

() Graduação (X) Pós-Graduação

TENDÊNCIAS E DESAFIOS NA AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE PROGRAMAS DE ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS: uma revisão sistemática PRISMA

Willian dos Santos Flores
Universidade Federal da Grande Dourados
willian.flores008@academico.ufgd.edu.br

Madalena Maria Schlindwein
Universidade Federal da Grande Dourados
madalenaschlindwein@ufgd.edu.br

Jonathan Gonçalves da Silva
Universidade Federal da Grande Dourados
jonathandasilva@ufgd.edu.br

Roselaine Bonfim de Almeida
Universidade Federal da Grande Dourados
roselainealmeida@ufgd.edu.br

Leandro Vinícios Carvalho
Universidade Federal da Grande Dourados
leandrocarvalho@ufgd.edu.br

RESUMO

Este estudo aborda a avaliação de métodos para adaptação do agronegócio às mudanças climáticas, utilizando uma abordagem exploratória e quantitativa. Por meio de uma revisão sistemática da literatura, foram identificados 77 artigos relevantes, após uma triagem rigorosa. Os principais métodos incluíram modelos de avaliação econômica, climáticos, integrados e de gestão global. Os resultados revelaram um crescimento na produção científica ao longo dos anos, com forte contribuição de países como Reino Unido, EUA e Países Baixos. Temas recorrentes incluíram mitigação de carbono, modelos integrados e impactos regionais. A análise de autores destacou líderes influentes na pesquisa, como Detlef P. van Vuuren e Shinichiro Fujimori. Concluiu-se que, embora haja uma diversidade de métodos e abordagens, há uma necessidade de colaboração interdisciplinar e uma busca por estratégias adaptativas sustentáveis. O estudo enfatiza a importância de atualizações contínuas nos modelos e uma abordagem colaborativa para enfrentar os desafios climáticos no agronegócio.

Palavras-chave: Adaptação climática; Avaliação de impacto; Mudanças climáticas; PRISMA; Políticas climáticas.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam uma das maiores ameaças globais à sustentabilidade ambiental e social. No cenário mundial, fenômenos extremos, aumento das temperaturas médias e mudanças nos padrões de precipitação têm desafiado comunidades e governos a desenvolver estratégias eficazes de adaptação (Nordhaus, 2018; Fujimori *et al.*, 2019).

No contexto brasileiro, a diversidade geográfica e socioeconômica amplifica os impactos das mudanças climáticas, demandando ações específicas em diferentes regiões do país (Bos *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2019; Tejada *et al.*, 2020). O estado do Mato Grosso do Sul, situado na região Centro-Oeste do Brasil, não está imune a tais desafios, sendo necessário compreender e avaliar os métodos disponíveis para medir o impacto de programas de adaptação nesse contexto.

No âmbito das mudanças climáticas, a adaptação assume um papel central na redução de vulnerabilidades (Carlino; Tavoni e Castelletti, 2022). Avaliar o impacto de programas de adaptação torna-se essencial para determinar a eficácia e direcionar esforços futuros (Jennings *et al.*, 2022). Conceitos como "avaliação de impacto", "emissões", "políticas ambientais" e "agricultura" desempenham papéis expressivos na compreensão da complexidade desses programas.

Diante da urgência em lidar com os efeitos das mudanças climáticas, é imperativo compreender a efetividade dos programas de adaptação implementados. A falta de uma análise criteriosa e sistemática dos métodos de avaliação de impacto pode limitar a capacidade de formulação e implementação de políticas eficazes (Daioglou *et al.*, 2019 e Han e Chen, 2022).

O objetivo deste estudo é realizar uma revisão sistemática, seguindo as diretrizes PRISMA, para identificar e analisar os métodos disponíveis de avaliação criteriosa do impacto de programas de adaptação às mudanças climáticas. Para atingir esse propósito, serão mapeadas as principais estratégias de adaptação implementadas, além de avaliar a descrição nos artigos da eficácia dessas estratégias em termos de redução de vulnerabilidades e, por fim, identificar lacunas existentes na literatura.

A busca será conduzida nas bases de dados SCOPUS e Web Of Science, considerando estudos publicados entre 2018 e 2022. A seleção seguiu critérios estritos de inclusão e exclusão,

com foco em estudos que abordassem métodos de avaliação de impacto de programas de adaptação climática e similares.

A relevância desta pesquisa reside na necessidade de fornecer uma visão abrangente e crítica sobre os métodos de avaliação de impacto, contribuindo para a tomada de decisões informadas e eficazes no desenvolvimento e aprimoramento de programas de adaptação às mudanças climáticas, assim como no planejamento de pesquisadores acerca de quais ferramentas estão sendo utilizadas para cada tipo de pesquisa.

O artigo está estruturado em seis seções. Após esta introdução, a segunda seção abordará a revisão de literatura, fornecendo um panorama dos métodos existentes. A terceira seção detalhará os procedimentos metodológicos adotados. As discussões e análises serão apresentadas na quarta seção. A quarta, e última seção, apresentará a conclusão derivada deste estudo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Inicialmente é importante salientar que o conceito do método utilizado para essa revisão sistemática, sendo a metodologia PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) que é um guia de boas práticas para revisões sistemáticas e meta-análises. Desenvolvido para melhorar a transparência e a qualidade dos relatórios, o PRISMA oferece uma estrutura rigorosa para a identificação, seleção, avaliação e síntese de evidências, proporcionando uma abordagem sistemática e confiável (Page *et al.*, 2021).

2.1. MODELOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO EM PROGRAMAS DE ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Para melhor compreensão dos métodos que tem sido utilizado para avaliar o impacto de políticas de adaptação climática, será feita uma categorização agrupando por similaridades em suas abordagens e propósitos. Destaca-se a diversidade de ferramentas disponíveis para avaliação de impacto, desde modelos econômicos até aqueles que incorporam especificidades climáticas, agrícolas e ambientais.

Modelos de Avaliação Econômica são ferramentas essenciais na análise dos impactos financeiros associados a fenômenos específicos, estratégias ou políticas (Ermolieva, *et al.*, 2022; Wesseler, 2022). Esses modelos, amplamente utilizados por economistas, pesquisadores e formuladores de políticas, empregam equações e restrições para representar a dinâmica

econômica, permitindo simulações que avaliam custos, benefícios e eficiência econômica de diferentes estratégias, incluindo programas de adaptação às mudanças climáticas. Um exemplo dos modelos utilizados neste grupo são: equilíbrio geral computável (EGC) (Lofgren; Harris e Robinson, 2002); modelo de avaliação integrada (MAI) (Fischer *et al.*, 2005), Input Output (IO) (Wiedmann, 2009) e Programação Linear (Lafferty, 2009).

Na compreensão das mudanças climáticas, Modelos Climáticos e de Emissões desempenham um papel relevante (National Research Council, 2005). Essas ferramentas modelam padrões climáticos globais e quantificam emissões de gases de efeito estufa. Utilizando equações físicas para simular o comportamento do sistema climático, esses modelos oferecem *insights* valiosos sobre as causas e consequências das mudanças climáticas, sendo fundamentais para a avaliação de estratégias de adaptação. Dentre os modelos deste grupo se tem: Modelo de Circulação Geral (GCM) (Roeckner *et al.*, 2003), Interações e Sinergias entre Gases de Efeito Estufa e Poluição Atmosférica (GAINS) (Amann *et al.*, 2011), Quadro Multimodelo para Avaliação Quantitativa das Mudanças Climáticas (MACC) (Bond *et al.*, 2013) e Modelo Climático Regional (RCM) (Teutschbein e Seibert, 2012).

