REVISTA DCS
FUNDADA EN 2000

BLOCKCHAIN, INTELIGÊNCIA ARTIFICAL E CUSTOS DE TRANSAÇÃO: UMA ABORDAGEM INSTITUCIONAL PARA A EFICIÊNCIA DO MERCADO DE CARBONO

BLOCKCHAIN, ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND TRANSACTION COSTS: AN INSTITUTIONAL APPROACH TO CARBON MARKET EFFICIENCY

BLOCKCHAIN, INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y COSTOS DE TRANSACCIÓN: UN ENFOQUE INSTITUCIONAL PARA LA EFICIENCIA DEL MERCADO DE CARBONO

Tatiane de Sousa Serafim[1], Sarah Mesquita Lima[2], Marcello Erick Fontenele Fiuza[3], Lucas Wesley do Nascimento Alves[4], Stephany Cristhiny Figueiredo Fernande[5]

DOI: 10.54899/dcs.v22i83.3627
Recibido: 12/09/2025 | Aceptado: 03/10/2025 | Publicación en línea: 22/10/2025.

RESUMO

Este artigo analisa os impactos das tecnologias digitais emergentes, em especial o blockchain e a inteligência artificial, na redução dos custos de transação no mercado de créditos de carbono, sob a ótica da Teoria Institucional Transacional. O mercado de carbono ainda enfrenta entraves relacionados à assimetria informacional, à burocracia e à dificuldade de monitoramento, o que afeta sua credibilidade e eficiência. Diante disso, torna-se relevante compreender de que modo as inovações digitais podem otimizar processos e fortalecer a legitimidade institucional desse sistema. A pesquisa adota abordagem qualitativa, baseada em revisão bibliográfica, e elabora uma matriz institucional transacional comparando dois contextos: o tradicional, com altos custos de busca, negociação e fiscalização, e o digital, caracterizado por registros imutáveis, automação contratual e uso de análises avançadas. Os resultados indicam que o blockchain e a inteligência artificial não apenas reduzem custos operacionais, mas também redefinem a governança ambiental, promovendo maior liquidez, padronização, segurança jurídica e transparência. O blockchain assegura rastreabilidade e integridade das transações, prevenindo dupla contagem e greenwashing, enquanto a inteligência artificial aprimora auditorias e análises preditivas, ampliando a precisão na mensuração e precificação dos créditos. Conclui-se que a integração dessas tecnologias inaugura um novo paradigma de governança ambiental, em que eficiência econômica e transparência institucional se complementam. Contudo, persistem desafios

[1] Mestranda em Administração e Controladoria, Universidade Federal do Ceará, Kunumilab UFC, Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: tatiane.serafim@yahoo.com.br Orcid: https://orcid.org/0009-0009-9970-0261
[2] Doutora em Administração de Empresas pela Universidade de Fortaleza, Kunumilab UFC, Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: sarah.mesquita@ifce.edu.br
[3] Graduando em Administração, Universidade Federal do Ceará, Kunumilab UFC, Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: marcelloerick8@gmail.com
[4] Graduando em Administração, Universidade Federal do Ceará, Kunumilab UFC, Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: lwalves2091.la@gmail.com
[5] Graduanda em Secretariado Executivo, Kunumilab UFC, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: stephanycristhiny09@gmail.com

regulatórios, éticos e de inclusão social que requerem investigações futuras sobre experiências práticas, comparações internacionais e modelos híbridos de governança digital.

Palavras-chave: Blockchain. Inteligência Artificial. Custos de Transação. Mercado de Carbon. Governança Ambiental.

ABSTRACT

This article analyzes the impacts of emerging digital technologies, particularly blockchain and artificial intelligence, on reducing transaction costs in the carbon credit market, through the lens of the Institutional–Transactional Theory. The carbon market still faces obstacles related to informational asymmetry, bureaucracy, and monitoring difficulties, which affect its credibility and efficiency. In this context, it is essential to understand how digital innovations can optimize processes and strengthen the institutional legitimacy of this system. The research adopts a qualitative approach based on a literature review and develops an institutional–transactional matrix comparing two contexts: the traditional one, characterized by high search, negotiation, and monitoring costs, and the digital one, marked by immutable records, contractual automation, and advanced data analysis. The results indicate that blockchain and artificial intelligence not only reduce operational costs but also redefine environmental governance by promoting greater liquidity, standardization, legal security, and transparency. Blockchain ensures traceability and integrity in transactions, preventing double counting and greenwashing, while artificial intelligence enhances audits and predictive analyses, improving the accuracy of carbon credit measurement and pricing. It is concluded that the integration of these technologies inaugurates a new paradigm of environmental governance, in which economic efficiency and institutional transparency complement each other. However, regulatory, ethical, and social inclusion challenges remain, highlighting the need for future research on practical experiences, international comparisons, and hybrid models of digital governance.

Keywords: Blockchain. Artificial Intelligence. Transaction Costs. Carbon Market. Environmental Governance.

