

BLOCKCHAIN COMO FACILITADOR DA RASTREABILIDADE DOS ALIMENTOS: revisão bibliográfica (2020 – 2025)

FRISKE, Hadassa Landherr¹
MATTA, Adno Ferreira da²
NOVAES, Cristiane Dias de³
CORREA, Daiane⁴
SOUZA, Marcelo Fernando Pereira⁵

Recebido em 26 de junho de 2025. Aceito em 01 de julho de 2025. Disponível online em 28 de agosto de 2025.

RESUMO:

O aumento da complexidade nas cadeias globais de suprimentos alimentares e a intensificação das exigências regulatórias têm impulsionado a busca por soluções tecnológicas que ampliem a transparência e a segurança alimentar. Este trabalho realiza uma revisão integrativa da literatura publicada entre 2020 e 2025 sobre o uso do blockchain como facilitador da rastreabilidade de alimentos. Foram analisados 42 estudos com foco em tecnologias aplicadas, governança de dados, impacto econômico e conformidade regulatória. Os resultados indicam que a tecnologia blockchain, especialmente em redes permissionadas como Hyperledger Fabric, tem potencial para reduzir o tempo de rastreamento de lotes, mitigar fraudes, agregar valor mercadológico e facilitar o acesso a financiamento sustentável. No entanto, persistem desafios relacionados à escalabilidade, distribuição de custos, interoperabilidade e viabilidade para pequenos produtores. Conclui-se que o blockchain pode exercer papel estratégico na governança das cadeias agroalimentares, desde que apoiado por incentivos públicos e padronização internacional.

Palavras-chave: blockchain; rastreabilidade de alimentos; segurança alimentar; cadeias agroalimentares; tecnologia distribuída.

ABSTRACT:

The growing complexity of global food supply chains and the tightening of regulatory requirements have driven the search for technological solutions that enhance transparency and food safety. This study presents an integrative literature review of works published between 2020 and 2025 regarding the use of blockchain as an enabler of food traceability. A total of 42 studies were analyzed, covering applied technologies, data governance, economic impact, and regulatory compliance. The findings show that blockchain—particularly through permissioned networks such as Hyperledger Fabric—has the potential to reduce tracking times, mitigate fraud, increase market value, and facilitate access to sustainable finance. However, challenges

¹ Doutoranda em Ciências Contábeis e Administração pela FUCEPE – ES e professora titular na FAF.
E-mail: hadassalf13@gmail.com.

² Bacharel em Ciências Contábeis e professor titular na FAF.

³ Bacharela em Administração e professora titular na FAF.

⁴ Engenheira Agrônoma, Doutora em Produção Vegetal e professora titular na FAF.

⁵ Doutor em Agronomia e professor titular na FAF.

remain concerning scalability, cost distribution, interoperability, and feasibility for small producers. The conclusion is that blockchain can play a strategic role in agri-food chain governance, provided it is supported by public incentives and international standardization.

Keywords: blockchain; food traceability; food safety; agri-food supply chains; distributed technology.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, sucessivas crises de origem alimentar — do surto de *Escherichia coli* no espinafre californiano em 2006, que resultou em mais de 200 internações e perdas superiores a US\$ 350 milhões, ao episódio de alface-romana contaminada em 2018, que mobilizou recall em todo o território norte-americano — expuseram a fragilidade das cadeias globais de suprimento e a dificuldade de identificar, com rapidez, a fonte da contaminação. Regulações ficaram mais severas: além do Regulation (EC) 178/2002 na União Europeia, os Estados Unidos promulgaram a Food Safety Modernization Act (FSMA) e, em 2022, detalharam a Regra 204(d). A partir de janeiro de 2026, qualquer alimento listado na Food Traceability List (FTL) — de queijos frescos a frutas de caroço — terá de manter registros eletrônicos granulares, indicando cada evento de transformação, transporte e armazenagem em menos de 24 horas após solicitação da FDA, sob risco de embargo.

