

**PLATAFORMAS DIGITAIS COMO VETORES ESTRUTURANTES DA ECONOMIA CIRCULAR: RASTREABILIDADE, GOVERNANÇA E IMPACTO SOCIOAMBIENTAL EM UM ESTUDO DE CASO BRASILEIRO**

**DIGITAL PLATFORMS AS STRUCTURING VECTORS OF THE CIRCULAR ECONOMY: TRACEABILITY, GOVERNANCE, AND SOCIO-ENVIRONMENTAL IMPACT IN A BRAZILIAN CASE STUDY**

**PLATAFORMAS DIGITALES COMO VECTORES ESTRUCTURANTES DE LA ECONOMÍA CIRCULAR: TRAZABILIDAD, GOBERNANZA E IMPACTO SOCIOAMBIENTAL EN UN ESTUDIO DE CASO BRASILEÑO**

 <https://doi.org/10.56238/arev7n12-152>

**Data de submissão:** 14/11/2025

**Data de publicação:** 14/12/2025

**Fernando Rodrigo de Souza**

Especialização em Engenharia da Qualidade Integrada e Lean Manufacturing, com formação em Engenharia de Produção, Tecnologia em Polímeros, Logística, Gestão Empresarial e Gestão da Qualidade

Instituição: Faculdade de Tecnologia de Sorocaba

E-mail: fernandorodrigosouza4@gmail.com

---

**RESUMO**

Este estudo investiga como uma plataforma digital de rastreabilidade contribui para fortalecer a governança sustentável em cadeias circulares, articulando tecnologia, impacto socioambiental e reconfigurações institucionais. A pesquisa responde à lacuna existente na literatura sobre o papel operacional e institucional de soluções digitais na qualificação dos fluxos reversos, especialmente em contextos de elevada heterogeneidade organizacional. Para alcançar esse objetivo, adotou-se uma abordagem qualitativa, com delineamento descritivo e exploratório, estruturada por meio de um estudo de caso único. A coleta de evidências combinou revisão bibliográfica sistemática, análise documental, entrevistas com atores-chave e observação indireta das funcionalidades da plataforma, permitindo triangulação metodológica rigorosa. Os resultados demonstram expansão operacional significativa, expressa em mais de 230 mil toneladas de resíduos compensados e cerca de 750 mil toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente evitadas desde o início da operação. A rede de cooperativas mobilizada alcançou 60 organizações, com crescimento de 87,5% em relação ao ciclo anterior, enquanto investimentos socioestruturais somaram R\$ 30 milhões. Programas setoriais registraram reciclagem de 11.384 toneladas de embalagens plásticas, equivalentes a 759 caminhões de coleta, além de taxas de reciclagem superiores a 93% em iniciativas corporativas específicas. Apesar dos avanços, identificaram-se instabilidades metodológicas relacionadas aos critérios de equivalência ambiental e às massas certificadas, o que limita a comparabilidade longitudinal e demanda padronização de procedimentos. Conclui-se que a plataforma atua como vetor estruturante da economia circular, ampliando transparência, rastreabilidade e eficiência sistêmica. Entretanto, sua plena consolidação requer aprimoramento metodológico, governança colaborativa e alinhamento contínuo a políticas públicas.

**Palavras-chave:** Economia Circular. Rastreabilidade Digital. Governança. Logística Reversa. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

This study examines how a digital traceability platform strengthens sustainable governance within circular economy chains by integrating technological capabilities, socio-environmental impacts, and institutional restructuring. The research addresses a persistent gap in the literature regarding the operational and institutional contributions of digital platforms to the qualification of reverse flows, particularly in contexts characterized by organizational heterogeneity. To pursue this objective, a qualitative approach with a descriptive and exploratory design was adopted, grounded in a single-case study. Data collection combined a systematic literature review, documentary analysis, semi-structured interviews with key actors, and indirect observation of platform functionalities, enabling rigorous methodological triangulation. The findings reveal significant operational expansion, with more than 230,000 tons of waste compensated and approximately 750,000 tons of CO<sub>2</sub> equivalent avoided since the beginning of the system's operation. The network of base organizations reached 60 cooperatives, representing an 87.5% increase from the previous cycle, while social and operational investments totaled R\$ 30 million. Sectoral programs certified the recycling of 11,384 tons of plastic packaging, equivalent to 759 collection trucks, and achieved recycling rates above 93% in specific corporate initiatives. Despite these advances, methodological inconsistencies were identified, particularly regarding environmental equivalence parameters and certified mass calculations, which constrain longitudinal comparability and underscore the need for standardized and auditable procedures. Overall, the platform functions as a structuring vector of the circular economy, enhancing transparency, traceability, and systemic efficiency. However, its full consolidation depends on methodological refinement, collaborative governance, and continuous alignment with public policy frameworks.

**Keywords:** Circular Economy. Digital Traceability. Governance. Reverse Logistics. Sustainability.

## RESUMEN

Este estudio investiga cómo una plataforma de trazabilidad digital contribuye a fortalecer la gobernanza sostenible en cadenas de suministro circulares, articulando la tecnología, el impacto socioambiental y las reconfiguraciones institucionales. La investigación aborda la brecha existente en la literatura sobre el rol operativo e institucional de las soluciones digitales en la mejora de la logística inversa, especialmente en contextos de alta heterogeneidad organizacional. Para lograr este objetivo, se adoptó un enfoque cualitativo, con un diseño descriptivo y exploratorio, estructurado a través de un estudio de caso único. La recopilación de evidencia combinó la revisión sistemática de la literatura, el análisis de documentos, las entrevistas con actores clave y la observación indirecta de las funcionalidades de la plataforma, lo que permitió una rigurosa triangulación metodológica. Los resultados demuestran una importante expansión operativa, expresada en más de 230.000 toneladas de residuos compensados y aproximadamente 750.000 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente evitadas desde el inicio de las operaciones. La red de cooperativas movilizadas alcanzó las 60 organizaciones, con un crecimiento del 87,5% en comparación con el ciclo anterior, mientras que las inversiones socioestructurales totalizaron R\$ 30 millones. Los programas sectoriales registraron el reciclaje de 11.384 toneladas de envases plásticos, equivalentes a 759 camiones de recolección, además de tasas de reciclaje superiores al 93% en iniciativas corporativas específicas. A pesar del progreso, se identificaron inestabilidades metodológicas relacionadas con los criterios de equivalencia ambiental y las masas certificadas, lo que limita la comparabilidad longitudinal y exige la estandarización de los procedimientos. Se concluye que la plataforma actúa como un vector estructurante de la economía circular, ampliando la transparencia, la trazabilidad y la eficiencia sistémica. Sin embargo, su plena consolidación requiere mejoras metodológicas, gobernanza colaborativa y una alineación continua con las políticas públicas.

