

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA) E BLOCKCHAIN INOVANDO EM PROCESSOS DE SUSTENTABILIDADE

1 INTRODUÇÃO

O crescimento do uso de Inteligência Artificial (IA) e de *blockchain* tem revelado um potencial transformador para práticas sustentáveis. Ambos permitem inovar de forma exponencial: a IA pode otimizar processos, enquanto a *blockchain* garante transparência, rastreabilidade e segurança nas cadeias de suprimentos e em outros processos sustentáveis. Nesse sentido, são diversas as possibilidades de uso de IA atrelado ao uso de *blockchain*, objetivando ganhos em termos de sustentabilidade, especialmente nas dimensões econômica, social e ambiental.

Como exemplo pode-se citar *smart city*, um dos temas da sustentabilidade em que a combinação da IA e da *blockchain* pode oferecer o desenvolvimento de tecnologias menos poluentes e mitigar impactos negativos nas cidades. Sharma *et al.* (2021) propuseram um esquema que possibilita essa melhoria facilitando ao usuário a adoção e uso das várias aplicações utilizadas para as *smart cities*.

Em outro estudo, Moorthy *et al.* (2022) analisaram maneiras de se utilizar IA e *blockchain* para se obter uma cadeia de suprimentos e questões de logística mais sustentáveis. Mascarenhas *et al.* (2023) analisaram a implementação da IA para a redução da pegada do carbono na área da saúde, em particular, no departamento de gastroenterologia, por exemplo, na endoscopia por cápsula, além de indicarem como a tecnologia *blockchain* pode contribuir para a sustentabilidade nessa especialidade clínica.

Diante da diversidade de aplicações surgindo em várias áreas da ciência, justifica-se a necessidade deste estudo, que objetiva investigar como a IA e a *blockchain* podem impulsionar o desenvolvimento sustentável, permitindo avanços em relação aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS da Organização das Nações Unidas - ONU (ONU BRASIL, 2015). Esta pesquisa visa explorar a literatura acadêmica por meio de estudo bibliométrico e de análise de conteúdo dos *abstracts* e dos principais artigos científicos, a relação entre os temas IA e *blockchain* e sua contribuição para a questão da sustentabilidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A IA é uma tecnologia avançada capaz de analisar grandes volumes de dados e tomar decisões automatizadas. Está cada vez mais presente em praticamente todas as áreas da ciência e tecnologia (Almeida; Nas, 2024). Sua aplicação em sustentabilidade inclui otimização de recursos, previsão de demandas e melhoria na eficiência energética. Lampropoulos (2024) realizou pesquisa que envolveu a análise de 1.041 documentos científicos no período entre 2015 e 2022. Concluiu que a tecnologia *blockchain* é essencial na segurança das *smart grids* (redes inteligentes de energia).

Blockchain, por sua vez, é um sistema descentralizado que registra transações de forma segura e transparente, essencial para rastreamento de materiais e certificação de práticas sustentáveis (De Villiers *et al.*, 2021; Parmentola *et al.*, 2022). Tem sido utilizado para apoiar processos em prol da sustentabilidade, como por exemplo registrar a cadeia de resíduos orgânicos desde a coleta até a compostagem, permitindo ganho financeiro para os entes participantes dessa cadeia, uma vez que esse processo pode gerar créditos de carbono. O mercado internacional apoia-se nessa tecnologia para ter segurança no rastreamento de alimentos (Charles; Emrouznejad; Gherman, 2023), como por exemplo do café (plantio, agrotóxicos, colheita, transporte, industrialização) e da carne (cuidados com o gado, vacinas, hormônios, criação, abate, transporte, industrialização).

Chrysiopoulos *et al.* (2024) realizaram uma análise bibliométrica de artigos científicos com tema dos certificados verdes que resultou em 940 documentos no período de 2000 a 2022. A pesquisa resultou em um entendimento a respeito das energias renováveis, mecanismos de apoio e o potencial transformador das tecnologias habilitadoras recentes, como a inteligência artificial e *blockchain* que surgem no contexto dos certificados verdes. Os autores enfatizam que as tecnologias da inteligência artificial e da *blockchain* são importantes para remodelar o setor de energia e também do comércio dos certificados verdes.