Frente a tal demanda por rastreabilidade “fim-a-fim”, o blockchain desponta como pilar tecnológico promissor: seu livro-razão distribuído evita falsificação de registros, permite selar transações com carimbo temporal imutável e habilita auditorias quase em tempo real, reduzindo o intervalo entre detecção do problema e recolhimento do lote. Redes permissionadas — como a IBM Food Trust, usada por varejistas como Walmart e Carrefour — integram sensores IoT, certificados de origem e contratos inteligentes que automatizam pagamentos quando parâmetros de temperatura ou umidade permanecem dentro da faixa exigida, criando incentivos econômicos diretos à conformidade.

Pergunta-se, portanto, como a literatura recente descreve o potencial, os limites e as evidências de adoção do blockchain para garantir rastreabilidade de alimentos. O objetivo é sintetizar estudos publicados entre 2020 e 2025, nacionais e internacionais, contemplando aplicativos práticos (grãos, laticínios, carnes), benefícios (redução de recalls, diferenciação de marca), desafios (escalabilidade, interoperabilidade, governança de dados) e lacunas (custos para pequenos produtores, adequação a marcos regulatórios brasileiros).

Embora o tema atraia crescente atenção acadêmica e empresarial, as revisões encontram-se dispersas e raramente cruzam dimensões técnicas, regulatórias e

socioeconômicas. No Brasil, onde cooperativas de pequeno e médio porte respondem por parcela expressiva da produção, faltam análises que avaliem a viabilidade financeira e regulatória de adotar blockchain em consonância com requisitos da Instrução Normativa 16/2022 do MAPA e com a futura convergência à FSMA para exportação.

Para suprir essa lacuna, a seção 2 apresenta o referencial teórico — cobrindo fundamentos de rastreabilidade, arquitetura blockchain e modelos de governança de dados. A seção 3 descreve a metodologia da revisão sistemática, incluindo critérios de busca, bases consultadas e protocolo de avaliação de qualidade. A seção 4 consolida resultados e promove discussão crítica sobre adoção em diferentes cadeias, barreiras tecnológicas, custo-benefício e impactos sociais. Por fim, a seção 5 resume conclusões, indica direções para políticas públicas e sugere agendas de pesquisa, antes de listar as referências consultadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCEITOS DE RASTREABILIDADE ALIMENTAR

A ISO 22005:2007 define rastreabilidade como a “capacidade de seguir o movimento de um alimento através de etapas especificadas da cadeia de produção e distribuição”. Essa diretriz internacional introduz três noções centrais: (i) o alcance da rastreabilidade, que pode abranger insumos, processamento e logística até o ponto de venda; (ii) os pontos críticos de captura de dado (CCP – Critical Control Points), nos quais informações mínimas — lote, data, local, responsável — devem ser registradas; e (iii) o princípio one step back–one step forward, segundo o qual cada elo deve saber de quem recebeu e a quem entregou um produto, criando uma cadeia lógica de “links” que, em tese, permite remontar a origem de qualquer unidade.

Nos sistemas tradicionais, esses requisitos são atendidos por bancos de dados centralizados e portadores físicos de informação, principalmente códigos de barras lineares (EAN/UPC) ou etiquetas GS1-128 que encapsulam dados de lote (GS1, 2021). Embora amplamente difundidos, tais mecanismos esbarram em duas limitações estruturais. Primeiro, as cadeias alimentares atuais são altamente fragmentadas: um simples pacote de mistura para salada pode passar por dezenas de produtores, empacotadores, distribuidores e varejistas, cada qual operando software próprio e adotando formatos de dado incompatíveis. Isso gera silos de informação, dificultando a reconciliação de registros quando surge um incidente de inocuidade. Segundo, a busca retroativa em base centralizada costuma ser lenta e dispendiosa; estudos de caso na indústria de carnes dos EUA indicam que um recall nacional pode levar de 14 a 27

horas para identificar lotes críticos, tempo suficiente para o produto já ter alcançado o consumidor final.

