UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO E SISTEMAS

João Victor Zulato Martins

Modelo de blockchain padrão adaptado para a cadeia cafeeira

JOÃO MONLEVADE
2025

João Victor Zulato Martins

Modelo de blockchain padrão adaptado para a cadeia cafeeira

Trabalho de conclusão de curso de Engenharia da Computação do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia da Computação.

Orientadora: Dra. Luciana Paula Reis.

JOÃO MONLEVADE

2025

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIENCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUCAO - ICEA

FOLHA DE APROVAÇÃO

João Victor Zulato Martins

Modelo de blockchain padrão adaptado para a cadeia cafeeira

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Computação da Universidade Federal
de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Computação

Aprovada em 04 de setembro de 2025

Membros da banca

Dra. Luciana Paula Reis - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Euler Horta Marinho (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dra. Maressa Nunes Ribeiro Tavares (Universidade Federal de Ouro Preto)

Luciana Paula reis, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 09/10/2025

Documento assinado eletronicamente por **Luciana Paula Reis**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/10/2025, às 10:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **0993269** e o código CRC **7EFBFBAF**.

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: (31)3808-0817 - www.ufop.br

Resumo

Este estudo tem como objetivo propor um modelo de blockchain (BC) padronizado e adaptado para a cadeia produtiva do café, com foco em superar desafios de fragmentação e baixa interoperabilidade entre diferentes plataformas. A pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão sistemática da literatura (RSL), utilizando o protocolo PRISMA, analisando artigos científicos recentes (2021–2025) indexados na base SCOPUS. Foram identificadas as principais categorias de plataformas BC (públicas, privadas, consórcio e híbridas) e classificadas as funcionalidades críticas dos *smart contracts* aplicáveis ao setor cafeeiro. A análise revelou lacunas na padronização das camadas técnicas como bloco, rede e contratos inteligentes, limitando a adoção ampla da tecnologia, especialmente para pequenos e médios produtores. Com base nesses achados, foram elaboradas diretrizes estruturais para a padronização dessas camadas, visando garantir confiabilidade, segurança e eficiência, além de facilitar a integração e fomentar ecossistemas colaborativos no setor. Assim, o trabalho contribui para a consolidação teórica do tema e oferece um framework prático para guiar futuras pesquisas e a implementação da tecnologia BC no agronegócio cafeeiro.

Palavras-chave: Blockchain, Cadeia Cafeeira, Padronização, Interoperabilidade, *Smart contracts*, Agronegócio.

Abstract

This study aims to propose a standardized and adapted blockchain (BC) model for the coffee supply chain, addressing fragmentation and interoperability challenges among existing platforms. The research was conducted through a systematic literature review following the PRISMA protocol, analyzing recent scientific articles (2021–2025) indexed in the SCOPUS database. The study identified key BC platform categories—including public, private, consortium, and hybrid types—and classified relevant *smart contracts* for the coffee sector. Findings revealed significant gaps in standardization across BC layers—block structure, network framework, and *smart contracts*—that hinder widespread adoption, particularly among small and medium producers. Based on these insights, the study formulated technical guidelines to standardize these layers, aiming to ensure reliability, security, and efficiency, while facilitating integration and fostering collaborative ecosystems within the sector. Thus, this work contributes to theoretical consolidation and provides a practical framework to guide future research and implementation of BC technology in agribusiness.

Keywords: Blockchain, Coffee Supply Chain, Standardization, Interoperability, *Smart contracts*, Agribusiness.

Lista de figuras

Lista de tabelas

Sumário

Glossário:

APIs – Application Programming Interfaces

BC – Blockchain

Cross-chain – Interoperabilidade entre diferentes blockchains

ERC – Ethereum Request for Comments

Hash – Função criptográfica que gera impressão digital dos dados

IBC – Inter-Blockchain Communication Protocol

Interoperabilidade – Capacidade de sistemas trocarem informações

ISO – International Organization for Standardization

Merkle Root – Hash único que representa todas as transações de um bloco

PBFT – Practical Byzantine Fault Tolerance

RSL – Revisão Sistemática da Literatura REST – Representational State Transfer SCOPUS – Base de dados acadêmica