Para uma compreensão abrangente e holística das mudanças climáticas, Modelos Integrados e de Gestão Global são empregados. Integrando aspectos climáticos, econômicos e sociais, essas ferramentas analisam cenários futuros, considerando variáveis inter-relacionadas. Amplamente utilizados por pesquisadores e analistas de políticas, esses modelos fornecem *insights* críticos para a formulação de estratégias adaptativas eficazes. Nestas categorias, tem-se: *Dynamic Integrated Climate-Economy* (DICE) (Nordhaus, 1992), Modelo de Avaliação de Mudanças Globais (GCAM) (Thomson *et al.*, 2011), Modelo Global de Gestão da Biosfera (GLOBIOM) (Grubler *et al.*, 2020), Modelo Integrado para Avaliar o Meio Ambiente Global (IMAGE) (Stehfest *et al.*, 2014) e Modelo de Avaliação Integrada TIMES (TIAM) (McGlade e Ekins, 2015).

Os Modelos Hidrológicos e Agrícolas desempenham um papel importante na avaliação dos impactos das mudanças climáticas na disponibilidade de água e nas condições agrícolas. Utilizando equações hidrológicas e agrícolas, essas ferramentas permitem simulações que são essenciais para a avaliação de medidas adaptativas relacionadas à gestão hídrica e agrícola, contribuindo significativamente para a segurança alimentar. Aqui estão as Ferramentas de Avaliação de Solo e Água (SWAT) (Gassman *et al.*, 2007) que é um modelo hidrológico, o Sistema Integrado (ou Nexos) de Energia-Água-Terra (EWL) (Wilbanks *et al.*, 2013) e o Estimador Futuro Integrado para Emissões e Dietas (iFEED) (Jennings *et al.*, 2022) que são

modelos utilizados para analisar impactos econômicos e feedbacks interativos em contextos de adaptação como o agrícola.

Explorando diferentes trajetórias socioeconômicas, os Modelos de Cenários e Caminhos Socioeconômicos (MCCS) fornecem uma visão valiosa sobre como fatores como população, urbanização e tecnologia podem influenciar as mudanças climáticas (Riahi *et al.*, 2017). Essas ferramentas, desenvolvendo cenários baseados em diferentes trajetórias de desenvolvimento socioeconômico, oferecem *insights* consideráveis sobre os contextos nos quais estratégias de adaptação devem ser implementadas. Um exemplo é o *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs) que exploram diferentes trajetórias socioeconômicas, permitindo a avaliação de possíveis futuros em termos de alterações climáticas, fornecendo contexto para estratégias adaptativas (Riahi *et al.*, 2017).

Na busca por estratégias sustentáveis, Modelos de Avaliação Ambiental e Sustentabilidade desempenham um papel central. Avaliando os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de produtos, processos ou políticas, essas ferramentas, que empregam análises de ciclo de vida, identificam opções mais sustentáveis e avaliam o desempenho ambiental de estratégias de adaptação, contribuindo para a promoção da sustentabilidade em iniciativas climáticas. Evidentemente que aqui estaria a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e seu desenvolvimento mais recente (Finnveden *et al.*, 2009).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo adotou uma abordagem exploratória e quantitativa para atingir seus objetivos, centrando-se na revisão sistemática da literatura. A pesquisa foi conduzida com base em artigos indexados nas bases de dados Scopus da Elsevier e *Web of Science* do *ISI of Knowledge*, com a busca realizada em 28 de setembro de 2023. A seleção dos estudos considerou a restrição de data de publicação entre 2018 e 2022, priorizando estudos relevantes e de alto impacto.

As palavras-chave utilizadas foram "agr*", "assessment", "climate change", "emission*", e "polic*", aplicadas utilizando o separador AND nos campos título, resumo e/ou palavras-chave. Inicialmente, foram identificados 437 documentos na *Web of Science* e 445 na Scopus, antes da aplicação dos critérios de exclusão.

O protocolo PRISMA foi seguido para garantir rigor metodológico na revisão sistemática, com as seguintes etapas:

- i. Definição clara do escopo da pesquisa, concentrando-se nas metodologias de avaliação da eficácia de políticas de adaptação às mudanças climáticas, com foco no agronegócio;
- ii. Definição dos Critérios de Inclusão e Exclusão: estabelecimento de critérios para identificar os estudos pertinentes, excluindo artigos de conferência, dados bibliométricos, capítulos de livro e apresentação do método e/ou modelo;
- iii. Seleção e Avaliação da Qualidade da Literatura Incluída: avaliação dos estudos quanto à sua relevância e qualidade, considerando apenas os artigos que atenderam às quatro etapas do protocolo PRISMA; e
- iv. Análise, Síntese e Divulgação de Resultados: compilação e análise dos dados extraídos dos estudos selecionados, seguida pela divulgação dos resultados.

Adicionalmente, foi realizada uma revisão bibliométrica utilizando o *software* VOSviewer versão 1.6.18. A segunda fase da análise compreendeu a avaliação da frequência dos artigos ao longo do tempo, áreas de conhecimento, número de publicações por país, instituições e autores.

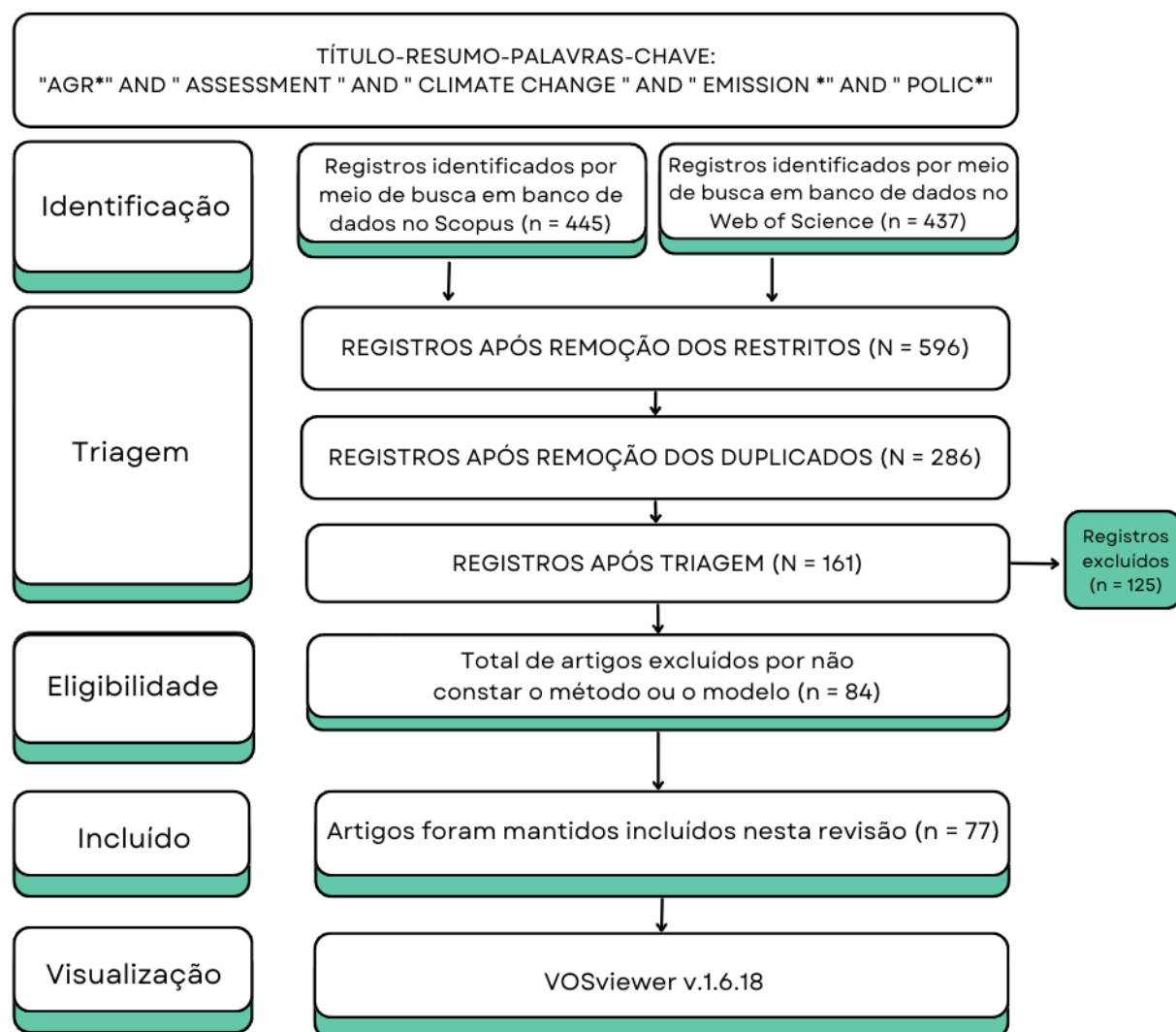
A análise e discussão dos resultados foram conduzidas através de uma abordagem quantitativa, envolvendo uma revisão sistemática dos artigos, leitura aprofundada de cada um deles e extração de fragmentos de interesse. A próxima seção sintetiza o processo de coleta de dados, seleção, inclusão e exclusão de artigos com base nos critérios de elegibilidade.