3 METODOLOGIA

Este estudo exploratório (Creswell, 2014) utiliza uma análise bibliométrica e textual para investigar sobre a intersecção entre IA, *blockchain* e sustentabilidade. Utilizou-se para a busca os termos: *Sustainability AND Blockchain AND "Artificial Intelligence"*. A pesquisa foi realizada nas bases *Web of Science e Scopus*, resultando em 564 artigos com foco em publicações entre 2022 e 2024. A busca foi realizada a partir dos títulos, resumos e palavras-chave.

Foram critérios de inclusão: artigos, artigos de revisão, publicados na língua inglesa e *Open Access*. Registre-se que 90 artigos foram excluídos por estarem repetidos em ambas as bases de dados, restando 225 textos para a análise. Utilizou-se a linguagem de programação R e os *softwares Bibliometrix e Iramuteq* para a análise de dados, permitindo melhor exploração e compreensão dos dados obtidos, os quais foram analisados à luz das publicações encontradas.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

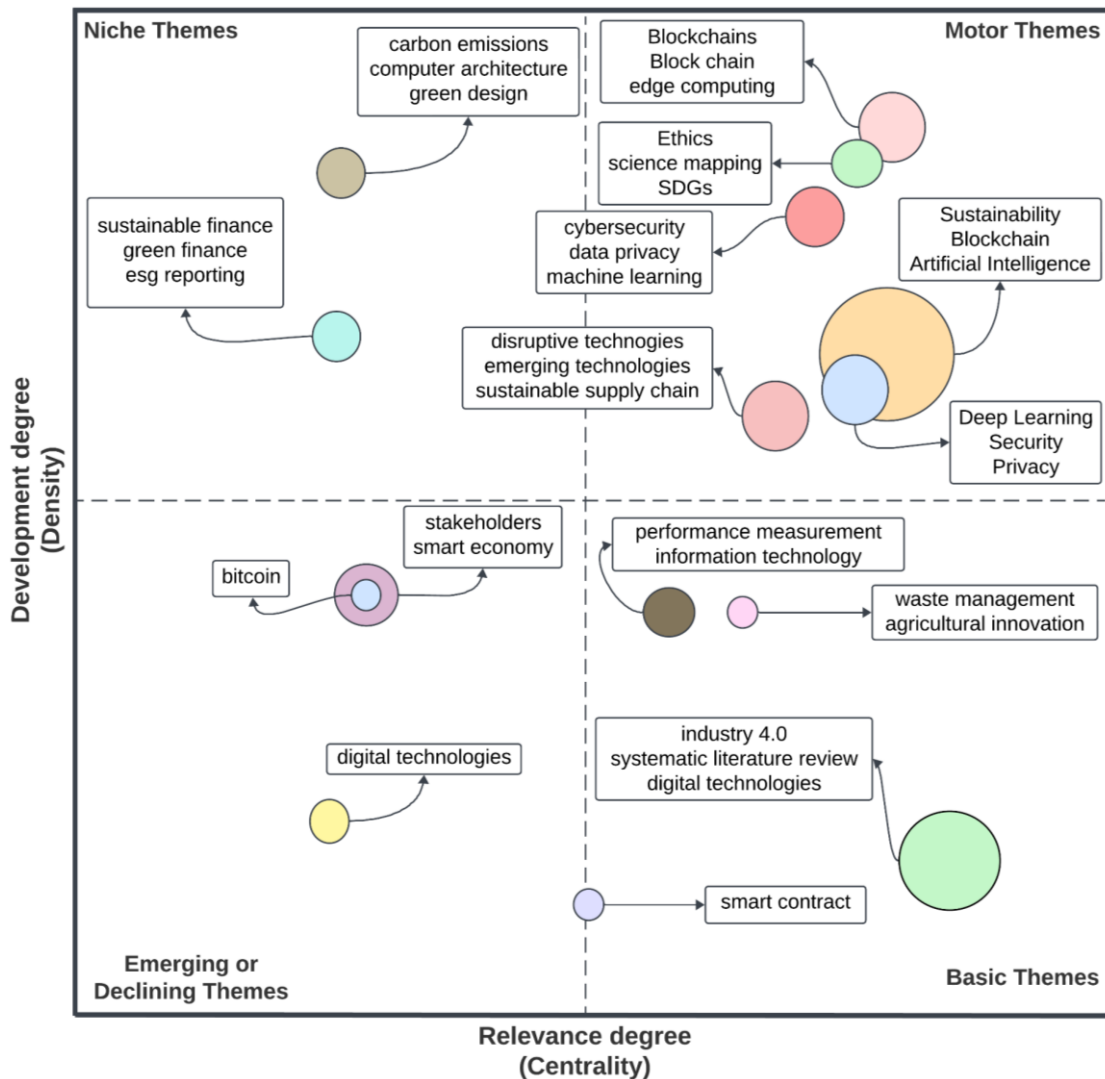
A análise revelou 225 artigos relevantes, publicados em 146 periódicos, evidenciando Índia, China e França como líderes em publicações nessa intersecção dos descritores supracitados. Foram encontrados 799 autores envolvidos com essas publicações e chama a atenção o fato de 19 textos terem sido escritos por apenas um único autor. Observou-se destaque de publicações (40 artigos) de autores ligados à universidade indiana Utarranchal.