RESUMEN

Este artículo analiza los impactos de las tecnologías digitales emergentes, en especial el blockchain y la inteligencia artificial, en la reducción de los costos de transacción en el mercado de créditos de carbono, desde la perspectiva de la Teoría Institucional Transaccional. El mercado de carbono aún enfrenta obstáculos relacionados con la asimetría de la información, la burocracia y las dificultades de monitoreo, lo que afecta su credibilidad y eficiencia. En este contexto, resulta esencial comprender cómo las innovaciones digitales pueden optimizar los procesos y fortalecer la legitimidad institucional de este sistema. La investigación adopta un enfoque cualitativo basado en revisión bibliográfica y elabora una matriz institucional transaccional que compara dos contextos: el tradicional, caracterizado por altos costos de búsqueda, negociación y supervisión, y el digital, marcado por registros inmutables, automatización contractual y análisis avanzados. Los resultados indican que el blockchain y la inteligencia artificial no solo reducen los costos operativos, sino que también redefinen la gobernanza ambiental, promoviendo mayor liquidez, estandarización, seguridad jurídica y transparencia. El blockchain garantiza la trazabilidad y la integridad de las transacciones, evitando la doble contabilización y el *greenwashing*, mientras que la inteligencia artificial mejora las auditorías y los análisis predictivos, aumentando la

precisión en la medición y valoración de los créditos de carbono. Se concluye que la integración de estas tecnologías inaugura un nuevo paradigma de gobernanza ambiental, donde la eficiencia económica y la transparencia institucional se complementan. No obstante, persisten desafíos regulatorios, éticos y de inclusión social que requieren futuras investigaciones sobre experiencias prácticas, comparaciones internacionales y modelos híbridos de gobernanza digital.

Palabras clave: Blockchain. Inteligencia Artificial. Costos de Transacción. Mercado de Carbono. Gobernanza Ambiental.

Esta obra está bajo una Licencia CreativeCommons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional

INTRODUÇÃO

No final da introdução, os objetivos do trabalho devem ser claramente delineados, de forma específica e mensurável. Caso deseje, é possível criar um subitem exclusivo para o objetivo. Além disso, é fundamental que sejam formulados de maneira alcançável, garantindo que o leitor compreenda completamente o escopo do estudo e o que será abordado e avaliado.

O agravamento das mudanças climáticas consolidou o mercado de créditos de carbono como um dos principais mecanismos de mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Esse mercado, tanto regulado quanto voluntário, ainda enfrenta desafios significativos relacionados a altos custos de transação, assimetria informacional, burocracia excessiva e riscos de greenwashing, fatores que comprometem sua credibilidade e eficiência (IPCC, 2023; Rosa; Castro, 2025). Nesse contexto, torna-se urgente a busca por soluções que assegurem maior transparência, rastreabilidade e confiabilidade nas operações, de forma a fortalecer a governança e a confiança dos agentes envolvidos (Lui, 2024; Bodnar; Hernández, 2022).

No cenário internacional, os mercados de carbono assumem papel estratégico na implementação de políticas de descarbonização e no cumprimento das metas estabelecidas pelo Acordo de Paris. Firmado em 2015, esse acordo consolidou os mercados como instrumentos centrais para a promoção da cooperação internacional e da eficiência climática. Um dos principais avanços foi a introdução do Artigo 6, que estabelece mecanismos para a transferência internacional de resultados de mitigação das emissões de gases de efeito estufa, por meio dos chamados Internationally Transferred Mitigation Outcomes (ITMOs) (Bruno; Fraga, 2018; Brasil, 2024; Rosa; Castro, 2025). Apesar do potencial econômico e ambiental desses instrumentos, a credibilidade do sistema depende da capacidade de monitorar, verificar e

certificar créditos de maneira eficiente e segura, prevenindo a dupla contagem e reduzindo práticas oportunistas. Nesse contexto, a literatura recente aponta que a governança tradicional dos mercados de carbono tem se mostrado insuficiente para lidar com a crescente complexidade das negociações globais (Rosa; Castro, 2025; Le *et al*., 2024).

Nesse contexto, as tecnologias digitais emergentes, especialmente o *blockchain* e a inteligência artificial (IA), apresentam-se como alternativas promissoras para responder a tais demandas. O *blockchain*, ao permitir registros imutáveis e auditáveis, garante maior rastreabilidade das transações, enquanto a IA possibilita análises avançadas e automação de auditorias, contribuindo para a redução de custos de monitoramento e verificação. Em conjunto, essas ferramentas podem transformar de forma estrutural o funcionamento dos mercados de carbono, ampliando a eficiência, a transparência e a legitimidade das transações (Tapscott; Tapscott, 2018; Olawade *et al*., 2024).

Ao incorporar a esse cenário a Teoria Institucional–Transacional, fundamentada na Teoria dos Custos de Transação (TCT), proposta por Coase (1937) e desenvolvida por Williamson (1985) e North (1990), se oferece um arcabouço analítico adequado para compreender os impactos dessas tecnologias digitais na redução dos custos de busca de informação, negociação, monitoramento e execução contratual. A partir desse referencial, este estudo busca responder à seguinte questão de pesquisa: como a integração de *blockchain* e inteligência artificial, sob a ótica da Teoria Institucional–Transacional, pode otimizar as transações no mercado de créditos de carbono?

O objetivo geral do estudo é analisar os impactos do uso de *blockchain* e inteligência artificial na redução dos custos de transação no mercado de créditos de carbono. Para atingir esse propósito, foram definidos três objetivos específicos: (i) identificar os principais custos de transação associados às negociações de créditos de carbono; (ii) examinar como blockchain e IA podem mitigar ineficiências e riscos informacionais; (iii) e desenvolver uma matriz institucional–transacional que compare os cenários tradicional e digital.