4 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Inicialmente foram encontrados 882 artigos, sendo 445 na Scopus e 437 na Web of Science quando foram refinados os resultados de 2018 a 2022. Considerando apenas artigos disponíveis para acesso público, o resultado foi reduzido a 596. Após adicionar estes trabalhos em uma planilha foi possível verificar 310 duplicados, reduzindo para 286. Após uma triagem para verificar os que constam no título, resumo e palavras-chave se constam indícios de que estavam sendo avaliados impactos de programas de adaptações climáticas, sendo excluídos outros 125 fora do escopo, reduzindo para 161. E destas, foram elegíveis apenas as que constavam os métodos ou modelos que foram utilizados para essas avaliações, sendo, portanto, 77 totais conforme Figura 1.

Para construir um panorama visual foi utilizado o aplicativo VOSviewer versão 1.6.18, em que se adaptou do PRISMA aglutinando informações para sintetizar o conteúdo.

Figura 1: Fluxograma da revisão sistemática.



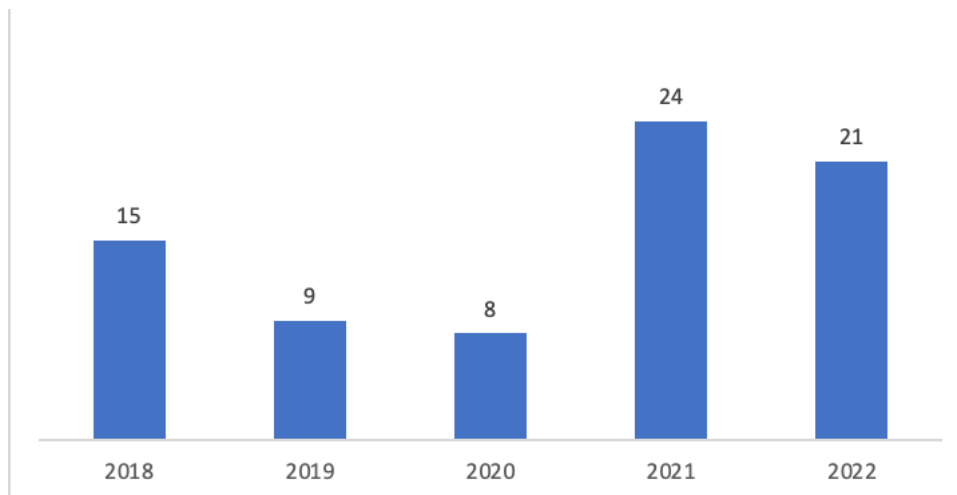
Fonte: Elaborado pelos autores, adaptado do fluxograma PRISMA.

As principais características da linha de pesquisa foram examinadas. Nas próximas figuras serão apresentadas essas características que incluíam a quantidade de artigos de pesquisa publicados, autores, citações, instituições, países, periódicos e palavras-chave. O método de cocitação também foi utilizado para encontrar redes de cooperação para autores, instituições e países. Além disso, foi utilizado um método de coocorrência para análise das palavras-chave, criando uma estrutura conceitual e temática. Os resultados da análise bibliográfica e uma revisão sistemática da literatura permitem identificar os temas de pesquisa mais explorados e suas principais contribuições. Também nos permite definir as principais lacunas na literatura acadêmica.

4.1 EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA

A evolução da produção científica no campo de avaliação de métodos para adaptação às mudanças climáticas no agronegócio apresentou variações ao longo dos anos. A figura 2 abaixo detalha o número de artigos publicados em cada ano.

Figura 2: Características da produção científica de 2018 a 2022.

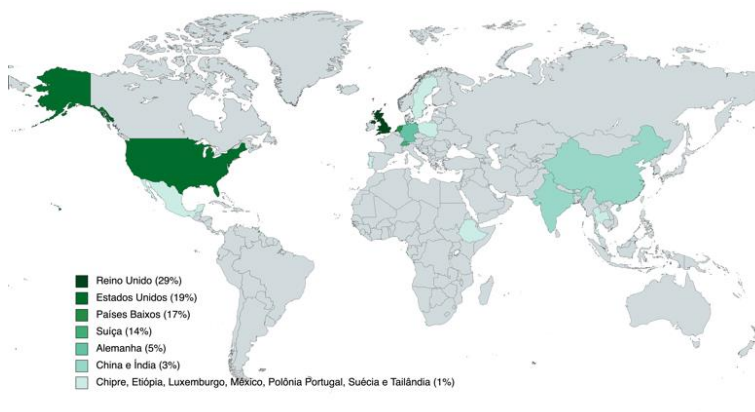


Fonte: elaborado pelos autores.

Os dados indicam uma tendência de crescimento na produção científica, atingindo um pico em 2021. Essa evolução reflete o interesse crescente na avaliação de métodos para adaptação às mudanças climáticas, especialmente no contexto do agronegócio.

Já a distribuição geográfica da produção científica revela a participação de diferentes países no desenvolvimento de estudos sobre métodos de adaptação. A figura 3 abaixo apresenta a porcentagem de contribuição de cada país.

Figura 3: distribuição geográfica da produção científica.



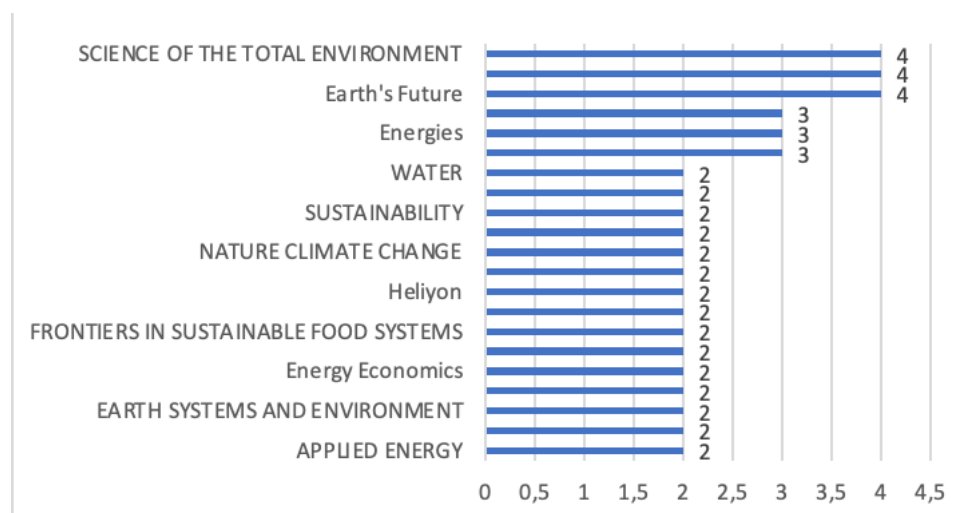
Fonte: elaborado pelos autores com uso do mapchart.