A IA é frequentemente aplicada para inovar e melhorar a eficiência das cadeias de suprimentos, enquanto a *blockchain* assegura a rastreabilidade e a transparência dos processos (Delgado, 2022b). Temas emergentes incluem a utilização da IA para monitorar emissões de CO₂ e a implementação de sistemas de Economia Circular (Parmentola *et al.*, 2022). A análise também destacou desafios, como o alto consumo energético da *blockchain* e a necessidade de regulamentação (Parmentola *et al.*, 2022).

Com a utilização do *software Bibliometrix* o mapa temático foi gerado com base em todas as palavras-chave utilizadas pelos autores dos artigos selecionados e representa a estrutura de conhecimento de uma pesquisa de determinada área. Dessa forma, a Figura 1 apresenta quatro quadrantes separados por diferentes temas, de acordo com sua força em relação aos demais (centralidade - eixo horizontal) e sua força dentro de algum tema específico (densidade - eixo vertical). Em relação aos temas, no quadrante superior direito estão os temas-motores, enquanto no quadrante inferior estão os temas básicos. Os temas do quadrante superior direito são bem desenvolvidos e importantes para a estruturação de um campo de pesquisa.

No quadrante inferior esquerdo estão os temas emergentes ou temas que estão desaparecendo na literatura, com ligações fracas tanto interna quanto externamente, e no quadrante superior esquerdo estão os temas de nichos que apresentam ligações internas bem desenvolvidas e ligações externas sem importância. As palavras-chave no quadrante inferior direito representam temas que são importantes para um campo de pesquisa, mas ainda não estão desenvolvidos e que podem ser temas gerais ou básicos (Cobo, 2011).

Figura 1 - Mapa temático das palavras-chave



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados do *software* Bibliometrix.