A justificativa deste trabalho reside na necessidade de aprimorar a governança institucional e a eficiência econômica dos mercados ambientais, tema de grande relevância frente aos compromissos globais de mitigação das mudanças climáticas. Ao articular teorias clássicas da economia institucional com ferramentas digitais emergentes, este estudo contribui para a literatura acadêmica sobre sustentabilidade e inovação, ao mesmo tempo em que oferece subsídios práticos para empresas, startups e formuladores de políticas interessados em fortalecer

a legitimidade e a escalabilidade dos mercados de carbono. Além disso, reforça a importância de compreender a digitalização não apenas como uma inovação tecnológica, mas como um instrumento de transformação institucional capaz de remodelar os arranjos econômicos e ambientais em escala global (Villabruna; 2024; Rosa; Castro, 2025).

Para melhor conduzir o presente estudo, o artigo foi estruturado em cinco seções. Após esta introdução, apresenta-se a fundamentação teórica, que revisita a Teoria dos Custos de Transação e discute as contribuições do blockchain e da inteligência artificial para o mercado de carbono, além de indicar as principais referências adotadas para sustentar a análise. Na sequência, a metodologia é detalhada, com ênfase na construção da matriz institucional–transacional que serve como instrumento de interpretação crítica. Em seguida, são expostos e discutidos os resultados obtidos a partir da aplicação desse modelo analítico. Posteriormente, apresentam-se as considerações finais, que sintetizam as contribuições do estudo e sugerem caminhos para pesquisas futuras. Por último, são apresentadas as referências utilizadas, que sustentam teoricamente o trabalho e garantem sua consistência científica.

REFERENCIAL TEÓRICO

Teoria dos Custos de Transação

A Teoria dos Custos de Transação (TCT) foi inicialmente proposta por Ronald Coase (1937) em seu artigo seminal The Nature of the Firm e posteriormente aprofundada por Oliver Williamson (1985) em *The Economic Institutions of Capitalism*. Essa teoria defende que as transações econômicas não envolvem apenas preços, mas também custos associados à busca de informações, negociação, monitoramento e enforcement contratual.

No mercado de créditos de carbono, esses custos tendem a ser elevados, considerando a multiplicidade de atores, as complexas regras regulatórias e a necessidade de verificações constantes para assegurar a integridade ambiental dos projetos. Conforme North (1990), as instituições são cruciais para reduzir incertezas e orientar o comportamento econômico, mas, ao mesmo tempo, podem gerar entraves burocráticos que aumentam os custos de governança.

Autores contemporâneos como Dixit (1996) e Hodgson (2007) reforçam que as instituições funcionam como “regras do jogo”, sendo determinantes para a eficiência das transações. No caso específico dos créditos de carbono, o risco de greenwashing ou de dupla

contagem evidencia a necessidade de arranjos institucionais mais robustos e mecanismos de coordenação mais confiáveis (Jonsdottir *et al*., 2022; Lui, 2024).

.Além disso, Williamson (1985) introduziu conceitos fundamentais como a racionalidade limitada e o oportunismo, destacando que as transações estão sujeitas a comportamentos estratégicos por parte dos agentes, o que tende a elevar os custos de negociação e monitoramento. No contexto dos créditos de carbono, esse risco se traduz em práticas como a superestimação de reduções de emissões ou a emissão de certificados sem lastro ambiental consistente, aumentando a incerteza para investidores e reguladores.

Outro ponto central da TCT é a especificidade de ativos, que, segundo Williamson, influencia diretamente a escolha entre realizar transações no mercado ou internalizá-las dentro das organizações. No caso dos créditos de carbono, ativos específicos, como certificações ambientais ou tecnologias de monitoramento, podem se tornar barreiras adicionais, elevando o custo das transações e limitando a entrada de novos participantes (Pohlmann, 2004; Prolo *et al*., 2021)

Pesquisas recentes têm reforçado a importância da TCT como lente analítica para compreender a dinâmica de mercados complexos (Rosa; Castro, 2025; Le *et al*., 2024). Hodgson (2007) aponta que, em ambientes regulados e sujeitos a incertezas externas, a coordenação econômica depende de arranjos institucionais que minimizem custos, reduzam comportamentos oportunistas e aumentem a previsibilidade das interações. Nesse sentido, a TCT é particularmente útil para analisar o mercado de carbono, onde a heterogeneidade dos agentes (empresas, governos, ONGs e investidores) e a complexidade regulatória intensificam os custos de transação.

Vale ressaltar que, ao aplicar a TCT ao mercado de créditos de carbono, compreende-se que a eficiência desse sistema não depende apenas da oferta e demanda por créditos, mas da capacidade de reduzir custos invisíveis associados ao processo de troca, desde a coleta de informações até a execução contratual (Rosa; Castro, 2025). Essa perspectiva abre espaço para a análise de tecnologias emergentes, como blockchain e inteligência artificial, que podem atuar diretamente sobre os elementos identificados por Coase e Williamson, oferecendo novos caminhos para mitigar ineficiências e ampliar a confiabilidade das transações.

Blockchain e Smart Contracts

O blockchain é um sistema de registro distribuído que garante imutabilidade e

transparência das transações. Sua aplicação em mercados regulados e voluntários de carbono tem sido investigada como forma de superar falhas institucionais e assimetrias de informação (Tapscott; Tapscott, 2018; Mougayar, 2016).