Observa-se uma concentração significativa de produção científica em países como Reino Unido, Estados Unidos e Países Baixos, que, juntos, representam uma parcela substancial do total (65%). Essa distribuição geográfica reflete a diversidade de interesses e abordagens na avaliação de métodos de adaptação, com contribuições significativas de diferentes regiões do globo.

4.2 ANÁLISE DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA

A produção científica sobre métodos de adaptação às mudanças climáticas no agronegócio está distribuída em diversas revistas, cada uma representando um canal importante para a divulgação de pesquisas nesse campo. Abaixo, estão listadas as revistas com o número correspondente de artigos publicados.

Figura 4: ranking de distribuição de artigos por periódico.



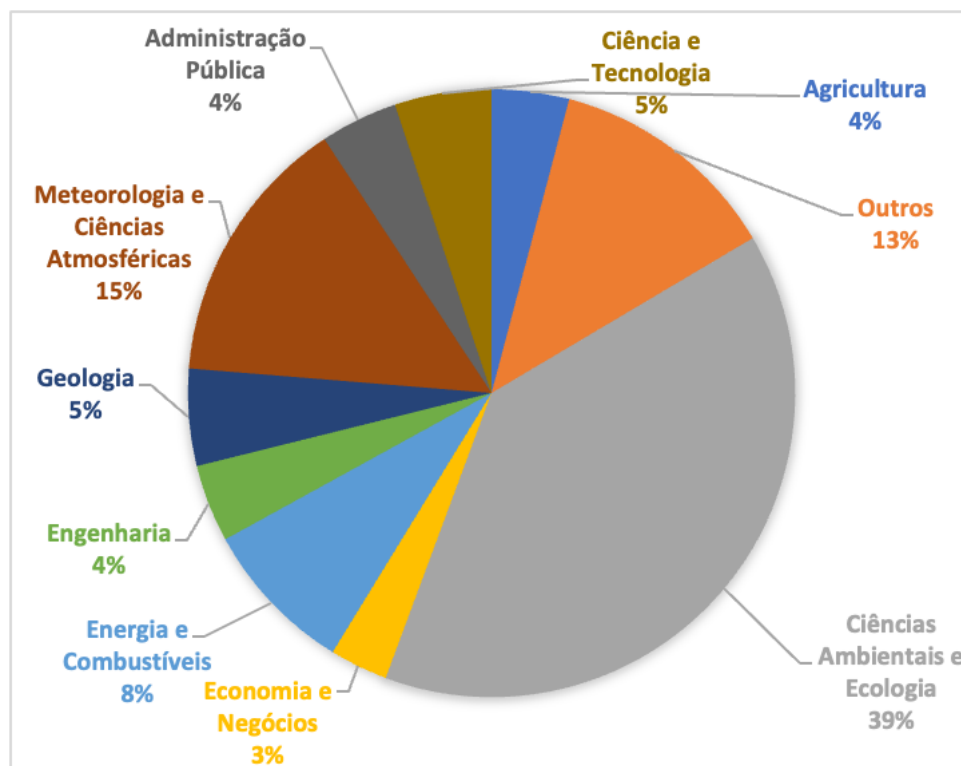
Fonte: elaborado pelos autores.

Essa distribuição reflete a diversidade de fóruns científicos que abordam a temática, indicando um interesse difundido em revistas que englobam tanto as ciências ambientais quanto as políticas climáticas e a sustentabilidade alimentar. A presença de múltiplos artigos em algumas revistas específicas, como "Earth's Future", "Environmental Research Letters" e "Science of the Total Environment", sugere que essas publicações desempenham um papel central na disseminação de pesquisas nesse campo específico. O número de artigos por revista fornece uma visão inicial da relevância e especialização de cada periódico na área de estudo.

4.3 ANÁLISE DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA POR ÁREA

A produção científica sobre métodos de adaptação às mudanças climáticas no agronegócio abrange diversas áreas do conhecimento, refletindo a natureza interdisciplinar da pesquisa nesse campo. Abaixo, estão listadas as áreas temáticas com o número correspondente de artigos publicados.

Figura 5: Distribuição da Produção Científica por Área



Fonte: elaborado pelos autores.

4.4. ANÁLISE DE PALAVRAS-CHAVE

A análise das palavras-chave revela uma variedade de temas e abordagens explorados na produção científica sobre métodos de adaptação às mudanças climáticas no agronegócio. Abaixo estão alguns dos termos mais frequentes e suas associações:

1. Temas Recorrentes:

- a. Mitigação de carbono: "Carbon reduction potential," "Carbon efficiency," "CO2 reduction," "Carbon price," "carbon neutrality."

- b. Modelagem Integrada: "Integrated model," "GENeSYS-MOD," "Integrated modeling," "Model comparison," "Integrated scenarios."
 - c. Energia e Combustíveis: "Energy system," "E-fuel," "Renewable energy," "Energy efficiency," "Battery electric vehicles."
 - d. Avaliação Econômica: "Economic evaluation," "Economic growth," "Economically extended input-output analysis," "CGE model."
 - e. Impactos Regionais: "Southeast USA," "Europe," "Argentina," "MENA (Middle East and North Africa)."
 - f. COVID-19 e Recuperação Econômica: "COVID-19," "Economic recovery," "Stimulus packages," "Scenarios."
2. Modelos e Ferramentas Específicas:
 - a. Modelos: "GENeSYS-MOD," "RICE model," "DICE," "SWAT model," "EXIOBASE," "GTAP (Global Trade Analysis Project)."
 - b. Ferramentas de Avaliação: "Evaluation tool," "Best available database," "Life Cycle Assessment (LCA)," "SWAT tool."
 3. Metodologias e Abordagens:
 - a. "Quasi-experiment," "General equilibrium," "Sectorial mitigation," "Technology interaction," "Integrated scenarios."
 - b. "Agent-based modeling," "Stochastic programming," "Linear programming," "Risk aversion," "Decision-making under deep uncertainty."
 4. Objetivos e Indicadores de Sustentabilidade:
 - a. "Sustainable development goals (SDGs)," "Social cost of carbon," "Nature-based solutions," "Bioenergy," "Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)."
 - b. "Co-benefits," "Air pollution," "Low-carbon pathways," "Health impacts," "Population aging."
 5. Geografia e Regiões Específicas:
 - a. "Paris Agreement," "China," "India," "Mozambique," "Southeast USA," "EURO-CORDEX."
 - b. "MENA (Middle East and North Africa)," "Argentina," "Europe," "Poland," "Sub-Saharan Africa."
 6. Recursos Naturais e Agricultura:

As palavras em azul, que representam a maior quantidade de citações nos textos selecionados, constam em separado, mas podem compor blocos nos textos como é o caso de: *carbon, footprint* ou *mitigation; economic, integrated, model, analysis* e *system* ou *systems* que compõe vários blocos; *land, use* e *land-use; life, cycle* como *life cycle assessment*; e *Paris agreement*. Enfim, são em si palavras-chave, mas podem compor outros conjuntos de palavras-chave.