SHA – Secure Hash Algorithm

Sidechains – Blockchains paralelas conectadas à rede principal

Timestamp – Registro temporal associado a transações ou blocos

1 Introdução

1.1 Contextualização da pesquisa

A blockchain (BC) despontou na última década como uma infraestrutura de confiança distribuída com potencial para redes complexas que exigem rastreabilidade ponta a ponta e validação autônoma de transações (Su; Wang, 2022). No agronegócio, especialmente na cadeia do café, caracterizada pela fragmentação produtiva e múltiplos requisitos de certificação, a BC promete eliminar intermediários e reduzir custos de auditoria. Além disso, possibilita modelos de remuneração do tipo "*pay-for-outcome*", onde o pagamento é realizado com base nos resultados alcançados, e não apenas no tempo trabalhado ou nas tarefas executadas. Essa abordagem atrai o interesse de cooperativas, tradings e instituições financeiras (Chung; Adriaens, 2024).

O setor cafeeiro é uma cadeia produtiva complexa que enfrenta desafios crescentes em transparência, rastreabilidade e sustentabilidade. A literatura sobre BC em cadeias agroalimentares aponta benefícios concretos, como redução de até 30% nas despesas de auditoria para "café especial" rastreado e ganhos reputacionais ao permitir que consumidores verifiquem origem em segundos via apps móveis conectados à BC (Scanu, 2021). Estudos sobre BC corporativa indicam que redes privadas ou de consórcio oferecem melhor governança de dados sensíveis, mas perdem abertura e resiliência se não adotarem padrões abertos compatíveis com outras redes (Su; Wang, 2022). Sem tratamento sistêmico dessas variáveis, projetos-piloto falham na escala, mantendo a cadeia ligada a bancos de dados dos proprietários e aumentando riscos operacionais por falhas de integração (Scanu, 2021).

Nesse contexto, a pesquisa visa propor um modelo de BC padronizado e adaptado para a cadeia produtiva do café, abordando as três camadas essenciais da BC: bloco, estrutura de rede e *smart contracts*. A camada de bloco, unidade básica de registro, varia em composição e estrutura entre implementações, criando incompatibilidades técnicas que dificultam a comunicação entre sistemas, abrangendo diferenças nos cabeçalhos dos blocos e algoritmos de *hash* (Su; Wang, 2022).

A segunda camada, estrutura de rede, envolve a escolha de plataformas (públicas, privadas, consórcio ou híbridas) e algoritmos de consenso (*Proof of Work, Proof of Stake, Practical Byzantine Fault Tolerance*, entre outros), que influenciam escalabilidade, latência e custos operacionais. A diversidade de estruturas e algoritmos dificulta selecionar arquitetura adequada e prejudica a interoperabilidade entre implementações (Mehmood *et al*., 2025).

A terceira camada, *smart contracts*, são programas auto executáveis de lógica empresarial, mas a ausência de padronização nas linguagens de programação e bibliotecas gera vulnerabilidades e limitações. *Smart contracts* automatizam pagamentos condicionais, certificações e transferências,

porém a falta de normas aumenta riscos de segurança e incompatibilidades (Chung; Adriaens, 2024; Shkembi *et al.*, 2023).

1.2 Problema de pesquisa

A fragmentação conceitual e técnica das iniciativas em BC no agronegócio tem gerado soluções isoladas, funcionais em ambientes controlados, mas incapazes de integrar-se a outros sistemas da cadeia, limitando o potencial de transformação digital do setor. Essa condição decorre principalmente da ausência de padrões que assegurem interoperabilidade semântica e integração *cross-chain* (Shkemby *et al.,* 2023; Khiem *et al.,* 2023). A interoperabilidade semântica corresponde à troca de dados com significado compartilhado entre sistemas distintos, enquanto a integração *cross-chain* permite comunicação, transferência de valor e compartilhamento de recursos entre diferentes blockchains (Khiem *et al.,* 2023).