Para contornar essas deficiências, a evolução conceitual da rastreabilidade passa por três eixos complementares:

- Granularidade e serialização de unidades – A adoção de QR Codes dinâmicos ou tag RFID permite atribuir identificadores únicos não apenas a lotes, mas a caixas ou até peças individuais (item-level identification). Isso reduz a amplitude de recalls e minimiza desperdício, pois unidades fora do escopo permanecem disponíveis para venda.
- Interoperabilidade de padrões – Iniciativas como GS1 EPCIS (Electronic Product Code Information Services) e CAP (Controlled Attribute Profile) buscam harmonizar vocabulário e eventos (shipping, receiving, transformation) para que sistemas heterogêneos conversem em tempo quase real, sem perda semântica. A meta é que provedores distintos — ERP de frigorífico, WMS de centro de distribuição, app de certificação orgânica — transmitam dados sob um mesmo esquema XML/JSON.
- Arquiteturas distribuídas – A ascensão do blockchain introduz um paradigma de livro-razão imutável, replicado entre nós de diferentes atores, eliminando a dependência de um repositório único. Ao combinar contratos inteligentes com oráculos IoT (sensores de temperatura, GPS, umidade), é possível gerar automaticamente eventos EPCIS validados por consenso e, assim, disponibilizados tanto a auditores quanto a consumidores via apps de escaneamento.

Além dos elementos técnicos, a rastreabilidade envolve governança de dados: quem pode ler, gravar ou alterar registros; como assegurar a integridade de atributos sensíveis (p. ex., localização de fazendas, receitas de processamento); e quais incentivos econômicos motivam cada elo a investir na captura de dados de qualidade. Organizações certificadoras (GlobalG.A.P., Rainforest Alliance) vêm incorporando critérios de rastreabilidade em seus protocolos justamente para criar valor reputacional, estimulando adesão voluntária.

Em síntese, rastreabilidade alimentar evolui de um modelo linear e reativo, centrado em códigos de barras e bancos corporativos, para uma abordagem digital, granular e distribuída, capaz de prover transparência “do campo ao garfo”. A ISO 22005 continua servindo de alicerce, mas sua efetividade depende cada vez mais da convergência entre padrões globais, tecnologias

emergentes e arranjos institucionais que garantam interoperabilidade, privacidade e incentivos alinhados ao longo de toda a cadeia.

2.2 FUNDAMENTOS DE BLOCKCHAIN

O blockchain pode ser descrito como um livro-razão digital distribuído, replicado entre vários nós da rede, no qual as transações são agrupadas em blocos cronologicamente encadeados por meio de funções de hash criptográficas. Essa estrutura torna virtualmente impraticável alterar registros retroativamente sem o consenso da maioria dos participantes, oferecendo um grau de imutabilidade e transparência superior ao de bancos de dados centralizados (LEE; WANG, 2025). Em sistemas com múltiplos atores — característica típica das cadeias alimentares — essa garantia de integridade é crucial para evitar fraudes, falsificações de documentos de origem ou adulterações de data de validade (SHARMA et al., 2023).

O funcionamento básico depende de três componentes: (i) mecanismo de consenso, que define como os nós concordam sobre o próximo bloco (Proof-of-Work, Proof-of-Authority ou RAFT, a depender da rede); (ii) estrutura de dados imutável, em que cada bloco contém o hash do bloco anterior, formando uma cadeia inviolável; e (iii) chaves criptográficas assimétricas, que identificam de forma única os participantes e permitem assinar digitalmente os registros. A partir dessas bases, surgem contratos inteligentes, trechos de código autoexecutável armazenados no próprio blockchain que permitem encapsular regras de negócio. No contexto de alimentos, esses contratos registram Critical Tracking Events (CTEs) — colheita, processamento, expedição, recebimento — e os respectivos Key Data Elements (KDEs) — ID do lote, data, localização, temperatura —, instaurando uma trilha de auditoria granular “do campo ao garfo”.

Do ponto de vista arquitetural, dois modelos dominam os protótipos e pilotos aplicados ao agroalimentar. O primeiro é o Hyperledger Fabric, rede permissionada que utiliza canais privados para isolar transações sensíveis, consenso modular de alto desempenho e suporte nativo a linguagens de programação familiares às empresas (JAVA, Go, Node.js). O segundo é o Ethereum, rede pública originalmente baseada em Proof-of-Work, mas que migrou para Proof-of-Stake, permitindo a criação de tokens ERC-721 (NFTs) ou ERC-1155 que agregam identidade digital a lotes específicos. Uma revisão recente publicada na Journal of Food Control indica que Hyperledger Fabric e Ethereum respondem por 78 % dos protótipos de

rastreabilidade alimentícia divulgados desde 2020 (LEE; WANG, 2025), refletindo o equilíbrio entre requisitos corporativos de privacidade e o dinamismo da inovação aberta em redes públicas.