4.5 ANÁLISE DE AUTORES

Analisando os autores que mais produziram, é possível identificar alguns pesquisadores e grupos de pesquisa que têm contribuído significativamente no campo de mudanças climáticas, sustentabilidade e modelagem integrada. Aqui estão dez dos autores, em ordem decrescente de publicação, que mais se destacaram com base nos resultados encontrados:

- Detlef P. van Vuuren: autor de oito das obras selecionadas e destaca-se como um autor recorrentemente citado, sugerindo uma contribuição substancial em pesquisas sobre cenários de emissões, energia e políticas climáticas, utilizando modelos: IAM, Image, SSP e TERI.
- Shinichiro Fujimori: autor de seis das obras selecionadas e tem várias aparições, indicando uma participação significativa em estudos relacionados a cenários de energia, mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável, utilizando modelos: AIM, CGE, DNE21+, GRACE, IAM, IMACLIM-R, MESSAGEix-GLOBIOM e POLES.
- Jonathan C. Doelman: autor de quatro das obras selecionadas e aparece em várias instâncias, sugerindo uma contribuição consistente em diferentes contextos de pesquisa, utilizando modelos como: IAM, Image 3.0 e SSP.
- Elke Stehfest: autor de três das obras selecionadas e aparece em múltiplas ocasiões, indicando um papel ativo em estudos relacionados à eficiência de carbono e modelagem integrada, utilizando modelos: IAM, Image 3.0 e SSP.
- Krey Volker: autor de três das obras selecionadas e aparece em algumas ocasiões em trabalhos voltadas à redução do carbono na energia, utilizando modelos: IAM, IMAGE e GLOBIOM
- Hans van Meijl e Andrzej Tabeau: autores de três das obras selecionadas e aparecem em outras, contribuindo em diferentes contextos com ferramentas como IAM, Image 3.0 e SSP.

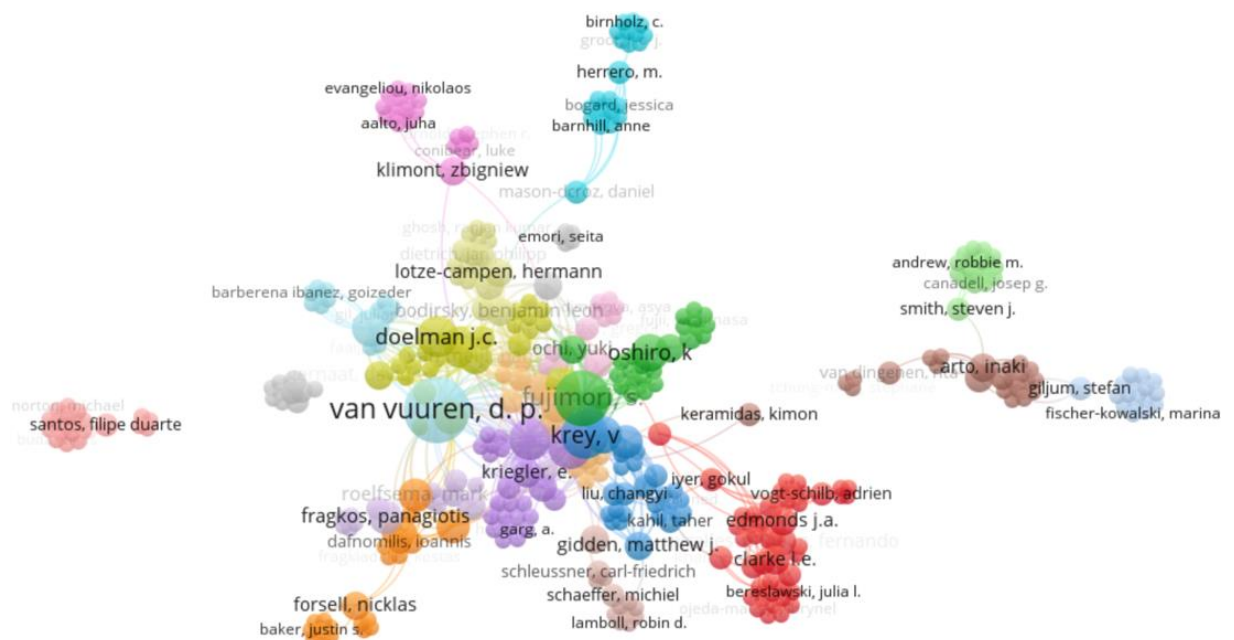
- Hermann Lotze-Campen, Petr Havlik e Keywan: autor de duas das obras selecionadas e aparece em mais obras, utilizando mais IAM e SSP.

E, somente nesses autores e coautores, já é possível identificar a maioria dos modelos utilizados para avaliar, ainda que tangencialmente, programas de adaptação às mudanças climáticas.

Esses autores provavelmente desempenham papéis influentes e lideram pesquisas em áreas específicas de mudanças climáticas e sustentabilidade. Suas contribuições repetidas indicam um compromisso contínuo com a pesquisa e desenvolvimento de soluções para os desafios ambientais globais.

Na figura 7 é possível perceber que eles estão destacados no centro das redes encontradas nas ligações identificadas pelo VOSviewer utilizando os dados exportados da pesquisa antes mesmo da seleção dos trabalhos, selecionando a interface de coautoria com mínimo de 1 documento e seus 393 autores:

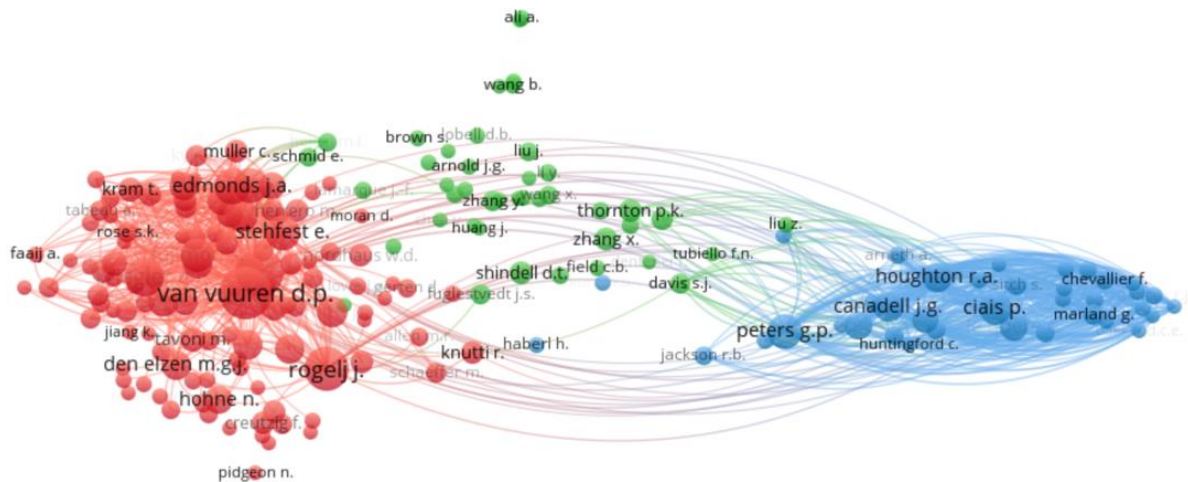
Figura 7: distribuição de autores, redes e conexões antes dos critérios de exclusão na base WoS.



Fonte: elaborado pelos autores.

Já na figura 8 são apresentados os autores mais citados, no mínimo 20 citações por autor, sendo 192 autores e coautores.

Figura 8: distribuição de autores, redes e conexões antes dos critérios de exclusão na base Scopus.



Fonte: elabora pelos autores.

Nessa figura é possível perceber que existe uma ligação forte com autores como Edmonds, não visto anteriormente, porém repetindo Stehfest e Van Vuuren, ou seja, reforçando que são relevantes nesse resultado de pesquisa.

4.6 PRINCIPAIS ACHADOS

Nesta seção, apresentamos os principais achados derivados de uma análise abrangente sobre métodos utilizados na literatura para avaliar os efeitos de ações voltadas à adaptação às mudanças climáticas. A tabela abaixo (Quadro 1) destaca os modelos mais proeminentes, seus objetivos, resultados obtidos, conclusões, lacunas identificadas e os autores associados.

Quadro 1: os principais métodos utilizados na literatura encontrada.