A falta de padronização em linguagens técnicas e arquiteturas, aliada à ausência de frameworks holísticos que sistematizem conceitos, tipologias e camadas essenciais — bloco, rede e *smart contracts* — compromete a interoperabilidade e a escalabilidade da tecnologia no setor agroindustrial (Mehmood *et al.,* 2025; Shkembi *et al.,* 2023; Su, Wang, 2022). Além disso, divergências nos modelos de consenso e nas estruturas de governança reduzem a eficiência e a segurança das operações, afetando a confiança dos usuários e a integridade sistêmica (Zahir *et al.,* 2024; Kim *et al.,* 2022).

Essa ausência de frameworks abrangentes constitui um entrave crítico à adoção em larga escala, restringindo os benefícios da BC a projetos-pilotos sustentáveis apenas no curto prazo, mas de difícil expansão (Jain, Gupta, Gupta, 2025; Mehmood *et al.,* 2025). Ainda assim, a literatura destaca o potencial da tecnologia no aumento da transparência, da rastreabilidade, na redução de custos e na promoção da sustentabilidade (Chung, Adiaens, 2024; Scanu, 2021). Paralelamente, são ressaltados desafios como resistência cultural, complexidade regulatória, limitações tecnológicas e carência de infraestrutura digital adequada (Hristova *et al.,* 2024; Larikova *et al.,* 2023). Entre os estudos analisados, destaca-se uma abordagem voltada à governança aplicada ao agronegócio, que considera elementos das três camadas da arquitetura, mas que ainda carece de maior detalhamento para possibilitar uma adoção completa e escalável (Kim *et al.,* 2022).

Diante dessa lacuna identificada na literatura científica, emerge a pergunta central que motivou esta pesquisa: “Qual é o modelo de BC e quais diretrizes necessárias para a padronização do uso da BC na cadeia produtiva cafeeira que possam superar os desafios de interoperabilidade e fragmentação existentes, promovendo implementação efetiva, integrada e sustentável dessa tecnologia?”

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Propor um modelo de BC padrão adaptado para a cadeia cafeeira, permitindo detectar e corrigir vulnerabilidades de segurança em tempo real e reduzir riscos operacionais a partir de uma RSL.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar os tipos de plataformas BC e suas variações aplicáveis à cadeia cafeeira;
- Caracterizar os tipos de plataformas quanto a atributos críticos como escalabilidade, transparência e segurança;
- Identificar e classificar os principais tipos de *smart contracts* pertinentes ao setor cafeeiro;
- Propor diretrizes essenciais para a padronização do uso da BC na cadeia cafeeira, nos pilares bloco, estrutura da rede e *smart contract*.

1.4 Justificativa

A cadeia produtiva cafeeira é um dos setores agrícolas mais relevantes para a economia global, movimentando bilhões de dólares e envolvendo milhões de produtores em países emergentes. A necessidade de fomentar transparência, rastreabilidade e sustentabilidade tem impulsionado a busca por inovações tecnológicas que atendam a estas demandas (Chung; Adriaens, 2024; Hristova *et al.,* 2024; Scanu, 2021).

Neste contexto, a BC tem emergido como ferramenta promissora para superar limitações históricas do setor, sobretudo devido a sua robustez em garantir imutabilidade, segurança e transparência dos registros na cadeia produtiva (Larikova *et al.,* 2023; Su, Wang, 2022). A demanda por soluções integradas, seguras e escaláveis que compatibilize a transparência com proteção de dados sensíveis realça a necessidade de diretrizes específicas para a padronização da BC no contexto da cadeia cafeeira (Choudhury *et al.,* 2023; Larikova *et al.,* 2023). Esta necessidade é reforçada pela constante evolução das regulamentações sobre privacidade, certificação digital e contratos inteligentes, que impõem desafios adicionais para a conformidade dos sistemas (Yadav, Singh, Kushwaha, 2023; Page *et al.,* 2021).

Portanto, este trabalho justifica-se pela relevância estratégica de desenvolver um modelo de BC padronizado, adaptado às particularidades e demandas da cadeia produtiva cafeeira, capaz de garantir interoperabilidade, eficiência e sustentabilidade. A pesquisa, assim, visa contribuir para o avanço acadêmico na área, preenchendo lacunas existentes e apoiando a transformação digital estruturada do agronegócio brasileiro e global.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos que acompanham o desenvolvimento lógico da pesquisa e a construção do modelo proposto. No capítulo 1, são apresentados o tema, o problema de pesquisa, os objetivos, a justificativa e a organização geral do estudo. O capítulo 2 detalha a metodologia adotada, especificamente a RSL, descrevendo critérios, procedimentos e fontes utilizadas para garantir rigor e validade científica.

