



O PAPEL DO MODELO E3ME NA GESTÃO SUSTENTÁVEL DO NEXO ÁGUA-ENERGIA-ALIMENTOS: ANÁLISE DE POLÍTICAS E IMPACTOS ECONÔMICOS

Izabella de Faveri Lemos¹
Pedro Queiroz Campos²
Anny Key de Souza Mendonça³
Lídia Tiggemann Prando⁴
Antônio Cezar Bornia⁵

Resumo

A crescente pressão sobre os recursos naturais devido à demanda por água, energia e alimentos exige abordagens integradas para assegurar a sustentabilidade. O conceito de Nexo Água-Energia-Alimentos (WEF, na sigla em inglês) oferece uma perspectiva estratégica para compreender as interconexões entre esses recursos e formular políticas eficazes. Este estudo investiga o papel do modelo E3ME (*Energy-Environment-Economy Macro-Econometric model*) na gestão sustentável do WEF, comparando-o com outras ferramentas de modelagem como CAPRI, IMAGE e MAGNET. O E3ME se destaca por sua abordagem macroeconômica integrada, permitindo simular os impactos de políticas energéticas sobre a economia e o meio ambiente. Analisando cenários de políticas até 2030, o estudo revela variações significativas nas emissões de CO₂, crescimento econômico e emprego entre diferentes regiões. Os resultados demonstram a eficácia do E3ME em capturar os impactos diretos e indiretos das políticas energéticas, oferecendo insights valiosos para a formulação de estratégias que promovam a sustentabilidade global.

Palavras-chave: Nexo Água-Energia-Alimentos; E3ME; Simulações de Políticas; Impactos Econômicos e Ambientais.

¹ Aluna do Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Catarina, bellaflemos@gmail.com.

² Aluno do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Santa Catarina, pedroqueiroz.ufsc@gmail.com.

³ Dra. Universidade Federal de Santa Catarina, departamento de Engenharia de Produção, annykeysmendonca@gmail.com.

³ Dra. Universidade Federal de Santa Catarina, departamento de Engenharia de Alimentos, liditiggemann@gmail.com.

⁴ Prof. Dr. Universidade Federal de Santa Catarina, departamento de Engenharia de Produção, cezar.bornia@gmail.com.



INTRODUÇÃO

A crescente demanda por água, energia e alimentos coloca uma pressão significativa sobre os recursos naturais globais, criando desafios complexos para a sustentabilidade. Projeções da Embrapa (2018) indicam que, até 2030, o consumo de água deverá aumentar em 50%, o de energia em 40% e a produção agrícola precisará crescer em 35%. Diante desse cenário, a interdependência entre esses três recursos torna-se fundamental para a formulação de políticas eficazes e sustentáveis.

O conceito de Nexo Água-Energia-Alimentos surge como uma abordagem estratégica para entender e gerenciar as interconexões entre água, energia e alimentos (Salem et al., 2022). Essa visão integrada é fundamental para promover o desenvolvimento sustentável e a preservação dos recursos naturais, além de ser vital para enfrentar os desafios ambientais, sociais e econômicos em um mundo em constante transformação.

No centro dessa abordagem está a necessidade de ferramentas de modelagem que possam capturar a complexidade das interações entre água, energia e alimentos, permitindo simulações e análises detalhadas de políticas e intervenções. Entre essas ferramentas, destaca-se o modelo E3ME (*Energy-Environment-Economy Macro-Econometric model*), que oferece uma estrutura robusta para avaliar os impactos de políticas energéticas sobre a economia, o meio ambiente e, indiretamente, sobre os recursos hídricos e alimentares.

Comparado a outras ferramentas de modelagem, como o CAPRI, IMAGE e MAGNET, o E3ME se distingue por sua abordagem macroeconômica integrada. Enquanto o CAPRI foca na política agrícola regionalizada (Gocht et al., 2016; Blanco et al., 2017; Wunderlich e Kohler, 2018) e o IMAGE aborda mudanças climáticas e uso da terra com uma perspectiva global (Blanco et al., 2017), o E3ME é especialmente eficaz na simulação de políticas climáticas e energéticas e na análise das suas repercussões econômicas (Blanco et al., 2017; Brouwer et al., 2018). O MAGNET, com seu enfoque em equilíbrio geral global e bioeconomia, também oferece insights valiosos (Pinnegar et al., 2021), mas o E3ME se destaca pela sua capacidade de modelar impactos diretos e indiretos das políticas energéticas e ambientais em uma perspectiva econômica mais abrangente (Blanco et al., 2017; Brouwer et al.,



2018).