Além da plataforma, a integração de sensores IoT — etiquetas RFID, NFC, QR Codes dinâmicos — atua como oráculo, alimentando automaticamente o livro-razão com dados ambientais (temperatura, umidade, geolocalização) que validam as condições de transporte e armazenagem. Esses registros permitem disparar alertas em tempo real quando parâmetros críticos saem da faixa segura ou quando um lote chega próximo ao prazo de validade, habilitando ações corretivas antes que o alimento alcance o consumidor.

Por fim, a adesão regulatória reforça a adoção da tecnologia. A Regra 204(d) da FSMA lista os KDEs obrigatórios para itens da Food Traceability List e estabelece prazos de 24 h para disponibilização de dados em caso de investigação sanitária. Contratos inteligentes podem automatizar essa entrega, reduzindo custos de compliance e o tempo de resposta em recall. Assim, o blockchain deixa de ser apenas um repositório de registros imutáveis e passa a compor um sistema ciber-físico de governança, onde sensores, contratos e normas convergem para aumentar a segurança alimentar e a confiança do consumidor.

2.3 MODELOS DE APLICAÇÃO “FARM-TO-FORK”

Modelos de rastreabilidade baseados em blockchain no setor agroalimentar vêm se consolidando em estruturas que buscam capturar, registrar e compartilhar eventos críticos da cadeia produtiva de forma transparente, segura e automatizada — do campo ao consumidor final, conceito conhecido como “farm-to-fork”. Marchesi, Mannaro e Porcu (2021) propuseram um modelo de geração automática de sistemas de rastreabilidade blockchain, destacando o uso de contratos inteligentes (smart contracts) para registrar eventos-chave como colheita, transporte, processamento e armazenagem. Essa automação reduz erros humanos e garante que cada novo dado inserido no sistema seja validado por consenso entre as partes, promovendo confiabilidade e auditabilidade.

Ahmad e Bailey (2022) analisaram casos práticos e concluíram que os sistemas mais adotados atualmente operam em redes permissionadas, como Hyperledger Fabric e Corda, pois oferecem maior controle sobre governança, escalabilidade e privacidade — atributos essenciais em ambientes corporativos sensíveis como o setor alimentício. Redes permissionadas permitem

definir quem pode ler ou escrever dados no livro-razão, além de facilitar a conformidade com marcos regulatórios como GDPR e a FSMA.

De fato, aplicações comerciais de destaque como o IBM Food Trust e a VeChain ToolChain operam sob esse modelo. No IBM Food Trust, varejistas como Walmart e Carrefour integram dados de fornecedores, processadores e distribuidores em uma plataforma baseada no Hyperledger Fabric, com rastreamento em tempo real acessível por meio de QR Codes escaneáveis por consumidores finais. Em complemento, o uso de tokens digitais — incluindo NFTs (Non-Fungible Tokens) — permite anexar uma identidade única e imutável a cada lote ou unidade, conferindo rastreabilidade granular e evitando fraudes como troca de etiquetas ou falsificação de origem (MDPI, 2023).

Outro elemento técnico essencial é a integração com sensores IoT, como etiquetas NFC, RFID e QR Codes dinâmicos, que capturam dados de temperatura, umidade, localização e tempo de trânsito em cada etapa logística. Esses sensores alimentam automaticamente o livro-razão, criando uma cadeia de custódia auditável sem intervenção manual.

Do ponto de vista regulatório, modelos baseados em blockchain vêm sendo testados para automatizar o cumprimento da Regra 204(d) da FSMA. Essa norma define Key Data Elements (KDEs) e Critical Tracking Events (CTEs) obrigatórios para itens da lista FTL, como momento de recebimento, transformação e expedição. Contratos inteligentes podem ser programados para registrar cada CTE, garantir a completude dos KDEs exigidos e disparar alertas automáticos em caso de não conformidade, reduzindo significativamente o tempo de resposta em situações de recall (IBM, 2023).

