

MODELAGEM BASEADA EM AGENTES APLICADA À SUSTENTABILIDADE: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Iasmin Costa Silva, Universidade Federal de Catalão, iasmin.silva@discente.ufcat.edu.br
Dalton Matsuo Tavares, Universidade Federal de Catalão, dalton_tavares@ufcat.edu.br
Stella Jacyszyn Bachega, Universidade Federal de Catalão, stella@ufcat.edu.br

Resumo: A crescente relevância da sustentabilidade tem impulsionado o uso da Modelagem Baseada em Agentes (Agent-Based Modeling – ABM) como metodologia para compreender dinâmicas socioambientais complexas. Estudos recentes demonstram que a ABM possibilita representar interações individuais e coletivas, apoiar a formulação de políticas públicas e explorar cenários em áreas como mobilidade urbana, transição energética, economia circular e governança socioecológica. Neste contexto, o presente trabalho tem o objetivo de realizar uma análise bibliométrica sobre a aplicação da ABM no âmbito da sustentabilidade, identificando relações entre autores, principais temas investigados e tendências emergentes na literatura. Utilizou-se a explicação científica hipotético-dedutiva, a abordagem de pesquisa mista quantitativa e qualitativa e o procedimento análise bibliométrica, com uso do software VOSviewer. Dentre os resultados, foram identificados os autores com maior colaboração para o tema e as palavras-chave mais utilizadas nos artigos analisados na base de dados ScienceDirect. Os resultados contribuem para sistematizar a produção científica e apontar oportunidades de pesquisa, reforçando o papel da ABM como suporte à tomada de decisão em contextos socioambientais. Entre as sugestões de pesquisas futuras está o desenvolvimento de modelos híbridos que integrem ABM com system dynamics e técnicas de aprendizado de máquina, além da ampliação de pesquisas nacionais considerando o tema de uso conjunto da ABM com a sustentabilidade.

Palavras-chave: modelagem baseada em agentes, sustentabilidade, análise bibliométrica, VOSviewer.

1. INTRODUÇÃO

A intensificação das discussões acerca da sustentabilidade tem incentivado a produção científica em diferentes áreas do conhecimento, com vistas a compreender e propor soluções para os desafios socioambientais contemporâneos. Nesse contexto, a Modelagem Baseada em Agentes (Agent-Based Modeling – ABM) surge como uma metodologia potente para investigar essas dinâmicas emergentes, possibilitando representar interações individuais e coletivas (Magliocca, 2020). Conforme apontam Ribeiro-Rodrigues e Bortoleto (2024), o uso de ABM tem se ampliado na modelagem de comportamentos pró-ambientais, revelando sua utilidade para o entendimento de processos sociais e ambientais interdependentes.

De modo complementar, Nugroho e Uehara (2023) evidenciaram o potencial da integração entre ABM e *system dynamics* para analisar sistemas socioecológicos, salientando a importância de modelos híbridos para a formulação de políticas públicas. No campo das aplicações, diferentes estudos exemplificam a versatilidade da ABM. Elkamel et al. (2023), aplica a abordagem a cenários urbanos sustentáveis, simulando interações entre veículos elétricos autônomos e hortas urbanas como estratégia para reduzir desigualdades no acesso a alimentos. Estudos empíricos recentes conduzidos em Siena, Itália, por Soccia, Vitanza e Mocenni (2025), investigam como práticas pró-sustentabilidade podem surgir a partir das interações sociais, tanto no nível individual quanto coletivo.

Apesar dos avanços, ainda persistem desafios metodológicos. Questões relacionadas à integração de dados empíricos, validação de modelos e colaboração interdisciplinar permanecem centrais para o fortalecimento da ABM como instrumento de análise e apoio à tomada de decisão (Nugroho; Uehara, 2023; Secchi et al., 2024). Considerando tais aspectos, a ABM consolida-se como abordagem relevante para o estudo da sustentabilidade, permitindo examinar a complexidade das interações socioambientais em múltiplas escalas.

Com base neste contexto, surge a seguinte questão de pesquisa: Como a modelagem baseada em agentes tem sido aplicada nos estudos sobre sustentabilidade, e quais são as principais contribuições e tendências emergentes identificadas na literatura recente? Dessa forma, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise bibliométrica sobre a aplicação da ABM no campo da sustentabilidade, identificando os principais autores e os temas mais relevantes.