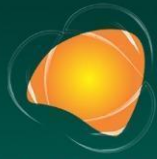
No entanto, o E3ME possui algumas limitações. A sua eficácia pode ser limitada pela necessidade de dados econômicos e ambientais específicos e pela complexidade na adaptação do modelo para diferentes contextos regionais. Em contraste, ferramentas como o IMAGE oferecem uma visão mais detalhada sobre mudanças climáticas e uso da terra, e o CAPRI é mais eficaz na análise de políticas agrícolas regionais. Assim, enquanto o E3ME se destaca na simulação de políticas climáticas e energéticas específicas e suas consequências econômicas, pode não capturar com a mesma profundidade aspectos específicos abordados por outras ferramentas.

Este estudo explora o papel do E3ME na gestão sustentável donexo WEF, demonstrando como essa ferramenta pode ser utilizada para prever os efeitos de diferentes políticas e intervenções, proporcionando uma compreensão das dinâmicas envolvidas. A aplicação do E3ME permite uma análise das interações entre os setores de água, energia e alimentos, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de gestão que possam garantir a segurança e sustentabilidade desses recursos no longo prazo.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O conceito de nexo água-energia-alimentos (WEF) surgiu na década de 1980, com contribuições pioneiras da Universidade das Nações Unidas (Al-Saidi e Elagib, 2017). Sua importância foi amplamente reconhecida em 2008 pelo Fórum Econômico Mundial, que destacou o nexo como uma abordagem fundamental para compreender os riscos associados à escassez de recursos e às mudanças climáticas, que afetam a segurança alimentar global. O conceito foi posteriormente aprofundado em eventos como o Fórum Econômico Mundial de 2011 e as conferências de Bonn em 2011 e 2014, que discutiram as complexidades da implementação de políticas eficazes relacionadas ao nexo (Daher e Mohtar, 2015).

A interdependência entre água, energia e alimentos reflete uma rede complexa de conexões que transcende as associações diretas frequentemente citadas. A produção de energia, por exemplo, é um dos principais consumidores de água, com usinas hidrelétricas, térmicas e nucleares exigindo grandes volumes de água para resfriamento e geração de energia, e a produção de biocombustíveis necessitando



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

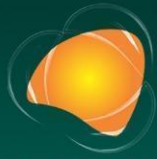
de grandes quantidades de água para o cultivo das plantas (OECD, 2012). Simultaneamente, a produção de alimentos está intrinsecamente ligada ao consumo de energia, visto que o cultivo, a colheita, o transporte e o processamento de alimentos requerem energia significativa, frequentemente na forma de combustíveis fósseis. A eficiência no uso da energia no setor agrícola pode impactar diretamente a segurança alimentar e os preços dos alimentos, especialmente diante das mudanças climáticas e das flutuações no mercado energético (Foley et al., 2011; Tilman et al., 2011).

A agricultura é responsável pelo maior consumo de água no planeta, representando aproximadamente 70% da retirada global de água doce. O uso intensivo de água na agricultura tem um impacto considerável sobre os recursos hídricos, especialmente em áreas com escassez de água. Assim, uma gestão eficiente dos recursos hídricos na agricultura é essencial para assegurar a segurança alimentar e a preservação desses recursos (FAO, 2017; GITZ et al., 2016).

Embora o conceito de nexo WEF seja frequentemente simplificado em associações diretas, como irrigação e agricultura, água e produção de energia, e energia e produção e distribuição de alimentos, essa visão não captura toda a complexidade das interações envolvidas. A demanda por biocombustíveis, os impactos ambientais da desflorestação e os efeitos sobre os sumidouros de carbono ilustram como as interações entre água, energia e alimentos são multifacetadas e complexas (FAO, 2008; Caputo et al., 2021). Além disso, o nexo WEF pode influenciar a distância entre a produção e o consumo de alimentos, resultando em maior consumo de energia e demanda por cultivos que requerem grandes quantidades de água (Edwards-Jones et al., 2008; Allouche et al., 2014).

O conceito de nexo WEF não possui uma definição única, e diversas interpretações coexistem. A definição das fronteiras do sistema de nexo é um desafio, frequentemente exigindo a exclusão de elementos para simplificar a análise. Wichelns (2017) sugere que uma análise mais completa deve incluir aspectos fundamentais para a produção agrícola, como a gestão da terra e a escolha de cultivos, que afetam o consumo de água e energia.

