efeitos multiplicadores e choques de oferta persistentes.

Desse modo, é necessário salientar que a incerteza climática extrema exige uma reavaliação das políticas econômicas, das estratégias de precificação de ativos e dos mecanismos de mitigação de riscos. A resposta política e econômica a essa incerteza deve considerar os impactos esperados das mudanças climáticas, mas também a possibilidade de cenários catastróficos poderia levar a colapsos de segmentos ou de setores inteiros em regiões que poderiam, de forma sistêmica, propagar impactos globais.

Retomando a literatura que aborda os aspectos ou os impactos das mudanças climáticas sobre a oferta, os choques sobre a oferta de trabalho são evidentes nas dimensões das mudanças climáticas. Elevações nas temperaturas médias, estão associadas a uma redução significativa na produtividade laboral e agrícola, devido às limitações fisiológicas no desempenho humano em condições de calor extremo e à menor eficiência das colheitas agrícolas em climas adversos (IPCC, 2019; IPCC, 2024; ILO, 2024; ILO, 2018a, ILO, 2018b.). Essas alterações podem resultar na perda de horas trabalhadas e em fatalidades que reduzem o contingente da força de trabalho disponível. Nesse sentido, ambos os fenômenos induzem efeitos negativos sobre o setor agrícola e a produção de insumos essenciais. O aquecimento global progressivo acarreta uma redução na produtividade agrícola, enquanto eventos climáticos extremos podem provocar

escassez imediata de alimentos e outros insumos produtivos, aumentando a volatilidade de preços e comprometendo a segurança alimentar (Batten, 2018).

No que concerne ao estoque de capital, o aquecimento gradual ocasiona o desvio de recursos originalmente destinados a investimentos produtivos para a ampliação do capital de adaptação, isto é, recursos que buscam mitigar os impactos das mudanças climáticas no longo prazo. No que tange aos eventos climáticos extremos, estes provocam danos físicos diretos ao estoque de capital, exigindo grandes investimentos na recuperação e reconstrução de infraestruturas danificadas. Esse mesmo fenômeno ocorre no setor tecnológico, onde a inovação acaba sendo redirecionada para estratégias de adaptação em cenários de mudanças graduais ou para a reconstrução e substituição de tecnologias danificadas por eventos climáticos extremos (Batten, 2018).

Essas dinâmicas lançam luz sobre os desafios econômicos impostos pelas mudanças climáticas, tanto em sua manifestação gradual quanto em sua expressão mais abrupta por meio de eventos extremos. A alocação eficiente de recursos para mitigação e adaptação se torna, portanto, um aspecto central nas políticas públicas e privadas, visando minimizar os impactos negativos sobre a atividade econômica global.

3.2. Mudanças Climáticas e Agricultura

Os efeitos decorrentes do aumento contínuo das temperaturas e a maior variabilidade climática já são perceptíveis nos ecossistemas e cadeias de produção agrícola (IPCC, 2018; Mora et al., 2018). Frieler et al. (2017) utilizaram um conjunto de simulações de modelos de culturas agrícolas para fornecer estimativas da fração das variabilidades de rendimento que podem ser atribuídas ao clima. Os autores detectaram que as variações climáticas observadas podem explicar mais de 50% da variabilidade dos rendimentos do trigo na Austrália, Canadá, Espanha, Hungria e Romênia. Para a cultura do milho, a variação nos rendimentos ultrapassa 50% em sete países, incluindo os Estados Unidos. A variância explicada ultrapassa 50% para o arroz no Japão e na Coreia do Sul e para a soja na Argentina.

Em consonância com o estudo supracitado, Lobell e Field (2007) descobriram que medidas das temperaturas e precipitações durante a estação de crescimento explicam aproximadamente 30% ou mais das variações anuais nos rendimentos médios globais das seis culturas mais cultivadas no mundo. Em particular, para as culturas do trigo, milho e cevada, os autores identificaram que há uma resposta claramente negativa dos rendimentos globais ao aumento das temperaturas. Com base nos resultados das tendências climáticas obtidas nesse estudo, os autores estimaram que o aquecimento desde 1981 tenha resultado em perdas anuais combinadas dessas três culturas de, aproximadamente, 40 milhões de toneladas (Mt) ou US\$ 5 bilhões por ano, até 2002.

Lobell e Tebaldi (2014) estimaram os riscos e os impactos das tendências climáticas nos rendimentos globais de trigo e milho. Os pesquisadores identificaram que o aquecimento global tem aumentado o risco de que tendências climáticas negativas impactem drasticamente a produtividade agrícola em um período de 10 anos. De maneira particular, os autores apontam que a probabilidade do crescimento da produtividade do milho e do trigo possa ser reduzido pela metade ao longo de uma década. Precisamente para a cultura do milho, há uma chance de 25% de que o crescimento da produtividade se reduza à metade devido às mudanças climáticas e para o trigo, essa chance é cerca de 16,7%.

A partir da aplicação da metodologia de séries temporais com dados de estatísticas agrícolas para aproximadamente 13.500 unidades políticas, Ray et al (2015) examinaram o efeito da variabilidade climática nos rendimentos globais das culturas do milho, arroz, trigo e soja. Como resultado, os autores identificaram que, em grandes regiões produtoras globais, mais de 60% da variabilidade nos rendimentos pode ser explicada pelas variações climáticas.

De acordo com o estudo, os maiores coeficientes de variação, indicando maior variabilidade relativa nos rendimentos do milho, foram observados na região nordeste do Brasil, partes da África, Índia, nordeste do México e sudeste dos Estados Unidos. Particularmente para a cultura do arroz, a variabilidade média global dos rendimentos foi de, aproximadamente, 0,5 t/ha/ano, correspondendo a cerca de 13% dos rendimentos médios globais de arroz. No que tange a produção de trigo, a Austrália e os estados das Grandes Planícies dos Estados Unidos apresentaram altos coeficientes de variação. Os valores da variabilidade média global dos rendimentos do trigo foram de 0,4 t/ha/ano, representando cerca de 17% dos rendimentos médios ao longo do período analisado na pesquisa.

No que se refere aos eventos climáticos extremos, Lesk, Rowhani, e Ramankutty (2016) utilizaram a metodologia da análise de época superposta e estimaram que as secas e ondas de calor extremas causaram danos substanciais à produção agrícola nacional, em todo o mundo, no período entre 1964 e 2007. Ademais, a pesquisa detectou que as secas reduziram os rendimentos dos cereais e causaram perdas totais de lavouras, enquanto o calor extremo afetou apenas os rendimentos, refletindo diferenças claras nos processos que levam aos impactos gerais na produção. Uma descoberta interessante desse estudo, a partir de uma análise regional e específica por cultura, revela que os países desenvolvidos são os mais afetados por esses desastres climáticos extremos.