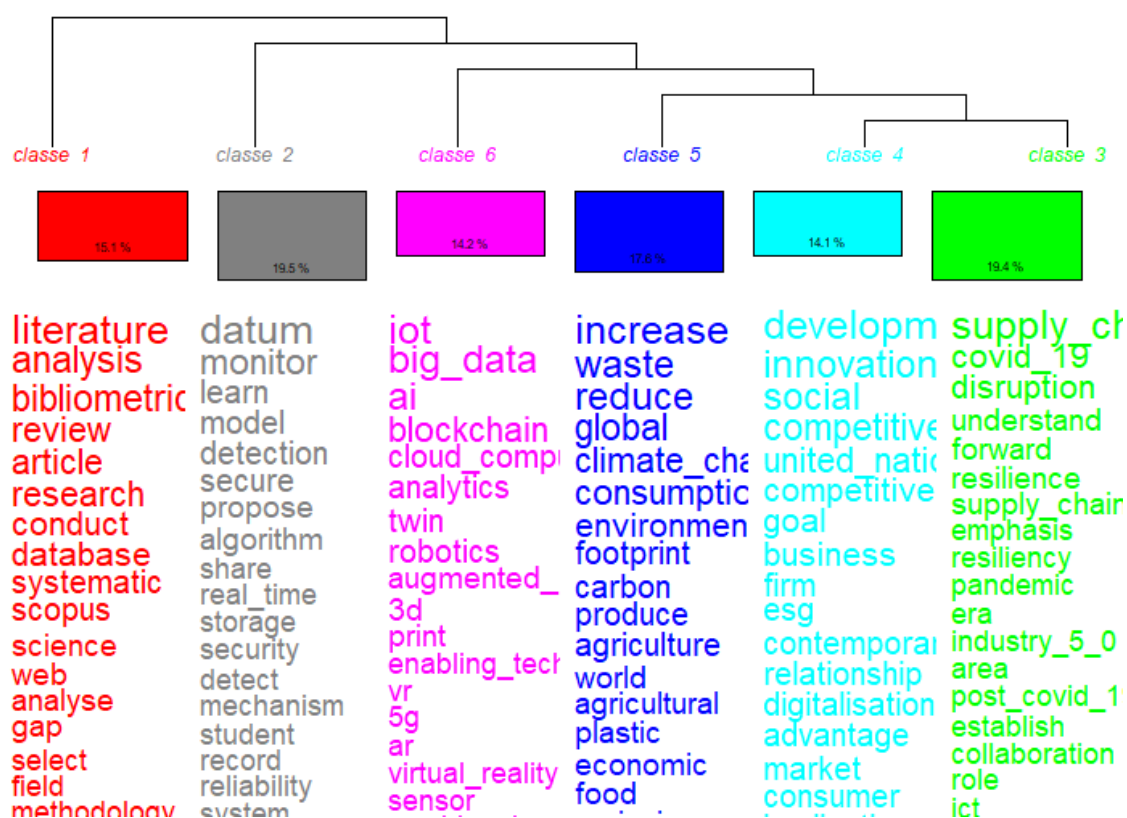
Dentro do quadrante dos temas de nicho, notam-se palavras em artigos publicados entre 2023 e 2024 como “emissões de carbono”, “arquitetura de computadores”, “design verde” e “finanças verdes”. Enquanto a palavra “finanças sustentáveis” aparece em 2022, 2023 e 2024, por sua vez “relatórios esg” aparece somente em publicações de 2023. Em relação aos temas emergentes, nota-se que os temas não estão declinando, pois aparecem em publicações de 2023 e 2024.

No quadrante dos temas motores, diversos temas surgem, em especial as tecnologias mencionadas no objetivo deste trabalho, *blockchain*, por exemplo, aparece com escritas distintas representadas nos artigos por “*Blockchains*” (2023 e 2024), “*Block chain*” (2023 e 2024) e “*blockchain*” (2022, 2023 e 2024), assim como também destacam-se os termos AI, sustentabilidade, segurança, *machine learning* e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) também em todos os anos analisados, enquanto os demais termos aparecem entre os anos de 2023 e 2024 como computação de borda, ética, cibersegurança, tecnologias disruptivas, tecnologias emergentes. Por sua vez, os temas básicos abordam técnicas utilizadas nos artigos que aparecem em todos os anos ou a base dessas tecnologias como “indústria 4.0”. Temas mais específicos também são notados em anos distintos, como “medição de desempenho”,

“tecnologia da informação”, “tecnologias digitais”, ambos em 2023 e 2024, enquanto em 2022 e 2024 os temas “gestão de resíduos” e “contrato inteligente” são pesquisados. A conclusão dessa análise é que os temas IA, *blockchain* e sustentabilidade estão em destaque e devem motivar, como temas-motores, mais publicações.