Além da rastreabilidade, a implementação de smart contracts possibilita reduzir custos de negociação e execução contratual, pois as cláusulas são programadas e executadas automaticamente, sem a necessidade de intermediários. Como observa Catalini e Gans (2016), isso representa um novo paradigma de governança digital, no qual as regras do contrato passam a ser autoexecutáveis e auditáveis em tempo real.

Swinkels (2024) analisa a tokenização de créditos de carbono via blockchain, demonstrando como a tecnologia pode facilitar a liquidez e a padronização dos ativos ambientais. Zhou e Zhang (2022) complementam destacando que o blockchain, ao permitir auditorias contínuas, reduz custos de monitoramento e fortalece a confiança entre os participantes do mercado.

Adicionalmente, a estrutura descentralizada do blockchain elimina a dependência de autoridades centrais para a validação das transações, característica especialmente relevante em mercados globais e fragmentados como o de carbono. Essa descentralização aumenta a resiliência do sistema contra fraudes, manipulações e falhas técnicas, ao mesmo tempo em que reduz a vulnerabilidade a práticas oportunistas por parte de intermediários (Netke, *et al*., 2025).

Outro ponto crucial é a imutabilidade dos registros, que garante que cada transação seja permanentemente gravada no sistema, criando um histórico verificável e auditável por todos os participantes. Isso contribui para reduzir os riscos de dupla contagem de créditos ou da emissão de certificados não lastreados em reduções reais de emissões, problemas recorrentes no mercado de carbono e apontados pela literatura como entraves à sua credibilidade (Tapscott; Tapscott, 2018).

No campo prático, os smart contracts ampliam o potencial de automação de processos, permitindo que cláusulas complexas, como a liberação de créditos apenas após a verificação de metas ambientais, sejam executadas sem intervenção humana. Essa característica reduz custos de enforcement, aumenta a previsibilidade das operações e minimiza litígios, aspectos destacados por Catalini e Gans (2016) como essenciais para a eficiência de sistemas econômicos baseados em transações digitais.

A tokenização, analisada por Swinkels (2024), representa um avanço adicional ao transformar créditos de carbono em ativos digitais negociáveis em tempo real. Esse processo não

apenas aumenta a liquidez do mercado, mas também cria condições para padronização, algo que historicamente tem sido um desafio devido à diversidade de metodologias de certificação. Quando associada ao blockchain, a tokenização fortalece a rastreabilidade e reduz barreiras de entrada, permitindo a participação de pequenos e médios agentes econômicos.

Estudos como o de Zhou e Zhang (2022) reforçam que o blockchain, ao viabilizar auditorias contínuas e descentralizadas, atua como um mecanismo de confiança compartilhada, reduzindo custos de monitoramento e aumentando a transparência das transações. Em conjunto com smart contracts, essa tecnologia fornece as bases para uma infraestrutura digital mais eficiente, capaz de alinhar credibilidade, liquidez e escalabilidade ao mercado de créditos de carbono, tornando-o mais atrativo para investidores e mais robusto frente aos desafios globais de mitigação das mudanças climáticas.

Inteligência Artificial e Transparência no Mercado de Créditos de Carbono

A inteligência artificial (IA) tem ganhado relevância como ferramenta de análise preditiva e de auditoria automatizada. Segundo Russell e Norvig (2021), algoritmos de IA permitem identificar padrões, prever comportamentos e reduzir erros humanos em sistemas complexos. No mercado de carbono, essa capacidade é particularmente valiosa, dado o grande volume de dados relativos a emissões, verificações de projetos e relatórios de sustentabilidade.

A integração da IA em sistemas de monitoramento permite identificar inconsistências e fraudes potenciais com maior rapidez e precisão, reduzindo custos e riscos associados ao controle manual (Olawade *et al*., 2024). Além disso, a IA pode auxiliar na precificação de créditos ao considerar múltiplas variáveis econômicas e ambientais, fornecendo maior previsibilidade e segurança aos investidores.

Outro aspecto importante é a capacidade da IA de lidar com big data de forma escalável, o que a torna especialmente relevante em mercados ambientais nos quais a multiplicidade de projetos, metodologias e indicadores de desempenho exige análises rápidas e precisas. Algoritmos de aprendizado de máquina, por exemplo, podem cruzar informações de diferentes bases de dados, identificar correlações invisíveis ao olhar humano e sinalizar riscos de inconsistências em relatórios de emissões. Essa automação contribui não apenas para a redução de custos operacionais, mas também para o aumento da confiabilidade dos registros ambientais (Lui, 2024).

A literatura aponta ainda que a IA pode atuar de forma proativa no monitoramento de créditos de carbono, utilizando imagens de satélite, sensores IoT e dados climáticos em tempo real para validar projetos de redução de emissões. Essa integração tecnológica permite verificar, por exemplo, a efetividade de programas de reflorestamento ou a manutenção de áreas de preservação, reduzindo a dependência de auditorias presenciais demoradas e custosas. Dessa forma, a IA amplia a rastreabilidade e a precisão das avaliações, elementos centrais para o fortalecimento do mercado de carbono (Ali, 2025).

No campo da precificação, os modelos de IA oferecem maior robustez ao incorporar variáveis externas, como flutuações econômicas globais, mudanças regulatórias e indicadores ambientais. Isso garante maior previsibilidade para investidores e reguladores, ao mesmo tempo em que reduz a subjetividade presente em métodos tradicionais de cálculo. Segundo Olawade *et al*. (2024), esse tipo de automação analítica contribui para aumentar a liquidez e a atratividade do mercado, aproximando-o de padrões mais consolidados de ativos financeiros.