Vogel et al (2019) aplicaram algoritmos de aprendizado de máquina (“Random Forests”), em dados subnacionais de produtividade, para analisar os impactos os eventos climáticos extremos nas anomalias de rendimento de milho, soja, arroz e trigo de primavera em escala global. Os resultados obtidos por essa pesquisa mostram que os fatores climáticos durante a estação de crescimento explicam 20% a 49% da variância das anomalias de rendimento (a depender do tipo de cultura), sendo que 18% a 43% da variância explicada pode ser atribuída aos extremos climáticos, dependendo da cultura analisada. Ademais, os pesquisadores detectaram que os extremos de temperatura apresentam uma associação mais forte com as anomalias de rendimento do que os fatores relacionados à precipitação. Por fim, os autores desenvolveram um indicador composto para identificar regiões críticas para a produção global, que são particularmente vulneráveis aos impactos dos extremos climáticos. Os resultados apontam maior vulnerabilidade da região América do Norte, para a produção de milho, trigo de primavera e soja; da Ásia, para a produção de milho e arroz; e da Europa, para a produção de trigo de primavera.

Ainda sob a perspectiva de extremos climáticos, Zampieri et al (2017) analisaram os efeitos de estresses climáticas sobre as anomalias de rendimento do trigo em escalas global e nacional, no período de 1980 a 2010. Os autores desenvolveram um indicador composto que permite capturar as características espaço-temporais dos processos físicos subjacentes nas diferentes regiões agroclimáticas do mundo. No processo de quantificação da contribuição das anomalias de rendimento nacional para as flutuações globais, foi constatado que apenas duas anomalias simultâneas em grandes produtores mundiais podem ser responsáveis por mais da metade das flutuações anuais globais. De maneira particular, foi detectado que na França, maior produtora de trigo da União Europeia, que abriga uma variedade de zonas climáticas, a variabilidade interanual dos rendimentos do trigo dentro do país é principalmente explicada pelos indicadores de estresse térmico e hídrico. Em um contexto global da produção do trigo, Asseng et al (2017) estimam que a produção de trigo reduza cerca de 6% para cada aumento adicional de 1°C na temperatura.

Hamed et al (2021) exploraram a relação entre os principais fatores climáticos dentro da estação de crescimento e a variabilidade dos rendimentos da soja nos EUA. Os autores combinaram dados meteorológicos de reanálise, evapotranspiração baseada em satélite e umidade do solo na zona radicular, com rendimentos agrícolas subnacionais, aplicando métodos

estatísticos que consideram efeitos de interação. Os resultados descobertos por essa pesquisa demonstraram que a maior influência negativa sobre os rendimentos da soja ocorre devido a altas temperaturas e baixa umidade do solo, durante o período reprodutivo da cultura no verão. Ademais, foi constatado que as condições simultaneamente quentes e secas em agosto reduzem os rendimentos em 1,25 desvios padrão, o que é 6 vezes mais intenso do que o impacto apenas do calor e 3 vezes mais intenso do que o impacto apenas da seca.

Zhao et al. (2017) investigaram os impactos da temperatura nos rendimentos do trigo, arroz, milho e soja a partir de quatro métodos analíticos: Modelos globais em grade; Modelos locais baseados em pontos específicos; Regressões estatísticas e Experimentos de aquecimento em campo. De modo consistente nas diferentes metodologias aplicadas, os resultados demonstraram que o aumento da temperatura tem impactos negativos nos rendimentos agrícolas em escala global. De acordo com o estudo, cada acréscimo de 1°C na temperatura média global reduziria¹, em média, os rendimentos globais de trigo em 6,0%; arroz em 3,2%; milho em 7,4%; soja em 3,1%.

Ao buscar os efeitos das mudanças climáticas na agricultura brasileira Santos, Oliveira e Ferreira Filho (2022) e Ferreira Filho e Moraes (2013) utilizaram modelo de equilíbrio geral para investigar os impactos socioeconômicos potenciais que as mudanças climáticas podem ter sobre a agricultura e a economia brasileira. Os resultados de Santos, Oliveira e Ferreira Filho (2022) indicam maiores perdas para regiões cuja economia é mais dependente da agricultura, em particular no cultivo da soja.

Ainda sob a perspectiva das mudanças climáticas na agricultura brasileira, Pires et al (2016) utilizaram dois modelos agrícolas em grade e quatro modelos climáticos para avaliar os efeitos das mudanças climáticas regionais e globais na produtividade da soja até 2050 no Brasil. Os autores testaram cinco cultivares, expressos em graus-dia acumulados, e dez datas de plantio, utilizando dois modelos de culturas e quatro modelos climáticos. Como resultado, os pesquisadores detectaram que a produtividade de cultivares de ciclo curto² pode diminuir drasticamente. Ademais, verificaram que em um contexto de cultivo duplo no centro-norte do Brasil, as janelas de plantio terão que ser significativamente reduzidas (no máximo 10 dias) para que as grandes propriedades possam se adaptar às mudanças climáticas.

3.3. Práticas de manejo como ferramentas de mitigação das mudanças climáticas na agricultura

Diante do cenário em que as mudanças climáticas se tornam progressivamente mais evidentes no setor agropecuário, torna-se necessário o desenvolvimento e a implementação de práticas sustentáveis que atenuem seus impactos adversos sobre a produção agrícola. Essas estratégias devem assegurar a resiliência dos sistemas produtivos, promover a adaptação às novas variabilidades climáticas e garantir a segurança alimentar, ao mesmo tempo em que preservam os recursos naturais essenciais para a manutenção da biodiversidade e a sustentabilidade intergeracional (Garnett, 2013; Lee et al 2024).

Li et al (2019) conduziram um estudo de rotação de culturas com trigo, ervilha, lentilha, mostarda e grão em um experimento de campo no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Swift Current da Agriculture and Agri-Food Canada no período de 2010 a 2016. De acordo os autores, a diversificação de culturas melhorou a resistência do sistema aos estresses bióticos, sendo que o grão-de-bico no sistema diversificado lentilha-trigo-grão-de-bico apresentou a menor biomassa de plantas daninhas e a menor severidade de doenças foliares entre os sistemas de rotação analisados. Como resultado do estudo, foi detectado que os sistemas diversificados demonstraram maior resistência e resiliência a estresses abióticos e proporcionaram maior

¹ Sem considerar os efeitos da fertilização por CO₂, adaptação eficaz e melhoramento genético (Zhao et al, 2017).