**Palabras clave:** Economía Circular. Trazabilidad Digital. Gobernanza. Logística Inversa. Sostenibilidad.

## 1 INTRODUÇÃO

A consolidação das *cleantechs* como elementos estruturantes da economia circular decorre de transformações profundas que redefinem os modos pelos quais informações, materiais e decisões circulam entre os agentes econômicos. A literatura demonstra de forma consistente que a transição para modelos sustentáveis depende da articulação entre tecnologias digitais, inovação ambiental e rearranjos institucionais, conformando um cenário em que essas empresas assumem relevância estratégica. As formulações clássicas de Porter & Van Der Linde (1995) estabeleceram fundamentos teóricos decisivos para compreender a interdependência entre inovação ambiental e competitividade, ao passo que análises posteriores, como as de Pernick & Wilder (2007) e Caprotti (2012), evidenciaram que o avanço das *cleantechs* está intimamente associado tanto à intensificação das pressões climáticas quanto à aceleração tecnológica que redefine as dinâmicas produtivas contemporâneas. A esse panorama soma-se a advertência de Wuebbles (2017), cuja análise demonstra que a crescente gravidade dos impactos ambientais impõe a necessidade de soluções tecnológicas capazes de reduzir emissões, ampliar eficiência e mitigar vulnerabilidades sistêmicas, reforçando o papel das tecnologias orientadas à sustentabilidade como eixo estruturante das transições ecológicas.

Nesse quadro, a economia circular emerge como matriz conceitual cuja operacionalização depende de conectividade digital avançada, interoperabilidade contínua e rastreabilidade precisa em larga escala. Contribuições recentes demonstram que plataformas digitais possuem a capacidade de integrar recicadoras, geradores de resíduos e indústrias consumidoras de materiais secundários, formando redes colaborativas que reduzem incertezas e ampliam a previsibilidade operacional, conforme argumentado por Noronha (2022). Essa compreensão dialoga diretamente com o arcabouço das transições sociotécnicas formulado por Geels (2004), segundo o qual transformações sustentáveis resultam da interação dinâmica entre tecnologias, práticas sociais e arranjos institucionais. Nessa interseção, as *cleantechs* atuam como mediadoras estruturais, coordenando fluxos materiais e informacionais em ecossistemas complexos e crescentemente interdependentes.

A literatura contemporânea aprofunda esse diagnóstico ao demonstrar que capacidades digitais avançadas são determinantes para mitigar ineficiências estruturais das cadeias circulares. Evidências apresentadas por Duman Altan, Beyca & Zaim (2024), Romagnoli, Tarabu, Maleki Vishkaei & De Giovanni (2023) e Schögl, Rusch, Stumpf & Baumgartner (2023) mostram que tecnologias de rastreamento digital, automação, Internet das Coisas e análise intensiva de dados conferem estabilidade, previsibilidade e governança aos sistemas reversos. Resultados convergentes foram demonstrados por Liu, Song & Liu (2023) e Mishra, Rana & Dwivedi (2023), cujas análises confirmam que organizações com maiores níveis de maturidade digital alcançam desempenho

superior em sustentabilidade, circularização e controle operacional, reforçando o papel das soluções digitais como pilares do funcionamento eficiente das cadeias circulares.

Entretanto, desafios persistem. Dante (2024) aponta que a variabilidade dos materiais retornados compromete a previsibilidade dos fluxos, exigindo sistemas capazes de capturar e qualificar informações com precisão. Em linha semelhante, Blackburn, Ritala, Keränen & Bocken (2025) identificam que limitações de interoperabilidade, padronização e coordenação interorganizacional continuam dificultando a consolidação de plataformas circulares. Pesquisas de Ahmad, Ghadimi, Hargaden & Papakostas (2025) e Akbar & Awan (2024) reforçam que tecnologias emergentes, como *blockchain*, *IoT* e automação inteligente, são essenciais para superar essas barreiras e escalar modelos circulares de forma robusta.

Nesse cenário, tecnologias digitais desempenham papel decisivo ao ampliar visibilidade operacional, precisão analítica e capacidade de verificação independente dos fluxos materiais. Estudos de Dutta, Kumar & Yadav (2024) demonstram que sistemas integrados reduzem assimetrias informacionais, fortalecem auditorias e consolidam mecanismos de comprovação ambiental. Como apontam o *World Economic Forum & Ellen MacArthur Foundation* (2016) e Akbar & Awan (2024), plataformas *cleantech* especializadas em monitoramento digital de resíduos funcionam como infraestruturas sociotécnicas centrais para certificação, rastreamento e coordenação entre agentes.

Discussões paralelas sobre governança digital indicam que tais plataformas reforçam legitimidade institucional e qualidade decisória, como argumentado por Meijer & Bolívar (2016). Em setores industriais complexos, problemas associados à remanufatura e ao retorno de materiais permanecem desafios críticos, conforme demonstrado por Guide, Souza & Ketzenberg (2002); e evidências recentes apontam que tecnologias distribuídas permitem mitigar tais incertezas ao registrar a trajetória completa dos itens retornados, aumentando previsibilidade e confiança nos processos.

De modo complementar, debates sobre sustentabilidade reforçam a importância de mecanismos capazes de garantir verificabilidade, transparência e conformidade regulatória, fundamentos que sustentam o interesse crescente pela *blockchain* como infraestrutura de governança ambiental. A literatura identifica que contratos inteligentes contribuem para reduzir custos transacionais, padronizar procedimentos e aprimorar a coordenação interorganizacional, como mostram Saberi, Kouhizadeh, Sarkis & Shen (2019) e estudos recentes sobre automação contratual aplicados à circularidade.

Considerando esse conjunto de evidências, observa-se que as *cleantechs* desempenham papel decisivo não apenas como provedoras de tecnologias, mas como mediadoras sociotécnicas capazes de estruturar ecossistemas produtivos resilientes, informacionalmente robustos e ambientalmente

confiáveis. Sua atuação viabiliza fluxos auditáveis, permite a consolidação de práticas de governança e sustenta a adoção de modelos circulares em escala, reafirmando sua centralidade na transição para sistemas produtivos mais integrados, transparentes e alinhados às exigências contemporâneas de sustentabilidade.

## **2 CLEANTECHS COMO FACILITADORAS DE INTEGRAÇÃO SOCIOECONÔMICA NA ECONOMIA CIRCULAR**

A consolidação das *cleantechs* como agentes centrais da economia circular decorre de transformações estruturais que reconfiguram sistemas produtivos, práticas organizacionais e mecanismos de circulação de informações, materiais e decisões entre múltiplos atores. A literatura demonstra que a transição para modelos sustentáveis resulta da combinação entre tecnologias digitais, inovação ambiental e reorganização institucional, posicionando essas organizações no cerne das dinâmicas contemporâneas de circularidade. As formulações de Porter & Van Der Linde (1995) constituíram um marco teórico fundamental ao evidenciarem que a inovação ambiental pode atuar como motor de competitividade; posteriormente, análises de Pernick & Wilder (2007) e Caprotti (2012) aprofundaram essa discussão ao demonstrar que o surgimento e a expansão das *cleantechs* decorrem da adoção de soluções que promovem eficiência energética, uso responsável dos recursos naturais e reconfiguração dos processos produtivos em resposta às pressões climáticas e tecnológicas crescentes.

O agravamento da crise ambiental, como argumentado por Wuebbles (2017), intensifica a urgência por tecnologias capazes de reduzir emissões, elevar eficiência operacional e mitigar vulnerabilidades sistêmicas. Esse cenário ganha complexidade à medida que a economia circular se consolida como alternativa ao modelo linear, exigindo conectividade digital avançada, interoperabilidade contínua e rastreamento preciso em todas as etapas dos fluxos materiais. Contribuições como as de Noronha (2022) demonstram que plataformas digitais desempenham papel decisivo ao integrar recicadoras, indústrias consumidoras de materiais secundários e geradores de resíduos, constituindo redes colaborativas que reduzem incertezas e ampliam a robustez dos fluxos circulares.