A presente pesquisa justifica-se pela importância do tema relatado em artigos como Magliocca (2020), Ribeiro-Rodrigues e Bortoleto (2024), Nugroho e Uehara (2023), Elkamel et al. (2023) e Secchi et al. (2024), os quais expõem o potencial e os desafios da aplicação de ABM em contextos socioambientais diversos. O artigo está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta a base conceitual do tema; a seção 3 descreve a metodologia adotada; a seção 4 expõe as análises dos estudos revisados; e, por fim, a seção 5 apresenta as considerações finais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A ABM consolidou-se nos últimos anos como uma das principais metodologias para investigar sistemas complexos compostos por múltiplos atores interdependentes. Nessa abordagem, cada agente é modelado com regras próprias de comportamento e capacidade de interação com outros agentes e com o ambiente. Isso permite a representação de heterogeneidade, adaptação e dinâmicas emergentes em diferentes escalas (Verhagen; Elsenbroich; Wijermans, 2024).

Estudos recentes destacam que a ABM é especialmente poderosa para lidar com sistemas socioecológicos, justamente pela sua flexibilidade em integrar dados empíricos, hipóteses teóricas e cenários prospectivos (Magliocca, 2020). Essa capacidade a torna particularmente útil para testar intervenções e avaliar políticas em contextos de alta incerteza.

As aplicações são diversas: desde a modelagem de comportamentos pró-ambientais, como hábitos de consumo e eficiência energética (Nugroho et al., 2023), até a análise de sistemas agroalimentares e mudanças no uso da terra, integrando dados espaciais e sociais (Ravaioli; Domingos; Teixeira, 2023). Esse conjunto evidencia que a ABM é uma metodologia em constante evolução.

A combinação entre ABM e sustentabilidade abre caminho para análises, capazes de avaliar cenários complexos como transição energética, mobilidade urbana verde, consumo responsável e governança socioambiental. Trata-se de um campo em expansão, onde metodologias computacionais oferecem suporte direto à formulação de políticas públicas mais integradas, resilientes e equitativas.

O conceito de sustentabilidade mantém como núcleo a integração das dimensões ambiental, social e econômica, mas ganhou maior sofisticação ao ser tratado como um sistema dinâmico e interdependente (Li; Yi; Zhang, 2021). Nesse contexto, ferramentas computacionais têm se tornado fundamentais para compreender como indivíduos, organizações e políticas se articulam em busca de equilíbrio entre crescimento econômico, justiça social e conservação ambiental.

Pesquisas recentes mostram que a eficácia de políticas ambientais aumenta quando são considerados os efeitos de influência social e difusão comportamental. Nesse contexto, a decisão de um indivíduo pode induzir mudanças coletivas, amplificando o impacto das intervenções (Savin et al., 2023). Sob essa ótica, a sustentabilidade não se limita aos recursos, mas envolve igualmente as redes sociais e as dinâmicas culturais.

3. METODOLOGIA

A perspectiva hipotético-dedutiva foi empregada, pois proposições foram formuladas ao longo da análise bibliométrica realizada, para atingir o objetivo da pesquisa (Carvalho, 2000). A abordagem de pesquisa adotada foi a mista qualitativa e quantitativa, conforme Bryman (1989) e Creswell (1994). Considerando o uso da análise bibliométrica como procedimento de pesquisa, algumas análises possuem características quantitativas e outras qualitativas (Donthu et al., 2021; Öztürk; Kocaman; Kanbach, 2024).

A análise bibliométrica é um método rigoroso e popular para explorar e analisar grandes volumes de dados científicos, que permite desvendar as nuances evolutivas de um campo específico, ao mesmo tempo que esclarece sobre as áreas emergentes nesse campo (Donthu et al., 2021).

As principais técnicas de análise bibliométrica utilizadas foram a análise de desempenho e o mapeamento científico. Para proporcionar técnica de enriquecimento na análise, há, ainda, a análise de rede (Donthu et al., 2021), sendo que para visualizações, foi utilizado o software VOSviewer versão 1.6.20. Nesta pesquisa foi selecionada esta solução computacional por ser gratuita e por permitir uso de arquivos gerados pela base de dados ScienceDirect, disponível no Portal de Periódicos da CAPES, sendo esta base liberada para acesso na universidade sede da pesquisa.