Modelo - Tradução	Objetivo	Resultados	Conclusões	Lacunas	Autores
Computable General Equilibrium (CGE) - Equilíbrio Geral Computável (EGC)	Modelar a interação entre economia, energia e emissões	Projeções econômicas, emissões e uso de energia sob diferentes cenários	Subsídios para políticas de mitigação e adaptação	Simplificações na representação de comportamentos, incertezas nos parâmetros	ABUDU; WESSEH e LIN, 2022; CLORA <i>et al.</i> , 2021; ELISONDO <i>et al.</i> , 2020; OSHIRO e FUJIMORI, 2022; PEÑA-LÉVANO; TAHERIPOUR e TYNER, 2019; PRADHAN e GHOSH, 2021; SUGIYAMA <i>et al.</i> , 2019; WAŞ <i>et al.</i> , 2021.
Integrated assessment models (IAM) - Modelos de avaliação integrada	Modelar a interação entre economia, energia e emissões	Projeções econômicas, emissões e uso de energia sob diferentes cenários	Subsídios para políticas de mitigação e adaptação	Simplificações na representação de comportamentos, incertezas nos parâmetros	CUI <i>et al.</i> , 2022; WILLNER; GLANEMANN e LEVERMANN, 2021; HASEGAWA <i>et al.</i> , 2018; LUDERER <i>et al.</i> , 2018; RAFAJ <i>et al.</i> , 2021; SHIRAKI e SUGIYAMA, 2020; TAMAKI; NOZAWA e MANAGI, 2019; WEI <i>et al.</i> , 2018.
IMAGE integrated assessment model framework - Estrutura do modelo de avaliação integrada IMAGE	Modelar o uso da terra global, emissões e impactos das mudanças climáticas	Projeções de uso da terra, emissões e impactos ambientais	Informações para políticas de conservação e mitigação	Incertezas nos modelos de uso da terra e nas projeções climáticas	DAIOGLOU <i>et al.</i> , 2019; DOELMAN <i>et al.</i> , 2018; DOELMAN <i>et al.</i> , 2020; MÜLLER-CASSERES <i>et al.</i> , 2021; RAFAJ <i>et al.</i> , 2021; ROCHEDO <i>et al.</i> , 2021; ROELFSEMA <i>et al.</i> , 2018; ROELFSEMA <i>et al.</i> , 2022.
Life Cycle Assessment (LCA) - Análise de Ciclo de Vida (ACV)	Avaliar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de produtos e serviços	Estimativas quantitativas dos impactos ambientais, como pegada de carbono, consumo de água	Fornecer informações para tomada de decisões mais sustentáveis em processos produtivos	Dependência de dados precisos, limitações na incorporação de todos os impactos relevantes	DI FULVIO <i>et al.</i> , 2019; GUO <i>et al.</i> , 2022; MARVUGLIA <i>et al.</i> , 2022; MORFELDT <i>et al.</i> , 2022; SHARMA; HUMPHREYS e HOLDEN, 2018; SOMÉ <i>et al.</i> , 2018; WEDDING <i>et al.</i> , 2021; WEIK <i>et al.</i> , 2022.
Soil and Water Assessment Tool (SWAT) - Ferramenta de Avaliação de Solo e Água	Integrar dados de sensoriamento remoto, índice de vegetação e modelagem hidrológica	Avaliar mudanças no uso da terra e impactos na hidrologia	Informações para gestão sustentável de recursos naturais	Limitações na resolução espacial e temporal pela complexidade do modelo pode causar incertezas nos resultados e na sua interpretação.	AHMAD <i>et al.</i> , 2022; JANTA <i>et al.</i> , 2022; MASUD <i>et al.</i> , 2019; MEHAN <i>et al.</i> , 2019; MFWANGO; AYENEW e MAHOO, 2022.

Fonte: elaborado pelos autores.

Além dos métodos mencionados no quadro 1 é importante destacar o papel significativo do modelo global de avaliação integrada denominado TIAM, que nos trabalhos encontrados buscou avaliar tecnologias de captura e armazenamento de carbono, custos, eficiência e impactos ambientais associados à captura de CO₂. Contribui com informações para o desenvolvimento de políticas de mitigação e possui como desafios técnicos, custos elevados e incertezas na capacidade de expansão ou adaptação conforme necessário (Butnar *et al.*, 2020; Dalla Longa *et al.*, 2022; Karatay e Meyer-Aurich, 2018; Kypreos *et al.*, 2018 e Nogueira; Longa e Van der Zwaan, 2020).

Esses achados fornecem uma visão abrangente dos métodos utilizados na literatura para analisar os impactos das ações de adaptação às mudanças climáticas, destacando tanto suas contribuições quanto suas limitações. Essa compreensão é essencial para orientar futuras pesquisas e aprimorar as estratégias de adaptação.

5 CONCLUSÕES

A revisão sistemática realizada, conforme as diretrizes PRISMA, proporcionou uma visão abrangente sobre os métodos utilizados na avaliação do impacto de programas de adaptação às mudanças climáticas, especialmente no contexto do agronegócio. Os resultados destacam a diversidade e complexidade das abordagens, refletindo a interdisciplinaridade necessária para compreender as dimensões econômicas, sociais e ambientais envolvidas.

Um dos principais achados foi a identificação de diferentes modelos de avaliação, cada um com objetivos específicos. Os Modelos de Avaliação Econômica (MAE) destacam-se na análise dos impactos financeiros associados a estratégias de adaptação, proporcionando *insights* sobre custos, benefícios e eficiência econômica (Ostberg *et al.*, 2018). Por outro lado, os Modelos Climáticos e de Emissões (MCE) desempenham um papel relevante na compreensão dos padrões climáticos globais e na quantificação das emissões de gases de efeito estufa (Kuenen *et al.*, 2021).

Os modelos integrados e de gestão global como o IAM, IMAGE e TIAM foram identificados como ferramentas essenciais para analisar cenários futuros, considerando variáveis inter-relacionadas nas dimensões climáticas, econômicas e sociais. Essa abordagem holística destaca a importância de considerar múltiplos fatores na formulação de estratégias adaptativas eficazes.

Além disso, os modelos hidrológicos e agrícolas como o SWAT foram reconhecidos por seu papel fundamental na avaliação dos impactos das mudanças climáticas na disponibilidade

de água e nas condições agrícolas. A busca por estratégias sustentáveis foi enfatizada pelos Modelos de Avaliação Ambiental e Sustentabilidade que contribuem para a identificação de opções mais sustentáveis e o desempenho ambiental de estratégias de adaptação.

A análise da produção científica revelou uma tendência de crescimento na produção de artigos ao longo dos anos, atingindo um pico em 2021. A distribuição geográfica destacou a participação significativa de países como Reino Unido, Estados Unidos e Países Baixos, indicando um interesse global na avaliação de métodos de adaptação.

A análise bibliométrica e a revisão sistemática permitiram a identificação de temas recorrentes na pesquisa, como mitigação de carbono, modelos integrados, energia e combustíveis, avaliação econômica, impactos regionais, COVID-19 e recuperação econômica, entre outros. Esses temas refletem a amplitude de preocupações e abordagens na literatura, indicando a necessidade de considerar uma variedade de aspectos na avaliação de programas de adaptação.

A análise de palavras-chave e a nuvem de palavras revelaram a complexidade dos tópicos explorados, destacando termos como mitigação das mudanças climáticas, modelagem integrada, desenvolvimento econômico sustentável, eficiência de carbono e questões regionais específicas. Essa diversidade de temas sublinha a necessidade de uma abordagem interdisciplinar na pesquisa sobre adaptação climática no contexto do agronegócio.

A análise de autores revelou pesquisadores e grupos de pesquisa que contribuíram significativamente para o campo de mudanças climáticas, sustentabilidade e modelagem integrada. Destacaram-se autores como Detlef P. van Vuuren, Shinichiro Fujimori e Jonathan C. Doelman, indicando sua influência e liderança em pesquisas relacionadas a cenários de emissões, energia e políticas climáticas.