A abordagem das transições sociotécnicas proposta por Geels (2004) permanece central para compreender o avanço dessas plataformas. Transformações sustentáveis emergem da interação entre tecnologias, práticas sociais, modelos organizacionais e marcos regulatórios. À luz dos desenvolvimentos recentes, se torna evidente que as *cleantechs* ocupam o ponto de convergência desses elementos, funcionando como infraestruturas operacionais capazes de articular fluxos

materiais, sistemas digitais e arranjos colaborativos de governança em ecossistemas cada vez mais complexos.

Estudos contemporâneos destacam que a consolidação de cadeias circulares depende de capacidades digitais maduras, particularmente no que se refere a rastreamento, automação, *Internet das Coisas* e análise avançada. Investigações como as de Duman Altan, Beyca & Zaim (2024), Romagnoli, Tarabu, Maleki Vishkaei & De Giovanni (2023) e Schögg, Rusch, Stumpf & Baumgartner (2023) demonstram que tais tecnologias aumentam estabilidade operacional, previsibilidade e eficiência dos sistemas reversos. Convergindo com esses achados, Liu, Song & Liu (2023) e Mishra, Rana & Dwivedi (2023) apresentam evidências de que organizações com maior maturidade digital alcançam desempenho superior em sustentabilidade, circularização e controle de processos.

Apesar dos avanços, subsistem limitações estruturais relacionadas à variabilidade dos materiais retornados e à falta de padronização nos fluxos informacionais, como discutido por Dante (2024). Revisões sistemáticas conduzidas por Blackburn, Ritala, Keränen & Bocken (2025) mostram que desafios persistem na interoperabilidade, na harmonização de dados e na coordenação interorganizacional, elementos críticos para a escalabilidade dos modelos circulares. Estudos recentes, como aqueles de Ahmad, Ghadimi, Hargaden & Papakostas (2025) e Akbar & Awan (2024), enfatizam que tecnologias emergentes, incluindo *blockchain*, *Internet das Coisas* e automação inteligente, constituem hoje pilares para superar tais entraves e viabilizar sistemas circulares confiáveis.

A combinação desses aportes evidencia que *cleantechs* reconfiguram não apenas a capacidade tecnológica das cadeias, mas também seus mecanismos de governança, atuando como mediadoras sociotécnicas que sustentam práticas de rastreamento, verificação, padronização e coordenação entre agentes. Entretanto, a consolidação plena desses sistemas depende do amadurecimento institucional e da superação das restrições operacionais ainda presentes nas estruturas circulares existentes. Dante (2024) argumenta que a variabilidade dos materiais compromete previsibilidade e viabilidade econômica, ao passo que Azevedo (2017) e Lieder & Rashid (2016) reforçam que mecanismos informacionais consistentes são fundamentais para reduzir custos transacionais e assegurar eficiência.

Evidências recentes mostram que tecnologias digitais avançadas, como *Internet das Coisas*, *blockchain* e sistemas ciberfísicos, estão transformando a governança das cadeias de valor ao ampliar visibilidade, precisão e capacidade de verificação independente (Mishra, Rana & Dwivedi, 2023; Dutta, Kumar & Yadav, 2024). Nesse cenário, plataformas *cleantech* especializadas em monitoramento digital funcionam como infraestruturas sociotécnicas essenciais para registrar

trajetórias materiais, certificar processos e promover maior transparência entre geradores, operadores e agentes regulados (World Economic Forum & Ellen MacArthur Foundation, 2016; Akbar & Awan, 2024).

Em síntese, a literatura revela que *cleantechs* constituem pilares centrais da economia circular, não apenas pelo desenvolvimento de tecnologias, mas por viabilizar condições institucionais, informacionais e organizacionais que sustentam processos circulares robustos. Ao permitir fluxos materiais e informacionais auditáveis, confiáveis e ambientalmente consistentes, essas organizações contribuem para estruturar ecossistemas produtivos mais integrados, resilientes e orientados à sustentabilidade.

### **3 BLOCKCHAIN COMO INFRAESTRUTURA PARA GOVERNANÇA SUSTENTÁVEL EM CADEIAS CIRCULARES**

A adoção da tecnologia *blockchain* em cadeias produtivas tem sido amplamente analisada pela literatura contemporânea como um elemento estruturante para o fortalecimento da governança, para a mitigação de assimetrias informacionais e para o aprimoramento da transparência, verificabilidade e auditabilidade em sistemas complexos compostos por múltiplos agentes. No contexto das cadeias circulares, essa relevância assume caráter ainda mais central, dada a necessidade crescente de registrar, validar e monitorar fluxos materiais com precisão técnica, integridade metodológica e resiliência frente a manipulações. Conforme demonstrado por Drescher (2017), a arquitetura descentralizada dos registros distribuídos constitui o fundamento tecnológico que possibilita a criação de trilhas digitais imutáveis, capazes de sustentar ambientes operacionais que dependem de altos níveis de confiabilidade informacional.

A literatura recente aprofunda essa discussão ao mostrar que o *blockchain* não apenas estabelece registros invioláveis, mas também cria condições para novos arranjos de rastreabilidade e coordenação operacional aplicáveis à economia circular. Kouhizadeh, Saberi & Sarkis (2021) evidenciam que sistemas distribuídos contribuem para superar barreiras de governança, permitindo maior integração informacional em cadeias nas quais os dados se encontram fragmentados e a confiança interorganizacional é limitada. De forma complementar, Firouzian-Haji, Eshghollahi, Ziari, Tavakkoli-Moghaddam & Rezaei (2025) demonstram que modelos de cadeia fechada baseados em *blockchain* ampliam a transparência e fortalecem a sustentabilidade ao integrar mecanismos automáticos de verificação dos fluxos materiais e apoiar decisões de precificação orientadas por critérios ambientais.

Pesquisas aplicadas reforçam esses achados ao evidenciar benefícios concretos da tecnologia em setores específicos. Dutta, Kumar & Yadav (2024) e Rajput, More, Adhikari & Arya (2025) mostram que, em cadeias alimentares e agroindustriais, o *blockchain* reduz riscos decorrentes de assimetrias de informação, melhora a previsibilidade operacional e aumenta a confiabilidade dos dados utilizados em auditorias ambientais. Esses resultados convergem com os de Reyna, Martin, Chen, Soler & Díaz (2018), que demonstram que a integração entre blockchain e Internet das Coisas potencializa a rastreabilidade ao possibilitar captura contínua de dados e sincronização descentralizada de informações, ampliando a granularidade e a resiliência dos sistemas de monitoramento.

Evidências complementares, como as apresentadas por Ahmad, Ghadimi, Hargaden & Papakostas (2025), reforçam que a incorporação da *blockchain* em cadeias reversas eleva a integridade dos registros, permite monitoramento sistemático de ciclos de vida e fortalece práticas de sustentabilidade operacional. De uma perspectiva institucional, Saberi, Kouhizadeh, Sarkis & Shen (2019) mostram que redes distribuídas se tornam fundamentais para assegurar integridade informacional em ambientes regulados, reduzindo riscos de greenwashing e oferecendo base documental sólida para certificações ambientais.