O termo de busca utilizado para pesquisa no título, resumo e palavras-chaves definidas pelos autores nos artigos foi: (“agent-based model” OR “agent-based simulation”) AND (Sustainability OR Sustainable OR “Environmental Impact”). Foram encontrados 357 resultados para o horizonte de tempo de 2021 até 2025, sendo considerados somente artigos de revisão (21 artigos encontrados) e artigos de pesquisa (336 artigos identificados). Não houve filtragem de idioma, sendo permitido considerar todos os idiomas presentes na base de dados.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Para realizar a análise bibliométrica sobre a ABM no contexto de sustentabilidade, foram estabelecidos alguns critérios para a seleção dos autores: o número mínimo de um artigo publicado por autor e um mínimo de cinco citações na publicação.

O resultado foi a formação de três *clusters* principais no mapa gerado pelo VOSviewer, cada um desses representando um grupo de autores com interligação temática e de coautoria. A disposição dos nomes reflete a proximidade entre os autores: quanto mais próximos, mais intensa é a relação de coautoria. As linhas que conectam os nós indicam os vínculos colaborativos, enquanto o tamanho da fonte dos nomes sinaliza a relevância de cada autor na rede de colaboração científica. A análise desses *clusters* confirma um cenário de produção fragmentada, com polos bem definidos. Isso reforça a ideia de que a pesquisa em ABM aplicada à sustentabilidade é diversa, porém alinhada com questões prioritárias.

4.1. Análise dos *Clusters* por Rede de Coautoria

Para ter uma visão ampla sobre os resultados encontrados na pesquisa, foram analisados os *clusters* do mapa de redes de coautoria gerado pelo VOSviewer. A Figura (1) revela os três agrupamentos principais, e os autores envolvidos em colaborações mútuas.

Além da visualização gráfica, a Tab. (1) apresenta os principais autores identificados, o *cluster* ao qual cada um pertence, a força e a quantidade dos vínculos de coautoria, o número de documentos por autor e o ano médio de publicação.

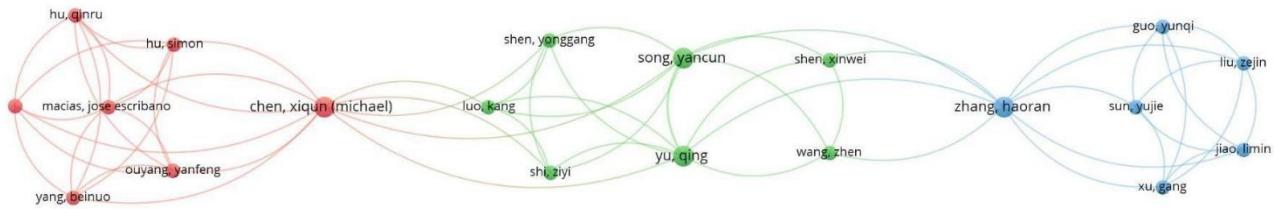


Figura 1: Mapa da rede de coautoria (Fonte: Dados da pesquisa)

A Tabela (1) mostra 20 autores distribuídos em 3 *clusters* de colaboração relativamente equilibrados. O *cluster* 1 se destaca pela maior força de vínculo, liderado por Chen, Xiqun (Michael), com vínculo 11 (colaborou com 11 outros autores), força 11 (publicou 11 artigos com estes outros autores no qual colaborou) e o atributo documentos com valor 2 (indica o peso atribuído aos autores mais produtivos), sendo este o autor mais conectado da rede. Poucos autores concentram as conexões mais fortes e a produção é recente (entre 2024 e 2025) e distribuída entre os três principais grupos.

Tabela 1: Dados da rede de coautoria (Fonte: Dados da pesquisa).