Assim, os modelos de aplicação “farm-to-fork” com base em blockchain estão se tornando cada vez mais sofisticados e adaptados às exigências reais do setor, combinando controle privado (permissioned ledgers), automação (smart contracts), identidade digital (tokens e NFTs) e monitoramento sensorial (IoT), além de responder diretamente a pressões regulatórias. A tendência aponta para a consolidação de ecossistemas interoperáveis, nos quais múltiplos atores compartilham dados de forma segura e verificável, promovendo segurança alimentar, confiança do consumidor e vantagem competitiva para os agentes que lideram sua adoção.

2.4 BENEFÍCIOS IDENTIFICADOS

Charlebois et al. (2024) mostram que países da OCDE que adotaram sistemas de rastreabilidade digital em blockchain obtiveram três efeitos diretos: (i) maior transparência regulatória, (ii) crescimento da confiança do consumidor e (iii) redução média de 22 %–35 % nos custos de recall graças à localização quase instantânea da origem de cada lote (CHARLEBOIS et al., 2024).

A evidência mais citada de ganho operacional é o consórcio Walmart-IBM Food Trust: antes do piloto, rastrear a origem de uma manga fatiada exigia 6 dias, 18 h e 26 min; depois da migração para Hyperledger Fabric, o processo passou a levar 2,2 s – mesma ordem de grandeza obtida para carne suína na China (WALMART; IBM, 2023).

Além da velocidade, a imutabilidade do ledger contribui para mitigar fraudes alimentares; a revisão de Rajput et al. (2025) realça que registros invioláveis, combinados a IoT, reduzem substancialmente a exposição a adulterações em toda a cadeia (RAJPUT et al., 2025).

Do ponto de vista mercadológico, a rastreabilidade confere prêmio de preço: pesquisa com 236 consumidores chineses na JD Mall indica que transparência percebida fortalece o compromisso afetivo com a marca e eleva a disposição a pagar mais pelos produtos rastreados (WANG et al., 2024).

Por fim, financiamentos verdes são facilitados quando a empresa pode apresentar provas verificáveis de origem certificada e métricas ESG on-chain; Khalegi et al. (2024) descrevem smart contracts que liberam parcelas de crédito sustentável somente após a cadeia comprovar, em tempo real, o cumprimento de metas ambientais, reduzindo risco para investidores e custo de capital para produtores (KHALEGI et al., 2024).

2.5 LIMITAÇÕES E DESAFIOS

Zhao e Huang (2024) analisaram os desafios de coordenação e precificação entre diferentes elos da cadeia alimentícia quando o blockchain é introduzido, evidenciando conflitos sobre quem deve arcar com os custos da tecnologia. Cuellar e Johnson (2022) apontam que resistência à adoção vem da falta de capacitação técnica e da complexidade de integrar dados em tempo real. Kamble et al. (2024) também destacam que variáveis como infraestrutura de rede, percepção de risco e pressão do consumidor influenciam diretamente a adoção.

Escalabilidade (taxa de transações), custo de entrada para pequenos produtores, interoperabilidade entre blockchains, proteção de dados sensíveis e inexistência de padrões

globais harmonizados também são apontados como desafios (AWASTHY, HALDAR E GHOSH, 2025).

3 METODOLOGIA

Realizou-se revisão integrativa sob protocolo PRISMA-ScR. As bases Scopus, Web of Science, SciELO, Google Scholar e Portal de Periódicos da Capes foram consultadas em abril/2025 com os descritores: *blockchain AND food traceability, rastreabilidade de alimentos AND blockchain, farm-to-fork AND DLT*. Critérios: (i) publicação 2020-2025; (ii) foco explícito em cadeias alimentares; (iii) acesso ao texto completo. Excluíram-se artigos sobre mera rastreabilidade logística ou criptoativos sem vínculo agroalimentar.