A literatura também ressalta que a convergência entre *blockchain* e automação inteligente aprofunda significativamente o potencial de padronização e governança digital. Estudos como os de Dutta, Kumar & Yadav (2024) demonstram que contratos inteligentes automatizam rotinas críticas, incluindo validação documental e verificações de conformidade, reduzindo erros humanos, diminuindo custos transacionais e aumentando a confiabilidade dos processos de coordenação. Esse entendimento é reforçado por Rajput, More, Adhikari & Arya (2025), que mostram que a automação contratual integrada a sistemas de rastreamento fortalece a consistência analítica dos processos produtivos.

Do ponto de vista sistêmico, análises conduzidas por Turskis & Šniokienė (2024) e Romagnoli, Tarabu, Maleki Vishkaei & De Giovanni (2023) evidenciam que a integração entre *blockchain*, *IoT* e plataformas digitais melhora a previsibilidade, reduz variabilidade operacional e amplia a capacidade de auditoria independente em cadeias complexas. Em paralelo, estudos aplicados de Guide, Souza & Ketzenberg (2002) demonstram que incertezas relacionadas à qualidade dos materiais retornados permanecem como um dos principais entraves à circularidade, o que torna soluções de rastreamento distribuído especialmente relevantes para mitigar tais limitações.

A literatura associada à governança digital também reforça os benefícios institucionais dessas tecnologias. Meijer & Bolívar (2016) argumentam que plataformas tecnológicas avançadas ampliam

a legitimidade institucional e aprimoraram a qualidade das decisões públicas ao elevar a transparência e a disponibilidade de dados. Em linhas convergentes, Souza (2024) demonstra que a imutabilidade dos registros distribuídos contribui para fortalecer métricas *ESG* ao permitir sistemas confiáveis de comprovação socioambiental.

Em síntese, o corpo teórico e empírico acumulado demonstra que o *blockchain* se consolidou como infraestrutura crítica para cadeias circulares, oferecendo bases sólidas para rastreamento granular, padronização metodológica, verificações independentes e governança ampliada. Embora persistam desafios relacionados à interoperabilidade, padronização técnica e custos de implementação, as evidências apontam que a tecnologia constitui um dos pilares mais promissores para fortalecer a confiabilidade dos sistemas produtivos orientados à sustentabilidade, reduzir incertezas estruturais e ampliar a robustez institucional em ecossistemas econômicos ancorados na circularidade.

#### **4 RASTREABILIDADE DIGITAL COMO ESTRUTURA DE GOVERNANÇA SUSTENTÁVEL EM CADEIAS CIRCULARES**

A rastreabilidade digital consolidou-se como um dos pilares da governança sustentável em cadeias circulares, na medida em que possibilita o acompanhamento rigoroso da origem, dos atributos e das transformações dos materiais ao longo de todas as etapas da circulação. Esse monitoramento contínuo fortalece a previsibilidade operacional, reduz incertezas estruturais e amplia a capacidade institucional de avaliar conformidade ambiental e eficiência produtiva. Evidências provenientes dos estudos sobre governança urbana e digital, como demonstram Luna-Reyes & Gil-García (2014), indicam que sistemas informacionais robustos constituem requisito fundamental para decisões administrativas precisas, especialmente em contextos regulatórios nos quais dados técnicos sustentam políticas públicas e instrumentos de fiscalização.

No âmbito da economia circular, a falta de informações confiáveis e padronizadas é amplamente reconhecida como obstáculo crítico à reinserção eficiente dos materiais. A variabilidade dos atributos de itens retornados compromete a estabilidade dos processos industriais, dificulta operações de remanufatura e eleva custos operacionais, conforme argumentado por Guide, Souza & Ketzenberg (2002). Pesquisas aplicadas ao setor da construção civil, como as desenvolvidas por Mendes (2023), reforçam que sistemas digitais de rastreamento são indispensáveis para assegurar transparência, segurança e validação técnica de componentes reutilizados, mitigando riscos decisórios derivados de registros inconsistentes e ampliando a confiabilidade dos fluxos materiais em processos de circularidade.

A consolidação das tecnologias associadas à Indústria 4.0 intensifica ainda mais essa centralidade, na medida em que sensores, dispositivos *RFID*, códigos *QR* e plataformas integradas viabilizam monitoramento contínuo, granular e interoperável dos fluxos materiais. As contribuições de Porter & Heppelmann (2014) evidenciam que produtos e infraestruturas conectados ampliam substancialmente a visibilidade das cadeias de valor, permitindo o acompanhamento sistemático de estados, trajetórias e condições dos materiais. Essa perspectiva converge com análises recentes sobre digitalização sustentável, como as de Liu, Song & Liu (2023) e Mishra, Rana & Dwivedi (2023), que demonstram que tecnologias avançadas de informação estruturam novos patamares de coordenação, previsibilidade e eficiência essenciais para modelos circulares baseados em rastreamento integral.

Paralelamente, o campo das *cleantechs* confirma a importância dessa infraestrutura, pois modelos tecnológicos orientados à sustentabilidade dependem de sistemas auditáveis e verificáveis para operar com credibilidade em ecossistemas circulares. Estudos como os de Blackburn, Ritala, Keränen & Bocken (2025) e Shakeel (2021) indicam que plataformas ambientais digitais funcionam como mediadoras sociotécnicas capazes de integrar fluxos materiais e informacionais, reduzir assimetrias de informação e sustentar práticas de governança baseadas em evidências. Em contextos regulatórios, operacionais e financeiros, a integridade técnica proporcionada pela digitalização se torna, portanto, um requisito institucional incontornável.

A convergência entre tecnologias conectadas, capacidades digitais avançadas e plataformas *cleantech* revela que a rastreabilidade deixa de ser apenas um mecanismo operacional e passa a desempenhar função estratégica na governança das cadeias circulares. Pesquisas contemporâneas demonstram que sensores, sistemas *IoT*, registros distribuídos e soluções digitais integradas ampliam a precisão, a interoperabilidade e a confiabilidade dos dados que sustentam processos decisórios (Liu, Song & Liu, 2023; Duman Altan, Beyca & Zaim, 2024; Romagnoli, Tarabu', Maleki Vishkaei & De Giovanni, 2023). Essa infraestrutura sociotécnica reduz assimetrias informacionais, promove padronização procedural, fortalece mecanismos de verificação e sustenta práticas de circularidade em escala industrial e institucional.

No âmbito da governança pública, a rastreabilidade digital desempenha papel igualmente decisivo. Sistemas informacionais robustos ampliam a transparência institucional, fortalecem a responsabilização e reduzem a incidência de práticas irregulares ao possibilitar auditoria independente dos dados. As análises de Meijer & Bolívar (2016) indicam que infraestruturas digitais avançadas aprimoram a legitimidade dos processos decisórios ao fortalecer a capacidade administrativa de integrar informações, coordenar políticas e assegurar coerência entre metas ambientais e práticas governamentais.