Autor	Cluster	vínculo	Força total do vínculo	Documentos	Ano Médio de Publicação
chen, xiqun (michael)	1	11	11	2	2024.5
guo, yunqi	3	5	5	1	2024
hu, qinru	1	6	6	1	2025
hu, simon	1	6	6	1	2025
jiao, limin	3	5	5	1	2024
liu, zejin	3	5	5	1	2024
luo, kang	2	5	5	1	2024
macias, jose escribano	1	6	6	1	2025
ouyang, yanfeng	1	6	6	1	2025
shen, xinwei	2	4	4	1	2024
shen, yonggang	2	5	5	1	2024
shi, ziyi	2	5	5	1	2024
song, yancun	2	8	9	2	2024
sun, yujie	3	5	5	1	2024
wang, zhen	2	4	4	1	2024
xu, gang	3	5	5	1	2024
yang, beinuo	1	6	6	1	2025
yu, qing	2	8	9	2	2024
zhang, haoran	3	9	9	2	2024
zhang, keyang	1	6	6	1	2025

Cluster 1

Este *cluster* está majoritariamente associado a estudos sobre otimização e simulação de sistemas de transporte com foco em sustentabilidade. Isso se deve à necessidade urgente de o setor passar por uma transformação rumo ao desenvolvimento de baixo carbono, como parte do esforço global para enfrentar as mudanças climáticas (Qiu; Hou; Meng, 2021).

Os trabalhos enfatizam o uso de simulação baseada em agentes para modelar comportamentos de tráfego, fluxos logísticos e decisões de mobilidade urbana. Esses modelos permitem mapear ganhos

de eficiência de carbono, considerando de forma integrada as implicações ambientais e o consumo de energia.

Chen, Xiqun (Michael) se destaca incorporando em seus modelos variáveis e comportamentos adaptativos de agentes (motoristas, pedestres ou veículos autônomos). Também insere respostas a políticas públicas, como pedágios urbanos, faixas exclusivas ou incentivos ao transporte coletivo, com o objetivo de maximizar os lucros dos sistemas simulados, contabilizando as receitas de atendimento ao cliente e os custos de energia e viagens. Além disso, há uma forte presença de métodos híbridos, integrando ABM com o objetivo de prever cenários futuros, e testar políticas públicas com foco em redução de impacto ambiental e eficiência operacional.

Cluster 2

Este grupo representa a aplicação da simulação baseada em agentes em contextos complexos envolvendo energia, transporte e dinâmicas urbanas. O foco principal é na gestão da demanda energética, eficiência no consumo e formulação de políticas sustentáveis, incluindo aspectos como mobilidade urbana e estratégias de contenção de epidemias em grandes centros.

As pesquisas desenvolvidas modelam interações entre consumidores residenciais, comerciais e a rede elétrica, incorporando elementos como a integração de veículos elétricos, adoção de tecnologias verdes (p. ex. painéis solares, sistemas de automação, carros elétricos) e o impacto de subsídios e tarifas sobre o comportamento do consumidor. A metodologia ABM permite capturar a diversidade comportamental dos agentes, representando diferentes perfis socioeconômicos, níveis de informação e preferências ambientais. Ao simular o comportamento descentralizado dos agentes, os modelos permitem antecipar gargalos, testar políticas públicas e identificar oportunidades de inovação, especialmente em sistemas distribuídos ou com alta penetração de tecnologias emergentes.

Cluster 3

Esse *cluster* foca em infraestrutura urbana inteligente, explorando como a simulação baseada em agentes pode contribuir para o desenvolvimento de cidades mais resilientes, adaptativas e sustentáveis. Os estudos analisam:

- interações entre diferentes sistemas urbanos (transporte, energia, água e resíduos);
- infraestruturas críticas diante de eventos extremos (climáticos, sociais ou sanitários);
- modelos de cogestão entre governo; e
- empresas e população no uso dos recursos urbanos.

Esses autores simulam sistemas complexos de cidades inteligentes, permitindo observar os efeitos de políticas públicas, investimentos em infraestrutura e mudanças comportamentais dos cidadãos ao longo do tempo. Dessa forma, ABM e algoritmos de aprendizado profundo permitem análises detalhadas em nível individual, melhorando a compreensão de como escolhas pessoais afetam mudanças demográficas mais amplas (Tian et al., 2021). As abordagens valorizam a interconectividade entre setores urbanos e mostram como decisões locais podem ter impacto em cascata, permitindo um *insight* essencial para a governança de cidades sustentáveis.

4.2. Análise dos *Clusters* por Rede de Termos

A análise de tendências busca mapear, por meio da visualização de ocorrência de termos e vínculos, os principais temas acadêmicos relevantes. Para realizar essa análise, utiliza-se o software VOSviewer em conjunto com dados extraídos da base ScienceDirect. Estabelecidos alguns critérios para a seleção dos autores, os temas baseados nos trabalhos desses autores são relacionados.