Para a análise do resumo dos artigos, o *software Iramuteq* foi utilizado, o conjunto de todos os 225 resumos foi segmentado e 1.296 segmentos de texto (89,19%) foram classificados em alguma das classes sugeridas no dendograma gerado a partir da Classificação Hierárquica Descendente (CHD), presente na Figura 2.

Figura 2 - Classificação Hierárquica Descendente dos resumos selecionados



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados do software Iramuteq.

De acordo com o *output* do *software*, o tema foi desmembrado em 6 (seis) classes diferentes. Na Classe 1 (Vermelha) apresenta palavras como “literatura”, “análise”, “bibliométrico”, “revisão”, e pode ser denominada como a classe que apresenta os métodos de pesquisa utilizados nos artigos. A Classe 2 (Cinza) apresenta palavras como “dado”, “aprender”, “monitorar”, “modelo”, apresentando técnicas de IA ou a forma de uso desses algoritmos. A Classe 6 (Lilás) trata de 2 (dois) dos temas centrais deste estudo, apresentando palavras como “internet das coisas”, “*big data*”, “inteligência artificial”, “*blockchain*”, enfatizando as tecnologias citadas e utilizadas nessa área. Na Classe 5 (Azul), algumas das palavras utilizadas são “aumentar”, “desperdício”, “reduzir”, “global”, representando a classe que trata das questões do meio ambiente em relação a agricultura, principalmente relacionadas às mudanças climáticas e a produção de comida, juntamente com a emissão de carbono gerada por esse setor. A Classe 4 (Ciano) apresenta palavras como “desenvolvimento”, “inovação”, “social”, “competitivo” e pode ser denominada como a classe voltada para os negócios e a competitividade agregada a transição e uso dessas tecnologias, especialmente aquelas que se relacionam com os objetivos das Nações Unidas. A Classe 3 (Verde) apresenta palavras como

“cadeia de suprimentos”, “covid 19”, “interrupção”, “entender” e pode ser denominada como a classe voltada para as questões regulatórias em relação à sustentabilidade e a adoção dessas tecnologias.

Em relação às aplicações de tecnologias com foco em sustentabilidade (Classe 6), verificou-se algumas aplicações em áreas diversas como o uso de drones com IA que permitem um monitoramento sobre a saúde da planta, além de auxiliar na aplicação de pesticidas. Ou no uso de drones para a área de logística permitindo controle de estoque, entrega de suprimentos e assistência médica permitindo realizar entrega de suprimentos ou controles de doenças. O mesmo ocorre com os veículos terrestres autônomos, com o uso de aprendizado de máquina e visão computacional podem oferecer soluções tão eficientes quanto as oferecidas pelo uso dos drones (Herich; Vaščák, 2024). Enquanto as soluções com *blockchain* oferecem eliminação de despesas com intermediários, oferecem maior transparência, *compliance* e rastreabilidade da origem do produto (Kashem *et al.*, 2023; Schöggel *et al.*, 2023). O uso de IA atrelada ao uso da *blockchain* pode auxiliar em problemas urbanos otimizando o tráfego nas cidades inteligentes, ao mesmo tempo que garante a imutabilidade dos dados (Jaramillo-Alcazar; Govea; Villegas-Ch, 2023). Dessa forma, fica evidenciada a ampla utilização das tecnologias exploradas para os mais diversos fins relacionados à sustentabilidade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo ressalta a importância inovativa da sinergia entre IA e *blockchain* para práticas sustentáveis, destacando a necessidade de regulamentação robusta e treinamento adequado para maximizar os benefícios econômicos, ambientais, sociais e de governança, a fim de reduzir custos e mitigar riscos, o que de alguma forma se relaciona também com certificações verdes. A pesquisa trouxe achados bastante interessantes e inovadores, por isso contribui ao oferecer um mapeamento claro das preocupações atuais globais com a emergência em sustentabilidade, haja vista as graves alterações climáticas em curso, apresenta diversas possibilidades nesse sentido e orienta futuras pesquisas e políticas relacionadas ao assunto, podendo ser útil para gestores públicos e privados. Considerando-se o surgimento de outros termos e outras tecnologias associadas a IA e *blockchain* na pesquisa realizada, sugere-se para estudos futuros a inclusão de IoT, Indústria 4.0 e *Big data*, dentre outras possibilidades de alavancagem da sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, V.; NAS, E. Desafios da IA responsável na pesquisa científica. **Revista USP São Paulo**, n. 141, p. 17-28, 2024.