A análise do nexo deve considerar diferentes escalas para captar as interações complexas entre água, energia e alimentos. Muitos estudos investigam o conceito em grandes escalas, mas a integração das interações em múltiplas escalas ainda é limitada (Newell et al., 2019). Apesar do crescente interesse em incluir dimensões sociais nos modelos de nexo, muitos ainda se concentram predominantemente



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

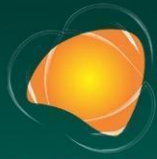
em variáveis físicas, limitando a compreensão dos impactos humanos sobre o consumo de recursos.

Diversas ferramentas e métodos foram desenvolvidos para enfrentar os desafios relacionados ao nexo WEF, incluindo Dinâmica de Sistemas, Modelagem Baseada em Agentes e Análise de Cadeia de Valor, que exploram as complexas interações entre água, energia e alimentos (Zhang et al., 2019). No entanto, poucos modelos abordam aspectos políticos e de governança, que são essenciais para uma implementação eficaz das políticas relacionadas ao nexo (Dai et al., 2018). A avaliação crítica de modelos integrados de gestão, como CAPRI (*Common Agricultural Policy Regionalised Impact*), E3ME (*Energy-Environment-Economy Macro-Econometric model*), IMAGE (*Integrated Model to Assess the Global Environment*) e MAGNET (*Modular Applied General Equilibrium Model*), é fundamental para identificar as melhores práticas para promover a sustentabilidade e a segurança dos sistemas hídricos, energéticos e alimentares globalmente.

O conceito de nexo água-energia-alimentos é essencial para uma abordagem integrada e eficiente na gestão desses recursos, especialmente no contexto do desenvolvimento sustentável. Diante dos desafios globais de escassez de recursos naturais, a utilização eficiente e equitativa de água, energia e alimentos é indispensável para garantir a segurança alimentar, hídrica e energética (ALBRECHT et al., 2018). Uma governança eficaz dos recursos do nexo WEF é fundamental para alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável, incluindo segurança alimentar, redução da pobreza, proteção da biodiversidade e promoção da equidade social. Para uma governança eficaz, é necessário o envolvimento de todas as partes interessadas, como governos, empresas, comunidades locais e organizações internacionais, além do uso de ferramentas de gestão para auxiliar nas análises.

METODOLOGIA

A metodologia adotada nesta pesquisa combina uma abordagem teórica com a aplicação prática de modelagem utilizando o modelo E3ME (*Energy-Environment-Economy Macro-Econometric model*). O estudo foca na análise integrada do nexo água-energia-alimentos (WEF) e nas simulações de políticas energéticas para prever seus impactos econômicos e ambientais. A seguir, detalhamos os procedimentos metodológicos adotados.



PROCEDIMENTOS TÉCNICOS

Esta pesquisa foi conduzida por meio de um estudo bibliográfico e a aplicação de simulações computacionais. Inicialmente, uma revisão da literatura foi realizada nas bases de dados acadêmicas, Web of Science e Scopus, para identificar modelos relevantes e entender as interações nonexo WEF. Em seguida, o modelo E3ME foi customizado e implementado para realizar simulações específicas sobre os impactos das políticas energéticas.

OBJETIVOS DA PESQUISA

A pesquisa, classificada como exploratória e aplicada, visou:

- Explorar as interações entre os setores de água, energia e alimentos no contexto das políticas energéticas.
- Analisar os impactos de políticas energéticas na economia e no meio ambiente utilizando o modelo E3ME.
- Identificar estratégias de gestão integrada do nexoo WEF que promovam a sustentabilidade econômica e ambiental.

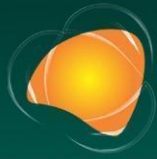
ETAPAS DO PROCESSO DE PESQUISA

O processo de pesquisa foi estruturado em quatro etapas principais:

Coleta e Análise de Dados Bibliográficos: Foi realizada uma revisão da literatura sobre o nexoo WEF e modelos de gestão integrada. Fontes consultadas incluíram artigos científicos, livros, relatórios técnicos e documentos governamentais, fornecendo uma base sólida para a escolha dos modelos e o desenvolvimento das simulações.

Customização e Implementação do Modelo E3ME: O modelo E3ME foi adaptado para refletir as particularidades dos países estudados (Brasil, Estados Unidos, China e Índia). Esses países foram escolhidos com base em sua relevância econômica, tamanho populacional e impacto nas dinâmicas globais relacionadas ao nexoo água-energia-alimentos. Foram definidos parâmetros específicos, como dados históricos e projeções futuras (PIB, emissões de CO₂, consumo de energia e investimentos). A customização garantiu que as simulações fossem representativas das realidades econômicas e ambientais de cada país.