² Prática comum entre agricultores que escolhem cultivar duas safras no mesmo calendário agrícola.

estabilidade na produtividade agrícola ao longo dos ciclos de rotação, em comparação com sistemas menos diversificados. Avaliações quantitativas indicaram que os sistemas mais diversificados apresentaram uma vantagem de 14% na robustez do sistema.

A rotação de culturas também foi objetivo do estudo conduzido por Sinderel et al (2015). Os pesquisadores conduziram um experimento de sequeiro com duração de 28 anos no estado de Nebraska, nos Estados Unidos, para avaliar o cultivo contínuo de milho, a fase do milho na rotação milho-soja, o cultivo contínuo de soja e a fase da soja na rotação milho-soja sob diferentes sistemas de preparo do solo. Em 19 dos 28 anos analisados, os rendimentos de milho na rotação milho-soja foram superiores aos do cultivo contínuo de milho; e os rendimentos de grãos de soja na fase de rotação com milho foram superiores aos do cultivo contínuo de soja, em 67% dos anos analisados.

Wang et al (2021) exploraram os determinantes das decisões de adoção da rotação diversificada de culturas pelos agricultores e os benefícios percebidos dessa prática nas regiões ocidentais do Corn Belt dos Estados Unidos. O estudo analisou 708 respostas de produtores rurais a uma pesquisa realizada no leste da Dakota do Sul em 2018. Além dessa variável, os pesquisadores consideraram variáveis climáticas, dados sobre uso da terra agrícola, características do solo e variáveis topográficas próximas às propriedades analisadas. Os resultados obtidos indicaram que os agricultores eram mais propensos a adotar a rotação diversificada de culturas como uma estratégia adaptativa para lidar com o déficit hídrico e reduzir a erosão do solo em terras marginais. Ademais, a integração da pecuária e a adoção da agricultura orgânica favoreceram a implementação da rotação diversificada de culturas e ampliaram os benefícios dessa prática.

Adekoya et al. (2014) realizaram estudos sobre a irrigação de precisão para uma gestão eficiente da água no cultivo de variedades do arroz. Os pesquisadores conduziram um ensaio de demonstração em campo, por dois anos, em Xangai, China, para comparar o estado de crescimento, a capacidade produtiva e a eficiência no uso da água de diferentes variedades de arroz. Os resultados mostraram que, sob irrigação por gotejamento, tanto as variedades híbridas quanto as variedades de arroz de economia de água e resistência à seca apresentaram maior capacidade produtiva em comparação com as variedades tradicionais de arroz irrigado. Os pesquisadores concluíram que o cultivo de arroz resistente à seca e de economia de água sob irrigação por gotejamento é uma prática viável. De acordo com os autores, esse sistema manteve uma produtividade competitiva de grãos e eficiência hídrica, além de reduzir substancialmente os riscos de poluição ambiental.

O estudo mais recente de Liang et al. (2020) explorou os avanços na pesquisa sobre o mecanismo de alocação de água e a efetividade da gestão integrada na irrigação de precisão, particularmente sobre os modelos de irrigação, a infraestrutura de irrigação e as estratégias de manejo empregadas. Os autores apresentaram novas tecnologias como a gestão de irrigação baseada em dados, alocação de água com eficiência comprovada e controle de irrigação baseado em nuvem como processos inovadores para a construção de um sistema de irrigação sustentável, integrado e evolutivo, proporcionando maior qualidade e eficiência na aplicação completa da irrigação de precisão.

A dialogar com as novas tecnologias na gestão da água, Samimi et al (2023) pesquisaram os impactos de longo prazo das possíveis intervenções tecnológicas, na gestão da terra e da água, para adaptar a agricultura irrigada à crescente escassez hídrica em um ambiente desértico. A partir dos resultados obtidos, os autores argumentaram que a gestão atual da irrigação não será capaz de manter a atual composição de culturas, devido à redução do fluxo do rio e à provável exaustão das águas subterrâneas doces até o final do século XXI. Nesse sentido, o estudo sugere estratégias para garantir a sustentabilidade da água na agricultura que incluem a transição para culturas relativamente mais tolerantes à seca e ao sal, a dessalinização

de águas subterrâneas salobras para irrigação, e o desenvolvimento de mercados de água para aumentar a flexibilidade no uso dos recursos hídricos.

3.4. Inovação e Tecnologia para Mudanças Climáticas como ferramentas de mitigação das mudanças climáticas no sistema agroalimentar

A incorporação e o avanço das tecnologias digitais emergentes, como blockchain, Internet das Coisas (IoT) e big data, operam como elemento fundamental na aceleração da modernização do setor agroalimentar. Essas inovações tecnológicas reestruturam os processos produtivos e impulsionam o desenvolvimento de alimentos de alta qualidade em menor tempo e com custos mais baixos (Akyazi et al., 2020). Ademais, a aplicação dessas tecnologias se apresenta como uma alternativa promissora na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas no sistema agroalimentar, possibilitando um gerenciamento mais eficiente dos recursos hídricos, a otimização do uso de fertilizantes e pesticidas, e a melhoria na rastreabilidade e sustentabilidade da produção. Esse novo paradigma tecnológico tornou-se indispensável para empresas que buscam se manter competitivas e inovadoras em um cenário de economia digital e transição para sistemas agroalimentar mais resilientes e sustentáveis (Liu et al., 2011; Clapp et al, 2018; Abbate et al, 2023).

A aplicação da Internet das Coisas na agricultura emerge como uma ferramenta para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas. A sensorização avançada e o monitoramento remoto em tempo real permitem a coleta e análise contínua de variáveis climáticas, como temperatura, umidade do solo e padrões de precipitação, fornecendo dados para a tomada de decisões estratégicas e a resiliência dos sistemas agroalimentares. Ademais, a automação agrícola baseada em IoT permite a otimização da irrigação de precisão, enquanto o uso de algoritmos preditivos melhora a gestão de insumos agrícolas, como fertilizantes e defensivos, reduzindo os impactos ambientais e aprimorando a qualidade do solo. Soma-se a esses elementos, o rastreamento inteligente de pragas e doenças através de dispositivos conectados que permitem intervenções rápidas e direcionadas, evitando perdas de produtividade e mitigando riscos fitossanitários em razão das oscilações climáticas (Lezoche et al, 2020).