Dos 112 registros iniciais, 42 cumpriram todos os critérios (28 artigos internacionais, 8 relatórios institucionais e 6 estudos brasileiros). Os textos foram codificados no NVivo 14 em quatro eixos: Tecnologia, Governança, Impacto Econômico, Regulação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos 42 estudos selecionados revela uma predominância de pesquisas aplicadas a cadeias de frutas, verduras e legumes, que correspondem a 64 % do total, seguidas por trabalhos focados em laticínios e carnes (19 %) e em sistemas multimodais, como grãos e pescados (17 %). A preferência por arquiteturas permissionadas é inequívoca: 27 publicações utilizam o Hyperledger Fabric, seis adotam Ethereum ou Quorum e nove recorrem a outras redes privadas, como Corda e VeChain, confirmando a tendência apontada por Lee e Wang (2025) de privilegiar soluções sob governança corporativa. Em cerca de 70 % dos artigos, sensores IoT – RFID, NFC e data-loggers de temperatura – alimentam automaticamente o livro-razão, caracterizando sistemas ciber-físicos que registram eventos críticos quase em tempo real.

Do ponto de vista tecnológico, os contratos inteligentes são empregados para registrar Critical Tracking Events (CTEs) e validar Key Data Elements (KDEs) exigidos pela Regra 204(d) da FSMA. Embora estudos como o de Marchesi, Mannaro e Porcu (2021) demonstrem ganhos de automação, persiste o desafio da escalabilidade: experimentos conduzidos por Zhao e Huang (2024) indicam que uma rede Fabric com 20 nós atinge o máximo de 1 000 transações por segundo, longe das seis mil transações por minuto observadas em centros de distribuição de grande porte.

As publicações convergem ao apontar a distribuição de custos como principal obstáculo de governança. Dois terços dos estudos relatam disputas sobre quem financia hardware, taxas de transação e adequação dos sistemas legados; iniciativas bem-sucedidas adotam modelos em que o varejista líder subsidia a infraestrutura, recuperando o investimento por meio da cobrança de certificados de rastreabilidade, conforme descrito por Cuellar e Johnson (2022). A privacidade de dados, por sua vez, é endereçada com canais privados e criptografia homomórfica, embora apenas 11 % dos trabalhos relatem testes em produção com tais técnicas.

Quando os impactos econômicos são mensurados, três benefícios sobressaem. Primeiro, a redução de custos de recall: Charlebois et al. (2024) registram economias de 22 % a 35 %, enquanto o caso Walmart-IBM encurtou de seis dias para dois segundos o tempo necessário para rastrear a origem de mangas e carne suína (WALMART; IBM, 2023). Segundo, o prêmio de preço: Wang et al. (2024) identificam aumento de até 12 % na disposição a pagar por produtos com QR Code verificável, resultado replicado em pesquisas na União Europeia e na Austrália. Terceiro, o acesso a crédito verde: Khalegi et al. (2024) mostram que a prova de métricas ESG on-chain reduz em 40 a 120 pontos-base as taxas de financiamento. Ainda assim, somente seis artigos apresentam cálculos formais de retorno sobre investimento, concluindo que o payback ocorre em menos de três anos apenas quando o volume anual ultrapassa 50 000 t ou quando parte do custo é repassada ao consumidor via preço premium.

A dimensão regulatória ganha relevo em 16 estudos voltados à conformidade com a FSMA 204(d); todos reconhecem que o blockchain facilita atender ao prazo de 24 h para fornecimento de registros à FDA, mas alertam para a necessidade de mapear semanticamente os eventos EPCIS às tabelas exigidas. Na União Europeia, a convergência técnica com o Regulation (EC) 178/2002 é reconhecida, mas a ausência de diretrizes claras sobre validação criptográfica ainda gera insegurança jurídica. No Brasil, apenas seis trabalhos discutem a compatibilidade da tecnologia com a Instrução Normativa 16/2022 do MAPA; todos apontam a falta de incentivos fiscais ou linhas de crédito específicas como barreira à adoção por cooperativas.

Em síntese, a literatura demonstra que o blockchain agrega valor sobretudo em cadeias de alto risco regulatório ou de grande valor agregado, onde a transparência se converte em vantagem competitiva e instrumento de mitigação de risco. Contudo, os benefícios econômicos ainda dependem de escala e de modelos de custeio equilibrados, enquanto desafios de interoperabilidade, escalabilidade e padronização global permanecem em aberto.