A literatura contemporânea converge em reconhecer que sistemas avançados de rastreamento operam mediante uma arquitetura multicamada que articula dispositivos de captura de dados, plataformas digitais de conectividade, arranjos institucionais de coordenação e conjuntos padronizados de indicadores de desempenho. Essa estruturação viabiliza a circulação de informações com coerência interna, auditabilidade técnica e integridade operacional, atributos indispensáveis para sustentar modelos circulares cuja eficácia depende de métricas consistentes. Nesse sentido, indicadores como emissões evitadas, taxas de recuperação, conformidade regulatória e precisão informacional figuram como parâmetros centrais para avaliar desempenho circular, como evidenciam trabalhos recentes sobre transformação digital e sustentabilidade (Liu, Song & Liu, 2023; Schöggel, Rusch, Stumpf & Baumgartner, 2023; Romagnoli, Tarabu', Maleki Vishkaei & De Giovanni, 2023).

Apesar desses avanços, subsistem limitações significativas. A heterogeneidade dos padrões informacionais, a baixa interoperabilidade entre plataformas, a insuficiência de infraestruturas digitais e a complexidade inerente à coordenação entre múltiplos agentes configuram barreiras que fragilizam a consistência longitudinal dos dados e comprometem a efetividade dos processos de certificação. Evidências recentes apresentadas por Duman Altan, Beyca & Zaim (2024) e Mendes (2023) mostram que falhas de integração e inconsistências metodológicas continuam sendo entraves centrais à consolidação de cadeias circularizadas.

Ainda assim, análises atualizadas destacam caminhos promissores para superar essas limitações. Protocolos transparentes de interoperabilidade, investimentos em tecnologias digitais avançadas, mecanismos de auditoria independente e maior alinhamento regulatório são apontados como condições essenciais para consolidar sistemas de rastreabilidade capazes de sustentar governança ambiental sofisticada, como discutido por Ahmad, Ghadimi, Hargaden & Papakostas (2025) e Schmidt & Weber (2024).

Considerados em conjunto, esses elementos permitem compreender a rastreabilidade digital como uma infraestrutura estratégica que organiza, estabiliza e legitima a governança das cadeias circulares. Ao reduzir incertezas, ampliar transparência e reforçar a confiabilidade informacional, tais sistemas constituem pilares indispensáveis para a construção de ecossistemas produtivos resilientes, tecnicamente auditáveis e alinhados às demandas contemporâneas de sustentabilidade.

## 5 METODOLOGIA

A pesquisa adota uma abordagem qualitativa com um delineamento descritivo e exploratório, cuja adequação deriva da necessidade de compreender fenômenos organizacionais que se constituem na interface entre tecnologia, governança e dinâmicas sociotécnicas. Esse enquadramento

metodológico é coerente com as orientações de Lakatos & Marconi (2017) e de Gil (2019), para quem estudos dessa natureza exigem procedimentos capazes de captar significados, interpretar relações institucionais e analisar estruturas não diretamente mensuráveis, sobretudo quando vinculadas à economia circular e à operação de plataformas digitais de rastreamento. Tal perspectiva dialoga com Denzin & Lincoln (2018), que sustentam que a pesquisa qualitativa oferece instrumentos analíticos para revelar processos e práticas que não emergem mediante métodos estritamente quantitativos.

Para aprofundar a compreensão do fenômeno, empregou-se uma estratégia de estudo de caso único, seguindo a lógica construída por Stake (1995), Merriam & Tisdell (2015) e Yin (2015), que defendem essa modalidade como particularmente eficaz quando o objeto de investigação apresenta fronteiras fluidas entre tecnologia, estrutura organizacional e ambiente institucional. A opção por manter em sigilo a identidade da plataforma analisada visa assegurar neutralidade interpretativa e permitir que o foco recaia sobre seus mecanismos operacionais, sua lógica de governança e suas formas de articulação com distintos agentes da cadeia circular.

A coleta de evidências foi conduzida a partir de procedimentos complementares. Primeiramente, realizou-se uma revisão bibliográfica sistemática e integrativa, contemplando literatura nacional e internacional sobre economia circular, rastreabilidade digital, *blockchain*, governança ambiental e plataformas *cleantech*, em consonância com os princípios metodológicos de Cervo, Bervian & Silva (2007). Em seguida, procedeu-se à análise minuciosa de documentos institucionais, relatórios técnicos, normativos operacionais, registros administrativos e descrições funcionais disponibilizadas pela plataforma, o que permitiu examinar sua arquitetura digital, seus fluxos de comprovação ambiental e seus mecanismos de certificação. Essa etapa foi complementada por entrevistas semiestruturadas com atores-chave do ecossistema: cooperativas, operadores, gestores e interlocutores regulatórios, utilizando protocolos inspirados nas recomendações de Merriam (2009) para entrevistas qualitativas orientadas à compreensão de práticas e significados.

A investigação incorporou ainda observação indireta de funcionalidades públicas da plataforma, permitindo examinar suas dinâmicas de interação, sua estrutura de monitoramento e suas formas de integração com diferentes agentes da cadeia reversa. A articulação entre esses procedimentos resultou em um processo rigoroso de triangulação metodológica, conforme discutido por Minayo (2014), articulando revisão de literatura, análise documental, entrevistas e observações para ampliar validade interna, robustez interpretativa e densidade analítica.

A análise empírica foi organizada de modo integrativo, relacionando as evidências obtidas às categorias analíticas derivadas do referencial teórico. Esse processo permitiu identificar coerências, contradições, limitações operacionais e fatores intervenientes na capacidade da plataforma de

promover rastreabilidade, consolidar mecanismos de governança e estimular práticas alinhadas à economia circular. Ao conjugar fontes diversificadas de informação e métodos complementares dentro de um arcabouço qualitativo rigoroso, a pesquisa construiu uma interpretação abrangente e refinada, apta a sustentar criticamente os resultados e discussões apresentados.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados evidenciam um processo de expansão operacional sustentado por crescimento quantitativo significativo, refletido em volumes acumulados de compensação, reduções expressivas de emissões e ampliação da rede de organizações de base integradas ao sistema. Os principais indicadores obtidos ao longo do período analisado são apresentados na Tabela 1. As evidências demonstram que a solução digital atingiu a compensação acumulada superior a 230 mil toneladas de resíduos, além de contribuir para evitar a emissão de aproximadamente 750 mil toneladas de CO<sub>2</sub> desde o início de sua operação. Tais números sugerem elevada capacidade de mobilização, integração de fluxos e formalização de cadeias previamente fragmentadas.

Tabela 1 - Indicadores quantitativos consolidados da operação analisada

Categoria	Indicador Quantitativo	Valor	Descrição/ Observação
Impacto Ambiental Acumulado	Resíduos compensados	230.000 t	Volume total compensado ao longo da operação.
	Emissões evitadas	750.000 t CO <sub>2</sub> e	Redução acumulada decorrente da reinserção de materiais.
Investimentos Sociais e Operacionais	Investimentos em cooperativas	R\$ 30 milhões	Apoio à infraestrutura, regularização, equipamentos e melhorias laborais.
	<i>Hubs</i> de reciclagem (parceria citada na mídia)	R\$ 12 milhões	Investimento direcionado ao fortalecimento de hubs regionais.
Desempenho Operacional	Rede de cooperativas mobilizadas	60 cooperativas	Número total de organizações envolvidas em operação anual recente.
	Crescimento da rede	87,5%	Expansão percentual das cooperativas em relação ao ciclo anterior.
	Volumes de embalagens plásticas recicladas (ano-base)	11.384 t	Equivalente ao total certificado no período analisado.
	Equivalência em veículos de coleta	759 caminhões	Conversão do volume reciclado em unidades logísticas.