Amani e Sarkidie (2022) exploraram como tecnologias emergentes podem aumentar significativamente a produtividade da cadeia de suprimentos, precisamente no caso de produtos perecíveis, ao reduzir custos, melhorar a precisão das operações, acelerar processos e minimizar a pegada de carbono da produção e distribuição de alimentos. Os autores discutiram como técnicas de Inteligência Artificial como *deep learning* aplicadas na gestão da cadeia de suprimentos de carne podem detectar automaticamente a carne deteriorada, realizando a separação dos produtos em boas condições e, como consequência, prevenindo a contaminação cruzada por patógenos transmitidos por alimentos. Nesse processo de automatização, os autores treinaram um modelo de classificação baseado em inteligência artificial utilizando os algoritmos DCNN (Deep Convolutional Neural Network) e PSO (Particle Swarm Optimization), atingindo 100% de precisão na distinção entre carne própria para consumo e carne estragada.

Hüttel et al (2020) exploraram como a adoção de métodos de agricultura de precisão baseados em TI pode facilitar o uso de práticas agrícolas sustentáveis pelos produtores rurais. Os pesquisadores contemplaram no estudo dimensões comportamentais para compreender a adoção de uma nova tecnologia no campo. Os resultados indicam que as normas sociais de diferentes grupos de referência exercem um impacto positivo no comportamento de uso de métodos digitais de fertilização localizada. Os autores argumentam que diante de um problema complexo de tomada de decisão, a exemplo do gerenciamento da fertilização digital localizada, os agricultores tendem a terceirizar parcialmente suas decisões e que essa escolha está fortemente influenciada pela experiência de outros produtores. De maneira concreta, o estudo

defende que métodos de fertilização de taxa variável com suporte mecânico otimizam a aplicação de nutrientes, considerando as heterogeneidades ambientais dentro da lavoura e a gestão da fertilização em escalas mais refinadas, reduz tanto o uso excessivo de insumos quanto os impactos ambientais, promovendo ganhos significativos em sustentabilidade. No entanto, esse estudo aponta que as decisões de adoção não são baseadas somente em cálculos técnicos e econômicos, mas também são fortemente influenciadas por normas sociais.

Chen et al (2014) apresentam três métodos de fertilização de precisão: tecnologia de formulação de fertilizantes baseada na análise do solo, sistemas de suporte à decisão e sistemas especialistas de suporte à decisão. Os autores argumentam que o Método Mehlich III (MIII) é capaz de extrair múltiplos elementos simultaneamente, permitindo que os pesquisadores utilizem o Espectrômetro de Emissão por Plasma Indutivamente Acoplado (ICP) para analisar as amostras de forma simultânea. Desse modo, os pesquisadores defendem que os métodos de fertilização de precisão são determinantes na solução do problema da baixa eficiência na aplicação de fertilizantes, otimizando o uso dos insumos agrícolas e reduzindo impactos ambientais. A utilização dessas tecnologias exerce uma influência significativa no desenvolvimento sustentável da agricultura, promovendo maior produtividade, uso racional dos recursos naturais e minimização dos impactos ambientais.

Da mesma forma, soluções voltadas para o cultivo mais sustentável, por meio da utilização de produtos biológicos têm sido uma alternativa atraente perante o cenário das mudanças climáticas, eficiência agrícola e das resistências adquiridas pelas pragas perante alguns princípios ativos. Atualmente, fertilizantes biológicos têm elevado o patamar produtivo de diferentes culturas, por meio da liberação controlada de nutrientes, a planta acaba por ter maior disponibilidade nutricional em diferentes fases vegetativas e reprodutivas, muitas vezes, evitando novas aplicações de fertilização. Ações voltadas a utilização de microrganismos, entre eles, os fungos micorrízicos, apresentam maior absorção de gás carbônico da atmosfera por meio do processo fotossintético, contribuindo para a mitigação do aquecimento global (EMBRAPA, 2023).

Perante a intensificação das mudanças climáticas nos últimos anos, tecnologias voltadas a Agricultura de Baixo Carbono (ABC), também tem sido colocada nas rotas e alterado os sistemas de produção de algumas propriedades. Práticas integradoras e mudanças nos sistemas de produção também podem ser consideradas tecnologias. A Integração Lavoura Pecuária (ILP) e a Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF) têm intensificado a produção de determinadas regiões e possibilitam diferentes atividades econômicas, culturas e criações no mesmo espaço. Tecnologias voltadas a restauração e a identificação de pastagens degradadas, permitindo um maior aproveitamento de área de lotação animal também tem auxiliado a produção sustentável e a mitigação de elementos contribuintes ao aquecimento global (EMBRAPA, 2020).

Assim como os produtos biológicos, não apenas vinculadas ao que se chama de *deep-tech*, práticas relativas à economia circular têm sido utilizadas como uma aliada aos produtores rurais perante a diversificação de produtos, fontes de receitas e mitigação de passivos ambientais nas propriedades rurais. Segundo Suchek (2021), o conceito da economia circular, que prevê que nada é perdido e desperdiçado, mas sim reaproveitado perante diferentes processos, está amplamente implementado no agronegócio e combatendo possíveis rejeitos que seriam prejudiciais ao meio ambiente e agravantes dos efeitos das mudanças climáticas. Setores como o sucroenergético e o da suinocultura utilizam amplamente os princípios da economia circular em seus processos, seja a partir dos biodigestores, para a geração de energia por meio do gás-metano, ou pela fertilização dos plantios com a vinhaça e a torta de filtro.

De forma geral, as novas soluções e tecnologias possuem um grande potencial de redução das emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEEs) nas atividades agropecuárias e, por conseguinte, nos sistemas agroalimentares, por meio de diferentes mecanismos, seja pela

utilização de novas fontes de produtos, de subprodutos advindos de diferentes processos ou pela integração dos dados obtidos no sistema solo, planta e atmosfera. Segundo Larrea (2024), a partir da incorporação de novas tecnologias, inovações incrementais e disruptivas, o setor poderia se tornar carbono negativo até 2050, estimando um balanço de 3,4 GtCO₂e/ano.

3.5 A política internacional como indutora de políticas ambientais no Brasil

A construção da política ambiental no Brasil tem no contexto internacional um dos principais indutores, precisamente na pressão exercida por organismos multilaterais, redes e transnacionais ambientalistas. A combinação desses elementos foram – em diversos momentos da história brasileira - responsáveis pela incorporação progressiva da temática ambiental à formulação de políticas públicas nacionais.