Desenvolvimento da Aplicação: Utilizando a linguagem de programação R, foi desenvolvida uma aplicação para simular o impacto das políticas energéticas ao longo de um período especificado. A



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

aplicação foi estruturada para permitir a entrada de parâmetros variáveis, como taxas de emissão, crescimento econômico e consumo de energia, e gerar saídas que representam o impacto na atividade econômica.

Simulações e Análise dos Resultados: Com os cenários definidos e o modelo customizado, foram realizadas simulações para avaliar os impactos de diferentes políticas energéticas. O horizonte temporal das simulações foi até 2030, gerando projeções sobre indicadores econômicos e ambientais. Os resultados das simulações foram validados com base em dados históricos e comparados com a literatura existente. Refinamentos adicionais foram realizados para assegurar a precisão das simulações. A análise detalhada dos resultados permitiu a identificação de tendências e desafios para a gestão integrada do nexos WEF.

LIMITAÇÕES DA PESQUISA

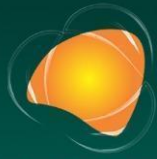
A pesquisa enfrenta algumas limitações. A principal restrição está na disponibilidade e qualidade dos dados para cada país, que pode variar e impactar a precisão dos resultados. Outra limitação é a generalização dos resultados, que pode não refletir completamente as condições específicas de cada região. É fundamental considerar essas limitações ao interpretar os achados e ao aplicar os resultados a políticas e estratégias práticas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

MODELOS DE GESTÃO INTEGRADA NO CONTEXTO DO NEXO WEF: ESTUDOS DE CASO ENCONTRADOS NA LITERATURA

Nesta pesquisa, foram analisados quatro modelos de gestão integrada que oferecem perspectivas distintas sobre o nexos água-energia-alimentos (WEF). Cada modelo é descrito a seguir com base nos estudos de caso encontrados na literatura. A Tabela 01 resume as características, estrutura e aplicabilidade de cada modelo.

CAPRI (*Common Agricultural Policy Regionalised Impact*): é uma ferramenta robusta para análise de políticas agrícolas, focada na União Europeia. Este modelo permite uma avaliação detalhada dos impactos das políticas agrícolas a nível regional e nacional, incorporando as emissões de gases de



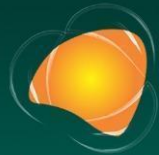
EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

efeito estufa e as interações entre alimentos, água e energia. Estudos que aplicaram o CAPRI analisaram a integração de mudanças estruturais nas fazendas, o impacto das políticas de pastagens no sequestro de carbono e os efeitos da reforma da Política Agrícola Comum (PAC) sobre a renda agrícola e o meio ambiente (Espinosa et al., 2016; Gocht et al., 2017; Kožar et al., 2012). Além disso, o modelo tem sido utilizado para avaliar os impactos das mudanças climáticas na agricultura da UE (Blanco et al., 2017).

IMAGE (*Integrated Model to Assess the Global Environment*): oferece uma abordagem global para avaliar as interações complexas entre mudanças climáticas, uso da terra, produção de alimentos e energia. Este modelo é útil para simular cenários futuros e prever como diferentes fatores podem influenciar os sistemas naturais e as políticas relacionadas (Doelman et al., 2022; Liu et al., 2020). Estudos realizados com o IMAGE investigaram desde a biogeoquímica de nutrientes em bacias hidrográficas globais até as necessidades futuras de fósforo na África Subsaariana, fornecendo uma visão abrangente sobre a segurança alimentar e a gestão de recursos (Magnone et al., 2022; Wang et al., 2020).

E3ME (*Energy–Environment–Economy Model*): é um modelo macroeconômico que integra aspectos de energia, meio ambiente e economia. Ele simula os efeitos de políticas climáticas e energéticas sobre a economia global e o emprego, ajudando a entender como diferentes políticas podem impactar a transição para uma economia de baixo carbono (Blanco et al. 2017). Estudos utilizando o E3ME exploraram a evolução tecnológica na geração de energia renovável e a eficiência de recursos, oferecendo insights valiosos para a formulação de políticas sustentáveis (Wiebe e Lutz, 2016; Brouwer et al., 2018).