Assim, blockchain e IA, quando combinados, oferecem um ecossistema inovador capaz de mitigar falhas institucionais, reduzir custos de transação e fortalecer a confiança no mercado de créditos de carbono, alinhando eficiência econômica e transparência ambiental. Essa convergência tecnológica reforça a ideia de que a digitalização não é apenas um suporte às práticas já existentes, mas um vetor de transformação estrutural que pode redefinir a forma como os mercados ambientais funcionam, aumentando sua credibilidade e escalabilidade internacional (Netke, *et al*., 2025).

METODOLOGIA

Este estudo adotou uma abordagem qualitativa baseada em revisão bibliográfica, integrando a Teoria dos Custos de Transação (Coase, 1937; Williamson, 1985) com a análise do mercado de créditos de carbono e a aplicação da Matriz Institucional-Transacional. A opção por essa abordagem se justifica pelo caráter exploratório e descritivo da pesquisa, que busca compreender de forma aprofundada como as tecnologias digitais, em especial o blockchain e a inteligência artificial, podem impactar os custos envolvidos nesse mercado.

De acordo com Gil (2008), a revisão bibliográfica é especialmente adequada em situações em que se pretende reunir e interpretar diferentes contribuições teóricas já existentes, permitindo ao pesquisador construir um quadro analítico consistente. Assim, a pesquisa fundamentou-se em

duas frentes principais. A primeira envolveu o levantamento de obras clássicas da Nova Economia Institucional, com destaque para as contribuições de Coase e Williamson, além de North (1990), no intuito de compreender a natureza dos custos de transação e seus efeitos sobre a governança econômica. A segunda buscou integrar estudos contemporâneos relacionados ao uso de blockchain, contratos inteligentes e inteligência artificial como mecanismos de transformação institucional e redução de custos em mercados regulados e ambientalmente orientados.

A Teoria dos Custos de Transação sendo integrada oferece um arcabouço teórico relevante por considerar que as transações econômicas envolvem custos de busca de informação, negociação, monitoramento e enforcement. Esses elementos são centrais no mercado de créditos de carbono, em que a multiplicidade de atores, a complexidade regulatória e a possibilidade de práticas oportunistas tornam a governança mais desafiadora. Nesse sentido, a aplicação da teoria permite analisar de que forma as novas tecnologias digitais podem mitigar ineficiências e promover maior transparência e confiabilidade.

A Matriz Institucional-Transacional desenvolvida como instrumento analítico para operacionalizar essa integração teórica, proporciona organizar os quatro tipos de custos de transação identificados na literatura, comparando o cenário tradicional, caracterizado por altos custos decorrentes de burocracia e ineficiência, com o cenário tecnológico, em que blockchain e inteligência artificial possibilitam processos automatizados, auditáveis e mais seguros. A fundamentação da matriz tende a baseia-se não apenas em referenciais clássicos da teoria econômica, mas também em estudos recentes sobre inovação e sustentabilidade.

Dessa forma, a metodologia adotada articula a revisão bibliográfica como base de sustentação teórica e a matriz aplicada como ferramenta para sistematizar e interpretar criticamente os impactos institucionais e transacionais da incorporação de tecnologias digitais no mercado de créditos de carbono.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Teoria dos Custos de Transação (Coase, 1937; Williamson, 1985) argumenta que toda interação econômica está sujeita a custos além do preço de mercado, como os relacionados à busca de informações, negociação, monitoramento e execução contratual. No mercado de créditos de carbono, tais custos são tradicionalmente elevados, devido à multiplicidade de atores

(empresas, governos, certificadoras e ONGs), à complexidade regulatória e à necessidade constante de verificações que assegurem a integridade ambiental dos projetos (North, 1990; Dixit, 1996; Hodgson, 2007). Esse contexto gera riscos de greenwashing e de dupla contagem, que minam a credibilidade e dificultam a escalabilidade do mercado (IPCC, 2023; Rosa; Castro, 2025).

A adoção de tecnologias digitais, como blockchain e inteligência artificial, surge como resposta a essas limitações. O blockchain assegura a rastreabilidade, imutabilidade e auditabilidade dos registros (Tapscott; Tapscott, 2018; Mougayar, 2016), enquanto a inteligência artificial contribui com análises preditivas, automação de auditorias e maior precisão na precificação (Russell; Norvig, 2021; Olawade *et al*., 2024). A integração dessas tecnologias cria um novo ecossistema transacional no qual a assimetria de informação e os custos associados a auditorias manuais, consultorias e intermediários são significativamente reduzidos (Swinkels, 2024; Zhou; Zhang, 2022).

Ao elaborar uma Matriz Institucional–Transacional ampliada, observa-se que a aplicação conjunta de blockchain e IA pode modificar estruturalmente o mercado de créditos de carbono. A Tabela 1 apresenta uma síntese comparativa dos custos de transação nos cenários tradicional e digital, destacando dimensões adicionais como segurança jurídica, liquidez e legitimidade social, frequentemente negligenciadas em análises convencionais.