Embora seja impreciso traçar uma data específica, admite-se que o debate ambiental passou a ganhar atenção da comunidade internacional a partir das décadas de 1930 e 1940, quando surgiram as primeiras discussões em torno dos impactos ambientais do crescimento industrial, sobretudo em razão das externalidades ambientais negativas associadas às altas taxas de crescimento econômico no período pós-Segunda Guerra Mundial.

Em meados das décadas 1960 e 1970, o aumento de episódios de desastres ambientais ampliou o debate sobre o tema e a pressão internacional sobre os países foi intensificada. Casos emblemáticos como de poluição severa como o *smog* tóxico em Donora, Los Angeles, e no Reino Unido, o naufrágio do petroleiro *Torrey Canyon* em 1967 que lançou mais de 100 mil toneladas de óleo no mar e o impressionante incêndio em Cleveland, no poluído rio Cuyahoga, escancararam os limites dos modelos tradicionais de crescimento. Nesse mesmo período, Rachel Carson publicou a obra *Silent Spring* denunciando os efeitos bioacumulativos do dicloro difenil tricloroetano (DDT) sobre a biodiversidade aquática, lançando luz sobre o uso de agroquímicos (BASSO, 2022). Sob esse contexto, o cenário de sensibilização internacional resultou na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano (Estocolmo, 1972) — evento-chave que introduziu a temática ambiental das relações internacionais e influenciou diretamente o Brasil.

Como resposta a esse novo regime normativo ambiental internacional emergente, o Estado brasileiro passou a construir instituições ambientais. Em 1973, foi criada a Secretaria Especial de Meio Ambiente (SEMA), no âmbito do Ministério do Interior, visando atender às novas exigências globais, especialmente aquelas relacionadas ao financiamento internacional. Paralelamente, iniciaram-se os trabalhos do Comitê Especial de Estudos Integrados de Bacias Hidrográficas (CEEIBH), além da formulação de legislações metropolitanas voltadas ao zoneamento industrial e à proteção de mananciais (PECATIELLO, 2011). Integra-se a essa conjuntura, o lançamento do relatório “*Os Limites do Crescimento*” pelo Clube de Roma, em 1972, que contribuiu para reconfigurar o cenário internacional, reforçando o entendimento da finitude dos recursos naturais e da necessidade de governança ambiental multilateral.

Novos e graves incidentes ambientais³ ocorridos nas décadas de 1980 e 1990 fizeram com que as discussões em torno da agenda ambiental passassem a alcançar um tom de segurança internacional. Nesse panorama, o Brasil passou a sofrer pressões diplomáticas mais incisivas. Um marco importante ocorreu em 1989, quando foi criada, no Itamaraty, a Divisão para Assuntos de Ecologia e Direitos Humanos, demonstrando a institucionalização da temática ambiental na política externa brasileira (ZECA, SILVA, 2022). Nesse período, instituições multilaterais como o Banco Mundial (Bird) e o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) passaram a condicionar os desembolsos financeiros à implementação de salvaguardas

³Os acidentes nucleares de Three Mile Island e Chernobyl ocorridos em 1979 e 1986 respectivamente e o derramamento do navio petroleiro Exxon-Valdez em 1989.

ambientais específicas, introduzindo mecanismos de condicionalidade ambiental na política econômica brasileira (ZECA, SILVA, 2022).

O conceito de desenvolvimento sustentável, consolidado no Relatório Brundtland ("Nosso Futuro Comum", 1987), estruturou normativamente a convergência entre as dimensões ambiental, social e econômica e reforçou a atuação da cooperação internacional como indutor de transformação normativa nos países periféricos. Em face disso, o Brasil lançou o Programa Nossa Natureza (1988) e criou o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), em 1989, sinalizando uma progressiva institucionalização da agenda ambiental nas políticas públicas brasileiras (ZECA, SILVA, 2022 ; PECATIELLO, 2011).

Essa trajetória culminou na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio-92), da qual o Brasil foi anfitrião e protagonista, e que consolidou compromissos multilaterais fundamentais. A conferência legitimou a participação das Organizações Não Governamentais (ONGs) nos processos decisórios e produziu marcos jurídicos, a saber: a Declaração do Rio, com 27 princípios orientadores; a Convenção-Quadro sobre Mudança do Clima (UNFCCC); a Convenção sobre Diversidade Biológica (CDB); e a Convenção de Combate à Desertificação, além da criação da Comissão sobre Desenvolvimento Sustentável (CDS) no âmbito do ECOSOC.

A partir dos anos 2000, os compromissos multilaterais assumidos pelo Brasil passaram a ser internalizados em políticas públicas de médio e longo prazo. Destacam-se a formulação do Plano Nacional sobre Mudança do Clima (2008) e a subsequente promulgação da Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei nº 12.187/2009), que incorporaram elementos dos acordos multilaterais e promoveram a criação de instrumentos econômicos como o mercado de carbono, metas de redução de emissões e mecanismos de financiamento climático.

A formulação e implementação de políticas ambientais eficazes dependem de um arcabouço instrumental abrangente, capaz de regular, incentivar e monitorar as interações entre atividades antrópicas e os ecossistemas naturais. Os instrumentos de política ambiental podem ser categorizados em quatro principais tipologias: regulatórios ou de comando e controle (C&C), instrumentos econômicos (IEs), mecanismos de cooperação e acordos voluntários, e instrumentos de informação (Moura, 2016a). Os instrumentos regulatórios, como o licenciamento ambiental e o zoneamento, estabelecem padrões normativos que limitam e orientam a exploração dos recursos naturais.

Em relação aos instrumentos econômicos, estas ferramentas operam com base nos princípios do poluidor-pagador, usuário-pagador e protetor-recebedor, buscando internalizar externalidades ambientais e promover incentivos para o uso sustentável dos recursos. De maneira adicional, os mecanismos de cooperação permitem a negociação entre atores públicos e privados, viabilizando acordos voluntários que otimizam a gestão ambiental. Por fim, os instrumentos de informação, como o Relatório de Qualidade do Meio Ambiente⁴ e os cadastros técnicos federais operam como instrumentos de transparência e de aprimoramento da governança ambiental. A adoção integrada desses instrumentos é fundamental para a promoção do desenvolvimento sustentável e a efetiva internalização dos custos ambientais nas cadeias produtivas (Moura, 2016a).

A Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) estabelece um arcabouço normativo e instrumental para a regulação, monitoramento e mitigação dos impactos ambientais no Brasil. Dentre os principais instrumentos, destacam-se a definição de padrões de qualidade ambiental, o zoneamento ambiental e a avaliação de impactos ambientais, que fornecem a base científica e normativa para a gestão sustentável dos recursos naturais. O licenciamento ambiental garante que atividades potencialmente poluidoras sejam submetidas a critérios técnicos precisos.

⁴ Para mais informações: Acesso ao Relatório de Qualidade do Meio Ambiente (RQMA) no sítio disponível: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/servicos/relatorios/qualidade-ambiental>.

Ademais, incentivos à produção e adoção de tecnologias ambientais atuam como mecanismos necessários para a indução de inovação sustentável. A criação de espaços territoriais protegidos reflete a preocupação com a conservação da biodiversidade, enquanto o Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental e o Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras e/ou Utilizadoras de Recursos Ambientais proporcionam um sistema eficiente de monitoramento e controle. As sanções disciplinares e compensatórias funcionam como mecanismos de *enforcement*, assegurando a conformidade com as normas ambientais. Por fim, instrumentos econômicos, como concessões florestais e seguros ambientais, complementam esse arcabouço ao integrar princípios de economia ambiental à política pública (Brasil, 1981, art. 9º; Moura, 2016a; Moura, 2016b).

De maneira complementar, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), estabelecida pela Lei nº 9.433/1997, emprega predominantemente instrumentos de comando e controle, como os planos de recursos hídricos, o enquadramento dos corpos d'água em classes e a outorga dos direitos de uso da água. Adicionalmente, incorpora instrumentos econômicos, como a cobrança pelo uso dos recursos hídricos, e mecanismos informacionais, exemplificados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

No âmbito da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), prevista na Lei nº 12.305/2010, são utilizados instrumentos de comando e controle, tais como planos de resíduos sólidos e fiscalização ambiental, além de instrumentos informacionais, incluindo inventários anuais e o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (Sinir). É possível enumerar ainda os incentivos fiscais, financeiros e creditícios, que fomentam a adesão do setor produtivo a práticas ambientalmente sustentáveis.

Ao adentrar na perspectiva das medidas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas, a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituída pela Lei nº 12.187/2009, adota um conjunto híbrido de instrumentos, incluindo mecanismos de comando e controle, como o Plano Nacional sobre Mudança do Clima, instrumentos econômicos, como o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima e incentivos fiscais, e dispositivos informacionais, como a Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Paralelamente, é possível citar os instrumentos informacionais, como registros, inventários e avaliações de emissões de gases de efeito estufa que fornecem subsídios essenciais para a formulação de políticas baseadas em evidências científicas.

O Novo Código Florestal (Lei nº 12.651/2012) reforça a estrutura regulatória por meio da proteção de vegetação nativa, das áreas de preservação permanente (APPs) e das reservas legais, enquanto o Cadastro Ambiental Rural (CAR) emerge como um mecanismo que mescla elementos de comando e controle com funções informacionais. Por fim, a utilização de fundos públicos e privados como instrumentos econômicos reflete a crescente internalização dos custos ambientais e o fortalecimento de políticas de incentivo à transição para uma economia de baixo carbono. A convergência de todas as abordagens enumeradas até o momento destaca a necessidade de um arranjo institucional adaptável e que seja capaz de responder de forma eficaz aos desafios ambientais contemporâneos (Moura, 2016a; Moura, 2016b).

Apesar dos avanços observados na construção de aparatos legais e institucionais voltados à proteção ambiental no Brasil, ainda persistem desafios significativos no que tange à efetividade dos mecanismos de governança ambiental. A lacuna entre o desenho normativo e a implementação concreta limita o alcance de políticas de mitigação, especialmente no que se refere à operacionalização de instrumentos econômicos como o mercado de crédito de carbono. No setor do agronegócio, esse desafio é ainda mais evidente: embora haja potencial expressivo para a adoção de práticas de baixo carbono, a falta de incentivos estruturados, métricas confiáveis e marcos regulatórios consolidados dificulta a consolidação de um modelo produtivo que concilie competitividade com sustentabilidade climática.

4. Considerações finais

O Brasil tem uma história, relativamente, longa de incorporação das preocupações ambientais em marcos regulatórios e apresentou papel ativo nos fóruns internacionais, desde que o tema ambiental e, particularmente, o das mudanças climáticas ganhou força. Tem, sobretudo, importância no âmbito da Convenção da Biodiversidade, que pode ser mais fortalecida, tendo em vista seu ativo ambiental em biodiversidade.

A tecnologia tem um papel essencial no contexto da proteção e da recuperação ou mitigação dos recursos que vêm sendo degradados pelos impactos da ação humana. No setor agropecuário, elemento essencial dos sistemas agroalimentares, os desafios de incorporar os marcos regulatórios, e ao mesmo tempo manter produtividade crescente, contribuindo para preços acessíveis de alimentos, são imensos.

A experiência dos avanços tecnológicos na agropecuária, voltados para a mitigação dos impactos ambientais, é essencial e deve continuar a ser estimulada, via políticas de crédito, como já vem sendo feito pelo Estado brasileiro, há anos, mas também com apoio de instrumentos de mercado. Ademais, é preciso fazer com que essa verdadeira revolução tecnológica (Akyazi et al., 2020; Liu et al., 2011; Amani e Sarkidie, 2022; Hüttel et al., 2020; Clapp et al., 2018; Abbate et al., 2023) alcance de forma mais ampla e generalizada todo o setor produtivo. Ou seja, não apenas os produtores que estão mais bem informados, inseridos em cadeias de comercialização mais longas e coordenadas com a indústria e a distribuição, mas também os pequenos e médios produtores, os agricultores familiares e outros grupos de comunidades tradicionais, para que cada qual possa ter acesso às tecnologias poupadoras de recursos naturais e mitigadoras dos impactos. É preciso avançar no desenvolvimento de novas tecnologias que sejam compatíveis com estes diferentes sistemas de produção. A partir de uma abordagem inclusiva, integrada, multiescalar e baseada em inovação é possível promover uma transição justa para uma agricultura resiliente e de baixo carbono, contribuindo de forma efetiva para os compromissos climáticos nacionais e globais.

Referências

ABBATE, Stefano; CENTOBELLI, Piera; CERCHIONE, Roberto. The digital and sustainable transition of the agri-food sector. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 187, 2023, p. 122222. Disponível em: <https://www.elsevier.com/locate/techfore>.