MAGNET (*Modular Applied GeNeral Equilibrium Tool*): é um modelo de equilíbrio global que examina a interação entre setores econômicos, com ênfase na agricultura e bioenergia. Ele tem sido utilizado para analisar o impacto de políticas agrícolas e comerciais sobre a segurança alimentar e a bioeconomia (Pinnegar et al., 2021; Banse et al., 2019). Pesquisas com o MAGNET avaliaram desde os efeitos das políticas comerciais sobre a produção agrícola até as implicações das reformas nos subsídios agrícolas para a saúde e o meio ambiente (Springmann e Freund, 2022; Sturm e Banse, 2021).



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

Tabela 01: Características, Estrutura e Aplicabilidade dos Modelos.

Modelo	Características	Estrutura	Aplicabilidade
CAPRI	Foco na Política Agrícola; Análise Regional e Global; Consideração de Múltiplos Setores	Modelo de Equilíbrio Parcial	Avaliação de Políticas Agrícolas; Análise de Cenários
E3ME	Enfoque em Energia e Meio Ambiente; Modelo Integrado; Abordagem Macroeconômica	Modelo de Equilíbrio Geral Computável (CGE)	Análise de Políticas Energéticas e Ambientais; Previsão de Tendências Econômicas
MAGNET	Foco no Comércio Global e Agricultura; Modelo Modular; Incorporação de Mudanças Climáticas	Modelo de Equilíbrio Geral Aplicado (AGE)	Análise de Políticas Comerciais; Avaliação de Vulnerabilidades Climáticas
IMAGE	Foco em Mudanças Climáticas e Uso da Terra; Modelo Integrado de Longo Prazo; Consideração de Cenários Alternativos	Modelo de Sistemas Integrados	Projeções Climáticas e de Uso da Terra; Apoio à Formulação de Políticas

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COM O MODELO E3ME

Os resultados obtidos com a simulação do modelo E3ME indicam uma redução significativa nas emissões globais de CO₂ até 2030. Conforme ilustrado na Figura 01, projeta-se uma diminuição de aproximadamente 34% em relação aos níveis da linha de base, corroborando os achados de Peters (2016). Essa redução é um reflexo das políticas energéticas e ambientais simuladas, que visam a transição para uma economia de baixo carbono.

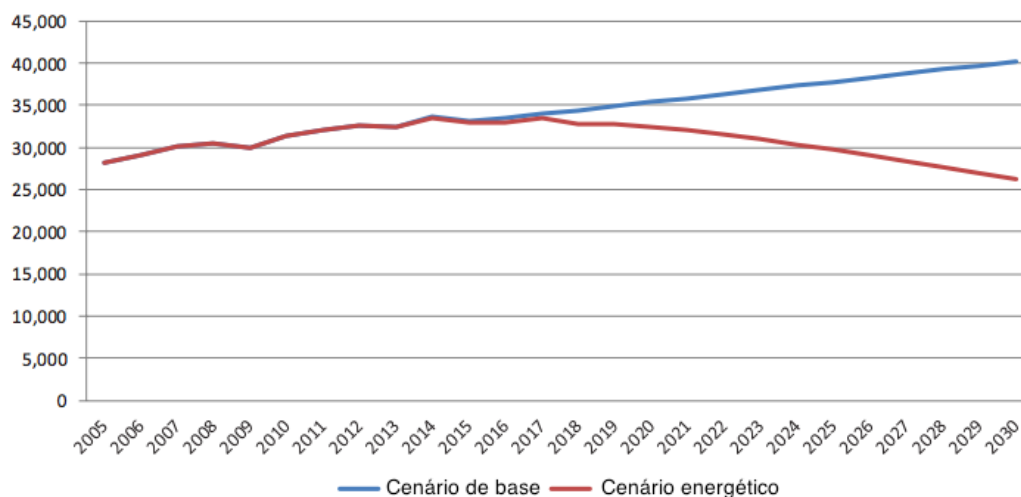
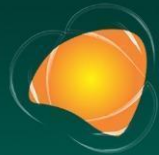


Figura 01: Emissões Globais de CO₂ ao longo do tempo 2005 – 2029.