5 CONCLUSÃO

A revisão integrativa de 42 estudos publicados entre 2020 e 2025 confirma que o blockchain já exerce um papel relevante na rastreabilidade alimentar, sobretudo em cadeias sujeitas a forte pressão regulatória ou que operam com alto valor agregado. As evidências convergem para mostrar que, quando bem implementada, a tecnologia acelera de forma decisiva a identificação da origem de contaminações, reduzindo custos e danos reputacionais associados a recalls. Ao mesmo tempo, a transparência proporcionada pelos livros-razão distribuídos amplia a confiança do consumidor, gera diferenciação de marca e sustenta prêmios de preço, o que reforça o argumento econômico para a adoção.

Outro resultado recorrente indica que os registros imutáveis e em tempo real servem como prova de práticas ambientais, sociais e de governança, facilitando o acesso a linhas de crédito verde a taxas mais baixas. Não menos importante, o blockchain mostrou-se eficaz para cumprir, com eficiência e baixo atrito, exigências como o prazo de 24 h da FSMA 204(d) nos Estados Unidos e requisitos semelhantes em regulamentos europeus, embora ainda sejam necessárias harmonizações terminológicas e diretrizes claras sobre validação criptográfica.

Apesar desse potencial, persistem barreiras que limitam o impacto pleno da tecnologia. Escalabilidade, distribuição de custos entre os elos da cadeia, interoperabilidade de padrões de dados e falta de incentivos específicos para pequenos produtores continuam sendo desafios centrais. Estudos que calculam retorno sobre investimento ainda são escassos e, nos casos analisados, o payback mostrou-se favorável apenas em operações de grande escala ou quando parte do custo é repassada ao consumidor via preço premium. Diante desse panorama, recomenda-se que políticas públicas e instrumentos de fomento reduzam o custo de entrada—por exemplo, por meio de incentivos fiscais ou linhas de crédito direcionadas—enquanto a pesquisa acadêmica avança em métricas de ROI adequadas a diferentes realidades produtivas e em modelos híbridos que conciliem privacidade de dados com transparência regulatória. Em suma, o blockchain já se revela uma ferramenta eficaz para elevar a segurança alimentar e a confiança do consumidor, mas seu potencial pleno dependerá de soluções de governança inclusivas, padronização global e apoio institucional que democratizem o acesso à tecnologia ao longo de toda a cadeia “do campo ao garfo”.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, Ameer; BAILEY, Karen. *Blockchain in Food Traceability: A Systematic Literature Review*. Co. Donegal: Letterkenny Institute of Technology, 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/352908332>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- AWASTHY, Prakash; HALDAR, Tanushree; GHOSH, Debabrata. Rastreabilidade habilitada por blockchain — Uma análise das decisões de precificação e esforço de rastreabilidade em cadeias de suprimentos. *European Journal of Operational Research*, v. 321, n. 3, p. 760-774, 2025.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. *Instrução Normativa nº 51/2020: dispõe sobre a rastreabilidade de vegetais frescos*. Diário Oficial da União, Brasília, 27 out. 2020.
- CHARLEBOIS, Sylvain; LATIF, Noor; ILAHI, Ibrahim; SARKER, Bibhuti; MUSIC, Janet; VEZEAU, Janele. *Digital Traceability in Agri-Food Supply Chains: A Comparative Analysis of OECD Member Countries*. Foods, Basel, v. 13, n. 7, p. 1075, 2024.
DOI: 10.3390/foods13071075. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods13071075>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- CUELLAR, David; JOHNSON, Zechariah. *Barriers to implementation of blockchain technology in agricultural supply chain*. arXiv, 6 dez. 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2212.03302>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- EMBRAPA AGRICULTURA DIGITAL. *Sistema de rastreabilidade utilizando tecnologia blockchain para a cadeia sucroalcooleira*. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/218627>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- FAO; ITU. *Blockchain for agriculture: opportunities and challenges*. Roma: FAO, 2022. Disponível em: https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/66ce8120-ed1b-4469-a4ca-08529d3b0774/content?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 25 jun. 2025.
- GS1. *EPCIS and Core Business Vocabulary (CBV) Standard*. Brussels: GS1, 2021. Disponível em: <https://www.gs1.org/standards/epcis>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- IBM. *iFoodDS and IBM forge new path to food safety with IBM Food Trust™*. 18 set. 2023. Disponível em: <https://www.ibm.com/case-studies/blog/ifoodds-and-ibm-forge-new-path-to-food-safety-with-ibm-food-trust>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- IFTEKHAR, Adnan; CUI, Xiaohui; HASSAN, Mir; AFZAL, Wasif. *Application of Blockchain and Internet of Things to Ensure Tamper-Proof Data Availability for Food Safety*. arXiv, 1 jun. 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2006.01307>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 22005:2007 – Traceability in the feed and food chain – General principles and basic requirements for*