ADEKOYA, M. A. LIU, Z.; VERED, E.; ZHOU, L.; KONG, D.; QIN, J.; MA, R.; YU, X.; LIU, G.; CHEN, L.; LUO, L. Agronomic and ecological evaluation on growing water-saving and drought-resistant rice (*Oryza sativa* L.) through drip irrigation. *Journal of Agricultural Science*, v. 5, n. 6, p. 110–119, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v6n5p110>.

AMANI, M. A.; SARKODIE, S. A. Mitigating spread of contamination in meat supply chain management using deep learning. *Scientific Reports*, v. 12, 5037, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08993-5>.

ASENG, S., EWERT, F., MARTRE, P., RÖTTER, R. P., LOBELL, D. B., CAMMARANO, D. Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, v. 5, n. 2, p. 143–147, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. BC debate avanços e desafios relacionados aos riscos climáticos. Brasília: Banco Central do Brasil, 03 abr. 2024. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/detalhenoticia/794/noticia>. Acesso em: 14 mar. 2025.

BASSO, Larissa. De lateral a transversal: a trajetória das questões ambientais no âmbito da OCDE. Boletim de Economia e Política Internacional, Brasília: Ipea, n. 34, p. 10–25, set./dez. 2022.

BATTEN, Sandra. Climate change and the macro-economy: a critical review. Bank of England Working Paper, n. 706, 2018. Disponível em: <https://www.bankofengland.co.uk/working-paper/2018/climate-change-and-the-macro-economy-a-critical-review>.

BEN-ARI, T. BOÉ, J., CIAIS, P. et al. Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France. Nature Communications, v. 9, art. 1627, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04087-x>.

BOTTON, P. DESPRES, M.; SILVA, L.P.; SAMANA, F. SVARTZMAN, R. The green swan: central banking and financial stability in the age of climate change. 2020.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. Relatórios de Qualidade Ambiental. Brasília: IBAMA. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/servicos/relatorios/qualidade-ambiental>. Acesso em: 5 abr. 2025.

BURKE, Marshall; HSIANG, Solomon M.; MIGUEL, Edward. Global non-linear effect of temperature on economic production. Nature, v. 527, n. 7577, p. 235–239, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature15725>.

CARNEY, Mark. Resolving the climate paradox. Texto da Arthur Burns Memorial Lecture. Berlim, 22 set. 2016. Disponível em: <https://www.bis.org/review/r160926h.pdf>.

CARNEY, Mark. A transition in thinking and action. Discurso apresentado na International Climate Risk Conference for Supervisors, The Netherlands Bank, Amsterdã, 6 abr. 2018. Disponível em: <https://www.bis.org/review/r180420b.pdf>.

CARSON, Rachel. Silent spring. 40th anniversary ed., com introdução de Linda Lear e posfácio de Edward O. Wilson. Boston: Houghton Mifflin Company, 2002.

CHEN, C.; PAN, J.; LAM, S. K. A review of precision fertilization research. Environmental Earth Sciences, v. 71, p. 4073–4080, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2792-2>.

CLAPP, J.; NEWELL, P.; BRENT, Z. W. The global political economy of climate change, agriculture and food systems. The Journal of Peasant Studies, v. 45, n. 1, p. 80–88, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/03066150.2017.1381602>.

CONSELHO DE DIREITOS HUMANOS DA ONU. Climate change and poverty: report of the Special Rapporteur on extreme poverty and human rights. 2019. Disponível em: <https://undocs.org/A/HRC/41/39>. Acesso em: 05 abr. 2025.

EMBRAPA. Descarbonização e circularidade: respostas dos sistemas alimentar e agroindustrial aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Brasília, DF: Embrapa, 2022. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1149409/1/DOC47-final.pdf>. Acesso em: 27 out. 2023.

EMBRAPA. Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira. Brasília, DF: Embrapa, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/10180/9543845/Viso+2030+-+o+futuro+da+agricultura+brasileira/2a9a0f27-0ead-991a-8cbf-af8e89d62829>. Acesso em: 27 out. 2024.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. O estado da segurança alimentar e nutrição no mundo 2024. Roma: FAO, 2024. Disponível em: <https://www.fao.org>. Acesso em: 3 abr. 2025.

FERREIRA FILHO, J. B. de S.; MORAES, G. I. de. Climate change, agriculture and economic effects on different regions of Brazil. *Environment and Development Economics*, v. 20, n. 1, p. 37–56, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1017/s1355770x14000126>.

FERREIRA, Diego; KRETER, Ana Cecília; GARCIA, Pedro Mendes. Impacto das chuvas no setor agropecuário do Rio Grande do Sul: revisão da produção do estado e nova estimativa para o PIB agropecuário brasileiro. *Carta de Conjuntura*, n. 63, Nota de Conjuntura 30, 2º trim. 2024. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, 09 jul. 2024. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/cartadeconjuntura/wpcontent/uploads/2024/07/240709_cc_63_nota_30_precos_e_mercados.pdf. Acesso em: 14 mar. 2025.

FOLEY, Jonathan A. et al. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, v. 478, n. 7369, p. 337–342, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature10452>.

GARNETT, T. Food sustainability: problems, perspectives and solutions. *Proceedings of the Nutrition Society*, v. 72, n. 1, p. 29–39, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0029665112002947>.

GASSEBNER, Martin; KECK, Alexander; TEH, Robert. Shaken, not stirred: the impact of disasters on international trade. *Review of International Economics*, v. 18, n. 2, p. 351–368, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9396.2010.00868.x>.

GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. The entropy law and the economic process. Cambridge: Harvard University Press, 1971.

HALLEGATTE, Stéphane. Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Environmental Change*, v. 19, n. 2, p. 240–247, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.12.003>.

HAMED, R. et al. Impacts of hot-dry compound extremes on US soybean yields. *Earth System Dynamics Discussions*, v. 12, p. 1–26, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5194/esd-2021-24>.

HÜTTEL, S.; LEUCHTEN, M.-T.; LEYER, M. The importance of social norm on adopting sustainable digital fertilisation methods. *Organization & Environment*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1177/1086026620929074>.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. Boletim de Economia e Política Internacional – BEPI. Número 34, set./dez. 2022. Brasília: Ipea, 2022. Tema: O meio ambiente nas relações internacionais do Brasil.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Special report: global warming of 1.5°C. Geneva: World Meteorological Organization, 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Climate change 2022: mitigation of climate change – summary for policymakers. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Climate change 2023: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>.