CHARLES, V.; EMROUZNEJAD, A.; GHERMAN, T. A critical analysis of the integration of blockchain and artificial intelligence for supply chain. **Annals of Operations Research**, v. 327, p. 7–47, 2023. DOI: 10.1007/s10479-023-05169-w.

CHRYSIKOPOULOS, S. K.; CHOUNTALAS, P. T.; GEORGAKELLOS, D. A.; LAGODIMOS, A. G. Green certificates research: bibliometric assessment of current state and future directions. **Sustainability**, v. 16, n. 3, p. 1129, 2024. DOI: 10.3390/su16031129.

COBO, M.J. et al An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field, **Journal of Informetrics**. v. 5 n. 1 2011. p. 146-166, <https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.10.002>.

CRESWELL, J. W. **Investigação qualitativa e projeto de pesquisa**: escolhendo entre cinco abordagens. Porto Alegre: Penso, 2014.

HERICH, D.; VAŠČÁK, J. The Evolution of Intelligent Transportation Systems: Analyzing the Differences and Similarities between IoV and IoFV. **Drones**, v. 8, p. 34, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones8020034>.

JARAMILLO-ALCAZAR, A.; GOVEA, J.; VILLEGAS-CH, W. Advances in the optimization of vehicular traffic in smart cities: integration of blockchain and computer vision for sustainable mobility. **Sustainability**, v. 15, p. 15736, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152215736>.

KASHEM, M. A.; SHAMSUDDOHA, M.; NASIR, T.; CHOWDHURY, A. A. The role of artificial intelligence and blockchain technologies in sustainable tourism in the Middle East. **Worldwide Hospitality and Tourism Themes**, v. 15, n. 2, p. 178-191, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1108/WHATT-10-2022-0116>.

LAMPROPOULOS, G. Blockchain in smart grids: a bibliometric analysis and scientific mapping study. **Multidisciplinary Scientific Journal**, v. 7, p. 19–47, 2024. DOI: [10.3390/j7010002](https://doi.org/10.3390/j7010002).

MASCARENHAS, M.; RIBEIRO, T.; AFONSO, J.; MENDES, F.; CARDOSO, P.; MARTINS, M.; FERREIRA, J.; MACEDO, G. Smart endoscopy is greener endoscopy: leveraging artificial intelligence and blockchain technologies to drive sustainability in digestive health care. **Diagnostics**, v. 13, p. 3625, 2023. DOI: [10.3390/diagnostics13243625](https://doi.org/10.3390/diagnostics13243625).

ONU BRASIL. Organização das Nações Unidas no Brasil. **Transformando nosso mundo**: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acesso em: 30 jul. 2024.

MOORTHY, S.; B, S.; N, K.; R, N. R.; R, C. M. R. Blockchain and Artificial Intelligence Feasibility, Implementation and Sustainability in Supply Chain. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMPUTING AND COMMUNICATION SYSTEMS (ICACCS), 8., 2022, Coimbatore, India. **Anais [...]**. Coimbatore: IEEE, 2022. p. 2112-2116. DOI: [10.1109/ICACCS54159.2022.9785273](https://doi.org/10.1109/ICACCS54159.2022.9785273).

SCHÖGGL, J.-P.; RUSCH, M.; STUMPF, L.; BAUMGARTNER, R. J. Implementation of digital technologies for a circular economy and sustainability management in the manufacturing sector. **Sustainable Production and Consumption**, v. 35, p. 401-420, 2023.. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.11.012>.

SHARMA, A.; PODOPLELOVA, E.; SHAPOVALOV, G.; TSELYKH, A. Sustainable smart cities: convergence of artificial intelligence and blockchain. **Sustainability**, v. 13, n. 23, p. 13076, 2021. DOI: [10.3390/su132313076](https://doi.org/10.3390/su132313076).