A Figura (2) representa a visualização do mapa de palavras que foi gerado utilizando a ferramenta VOSviewer. Nesta, a distribuição dos termos indica a ligação entre os temas, e as linhas que conectam

os nós representam os vínculos colaborativos. O tamanho da fonte dos termos, por sua vez, representa a relevância do tema na rede de ocorrência.

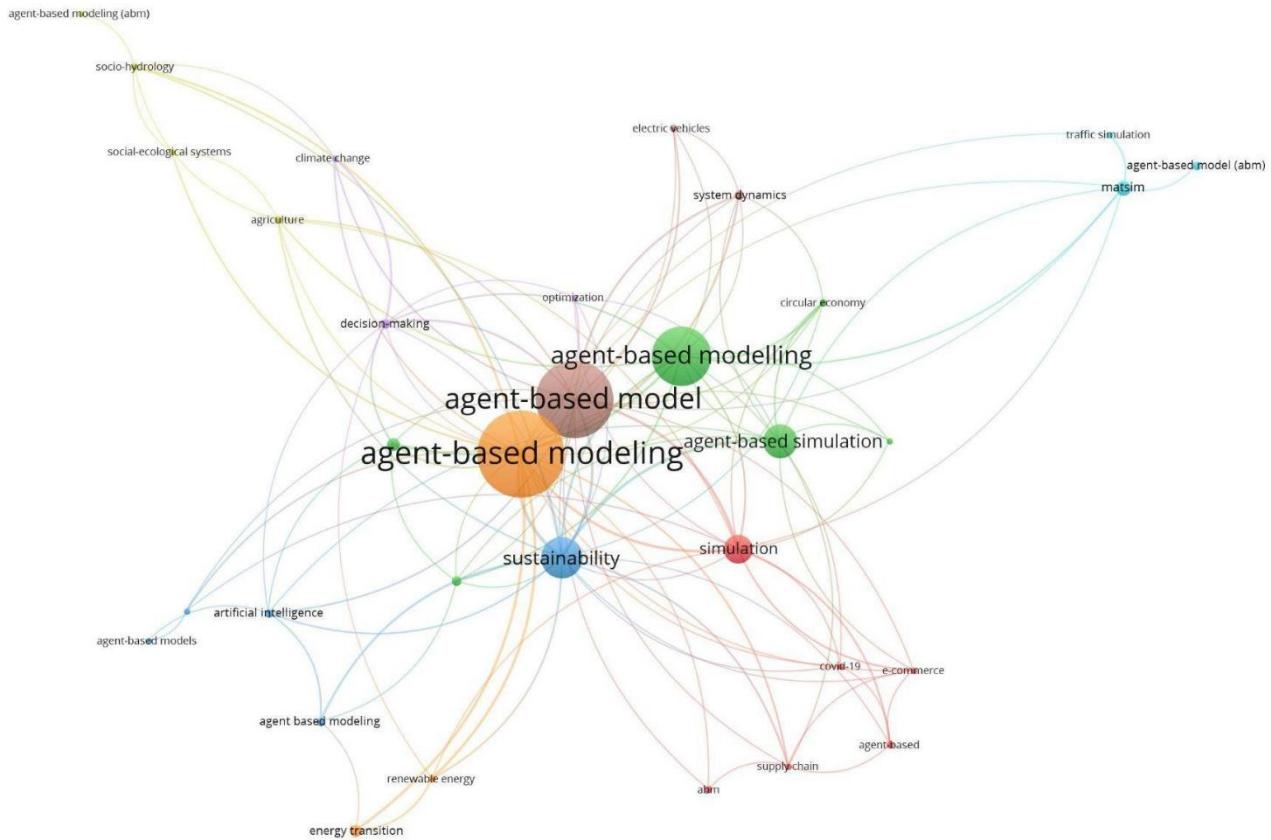


Figura 2: Mapa da rede de termos (Fonte: Dados da pesquisa)

A Tabela (2) apresenta, além da visualização gráfica fornecida pela Fig. (2), os principais termos identificados, o *cluster* ao qual pertencem, a força dos vínculos de correlação, o número de documentos por termo e o ano médio de publicação de cada termo.