Quadro 1 - Matriz Institucional – Transacional Aplicada ao Mercado de Créditos de Carbono

Elementos de Custo de Transação	Cenário Tradicional	Cenário Digital (Blockchain + IA)	Síntese Comparativa
Custos de Busca de Informação	Elevados, devido a auditorias presenciais, consultorias especializadas e relatórios dispersos, sujeitos a falhas humanas (North, 1990).	Reduzidos, pois os dados passam a ser digitais, padronizados, auditáveis em tempo real e acessíveis de forma descentralizada (Tapscott; Tapscott, 2018).	Maior transparência e acessibilidade; redução de assimetrias informacionais; agilidade no processo decisório.
Custos de Negociação	Altos, em razão da complexidade contratual, da necessidade de intermediários e da falta de padronização dos ativos (Williamson, 1985).	Baixos, via *smart contracts* que automatizam cláusulas e reduzem a dependência de intermediários (Catalini; Gans, 2016).	Simplificação de contratos; previsibilidade; redução de conflitos e custos legais.
Custos de Monitoramento	Muito altos, dependentes de verificações manuais e frequentes auditorias externas (IPCC, 2023).	Reduzidos, graças à auditoria contínua por blockchain e ao uso de IA com *machine learning* e imagens de satélite (Olawade *et al*., 2024).	Confiabilidade em tempo real; mitigação de fraudes e *greenwashing*; maior escalabilidade do mercado.
Custos de	Incertos, sujeitos a disputas	Baixos, com execução	Segurança jurídica

Enforcement (Execução)	legais, morosidade judicial e litígios complexos (Dixit, 1996).	automática por *smart contracts* e *token burning* (Swinkels, 2024).	ampliada; cumprimento automático de obrigações; incentivo a novos investimentos.
Liquidez e Padronização dos Ativos	Baixa liquidez devido à heterogeneidade dos certificados e metodologias de verificação (Rosa; Castro, 2025).	Alta liquidez via tokenização e padronização digital de créditos (Swinkels, 2024).	Facilita negociações internacionais; amplia atratividade para investidores institucionais.
Legitimidade e Confiança Social	Vulnerável a críticas sobre efetividade e transparência, comprometendo a credibilidade (Hodgson, 2007).	Reforçada por registros imutáveis, acessíveis publicamente e auditáveis (Zhou; Zhang, 2022).	Aumento da confiança social e institucional; maior alinhamento com compromissos globais de sustentabilidade.

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A matriz institucional–transacional ampliada demonstra que a incorporação de blockchain e inteligência artificial vai além da simples redução de custos operacionais: ela representa uma mudança estrutural no modo como as transações ambientais são concebidas, registradas e legitimadas. Enquanto no modelo tradicional o mercado de carbono é limitado por assimetrias informacionais, complexidade regulatória e alto grau de intermediação, o cenário digital cria condições para um ambiente transacional mais eficiente, transparente e confiável.

Primeiramente, no que se refere aos custos de busca de informação, os avanços em digitalização reduzem significativamente a dependência de consultorias especializadas e verificações presenciais. A descentralização das informações via blockchain permite acesso em tempo real a registros auditáveis, mitigando assimetria informacional — um dos elementos centrais da Teoria dos Custos de Transação (Williamson, 1985; North, 1990). Essa característica fortalece a eficiência de mercado e amplia a previsibilidade das negociações, conforme já apontado por Tapscott e Tapscott (2018).

Em relação aos custos de negociação, a implementação de smart contracts reconfigura a lógica contratual. Ao reduzir a necessidade de intermediários, esses contratos autoexecutáveis aumentam a previsibilidade, reduzem litígios e aceleram os processos de compra e venda. Catalini e Gans (2016) destacam que tal automação não elimina a necessidade de regras formais, mas cria um arranjo híbrido em que a codificação das cláusulas contratuais substitui boa parte da supervisão humana. No contexto dos créditos de carbono, isso é crucial, uma vez que a diversidade de metodologias e certificações historicamente dificultou a padronização.

No caso dos custos de monitoramento, observa-se uma transformação ainda mais significativa. Tradicionalmente elevados, esses custos decorrem da necessidade de auditorias manuais e de visitas in loco, sujeitas a falhas humanas e práticas oportunistas (greenwashing). A

integração da IA com sensores IoT, imagens de satélite e algoritmos de machine learning permite o monitoramento contínuo, em tempo real, e com maior precisão (Russell; Norvig, 2021; Olawade *et al*., 2024). Essa automação não apenas reduz despesas, mas amplia a confiabilidade das verificações ambientais, atendendo a uma das maiores críticas direcionadas ao mercado de carbono.

Quanto aos custos de enforcement, a execução de contratos é historicamente vulnerável a disputas judiciais e incertezas regulatórias (Dixit, 1996). A introdução de mecanismos digitais como token burning e smart contracts reduz tais incertezas ao assegurar a execução automática das cláusulas contratuais. Swinkels (2024) enfatiza que a tokenização dos créditos não só amplia a liquidez, mas também fortalece o cumprimento contratual, ao atrelar o valor do ativo diretamente a registros digitais verificáveis.

Além dos custos transacionais clássicos, dois elementos adicionais emergem como cruciais: liquidez e padronização dos ativos e legitimidade social. No cenário tradicional, a liquidez é limitada pela heterogeneidade das certificações e pela falta de integração internacional. Já o cenário digital, por meio da tokenização e da rastreabilidade garantida pelo blockchain, potencializa a liquidez, permitindo a participação mais ampla de investidores institucionais e pequenos agentes (Swinkels, 2024; Zhou; Zhang, 2022). No que se refere à legitimidade social, a imutabilidade dos registros e a acessibilidade das informações aumentam a confiança pública e institucional, aspecto que autores como Hodgson (2007) destacam como fundamental para a eficiência das instituições econômicas.