Dados de Programas Específicos	Compensação anual de embalagens (programa setorial)	48,89 t	Volume compensado em um ano para marca participante.
	Taxa de reciclagem do programa	93%	Percentual do material efetivamente reciclado.
	Emissões evitadas no programa	28,11 t CO <sub>2</sub> e	Redução decorrente da reciclagem do volume anual.
	Projeção de compensação para o ano seguinte	64,20 t	Crescimento estimado do programa.
Projetos de Impacto Territorial	Pontos de entrega voluntária planejados	325 pontos	Estrutura prevista para praias do RJ.
	Pontos já instalados (fase inicial)	24 pontos	Localizados inicialmente em Ipanema e Leblon.
	Extensão territorial do projeto	35 km de praia	Trecho atendido no plano operacional.
	Meta de resíduos retirados do litoral	4.000 t	Estimativa total de resíduos desviados.
	Valor financeiro gerado pelos resíduos	R\$ 1,7 milhão	Estimativa de retorno econômico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como demonstrado na Tabela 1, os indicadores quantitativos revelam uma infraestrutura digital capaz de articular, em larga escala, fluxos materiais, processos de certificação e mecanismos de comprovação ambiental. A combinação entre elevado volume de resíduos compensados, mitigação expressiva de emissões e ampliação progressiva das organizações de base integradas à operação evidencia um sistema sociotécnico que não apenas expande a rastreabilidade, mas também reorganiza práticas institucionais e fortalece a governança setorial. Em conjunto, tais resultados confirmam que o arranjo analisado se consolidou como vetor de integração, formalização e eficiência dentro das cadeias circulares, criando condições estruturais para a ampliação da transparência, previsibilidade e accountability ambiental.

No âmbito da estruturação socioprodutiva, registrou-se a destinação de aproximadamente R\$ 30 milhões em investimentos direcionados a cooperativas em todo o território nacional, abrangendo aquisição de equipamentos, modernização de galpões, regularização documental e melhorias em condições de trabalho. Esses aportes geraram avanços substantivos de produtividade, mas de forma assimétrica: enquanto parte das unidades apresentou rápida evolução organizacional, outras demonstraram limitações persistentes associadas a fragilidades gerenciais, baixa qualificação técnica e restrições estruturais históricas. As entrevistas evidenciam que tais desigualdades não decorrem do modelo digital em si, mas de condições prévias que modulam a capacidade de absorção tecnológica, indicando que a digitalização somente produz efeitos equitativos quando acompanhada de políticas sustentadas de capacitação, desenvolvimento organizacional e inclusão produtiva.

A atuação ambiental da plataforma também se destaca pelo volume de materiais efetivamente reinseridos no ciclo produtivo. Em programas setoriais recentes, verificou-se o rastreamento e a reciclagem de 11.384 toneladas de embalagens plásticas, equivalentes a cerca de 759 caminhões de coleta seletiva, envolvendo a participação direta de 60 cooperativas, um crescimento aproximado de 87,5% na rede mobilizada em relação ao período anterior. O desempenho demonstra capacidade de articulação territorial e institucional elevada, ampliando significativamente o alcance das estratégias de logística reversa e contribuindo para a formalização das etapas críticas da cadeia circular.

Os resultados também apontam efeitos relevantes em iniciativas corporativas específicas. Programas anuais estruturados pela plataforma possibilitaram, por exemplo, a compensação integral de 48,89 toneladas de embalagens de determinada marca, das quais mais de 93% foram efetivamente recicladas, evitando a emissão estimada de 28,11 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente em um único ciclo de reporte. Para o ciclo subsequente, projeta-se um aumento para 64,20 toneladas compensadas, demonstrando trajetória ascendente de engajamento empresarial e consolidação dos instrumentos de comprovação ambiental.

No entanto, apesar dos avanços quantitativos, emergem fragilidades metodológicas que exigem atenção analítica. Observou-se variação nos parâmetros de equivalência ambiental e nas massas certificadas entre diferentes ciclos, indicando ajustes internos que comprometem a reprodutibilidade dos indicadores e dificultam comparações longitudinais consistentes. A ausência de um protocolo metodológico completamente estável limita a robustez dos dados para fins de auditoria, fiscalização ou avaliação estratégica. Embora o sistema demonstre potencial técnico significativo, sua plena maturidade depende da efetiva padronização dos critérios de cálculo e da implementação de rotinas de validação independente capazes de assegurar rastreabilidade, confiabilidade e replicabilidade das métricas ambientais.

Do ponto de vista institucional, os achados indicam que a plataforma alcançou posição estratégica na coordenação da cadeia circular, exercendo papel articulador entre geradores de resíduos, operadores, cooperativas, unidades de triagem e indústrias recicladoras. Essa centralidade organizacional fortalece a eficiência sistêmica e reduz incertezas historicamente presentes na logística reversa, mas amplia também a responsabilidade sobre governança, transparência e equilíbrio entre agentes. O risco de assimetrias de poder exige que a solução opere com critérios procedimentais claros, mecanismos de auditoria independentes e participação ampliada dos atores de base, especialmente porque a concentração de dados e de fluxos econômicos tende a redefinir relações comerciais e operacionais no setor.

Em síntese, os resultados demonstram que a plataforma analisada atua como vetor estruturante da economia circular, ampliando significativamente volumes recuperados, fortalecendo redes cooperativas, aumentando a previsibilidade dos fluxos materiais e contribuindo para mitigação ambiental em escala mensurável. Todavia, sua consolidação plena requer avanços simultâneos em padronização metodológica, governança colaborativa e alinhamento a marcos regulatórios, de forma a assegurar que o crescimento quantitativo seja acompanhado de robustez técnica, equidade distributiva e legitimidade institucional duradoura.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação qualitativa, sustentada por triangulação metodológica, evidenciou que a plataforma analisada exerce papel estruturante na conformação de cadeias circulares mais transparentes, monitoráveis e institucionalmente robustas. Os dados quantitativos revelam um processo de expansão operacional de grande magnitude: mais de 230 mil toneladas de resíduos foram compensadas, resultando na mitigação de aproximadamente 750 mil toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, além de substancial ampliação da malha de cooperativas envolvidas, que atingiu 60 unidades, representando crescimento de 87,5% em relação ao ciclo anterior. O volume de materiais compensados, a equivalência de 759 caminhões de coleta e a criação de iniciativas territoriais de fôlego, como a implantação de 325 pontos de entrega voluntária com capacidade projetada para desviar 4 mil toneladas de resíduos costeiros, demonstram a capacidade de escala e capilaridade da operação.

Os resultados também destacam a relevância dos investimentos socioestruturais, que totalizam R\$ 30 milhões destinados à profissionalização, infraestrutura e regularização institucional das cooperativas. Tais aportes contribuíram para ganhos concretos de produtividade e para a elevação da qualidade operacional em diversos territórios. Contudo, se constatou que os efeitos desses investimentos permanecem assimétricos, uma vez que limitações organizacionais, gerenciais e de capital humano continuam condicionando a plena incorporação tecnológica entre os agentes da base. Assim, os dados reforçam que a digitalização, embora imprescindível, não substitui políticas complementares de fortalecimento institucional e de qualificação continuada.