O modelo E3ME, que integra aspectos de energia, meio ambiente e economia, foi utilizado para



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

simular cenários futuros. A análise das projeções econômicas e ambientais para 2030, conforme detalhada na Tabela 2, revela diferenças significativas entre as regiões. De acordo com os resultados simulados, no Brasil, por exemplo, estima-se uma redução de 20,4% nas emissões de CO₂ em relação à linha de base, resultado dos esforços contínuos do país em direção à sustentabilidade ambiental. Em contraste, os Estados Unidos enfrentam uma queda acentuada de -3,4% no PIB, sugerindo desafios econômicos que podem exigir a implementação de políticas adicionais de mitigação. A China, por outro lado, projeta um aumento substancial de 4,7% no PIB, impulsionado por investimentos na modernização de infraestrutura e na transição para fontes de energia mais limpas. Já a Índia apresenta uma redução significativa de 53,3% nas emissões de CO₂, acompanhada de um aumento modesto de 0,6% no PIB, refletindo um equilíbrio entre a redução das emissões e o crescimento econômico. Essas projeções destacam a necessidade de políticas adaptáveis e específicas para cada região, a fim de enfrentar os desafios econômicos e ambientais de maneira eficaz e sustentável.

Tabela 02: Diferença percentual das atividades econômica em relação à linha de base 2030.

	Mundo (%)	Estados Unidos (%)	China (%)	Índia (%)	Brasil (%)
PIB	0.1	-3.4	4.7	0.6	1.1
CO ₂	-34.6	-45.4	-26.5	-53.3	-20.4
Consumo	0.4	-2.0	11.2	-1.1	0.7
Investimento	1.0	-2.5	3.2	1.1	1.7

Os impactos previstos no emprego também variam significativamente entre os setores, conforme mostra a Tabela 3. O setor de mineração deve registrar uma perda considerável de empregos, com uma queda estimada de 16,6%, devido à menor produção de energia proveniente de combustíveis fósseis. Por outro lado, o setor da construção, juntamente com as indústrias ligadas a energias renováveis e à eficiência energética, deve observar um crescimento no emprego, com aumentos de 1,1% e 0,7%, respectivamente.

Tabela 03: Senário de emprego por setor, diferença percentual em relação a linha de base 2030.

Agricultura	0,5	Utilitários	-2,4
Industria	0,7	Transporte	0,5
Construção	1,1	Servidos Comerciais	0,7
Mineração	-16,6	Outros Serviços	0,3



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

A agricultura, com um aumento projetado de 0,5% no emprego, desempenha um papel crítico na adaptação às mudanças climáticas. Mudanças nos padrões climáticos e nas práticas agrícolas podem influenciar a demanda por mão de obra agrícola, variando conforme a região e as políticas implementadas. Os setores de serviços devem se beneficiar do aumento da atividade econômica, especialmente aqueles envolvidos na cadeia de suprimentos de energias renováveis e eficiência energética. Isso inclui serviços comerciais como distribuição, varejo, hotelaria e restaurantes, que devem observar um crescimento na demanda. Outros serviços, integrados às cadeias de suprimentos dos setores de construção e indústria, também devem experimentar um crescimento, refletindo o aumento da demanda nesses setores. Além disso, o setor de transporte deve se beneficiar do aumento dos gastos dos consumidores, com uma previsão de crescimento de 0,5% no emprego.

Em resumo, a gestão integrada do nexo água-energia-alimentos é essencial para enfrentar os desafios interconectados que o mundo enfrenta atualmente. Os modelos de gestão integrada apresentados neste estudo oferecem ferramentas valiosas para compreender e planejar estratégias eficazes para a sustentabilidade. Contudo, para alcançar um futuro verdadeiramente sustentável e resiliente, é essencial que essas análises sejam acompanhadas por políticas públicas flexíveis e estratégias robustas de implementação, adaptadas às especificidades de cada região e setor. Portanto, recomenda-se o desenvolvimento de políticas adaptativas que respondam às necessidades regionais e setoriais específicas, maximizando benefícios e minimizando desafios. Além disso, o envolvimento contínuo dos stakeholders, incluindo o setor privado e as comunidades locais, é essencial para garantir a eficácia das políticas e o gerenciamento adequado dos impactos econômicos e ambientais. Por fim, é necessário estabelecer mecanismos robustos para monitorar e avaliar o impacto das políticas, permitindo ajustes conforme necessário para alcançar os objetivos de sustentabilidade de forma efetiva e sustentável.

CONCLUSÕES

Este estudo destacou a importância da gestão integrada do nexo água-energia-alimentos (WEF) como uma abordagem estratégica para enfrentar os desafios interligados que o mundo contemporâneo enfrenta. Através da aplicação do modelo E3ME, foi possível demonstrar como políticas energéticas podem impactar não apenas as emissões de CO₂, mas também a economia e o emprego em diferentes



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

setores e regiões. As simulações realizadas apontaram para cenários variados, onde a transição para uma economia de baixo carbono apresenta tanto oportunidades quanto desafios significativos.