Portanto, a análise da matriz evidencia que blockchain e inteligência artificial não apenas reduzem custos de transação, mas também redefinem os arranjos institucionais que sustentam o mercado de créditos de carbono. Esse processo é consistente com a lógica da Nova Economia Institucional, que entende a eficiência econômica como produto tanto de incentivos de mercado quanto de arranjos institucionais que reduzem incertezas (North, 1990).

Os resultados sugerem que a incorporação dessas tecnologias tem implicações que transcendem o mercado de carbono, podendo ser aplicadas a outros mercados ambientais e regulados. A integração entre inovação digital e arranjos institucionais contribui para a criação de mercados mais robustos, líquidos e internacionalmente confiáveis, em consonância com os compromissos do Acordo de Paris e as recomendações do IPCC (2023).

CONCLUSÃO

O presente estudo evidenciou que a integração de blockchain e inteligência artificial configura-se como um marco transformador para a estruturação e operação do mercado de créditos de carbono, especialmente quando analisada sob a ótica da Teoria Institucional–Transacional. A investigação mostrou que essas tecnologias não apenas reduzem custos de transação tradicionalmente elevados, como os de busca de informação, negociação, monitoramento e execução contratual, mas também reconfiguram de forma estrutural os arranjos institucionais que sustentam a credibilidade e a legitimidade desse mercado. Enquanto o modelo convencional de governança é marcado por processos manuais, intermediações onerosas e falta de padronização, o cenário digital promovido pelo blockchain e pela inteligência artificial estabelece uma nova lógica caracterizada por eficiência, rastreabilidade e escalabilidade.

O blockchain, ao assegurar registros imutáveis e auditáveis, representa uma ferramenta fundamental para enfrentar desafios históricos como a dupla contagem, o greenwashing e a heterogeneidade dos ativos ambientais. Em paralelo, a inteligência artificial amplia a capacidade de auditorias em tempo real, proporciona maior precisão na precificação dos créditos e reforça a confiabilidade das transações por meio de análises preditivas e automação de processos. A aplicação da Matriz Institucional–Transacional revelou que o impacto dessas tecnologias vai além da redução de custos operacionais, pois introduz novos pilares de sustentação como transparência, liquidez, legitimidade social e segurança jurídica que se conectam diretamente com os compromissos assumidos no Acordo de Paris e com as recomendações do IPCC (2023). Nesse sentido, blockchain e inteligência artificial não devem ser entendidos apenas como recursos tecnológicos, mas como elementos estruturantes capazes de remodelar a governança econômica e institucional dos mercados ambientais.

A consolidação dessas ferramentas tende a ampliar a atratividade dos créditos de carbono para investidores institucionais, a fortalecer a padronização global dos ativos e a aproximar o mercado de carbono dos padrões de funcionamento dos sistemas financeiros internacionais. No entanto, a implementação plena dessas inovações ainda enfrenta obstáculos, como a ausência de regulamentações unificadas, as dificuldades de interoperabilidade, os custos iniciais de adoção, as resistências institucionais e as preocupações éticas relacionadas à governança de algoritmos e ao uso massivo de dados. Além disso, surge o desafio de assegurar que pequenos produtores, comunidades tradicionais e países em desenvolvimento não sejam excluídos desse processo de

digitalização, mas, ao contrário, possam se beneficiar dele como parte de uma estratégia de inclusão socioambiental.

Dessa forma, conclui-se que blockchain e inteligência artificial, ao promoverem maior eficiência econômica, transparência institucional e robustez regulatória, consolidam-se como pilares centrais para o fortalecimento do mercado de créditos de carbono e para sua inserção nos compromissos globais de mitigação das mudanças climáticas. A adoção dessas tecnologias representa não apenas uma solução técnica para entraves históricos, mas um vetor de transformação paradigmática da governança ambiental, capaz de legitimar o mercado perante a sociedade e potencializar sua relevância no cenário internacional.

Embora os resultados aqui apresentados reforcem o potencial dessas ferramentas digitais, eles também abrem caminho para novas agendas de pesquisa que possam aprofundar o debate. Investigações futuras poderão examinar empiricamente experiências concretas de aplicação de blockchain e inteligência artificial em projetos de créditos de carbono, tanto em mercados regulados quanto voluntários, de modo a mensurar os ganhos de eficiência, confiabilidade e escalabilidade. Também se mostra promissor o desenvolvimento de estudos comparativos internacionais que analisem como diferentes arranjos institucionais e legislações nacionais afetam a adoção dessas tecnologias. Outra frente de investigação relevante refere-se à construção de modelos híbridos de governança digital, nos quais blockchain, inteligência artificial, sensores IoT e big data se integrem em ecossistemas de monitoramento ambiental mais robustos. Soma-se a isso a necessidade de estudos que explorem as dimensões sociais e inclusivas dessa transformação digital, considerando seus impactos em comunidades locais, pequenos agentes econômicos e países em desenvolvimento, além de pesquisas voltadas à regulação e à ética do uso intensivo de dados e algoritmos em mercados ambientais.