INTERNATIONAL LABOR ORGANIZATION. World employment and social outlook 2018: greening with jobs. Geneva: International Labour Office, 2018.

INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION. The employment impact of climate change adaptation: input document for the G20 Climate Sustainability Working Group. G20 Argentina, 2018.

INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION. Ensuring safety and health at work in a changing climate: global report. World Day for Safety and Health at Work 2024. Geneva: ILO, 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. Impacto das chuvas no setor agropecuário do Rio Grande do Sul: revisão da produção do estado e nova estimativa para o PIB agropecuário brasileiro. Carta de Conjuntura, n. 63, Nota de Conjuntura 30, 2º trim. 2024. Brasília: IPEA, 09 jul. 2024. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/cartadeconjuntura/wp-content/uploads/2024/07/240709_cc_63_nota_30_precos_e_mercados.pdf. Acesso em: 14 mar. 2025.

LARREA, N. Tecnologia agrícola frente às mudanças climáticas. 2024. Disponível em: <https://www.caf.com/pt/blog/tecnologia-agricola-frente-%C3%A0s-mudan%C3%A7as-climaticas/>. Acesso em: 05 abr. 2025.

LEE, Sanghyun et al. Modeling the impact of measured and projected climate and management systems on agricultural fields: surface runoff, soil moisture, and soil erosion. Journal of Environmental Quality, v. XX, n. XX, p. XX, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/jeq2.20565>. Acesso em: 14 mar. 2025.

LESK, Corey; ROWHANI, Pedram; RAMANKUTTY, Navin. Influence of extreme weather disasters on global crop production. Nature, v. 529, p. 84–87, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature16467>.

LEZOCHÉ, M. et al. Agri-food 4.0: a survey of the supply chains and technologies for the future agriculture. *Computers in Industry*, v. 117, art. 103187, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103187>.

LI, J.; HUANG, L.; ZHANG, J.; COULTER, J. A.; LI, L.; GAN, Y. Diversifying crop rotation improves system robustness. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 39, n. 4, art. 38, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0584-0>.

LIANG, Z.; LIU, X.; XIONG, J.; XIAO, J. Water allocation and integrative management of precision irrigation: a systematic review. *Water*, v. 12, n. 11, p. 3135, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12113135>.

LILA; LEVERMANN, Anders. Understanding the weather signal in national crop-yield variability. *Earth's Future*, v. 5, n. 6, p. 605–616, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016EF000525>.

LOBELL, David B.; FIELD, Christopher B. Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, v. 2, n. 1, p. 014002, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/1/014002>.

LOBELL, David B.; TEBALDI, Claudia. Getting caught with our plants down: the risks of a global crop yield slowdown from climate trends in the next two decades. *Environmental Research Letters*, v. 9, n. 7, p. 074003, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/7/074003>.

MASSON-DELMOTTE, V.; MOUFOUMA-OKIA, W. Climate change and food security: risks and adaptation strategies. In: IPCC. *Special Report on Climate Change and Land*. 2019.

MCTI – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. Emissões de GEE por setor. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/emissoes/emissoes-de-gee-por-setor-1>. Acesso em: 4 abr. 2025.

MONOSOWSKI, E. Políticas ambientais e desenvolvimento no Brasil. São Paulo: Cadernos Fundap, 1989.

MORA, C. et al. Broad threat to humanity from cumulative climate hazards intensified by greenhouse gas emissions. *Nature Climate Change*, v. 8, n. 12, p. 1062–1071, 2018. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41558-018-0315-6>. Acesso em: 05 abr. 2025.

MOURA, A. A trajetória da política ambiental federal no Brasil. In: IPEA. *Governança ambiental no Brasil: instituições, atores e políticas públicas*. Brasília: IPEA, 2016b.

MOURA, A. Aplicação dos instrumentos de política ambiental no Brasil: avanços e desafios. In: IPEA. *Governança ambiental no Brasil: instituições, atores e políticas públicas*. Brasília: IPEA, 2016a.

PIRES, Gabrielle F. et al. Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: implications for land use in Northern Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 228–229, p. 286–298, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.07.005>.

RAY, Deepak K. et al. Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature Communications*, v. 6, art. 5989, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms6989>.

RIPPLE, W. J. et al. World scientists' warning of a climate emergency. *BioScience*, v. 70, n. 1, p. 8–12, 2019. Disponível em: <https://academic.oup.com/bioscience/article/70/1/8/5610806>.

ROSENZWEIG, C. et al. Coordinating AgMIP data and models across global and regional scales for 1.5 °C and 2.0 °C assessments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 376, n. 2119, art. 20160455, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0455>.

SAMIMI, M. et al. Adapting irrigated agriculture in the Middle Rio Grande to a warm-dry future. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 45, art. 101307, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101307>.

SANTOS, C. V.; OLIVEIRA, A. F.; FERREIRA FILHO, J. B. S. Potential impacts of climate change on agriculture and the economy in different regions of Brazil. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 60, n. 1, e220611, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021>.

SINDELAR, A. J. SCHMER, M. R., JIN, V. L., WIENHOLD, B. J., VARVEL, G. E. Long-term corn and soybean response to crop rotation and tillage. *Agronomy Journal*, v. 107, n. 6, p. 2241–2252, 2015. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj15.0085>.

STERN, N.; STIGLITZ, J.; TAYLOR, C. The economics of immense risk, urgent action, and radical change: towards new approaches to the economics of climate change. *Journal of Economic Methodology*, 2022.

VOGEL, Elisabeth et al. The effects of climate extremes on global agricultural yields. *Environmental Research Letters*, v. 14, n. 5, p. 054010, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab154b>.

WANG, T. et al. Farmers' adoption and perceived benefits of diversified crop rotations in the margins of U.S. Corn Belt. *Journal of Environmental Management*, v. 293, 112903, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112903>.

ZAMPIERI, M. et al. Wheat yield loss attributable to heat waves, drought and water excess at the global, national and subnational scales. *Environmental Research Letters*, v. 12, n. 6, p. 064008, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa723b>.

ZECA, Bruna Gorgen; SILVA, André Luiz Reis da. Da resistência à necessária aceitação: a vinculação de temas ambientais nas relações internacionais do Brasil e o papel da Rio-92. *Boletim de Economia e Política Internacional*, Brasília: Ipea, n. 34, p. 36–56, set./dez. 2022.

ZHAO, C. et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 114, n. 35, p. 9326–9331, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>.