Os resultados mostram que, enquanto setores como a mineração podem enfrentar perdas substanciais de empregos, outros setores, como a construção e as indústrias voltadas para energias renováveis, possuem potencial para crescimento. Esse panorama ressalta a necessidade de políticas públicas adaptáveis que possam atenuar os impactos negativos e promover um desenvolvimento sustentável.

Para gerir eficazmente o nexo WEF, é imperativo utilizar modelos robustos para prever e avaliar políticas, mas também garantir uma coordenação eficaz entre diferentes níveis de governo e setores da sociedade. Uma abordagem integrada e colaborativa é essencial para desenvolver estratégias que assegurem a segurança dos recursos naturais, promovam o crescimento econômico sustentável e fortaleçam a resiliência às mudanças climáticas.

Com base nos resultados obtidos, este estudo recomenda a formulação de políticas públicas direcionadas, que contemplem o apoio a setores em transição, como energias renováveis, enquanto implementam medidas de mitigação para setores em dificuldades, como a mineração. Além disso, é fundamental incentivar pesquisas futuras que possam aprofundar a análise das políticas simuladas, explorar novas interações entre setores e regiões, e avaliar a eficácia de tecnologias emergentes no contexto do nexo WEF. Essas iniciativas ajudarão a aprimorar o modelo E3ME e suas aplicações práticas, oferecendo uma orientação mais clara para a formulação de políticas públicas que busquem um desenvolvimento sustentável e equilibrado.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento deste projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALBRECHT, Tamee R.; CROOTOFF, Arica; SCOTT, Christopher A. The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods for nexus assessment. *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 4, p. 043002, 2018.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

- Al-Saidi, M., Elagib, N.A., 2017. Towards understanding the integrative approach of the water, energy and food nexus. *Sci. Total Environ.* 574, 1131–1139.
- Allouche, J., Middleton, C., Gyawal, D., 2014. Nexus Nirvana or Nexus nullity? A Dynamic Approach to Security and Sustainability in the Water-energy-food Nexus. STEPS Centre, Brighton. STEPS Working Paper 63.
- BANSE, M. et al. From the Russian food import ban to free trade from Lisbon to Vladivostok—will farmers benefit? *Journal of International Studies*, v. 12, n. 4, 2019. ISSN 2071-8330.
- BLANCO, M. et al. 1: Report on the “First Run” Simulation Results of The Thematic Models: Identifying the Gaps. 2017.
- BLANCO, M. et al. Climate change impacts on EU agriculture: A regionalized perspective taking into account market-driven adjustments. *Agricultural systems*, v. 156, p. 52-66, 2017. ISSN 0308-521X.
- BROUWER, F. et al. The nexus concept integrating energy and resource efficiency for policy assessments: A comparative approach from three cases. *Sustainability*, v. 10, n. 12, p. 4860, 2018. ISSN 2071-1050.
- CAPUTO, Silvio et al. Applying the food-energy-water nexus approach to urban agriculture: From FEW to FEWP (Food-Energy-Water-People). *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 58, p. 126934, 2021.
- Daher, B.T., Mohtar, R.H., 2015. Water–energy–food (WEF) Nexus tool 2.0: guiding integrative resource planning and decision-making. *Water Int.* 40 (5–6), 748–771.
- Dai, J., Wu, S., Han, G., Weinberg, J., Xie, X., Wu, X., Song, X., Jia, B., Xue, W., Yang, Q., 2018. Water-energy nexus: a review of methods and tools for macro-assessment. *Appl. Energy* 210, 393–408.
- DOELMAN, J. C. et al. Quantifying synergies and trade-offs in the global water-land-food-climate nexus using a multi-model scenario approach. *Environmental Research Letters*, v. 17, n. 4, 2022. ISSN 17489318.
- Edwards-Jones, G., i Canals, L.M., Hounsome, N., Truninger, M., Koerber, G., Hounsome, B., Cross, P., York, E.H., Hospido, A., Plassmann, K., Harris, I.M., 2008. Testing the assertion that ‘local food is best’: the challenges of an evidence-based approach. *Trends Food Sci. Technol.* 19 (5), 265–274.
- EMBRAPA. Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira. – Brasília, DF: Embrapa, ISBN 978-85- 7035-799- 1., 2018.
- ESPINOSA, M., GOCHT, A., HECKELEI, T., & y PALOMA, S. G. (2016). Incorporating farm structural change in models assessing the Common Agricultural Policy: An application in the CAPRI farm type model. *Journal of Policy Modeling*, 38(6), 1040-1059.
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2008. The State of Food and Agriculture 2008: Biofuels: Prospects, Risks and Opportunities. Food and Agriculture Organisation.
- FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS). The future of food and agriculture: Trends and challenges. Fao, 2017.
- FOLEY, Jonathan A. et al. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, v. 478, n. 7369, p. 337-342, 2011.
- GITZ, Vincent et al. Climate change and food security: risks and responses. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Report, v. 110, n. 2, p. 3-36, 2016.
- GOCHT, A. et al. EU-wide Economic and Environmental Impacts of CAP Greening with High Spatial and Farm-type Detail. *JOURNAL OF AGRICULTURAL ECONOMICS*, v. 68, n. 3, p. 651-681, SEP 2017. ISSN 0021-857X
- KOŽAR, M. et al. Flattening and redistribution of the CAP direct payments for the EU27 regions. *Agricultural Economics (Czech Republic)*, v. 58, n. 10, p. 397-407, 2012. ISSN 0139570X.
- LIU, X. et al. Exploring Long-Term Changes in Silicon Biogeochemistry Along the River Continuum of the Rhine and Yangtze (Changjiang). *Environmental Science and Technology*, v. 54, n. 19, p. 11940-11950, 2020. ISSN 0013936X.
- OECD - ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. Water and climate change adaptation: Policies to navigate uncharted waters. OECD Publishing, 2013.
- PINNEGAR, J. K. et al. Future socio-political scenarios for aquatic resources in Europe: a common framework based on shared-socioeconomic-pathways (SSPs). *Frontiers in Marine Science*, v. 7, p. 568219, 2021. ISSN 2296-7745.
- MAGNONE, D. et al. The impact of phosphorus on projected Sub-Saharan Africa food security futures. *NATURE COMMUNICATIONS*, v. 13, n. 1, OCT 29, 2022. ISSN 2041-1723 J9 - NAT COMMUN.
- NEWELL, Joshua P.; GOLDSTEIN, Benjamin; FOSTER, Alec. A 40-year review of food–energy–water nexus literature and its application to the urban scale. *Environmental Research Letters*, v. 14, n. 7, p. 073003, 2019.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