Do ponto de vista ambiental, os mecanismos de mensuração empregados demonstram avanços significativos, como evidenciado pelos programas setoriais que registraram 48,89 toneladas compensadas, com 93% de taxa de reciclagem, e evitavam 28,11 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, com projeção de crescimento para 64,20 toneladas. No entanto, a análise comparativa entre ciclos operacionais revela instabilidades metodológicas importantes, decorrentes de ajustes internos nos

critérios de equivalência e nos parâmetros de certificação. Essas variações limitam a comparabilidade temporal e reduzem a confiabilidade dos indicadores para aplicações regulatórias mais rigorosas. A consolidação da plataforma como instrumento de verificação ambiental depende, portanto, da padronização integral dos procedimentos de cálculo e da adoção de protocolos replicáveis e auditáveis.

A posição central da plataforma na coordenação dos fluxos materiais confere-lhe relevância estratégica, mas também amplia sua responsabilidade institucional. A concentração de dados, a dependência operacional dos agentes e a influência crescente na definição de critérios de certificação exigem mecanismos contínuos de governança transparente, auditoria independente e inclusão deliberativa dos diversos atores envolvidos na cadeia. Apenas com tais salvaguardas é possível mitigar riscos de assimetria de poder e assegurar legitimidade ao sistema.

Em síntese, os resultados demonstram que a plataforma constitui um vetor essencial para a operacionalização da economia circular em larga escala, ao articular tecnologia, governança e impacto socioambiental de maneira integrada. Sua plena maturidade, porém, exige avanços simultâneos em padronização metodológica, governança colaborativa e convergência com políticas públicas estruturantes. O fortalecimento das cadeias circulares dependerá, necessariamente, de processos contínuos de aprimoramento técnico, qualificação dos agentes de base, rigor informacional e transparência institucional, elementos indispensáveis para consolidar ecossistemas produtivos sustentáveis, eficientes e socialmente inclusivos.

## REFERÊNCIAS

- Ahmad, M., Ghadimi, P., Hargaden, V., & Papakostas, N. (2025). Blockchain technology for circular economy: Review of strategies with focus on product end-of-life. *IFAC-PapersOnLine*, 59(10), 2790–2795. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.09.469>
- Akbar, A., & Awan, U. (2024). Towards circular economy: A IoT-enabled framework for circular supply chain integration. *Journal of Cleaner Production*, 441, 141–159.
- Azevedo, M. (2017). Economia circular e inovação organizacional. Lisboa: Universidade Nova.
- Bai, Y., Hu, Q., Seo, S.-H., Kang, K., & Lee, J. J. (2022). Public participation consortium blockchain for smart city governance. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(3), 2094–2108. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3091151>
- Biswas, S., Yao, Z., Yan, L., Alqhatani, A., Bairagi, A. K., Asiri, F., & Masud, M. (2023). Interoperability benefits and challenges in smart city services: Blockchain as a solution. *Electronics*, 12(4), 1036. <https://doi.org/10.3390/electronics12041036>
- Blackburn, O., Ritala, P., Keränen, J., & Bocken, N. (2025). Circular economy platforms: A systematic review. *Business Strategy and the Environment*, bse.70307. <https://doi.org/10.1002/bse.70307>
- Caprotti, F. (2012). The cultural economy of cleantech. *Journal of Cleaner Production*, 32, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.028>
- Cervo, A. L., & Bervian, P. A. (2002). Metodologia científica (5a ed.). Prentice Hall.
- Cleantech Group. (2024). Global Cleantech 100: Innovating for Net-Zero. Recuperado em 04 fevereiro 2025, de <https://www.cleantech.com>
- Cromwell, J., Turkson, C., Dora, M., & Yamoah, F. A. (2025). Digital technologies for traceability and transparency in the global fish supply chains: A systematic review and future directions. *Marine Policy*, 178(106700), 106700. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2025.106700>
- Dante, A. (2024). Modelagem de fluxos reversos e variabilidade de materiais em cadeias circulares. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- Denzin, N., & Lincoln, Y. (2018). The SAGE handbook of qualitative research (5th ed.). Thousand Oaks: Sage.
- Drescher, D. (2017). Blockchain basics: A non-technical introduction in 25 steps. New York: Springer.
- Duman Altan, A., Beyca, Ö. F., & Zaim, S. (2024). Link between digital technologies adoption and sustainability performance: Supply chain traceability/resilience or circular economy practices. *Sustainability*, 16(19), 8694. <https://doi.org/10.3390/su16198694>

Dutta, P., Kumar, S., & Yadav, N. (2024). Blockchain technology in the food supply chain: A way towards circular economy and sustainability. *Food & Function*, 16(4), 2051–2073.

Ellen MacArthur Foundation. (2021). Circular economy and digital systems: Opportunities for scaling circularity. Recuperado em 04 fevereiro 2025, de <https://ellenmacarthurfoundation.org>

Fernandez-Carames, T. M., Blanco-Novoa, O., Froiz-Miguez, I., & Fraga-Lamas, P. (2024). Towards an autonomous industry 4.0 warehouse: A UAV and blockchain-based system for inventory and traceability applications in big data-driven supply chain management. Em arXiv [cs.CR]. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2402.00709>

Firouzian-Haji, S., Eshghollahi, S. E., Ziari, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Rezaei, P. (2025). A blockchain-based approach to enhance transparency and sustainability in a joint pricing and closed-loop supply chain network design problem. *Journal of Environmental Management*, 394(127463), 127463. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127463>

França, A. S. L., Amato Neto, J., Gonçalves, R. F., & Almeida, C. M. V. B. (2020). Proposing the use of blockchain to improve the solid waste management in small municipalities. *Journal of Cleaner Production*, 244(118529), 118529. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118529>

Geels, F. (2004). From sectoral systems of innovation to socio-technical systems. *Research Policy*, 33(6–7), 897–920. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2004.01.015>

Gil, A. C. (2019). *Métodos e técnicas de pesquisa social* (7<sup>a</sup> ed.). Atlas.

Guide, V., Souza, G., & Ketzenberg, M. (2002). The role of information quality in remanufacturing. *Production and Operations Management*, 11(3), 364–378.

IEA. (2023). Energy Technology Perspectives 2023. International Energy Agency. Recuperado em 04 fevereiro 2025, de <https://www.iea.org>

IPCC. (2023). Sixth Assessment Report: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. Recuperado em 04 fevereiro 2025, de <https://www.ipcc.ch>

IRENA. (2023). World Energy Transitions Outlook 2023. International Renewable Energy Agency. Recuperado em 04 fevereiro 2025, de <https://www.irena.org>

Kamble, S. S., Gunasekaran, A., Kumar, V., Belhadi, A., & Foropon, C. (2021). A machine learning based approach for predicting blockchain adoption in supply Chain. *Technological Forecasting and Social Change*, 163(120465), 120465. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120465>

Kouhizadeh, M., Saberi, S., & Sarkis, J. (2021). Blockchain technology and the sustainable supply chain: Theoretically exploring adoption barriers. *International Journal of Production Economics*, 231(107831), 107831. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107831>

Lakatos, E. M., & Marconi, M. A. (2017). *Fundamentos de metodologia científica* (8a ed.). Atlas.

Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation. *Journal of Cleaner Production*, 115, 36–51.

Liu, L., Song, W., & Liu, Y. (2023). Leveraging digital capabilities toward a circular economy: Reinforcing sustainable supply chain management with Industry 4.0 technologies. *Computers & Industrial Engineering*, 178(109113), 109113. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109113>

Luna-Reyes, L., & Gil-García, J. (2014). Digital government and public governance. *Government Information Quarterly*, 31(1), 6–17.

Meijer, A., & Bolívar, M. P. R. (2016). Governing the smart city: a review of the literature on smart urban governance. *International Review of Administrative Sciences*, 82(2), 392–408. <https://doi.org/10.1177/0020852314564308>

Mendes, R. (2023). Digitalização e rastreabilidade na construção civil. *Revista Brasileira de Inovação*, 22(4), 134–159.

Merriam, S. B., & Tisdell, E. J. (2015). Qualitative research: A guide to design and implementation (4 th ed.). Jossey-Bass.

Minayo, M. (2014). O desafio do conhecimento: Pesquisa qualitativa em saúde. São Paulo: Hucitec.

Mishra, D., Rana, N., & Dwivedi, Y. (2023). Leveraging digital capabilities toward a circular economy: Reinforcing sustainable supply chain management with Industry 4.0 technologies. *Technological Forecasting & Social Change*, 196, 122–145.

Muni Lavanya, B. (2018). Blockchain technology beyond bitcoin: An overview. *Ijcsma.com*. Recuperado 4 de dezembro de 2025, de <https://www.ijcsma.com/articles/blockchain-technology-beyond-bitcoin-an-overview.pdf>

Noronha, D. (2022). Plataformas digitais e redes colaborativas na reciclagem. *Revista de Gestão Ambiental*, 26(3), 44–61.

OECD. (2022). Digital for Circular Economy: Emerging approaches and policy considerations. Organisation for Economic Co-operation and Development. Recuperado em 04 fevereiro 2025, de <https://www.oecd.org>

Pernick, R., & Wilder, C. (2007). The clean tech revolution. New York: HarperCollins.

Porter, M., & Heppelmann, J. (2014). How smart connected products are transforming competition. *Harvard Business Review*, 92(11), 64–88.

Porter, M., & Van Der Linde, C. (1995). Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), 97–118.

Rajput, D. V., More, P. R., Adhikari, P. A., & Arya, S. S. (2025). Blockchain technology in the food supply chain: a way towards circular economy and sustainability. *Sustainable Food Technology*, 3(4), 930–946. <https://doi.org/10.1039/d5fb00065c>

Reyna, A., Martin, C., Chen, J., Soler, E., & Díaz, M. (2018). On blockchain and IoT. *Future Generation Computer Systems*, 88, 173–190.

Risso, L. A., Ganga, G. M. D., Godinho Filho, M., Santa-Eulalia, L. A. Chikhi, T., & Mosconi, E. (2023). Present and future perspectives of blockchain in supply chain management: A review of reviews and research agenda. *Computers & Industrial Engineering*, 183, 109195.  
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109195>

Romagnoli, S., Tarabu', C., Maleki Vishkaei, B., & De Giovanni, P. (2023). The impact of digital technologies and sustainable practices on circular supply chain management. *Logistics*, 7(1), 1.  
<https://doi.org/10.3390/logistics7010001>

Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and sustainable supply chains. *International Journal of Production Research*, 58(7), 2063–2081.

Schmidt, C. M., & Weber, T. (Eds.). (2024). Digitale enabler der Kreislaufwirtschaft. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. Recuperado 4 de dezembro de 2025, de <https://www.acatech.de/publikation/digitale-enabler-der-kreislaufwirtschaft/>

Shojaei, A., Ketabi, R., Razkenari, M., Hakim, H., & Wang, J. (2021). Enabling a circular economy in the built environment sector through blockchain technology. *Journal of Cleaner Production*, 294(126352), 126352.

Shakeel, S. R. (2021). Cleantech: Prospects and Challenges. *Journal of Innovation Management*, 9(2), VIII–XVII. [https://doi.org/10.24840/2183-0606\\_009.002\\_0002](https://doi.org/10.24840/2183-0606_009.002_0002)

Schöggel, J.-P., Rusch, M., Stumpf, L., & Baumgartner, R. J. (2023). Implementation of digital technologies for a circular economy and sustainability management in the manufacturing sector. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 401–420. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.11.012>

Souza, F. R. (2024). Aplicação da blockchain e IOT na gestão da cadeia de suprimentos: Um estudo de caso sobre rastreabilidade. *Revista produção online*, 23(3), 5016. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v23i3.5016>

Stake, R. E. (1995). *The art of case study research*. Sage.

Turskis, Z., & Šniokienė, V. (2024). IoT-driven transformation of circular economy efficiency: An overview. *Mathematical & Computational Applications*, 29(4), 49.  
<https://doi.org/10.3390/mca29040049>

World Economic Forum & Ellen MacArthur Foundation. (2016). Intelligent assets: Unlocking the circular economy potential. Ellen MacArthur Foundation. [https://ellenmacarthurfoundation.org/m/1111b850c4a5e68e/original/Intelligent-assets-Unlocking-the-circular-economy-potential.pdf?\\_gl=1\\*rkz19o\\*\\_ga\\*MzA4MzYwMzg3LjE3NjQ3Nzc4MDA.\\*\\_ga\\_V32N675KJX\\*cze3NjQ3Nzc3OTckbzEkZzEkdDE3NjQ3NzgwOTEkajU2JGwwJGgw\\*\\_gcl\\_au\\*MTcxNjc3MDE1MS4xNzY0Nzc3ODI3](https://ellenmacarthurfoundation.org/m/1111b850c4a5e68e/original/Intelligent-assets-Unlocking-the-circular-economy-potential.pdf?_gl=1*rkz19o*_ga*MzA4MzYwMzg3LjE3NjQ3Nzc4MDA.*_ga_V32N675KJX*cze3NjQ3Nzc3OTckbzEkZzEkdDE3NjQ3NzgwOTEkajU2JGwwJGgw*_gcl_au*MTcxNjc3MDE1MS4xNzY0Nzc3ODI3)

World Economic Forum. (2023). Global Risks Report 2023. Recuperado em 04 fevereiro 2025, de <https://www.weforum.org>

Wu, H., Li, S., Hou, W., & Zhang, X. (2024). Leveraging digital platforms for circular economy: A value creation view. *Sustainability*, 16(24), 11180. <https://doi.org/10.3390/su162411180>

Wuebbles, D. J., Fahey, D. W., Hibbard, K. A., DeAngelo, B., Doherty, S., Hayhoe, K., Horton, R., Kossin, J. P., Taylor, P. C., Waple, A. M., & Yohe, C. P. (2017). Executive summary. Climate science special report: Fourth national climate assessment, volume I. U.S. Global Change Research Program.

Yin, R. (2015). Case study research: Design and methods (5th ed.). Thousand Oaks: Sage.

Zhou, Y., Yan, S., Li, G., Xiong, Y., & Lin, Z. (2023). The impact of consumer skepticism on blockchain-enabled sustainability disclosure in a supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 178, 103323. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103323>