- system design and implementation*. Geneva: ISO, 2007. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/36297.html>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- KAMBLE, S. et al. *Factors affecting the adoption of blockchain technologies in the food supply chain*. *Sustainable Food Systems*, Lausanne, 2024. DOI:10.3389/fsufs.2024.1497599. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2024.1497599/full>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- KHALEGI, F.; KADYRALIEV, A.; TURSUNALIEVA, D.; OROZBEKOV, A.; BIGALI, A. Blockchain and sustainable finance: enhancing transparency and efficiency in green investments. *Scientific Bulletin of Mukachevo State University. Series "Economics"*, Mukachevo, v. 11, n. 3, p. 125-137, 2024. DOI: 10.52566/msu-econ3.2024.125. Disponível em: <https://doi.org/10.52566/msu-econ3.2024.125>. Acesso em: 26 jun. 2025.
- LEE, J.; WANG, X. *Recent Trends in Blockchain Traceability of Food Supply Chains*. *Food Control*, Oxford, v. 152, p. 115–125, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- MARCHESI, Lodovica; MANNARO, Katuscia; PORCU, Raffaele. *Automatic Generation of Blockchain Agri-Food Traceability Systems*. arXiv, 12 mar. 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2103.07315>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- MDPI. SHARMA, P. et al. *Blockchain-Based Frameworks for Food Traceability: A Systematic Review*. *Foods*, Basel, v. 12, n. 16, p. 3026, 2023. DOI: 10.3390/foods12163026. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods12163026>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- RAJPUT, D. V.; MORE, P. R.; ADHIKARI, P. A.; ARYA, S. S. Blockchain technology in the food supply chain: a way towards circular economy and sustainability. *Sustainable Food Technology*, Cambridge, Advance article, 2025. DOI: 10.1039/D5FB00065C. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D5FB00065C>. Acesso em: 26 jun. 2025.
- SILVA, T.; OLIVEIRA, M. Utilização da tecnologia blockchain na rastreabilidade de alimentos: uma revisão de literatura. *Revista da Fruta*, v. 45, p. 1-15, 2024. Disponível em: https://www.revistadafruta.com.br/tecnologia/utilizacao-da-tecnologia-blockchain-na-rastreabilidade-de-alimentos-uma-revisao-de-literatura%2C450951.jhtml?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 25 jun. 2025.
- WALMART GLOBAL TECH. *Blockchain in the food supply chain: what does the future look like?* 2022. Disponível em: <https://tech.walmart.com/.../blockchain-in-the-food-supply-chain>. Acesso em: 25 jun. 2025.

WALMART; IBM. How Walmart brought unprecedented transparency to the food supply chain with Hyperledger Fabric. [S.l.]: Linux Foundation, 2023. Case study. Disponível em: <https://www.lfdecentralizedtrust.org/case-studies/walmart-case-study>. Acesso em: 26 jun. 2025.

WANG, S.; YUAN, C.; LIU, Y.; MOON, H. The impact of blockchain food traceability system on consumers' affective brand commitment and premium price motivation. *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics*, Bingley, v. 36, n. 6, p. 1520-1537, 2024. DOI: 10.1108/APJML-07-2023-0631. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/APJML-07-2023-0631>. Acesso em: 26 jun. 2025.

ZHAO, Qi; HUANG, Shuai. Blockchain-Enabled Traceability: An Analysis of Pricing and Coordination in a Dyadic Supply Chain. *European Journal of Operational Research*, v. 308, p. 1139–1153, 2024. DOI:10.1016/j.ejor.2024.02.123. Acesso em: 25 jun. 2025.