No que diz respeito aos métodos específicos identificados na literatura revisada, como Computable General Equilibrium (CGE), Modelos de Avaliação Integrada (IAM), Estrutura do Modelo de Avaliação Integrada IMAGE, Análise de Ciclo de Vida (LCA) e a Ferramenta de Avaliação de Solo e Água (SWAT), cada um apresenta vantagens e limitações. Por exemplo, os modelos CGE e IAM oferecem projeções econômicas e de emissões, mas podem simplificar o comportamento humano. A ACV fornece uma avaliação abrangente dos impactos ambientais, mas depende de dados precisos. A SWAT integra dados de sensoriamento remoto e modelagem hidrológica para avaliar mudanças no uso da terra, mas enfrenta limitações na resolução espacial.

A tabela de métodos destaca a necessidade contínua de aprimorar e adaptar abordagens existentes, levando em consideração as complexidades dinâmicas das mudanças climáticas e do agronegócio. A seleção apropriada de métodos dependerá dos objetivos específicos de cada estudo, bem como da disponibilidade de dados e recursos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ABUDU, H.; WESSEH JR, P. K.; LIN, B. Climate pledges versus commitment: Are policy actions of Middle-East and North African countries consistent with their emissions targets?. **Advances in Climate Change Research**, v. 13, n. 4, p. 612-621, 2022.
- AHMAD, F.; TALUKDAR, N. R.; GOPARAJU, L.; BIRADAR, C.; DHYANI, S. K.; RIZVI, J. GIS-Based assessment of land-agroforestry potentiality of Jharkhand State, India. **Regional Sustainability**, v. 3, n. 3, p. 254-268, 2022.
- BUTNAR, I.; BROAD, O.; SOLANO RODRIGUEZ, B.; DODDS, P. E. The role of bioenergy for global deep decarbonization: CO2 removal or low-carbon energy?. **GCB Bioenergy**, v. 12, n. 3, p. 198-212, 2020.
- CLORA, F.; YU, W.; BAUDRY, G.; COSTA, L. Impacts of supply-side climate change mitigation practices and trade policy regimes under dietary transition: the case of European agriculture. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 12, p. 124048, 2021.
- CUI, R. Y.; WALDHOFF, S.; CLARKE, L.; HULTMAN, N.; PATWARDHAN, A.; GILMORE, E. A. Evaluating the regional risks to food availability and access from land-based climate policies in an integrated assessment model. **Environment Systems and Decisions**, v. 42, n. 4, p. 547-555, 2022.
- DAIOGLOU, V.; DOELMAN, J. C.; WICKE, B.; FAAIJ, A.; VAN VUUREN, D. P. Integrated assessment of biomass supply and demand in climate change mitigation scenarios. **Global Environmental Change**, v. 54, p. 88-101, 2019.
- DALLA LONGA, F.; FRAGKOS, P.; NOGUEIRA, L. P.; VAN DER ZWAAN, B. System-level effects of increased energy efficiency in global low-carbon scenarios: A model comparison. **Computers & Industrial Engineering**, v. 167, p. 108029, 2022.
- DI FULVIO, F.; FORSELL, N.; KOROSUO, A.; OBERSTEINER, M.; HELLWEG, S. Spatially explicit LCA analysis of biodiversity losses due to different bioenergy policies in the European Union. **Science of the total environment**, v. 651, p. 1505-1516, 2019.
- DOELMAN, J. C.; STEHFEST, E.; VAN VUUREN, D. P.; TABEAU, A.; HOF, A. F.; BRAAKHEKKE, M. C.; GERNAAT, D. E. H. J.; VAN DEN BERG, M.; VAN ZEIST, W. J.; DAIIOGLOU, V.; VAN MEIJL, H.; LUCAS, P. L. Afforestation for climate change mitigation: Potentials, risks and trade-offs. **Global Change Biology**, v. 26, n. 3, p. 1576-1591, 2020.
- DOELMAN, J. C.; STEHFEST, E.; TABEAU, A.; VAN MEIJL, H.; LASSALETTA, L.; GERNAAT, D. E. H. J.; HERMANS, K.; HARMSSEN, M.; DAIIOGLOU, V.; BIEMANS, H.; VAN DER SLUIS, S.; VAN VUUREN, D. P. Exploring SSP land-use dynamics using the IMAGE model: Regional and gridded scenarios of land-use change and land-based climate change mitigation. **Global Environmental Change**, v. 48, p. 119-135, 2018.

- ELIZONDO, A.; IBARRARÁN, M.E.; BOYD, R. Mitigation measures of greenhouse gases adopted in the farming sector: economic assessment and impact in Mexico. **Agricultura Sociedad y Desarrollo**, v. 17, p. 513-532, 2020.
- GUO, C.; BAI, Z.; WANG, X.; ZHANG, W.; CHEN, X.; LAKSHMANAN, P.; MA, L.; LU, J.; LIU, B.; SHI, X.; CHEN, X. Spatio-temporal assessment of greenhouse gas emission from rapeseed production in China by coupling nutrient flows model with LCA approach. **Food and Energy Security**, v. 11, n. 3, p. e398, 2022.
- HASEGAWA, T.; FUJIMORI, S.; HAVLÍK, P.; VALIN, H.; BODIRSKY, B. L.; DOELMAN, J. C.; FELLMANN, T.; KYLE, P.; KOOPMAN, J. F. L.; LOTZE-CAMPEN, H.; MASON-D'CROZ, D.; OCHI, Y.; PÉREZ-DOMÍNGUEZ, I.; STEHFEST, E.; SULSER, T. B.; TABEAU, A.; TAKAHASHI, K.; TAKAKURA, J.; VAN MEIJL, H.; VAN ZEIST, W.J.; WIEBE, K.; WITZKE, P. Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy. **Nature climate change**, v. 8, n. 8, p. 699-703, 2018.
- JANTA, R.; KHWANCHUM, L.; DITTHAKIT, P.; AL-ANSARI, N.; NGUYỄN, T. T. L. Water Yield Alteration in Thailand's Pak Phanang Basin Due to Impacts of Climate and Land-Use Changes. **Sustainability**, v. 14, n. 15, p. 9106, 2022.
- KARATAY, Y. N.; MEYER-AURICH, A. A model approach for yield-zone-specific cost estimation of greenhouse gas mitigation by nitrogen fertilizer reduction. **Sustainability**, v. 10, n. 3, p. 710, 2018.
- KUENEN, J.; DELLAERT, S.; VISSCHEDIJK, A.; JALKANEN, J. P.; SUPER, I.; DENIER VAN DER GON, H. CAMS-REG-v4: A state-of-the-art high-resolution European emission inventory for air quality modelling. **Earth System Science Data Discussions**, v. 2021, p. 1-37, 2021.
- KYPREOS, S.; GLYNN, J.; PANOS, E.; GIANNAKIDIS, G.; GALLACHÓIR, B. O. Efficient and equitable climate change policies. **Systems**, v. 6, n. 2, p. 10, 2018.
- LUDERER, G.; VRONTISI, Z.; BERTRAM, C.; EDELENBOSCH, O. Y.; PIETZCKER, R. C.; ROGELJ, J.; DE BOER, H. S.; DROUET, L.; EMMERLING, J.; FRICKO, O.; FUJIMORI, S.; HAVLÍK, P.; IYER, G.; KERAMIDAS, K.; KITOUS, A.; PEHL, M.; KREY, V.; RIAHI, K.; SAVEYN, B.; TAVONI, M.; VAN VUUREN, D.P.; KRIEGLER, E. Residual fossil CO₂ emissions in 1.5–2 C pathways. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 7, p. 626-633, 2018.
- MARVUGLIA, A.; BAYRAM, A.; BAUSTERT, P.; GUTIÉRREZ, T. N.; IGOS, E. Agent-based modelling to simulate farmers' sustainable decisions: Farmers' interaction and resulting green consciousness evolution. **Journal of Cleaner Production**, v. 332, p. 129847, 2022.
- MASUD, M. B.; WADA, Y.; GOSS, G.; FARAMARZI, M. Global implications of regional grain production through virtual water trade. **Science of the Total Environment**, v. 659, p. 807-820, 2019.
- MEHAN, S.; AGGARWAL, R.; GITAU, M. W.; FLANAGAN, D. C.; WALLACE, C. W.; FRANKENBERGER, J. R. Assessment of hydrology and nutrient losses in a changing climate in a subsurface-drained watershed. **Science of the Total Environment**, v. 688, p. 1236-1251, 2019.
- MFWANGO, L. H.; AYENEW, T.; MAHOO, H. F. Impacts of climate and land use/cover changes on streamflow at Kibungo sub-catchment, Tanzania. **Heliyon**, v. 8, n. 11, 2022.
- MORFELDT, J.; SHOMAN, W.; JOHANSSON, D. J.; YEH, S.; KARLSSON, S. If Electric Cars Are Good for Reducing Emissions, They Could Be Even Better with Electric Roads. **Environmental Science & Technology**, v. 56, n. 13, p. 9593-9603, 2022.
- MÜLLER-CASSERES, E.; EDELENBOSCH, O. Y.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R.; VAN VUUREN, D. P. Global futures of trade impacting the challenge to decarbonize the international shipping sector. **Energy**, v. 237, p. 121547, 2021.