- SALEM, H. S.; PUDZA, M. Y.; YIHDEGO, Y. Water strategies and water-food Nexus: challenges and opportunities towards sustainable development in various regions of the World. *SUSTAINABLE WATER RESOURCES MANAGEMENT*, v. 8, n. 4, AUG 2022. ISSN 2363-5037.
- SPRINGMANN, M.; FREUND, F. Options for reforming agricultural subsidies from health, climate, and economic perspectives. *Nature Communications*, v. 13, n. 1, p. 82, 2022. ISSN 2041-1723.
- STURM, V.; BANSE, M. Transition paths towards a bio-based economy in Germany: A model-based analysis. *Biomass and Bioenergy*, v. 148, p. 106002, 2021. ISSN 0961-9534.
- TILMAN, David et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the national academy of sciences*, v. 108, n. 50, p. 20260-20264, 2011.
- Walker, R.V., Beck, M.B., Hall, J.W., Dawson, R.J., Heidrich, O., 2014. The energy-waterfood nexus: strategic analysis of technologies for transforming the urban metabolism. *J. Environ. Manage.* 141, 104–115.
- WANG, J. et al. Spatially Explicit Inventory of Sources of Nitrogen Inputs to the yellow Sea, East China Sea, and South China Sea for the Period 1970–2010. *Earth's Future*, v. 8, n. 10, 2020. ISSN 23284277.
- Wang, S., Cao, T., Chen, B., 2017. Urban energy–water nexus based on modified input–output analysis. *Appl. Energy* 196, 208–217.
- Wichelns, D., 2017. The water-energy-food nexus: Is the increasing attention warranted, from either a research or policy perspective? *Environ. Sci. Policy* 69, 113–123.
- WIEBE, K. S.; LUTZ, C. Endogenous technological change and the policy mix in renewable power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 60, p. 739-751, 2016. ISSN 1364-0321.
- WUNDERLICH, A. C.; KOHLER, A. Using empirical Armington and demand elasticities in computable equilibrium models: An illustration with the CAPRI model. *Economic Modelling*, v. 75, p. 70-80, 2018. ISSN 02649993.
- Zhang, P., Zhang, L., Chang, Y., Xu, M., Hao, Y., Liang, S., Liu, G., Yang, Z., Wang, C., 2019. Food-energy-water (FEW) nexus for urban sustainability: a comprehensive review. *Resour. Conserv. Recycl.* 142, 215–224.