Tabela 2: Dados da rede de correlação de termos (Fonte: Dados da pesquisa).

Termos	Cluster	Vínculos	Força total do vínculo	Ocorrência	Ano médio de publicação
abm	1	3	3	6	2023.3333
agent based modeling	3	4	7	7	2022.8571
agent-based	1	5	6	6	2022.5
agent-based model	8	16	32	61	2022.9016
agent-based model (abm)	6	1	1	7	2023
agent-based modeling	7	23	48	69	2023.3623
agent-based modeling (abm)	4	1	1	5	2024.2
agent-based modelling	2	13	24	47	2023.0638
agent-based models	3	2	2	5	2024.4
agent-based simulation	2	11	16	27	2023.2593

agriculture	4	7	10	6	2023.6667
artificial intelligence	3	7	10	7	2023.4286
circular economy	2	7	9	6	2023.1667
climate change	5	4	8	5	2023.2
covid-19	1	5	5	5	2021.8
decision-making	5	9	15	8	2022875
e-commerce	1	7	8	5	2022.4
electric vehicle	2	4	4	5	2023.6
electric vehicles	8	4	5	6	2023.1667
energy transition	7	3	7	9	2024
life cycle assessment	2	7	8	8	2023375
matsim	6	7	9	12	2023.4167
optimization	5	5	6	5	2023.2
renewable energy	7	5	10	6	2023.3333
simulation	1	14	24	23	2023.0435
social-ecological systems	4	3	4	5	2024
socio-hydrology	4	6	9	6	2023.3333
supply chain	1	7	9	5	2023.2
sustainability	3	19	42	33	2023.3636
sustainable development	2	6	11	10	2023
system dynamics	8	7	11	8	2023.25
traffic simulation	6	2	3	5	2023.2
urban mobility	3	4	5	5	2023.6

A Tabela (2) mostra 33 termos distribuídos em 8 agrupamentos. Observa-se que a palavra-chave *agent-based modeling* possui 69 ocorrências e força total 48 (quantas vezes cada coocorrência ocorreu ao longo de todos os artigos) e o termo *agent-based model*, com força total 32 e número de ocorrências igual a 61. Salienta-se que há mais variações desses termos, como *abm*, *agent based modeling*, *agent-based*, *agent-based model (abm)*, *agent-based modeling (abm)*, *agent-based modelling*, *agent-based models* e *agent-based simulation*, reforçando a predominância do termo e o consolidando como principal eixo temático, por ser um dos focos das palavras-chave de busca na base de dados. São observadas aplicações recorrentes em áreas como sustentabilidade, cadeia de suprimentos, energia renovável e mobilidade urbana.

A estrutura do gráfico e os dados da Tab. (2) revelam a presença de oito *clusters* principais, cada qual representando subtemas distintos, porém inter-relacionados. Cada *cluster* mostra um agrupamento de palavras-chave com forte ligação entre si, sugerindo campos de aplicação e áreas de pesquisa correlacionadas.

Cluster 1

Este *cluster* é composto por termos como *covid-19*, *e-commerce* e *supply chain*. Trata-se de um grupo voltado a aplicações práticas e recentes de ABM, especialmente em respostas a eventos em sistemas logísticos complexos. A presença do termo *covid-19* indica o uso da modelagem baseada em agentes para simular a disseminação da pandemia e seus impactos econômicos, enquanto *supply chain* e *e-commerce* sugerem sua aplicação no redesenho de cadeias de suprimentos e comércio *online* em contextos de crise.

Cluster 2

Engloba termos como *energy transition*, *renewable energy*, *agent based modeling*, e *sustainable development*. Este *cluster* evidencia o crescimento das pesquisas que conectam ABM à transição para fontes de energia limpa. Os estudos nesse grupo destacam a modelagem como ferramenta para entender dinâmicas de adoção tecnológica, comportamento de usuários e planejamento energético sustentável, sendo relevante para formulação de políticas públicas no setor energético.

Cluster 3

Formado por termos como *agent-based simulation*, *circular economy*, e *system dynamics*. Este grupo explora a integração entre abordagens baseadas em agentes e dinâmicas de sistemas, com foco em modelagens sustentáveis e complexas. A presença da economia circular sugere investigações sobre ciclos produtivos fechados, logística reversa e reaproveitamento de recursos, utilizando ABM para simular interações entre agentes econômicos, consumidores e infraestrutura.