- NOGUEIRA, L. P.; DALLA LONGA, F.; VAN DER ZWAAN, B. A cross-sectoral integrated assessment of alternatives for climate mitigation in Madagascar. **Climate Policy**, v. 20, n. 10, p. 1257-1273, 2020.
- OSHIRO, K.; FUJIMORI, S. Role of hydrogen-based energy carriers as an alternative option to reduce residual emissions associated with mid-century decarbonization goals. **Applied Energy**, v. 313, p. 118803, 2022.
- OSTBERG, S.; SCHEWE, J.; CHILDERS, K.; FRIELER, K. Changes in crop yields and their variability at different levels of global warming. **Earth System Dynamics**, v. 9, n. 2, p. 479-496, 2018.
- PEÑA-LÉVANO, L. M.; TAHERIPOUR, F.; TYNER, W. E. Climate change interactions with agriculture, forestry sequestration, and food security. **Environmental and Resource Economics**, v. 74, p. 653-675, 2019.
- PRADHAN, B. K.; GHOSH, J. COVID-19 and the Paris Agreement target: A CGE analysis of alternative economic recovery scenarios for India. **Energy Economics**, v. 103, p. 105539, 2021.
- RAFAJ, P.; KIESEWETTER, G.; KREY, V.; SCHOEPP, W.; BERTRAM, C.; DROUET, L.; FRICKO, O.; FUJIMORI, S.; HARMSSEN, M.; HILAIRE, J. Air quality and health implications of 1.5° C–2° C climate pathways under considerations of ageing population: a multi-model scenario analysis. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 4, p. 045005, 2021.
- RIAHI, K.; VAN VUREEN, D. P.; KRIEGLER, E.; EDMONDS, J.; O'NEILL, B. C.; FUJIMORI, S.; BAUER, N.; CALVIN, K.; DELLINK, R.; FRICKO, O.; LUTZ, W.; POPP, A.; CUARESMA, J. C.; SAMIR, K.C.; LEIMBACH, M.; JIANG, L.; KRAM, T.; RAO, S.; EMMERLING, J.; EBI, K.; TAVONI, M. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change*, v. 42, p. 153-168, 2017.
- ROCHEDO, P. R.; FRAGKOS, P.; GARAFFA, R.; COUTO, L. C.; BAPTISTA, L. B.; CUNHA, B. S. L.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. Is green recovery enough? Analysing the impacts of post-COVID-19 economic packages. **Energies**, v. 14, n. 17, p. 5567, 2021.
- ROELFSEMA, M.; VAN SOEST, H. L.; DEN ELZEN, M.; DE CONINCK, H.; KURAMOCHI, T.; HARMSSEN, M.; DAFNOMILIS, I.; HÖHNE, N.; VAN VUUREN, D. P. Developing scenarios in the context of the Paris Agreement and application in the integrated assessment model IMAGE: a framework for bridging the policy-modelling divide. **Environmental Science & Policy**, v. 135, p. 104-116, 2022.
- SHARMA, P.; HUMPHREYS, J.; HOLDEN, N. M. The environmental impact of dairy production on poorly drained soils under future climate scenarios for Ireland. **Journal of environmental management**, v. 223, p. 625-632, 2018.
- SHIRAKI, H.; SUGIYAMA, M. Back to the basic: toward improvement of technoeconomic representation in integrated assessment models. **Climatic Change**, v. 162, n. 1, p. 13-24, 2020.
- SOMÉ, A.; DANDRES, T.; GAUDREAU, C.; MAJEAU-BETTEZ, G.; WOOD, R.; SAMSON, R. Coupling Input-Output Tables with Macro-Life Cycle Assessment to Assess Worldwide Impacts of Biofuels Transport Policies. **Journal of Industrial Ecology**, v. 22, n. 4, p. 643-655, 2018.
- SUGIYAMA, M.; FUJIMORI, S.; WADA, K.; ENDO, S.; FUJII, Y.; KOMIYAMA, R.; KATO, E.; KUROSAWA, A.; MATSUO, Y.; OSHIRO, K.; SANO, F.; SHIRAKI, H. Japan's long-term climate mitigation policy: multi-model assessment and sectoral challenges. **Energy**, v. 167, p. 1120-1131, 2019.
- TAMAKI, T.; NOZAWA, W.; MANAGI, S. Controlling CO₂ emissions for each area in a region: The case of Japan. *Carbon balance and management*, v. 14, p. 1-13, 2019.

- WAŚ, A.; KRUPIN, V.; KOBUS, P.; WITAJEWSKI-BALTVILKS, J.; JESZKE, R.; SZCZEPAŃSKI, K.. Towards climate neutrality in Poland by 2050: Assessment of policy implications in the farm sector. **Energies**, v. 14, n. 22, p. 7595, 2021.
- WEDDING, L. M.; MORITSCH, M.; VERUTES, G.; ARKEMA, K.; HARTGE, E.; REIBLICH, J.; DOUGLASS, J.; TAYLOR, S.; STRONG, A. L. Incorporating blue carbon sequestration benefits into sub-national climate policies. **Global Environmental Change**, v. 69, p. 102206, 2021.
- WEI, Y. M.; HAN, R.; LIANG, Q. M.; YU, B. Y.; YAO, Y. F.; XUE, M. M.; KUN, Z.; LIU, L.J.; PENG, J.; YANG, P.; MI, Z.F.; DU, Y.F.; WANG, C.; CHANG, J.J.; YANG, Q.R.; YANG, Z.; SHI, X.; XIE, W.; LIU, C.; MA, Z.; TAN, J.; WANG, W.; TANG, B.J.; CAO, Y.F.; WANG, M.; WANG, J.W.; KANG, J.N.; WANG, K.; LIAO, H. An integrated assessment of INDCs under Shared Socioeconomic Pathways: an implementation of C 3 IAM. **Natural Hazards**, v. 92, p. 585-618, 2018.
- WEIK, J.; LASK, J.; PETIG, E.; SEEGER, S.; VIDAURRE, N. M.; WAGNER, M.; WEILER, M.; BAHRS, E.; LEWANDOWSKI, I.; ANGENENDT, E. Implications of large-scale miscanthus cultivation in water protection areas: A Life Cycle Assessment with model coupling for improved policy support. **GCB Bioenergy**, v. 14, n. 11, p. 1162-1182, 2022.
- WILLNER, S. N.; GLANEMANN, N.; LEVERMANN, A. Investment incentive reduced by climate damages can be restored by optimal policy. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 3245, 2021.