Em síntese, a conclusão que se impõe é que a incorporação de blockchain e inteligência artificial não apenas fortalece a eficiência e a credibilidade do mercado de créditos de carbono, mas inaugura um novo paradigma de governança ambiental global. Ao mesmo tempo em que responde a problemas históricos, essa transformação impõe novos desafios que exigem um esforço coletivo de pesquisadores, formuladores de políticas, empresas e sociedade civil para garantir que os benefícios da digitalização se traduzam em um mercado mais transparente, inclusivo e sustentável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Intituto Kunumi pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALI, G. *et al*. Leveraging the internet of things, remote sensing, and artificial intelligence for sustainable forest management. **Babylonian Journal of Internet of Things**, v. 2025, p. 1-65, 2025.

BRASIL. Regulamentação dos instrumentos de mercado do Acordo de Paris: Artigo 6 e os ITMOs. **Interesse Nacional**, 2024. Disponível em: https://interessenacional.com.br/regulamentacao-dos-instrumentos-de-mercado-do-acordo-de-paris/. Acesso em: 2 set. 2025.

BRUNO, F. M. R.; FRAGA, J. M. L. A crise climática, o acordo de Paris e as perspectivas sobre o aquecimento global após a (des) regulamentação ambiental de Washington. **Revista Aurora**, v. 11, n. 1, p. 23-48, 2018.

BODNAR, Z.; HERNÁNDEZ, J. G. V. Mercado de Créditos de Carbono na Perspectiva da Governança Climática Transnacional: Experiências do Brasil e da Colômbia. **Novos Estudos Jurídicos**, v. 27, n. 3, p. 452-474, 2022.

CATALINI, C.; GANS, J. The value of blockchain technology. **MIT Sloan Research Paper**, n. 5191-16, p. 1-32, 2016.

COASE, R. H. The nature of the firm. **Economica**, v. 4, n. 16, p. 386-405, nov. 1937. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1468-0335.1937.tb00002.x. Acesso em: 25 ago. 2025.

DIXIT, A. **The making of economic policy: a transaction-cost politics perspective. Cambridge:** MIT Press, 1996.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. Ediitora Atlas SA, 2008.

HODGSON, G. M. Evolutionary and institutional economics as the new mainstream?. **Evolutionary and institutional economics review**, v. 4, n. 1, p. 7-25, 2007.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE –. ***Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change***. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/. Acesso em: 20 ago. 2025.

JONSDOTTIR, B. *et al*. Barriers to using ESG data for investment decisions. **Sustainability**, v. 14, n. 9, p. 5157, 2022.

LE, T. T. *et al*. Digital platforms and SMEs' performance: the moderating effect of intellectual capital and environmental dynamism. **Management Decision**, v. 62, n. 10, p. 3155-3180, 2024.

LUI, M. A. **Mercados de carbono : pilares da estratégia global contra as mudanças climáticas.** 2024. Tese (Doutorado) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 06 dez. 2024. Disponível em:

https://repositorio.ulisboa.pt/handle/10400.5/96616. Acesso em: 11 jun. 2025.

MOUGAYAR, W. ***The business blockchain: promise, practice, and the application of the next internet technology.*** Hoboken: Wiley, 2016.

NETKE, A. S., *et al*. Blockchain-Based Carbon Credit Ecosystem. **International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology**, v. 13, n. 1, p. 213–218, jan. 2025. ISSN 2321-9653. DOI: 10.22214/ijraset.2025.66232. Disponível em: https://www.ijraset.com/research-paper/blockchain-based-carbon-credit-ecosystem. Acesso em: 2 set. 2025.

NORTH, D. C. ***Institutions, institutional change and economic performance***. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

OLAWADE, D. B. *et al*. Artificial intelligence in environmental monitoring: Advancements, challenges, and future directions. **Hygiene and Environmental Health Advances**, v. 12, p. 100114, 2024.

PROLO, C. D. *et al*. Explicando os mercados de carbono na era do Acordo de Paris. **Rio de Janeiro: Instituto Clima e Sociedade**, 2021.

POHLMANN, Marcelo Coletto *et al*. Impacto da especificidade de ativos nos custos de transação, na estrutura de capital e no valor da empresa. **Revista Contabilidade & Finanças**, v. 15, p. 24-40, 2004.

ROSA, L.; CASTRO, A. ESG, governança ambiental e o mercado de carbono**.** ***Revista de Administração e Sustentabilidade***, Brasília, v. 9, n. 1, p. 55-77, 2025.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. ***Artificial intelligence: a modern approach***. 4. ed. London: Pearson, 2021.

SWINKELS, L. Trading carbon credit tokens on the blockchain. **International Review of Economics & Finance**, v. 91, p. 720-733, mar. 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1059056024000121. Acesso em: 25 ago. 2025.

TAPSCOTT, D.; TAPSCOTT, A. ***Blockchain revolution: how the technology behind bitcoin and other cryptocurrencies is changing the world***. London: Penguin, 2018.

VILLABRUNA, V. E. *et al*. Barriers and strategies for green investments in environmental, social and governance: a seaport companies' study. **Management of Environmental Quality: An International Journal,** v. 35, n. 6, p. 1193-1212, 2024.

WILLIAMSON, O. E. **The economic institutions of capitalism: firms, markets, relational contracting**. New York: Free Press, 1985

ZHOU, Q.; ZHANG, Q. Simulation research on carbon emissions trading based on blockchain. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v. 30, n. 1, p. 1-12, jan. 2022. Disponível em: https://ijspm.vgtu.lt/index.php/JEELM/article/view/15107. Acesso em: 11 ago. 2025.