Cluster 4

Este *cluster* inclui termos como *traffic simulation*, *MATSim*, e *agent-based model (ABM)*, concentrando-se nas aplicações da ABM no campo da mobilidade urbana. O destaque para o software MATSim indica a popularidade desta plataforma em simulações de tráfego urbano e planejamento de transporte, permitindo avaliar desde políticas públicas de mobilidade até comportamento individual de usuários em sistemas de transporte.

Cluster 5

Composto por palavras-chave como *climate change*, *agriculture*, *decision-making*, *socio-hydrology* e *social-ecological systems*, este *cluster* representa a interface entre ABM e as ciências ambientais e sociais. Os estudos desse grupo abordam a modelagem de sistemas sócio-ecológicos complexos, incluindo interações entre uso da terra, comportamento humano e clima. O termo *decision-making* ressalta o uso da ABM como abordagem para apoio à decisão em cenários de incerteza ambiental.

Cluster 6

Apesar da semelhança com o *cluster 4*, este grupo se distingue por sua composição mais técnica, envolvendo os termos *matSim*, *traffic simulation* e *agent-based model (abm)*. Isso indica um subgrupo de publicações voltado à modelagem de transporte e infraestrutura urbana, com ênfase em simulações computacionais de grande escala.

Cluster 7

Esse *cluster* apresenta termos como *sustainability*, *optimization*, *renewable energy* e *energy transition*. Isso demonstra como a ABM tem sido empregada para avaliar políticas de sustentabilidade em contextos energéticos. O uso do termo *optimization* sugere uma crescente integração entre ABM e técnicas quantitativas para maximização de eficiência em sistemas sustentáveis.

Cluster 8

Por fim, este cluster inclui termos como *electric vehicles*, *electric vehicle*, *system dynamics* e *agent-based modelling*, focando em tecnologias emergentes, como a adoção de veículos elétricos e suas interações com infraestrutura urbana e dinâmica do consumidor. A presença de *system dynamics* reforça o caráter interdisciplinar desse *cluster*, unindo abordagens qualitativas e quantitativas para entender a adoção de novas tecnologias.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo atingiu o objetivo proposto de identificar as relações entre autores, principais temas investigados e tendências emergentes na literatura com foco de aplicação da Modelagem Baseada em Agentes (ABM) no contexto da sustentabilidade. A análise bibliométrica, aliada a visualização de redes de coautoria e de ocorrência de termos, permitiu compreender a dinâmica de produção científica e os principais focos de pesquisa na área, evidenciando a relevância da ABM como abordagem para investigar sistemas socioambientais complexos.

Entre os resultados mais relevantes, destaca-se a centralidade do termo *agent-based model* e suas variações. Verificou-se que a ABM tem sido empregada em estudos sobre mobilidade urbana, transição energética, cadeias de suprimentos, economia circular e sistemas socioecológicos. A análise dos *clusters* de coautoria revelou três grupos principais: um voltado à otimização de sistemas de transporte sustentável, outro focado na gestão de demanda energética e adoção de tecnologias verdes, e um terceiro dedicado à infraestrutura urbana inteligente e resiliente. Esses achados demonstram o potencial da ABM para apoiar a tomada de decisão em contextos de alta complexidade e incerteza, fornecendo subsídios para políticas públicas e estratégias empresariais.

Do ponto de vista acadêmico, este trabalho contribui ao sistematizar a produção científica sobre ABM aplicada à sustentabilidade, destacando lacunas de pesquisa e oportunidades de investigação. Em termos práticos, os resultados oferecem possíveis *insights* para gestores, planejadores urbanos e formuladores de políticas, apontando indícios de como a ABM pode ser utilizada em estudos para orientar estratégias de mobilidade, planejamento urbano, adoção de tecnologias sustentáveis e gestão de sistemas socioecológicos, promovendo impactos positivos em termos de eficiência, equidade e redução de impactos ambientais.

Como perspectivas para pesquisas futuras, recomenda-se a ampliação de estudos nacionais sobre ABM e sustentabilidade, o desenvolvimento de modelos híbridos que integrem ABM com *system dynamics* e técnicas de aprendizado de máquina, bem como a incorporação de dados empíricos mais robustos para validação de modelos. Ademais, sugere-se investigar a aplicação da ABM em novos contextos tecnológicos, governança participativa e avaliação de políticas ambientais de longo prazo, aprofundando a compreensão das interações entre agentes individuais, coletivos e seus ambientes.

6. REFERÊNCIAS

BRYMAN, A. *Research methods and organization studies*. London: Uniwin Hyman, 1989.

CARVALHO, M. C. M. *Construindo o saber*. 2.ed. Campinas, SP: Papirus, 2000.

CRESWELL, J. W. *Research design: qualitative & quantitative approaches*. London: Sage, 1994.

DONTHU, N.; KUMAR, S.; MUKHERJEE, D.; PANDEY, N.; LIM, W. M. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, v. 133, p. 285–296, 2021. DOI: 10.1016/j.jbusres.2021.04.070. Acesso em: 22 mai. 2025.

ELKAMEL, M. et al. Multi-agent modeling for linking a green transportation system with an urban agriculture network in a food-energy-water nexus. *Sustainable Cities and Society*, [s.l.], v. 89, p. 104354, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104354>. Acesso em: 12 set. 2025.

LI, W.; YI, P.; ZHANG, D. Investigation of sustainability and key factors of Shenyang city in China using GRA and SRA methods. *Sustainable Cities and Society*, [s.l.], v. 68, p. 102796, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102796>. Acesso em: 12 set. 2025.

MAGLIOCCA, N. R. Agent-based modeling for integrating human behavior into the food–energy–water nexus. *Land*, Basel, v. 9, n. 12, p. 519, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land9120519>. Acesso em: 12 set. 2025.

NUGROHO, S.; UEHARA, T. Systematic review of agent-based and system dynamics models for social-ecological system case studies. *Systems*, Basel, v. 11, n. 11, p. 530, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/systems11110530>. Acesso em: 12 set. 2025.

ÖZTÜRK, O.; KOCAMAN, R.; KANBACH, D. K. How to design bibliometric research: an overview and a framework proposal. *Review of Managerial Science*, v. 18, p. 3333–3361, 2024. DOI: 10.1007/s11846-024-00738-0. Acesso em: 22 mai. 2025.

QIU, R.; HOU, S.; MENG, Z. Low carbon air transport development trends and policy implications based on a scientometrics-based data analysis system. *Transport Policy*, [s.l.], v. 107, p. 1-10, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.04.013>. Acesso em: 12 set. 2025.

RAVAIOLI, G.; DOMINGOS, T.; TEIXEIRA, R. F. M. A framework for data-driven agent-based modelling of agricultural land use. *Land*, Basel, v. 12, n. 4, p. 756, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land12040756>. Acesso em: 12 set. 2025.

RIBEIRO-RODRIGUES, E.; BORTOLETO, A. P. A systematic review of agent-based modeling and simulation applications for analyzing pro-environmental behaviors. *Sustainable Production and Consumption*, [s.l.], v. 47, p. 343-362, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.04.017>. Acesso em: 12 set. 2025.

SAVIN, I et al. Agent-based modeling to integrate elements from different disciplines for ambitious climate policy. *WIREs Climate Change*, [s.l.], v. 14, n. 2, p. e811, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wcc.811>. Acesso em: 13 set. 2025.

SECCHI, D. et al. Modeling and theorizing with agent-based sustainable development. *Environmental Modelling & Software*, [s.l.], v. 171, p. 105891, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105891>. Acesso em: 13 set. 2025.

SOCCI, V.; VITANZA, E.; MOCENNI, C. An agent-based model to foster citizens' sustainable behavior in the Italian city of Siena. *The European Physical Journal B*, [s.l.], v. 98, n. 4, p. 72, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1140/epjb/s10051-025-00910-9>. Acesso em: 13 set. 2025.

TIAN, S. et al. An agent-based modeling approach combined with deep learning method in simulating household energy consumption. *Journal of Building Engineering*, [s.l.], v. 43, p. 103210, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103210>. Acesso em: 13 set. 2025.

VERHAGEN, H.; ELSENBROICH, C.; WIJERMANS, N. Agent decision-making heterogeneity — agent (meta)frameworks for agent-based modelling. In: ELSENBROICH, C.; VERHAGEN, H. (ed.). *Advances in social simulation*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 621-630. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-57785-7_48. Acesso em: 13 set. 2025.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.