O capítulo 3 consiste na RSL, com a análise aprofundada dos tipos de plataformas BC, soluções comerciais emblemáticas e tipos de *smart contracts* relevantes para a cadeia cafeeira. No capítulo 4, são propostas as diretrizes para padronização da BC adaptada ao contexto do setor cafeeiro, organizadas nas três camadas arquiteturais fundamentais: bloco, estrutura de rede e *smart contracts*. Ademais, neste capítulo é apresentado o modelo BC adaptado ao contexto cafeeiro.

O capítulo 5 discute as implicações práticas das diretrizes para os diversos stakeholders da cadeia, além dos desafios e limitações identificados para a adoção e escalabilidade das soluções. Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões, contribuições acadêmicas e práticas do estudo, bem como recomendações para pesquisas futuras e estratégias de implementação.

2. Metodologia de pesquisa

2.1 Classificação da pesquisa

Este estudo foi realizado por meio da aplicação rigorosa da metodologia da RSL, seguindo as diretrizes internacionais do protocolo *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), amplamente reconhecidas por assegurar a transparência, reprodutibilidade e qualidade das revisões científicas.

2.2 Sistema de coleta e análise de dados

A coleta de dados foi realizada por meio de busca sistemática na base bibliográfica SCOPUS, escolhida por sua abrangência internacional e cobertura de periódicos de alta qualidade na área de tecnologia da informação e sistemas de informação. Os artigos identificados compreendem o período entre janeiro de 2020 e abril de 2025, capturando desenvolvimentos recentes e relevantes na área de BC aplicada ao agronegócio.

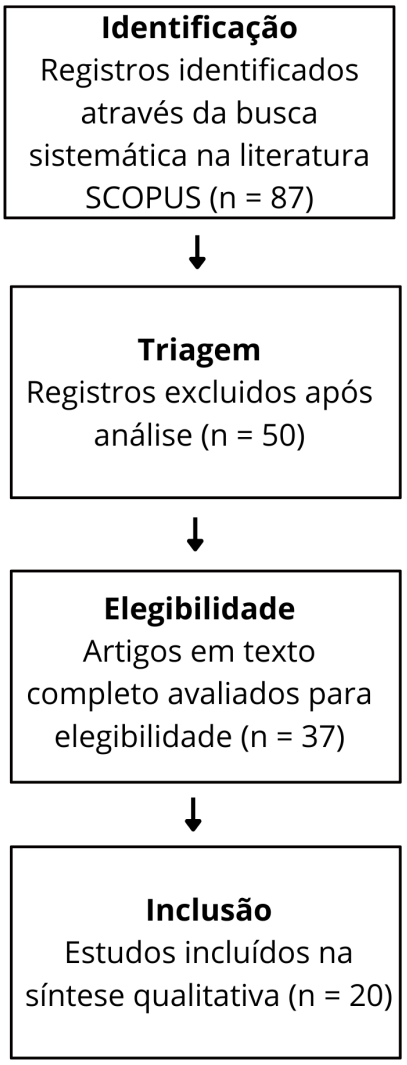
A estratégia de busca foi desenvolvida por meio de processo iterativo baseado em termos-chave derivados da pergunta de pesquisa e refinada com base na necessidade. Foram utilizadas duas strings principais de busca combinando operadores booleanos. A primeira string *"blockchain AND technolog* AND (private OR public OR hybrid OR consortium) AND consensus type*" foi projetada para capturar estudos sobre tipologias de plataformas BC. A partir dessa busca foram identificados 59 artigos. Após a triagem dos artigos, foram removidos 37 deles por não apresentarem alinhamento com os objetivos da pesquisa após análise de título e resumo. Isso resultou em 22 artigos incluídos para análise.

A segunda string *"blockchain AND technolog* AND platform AND type AND (private OR public OR hybrid OR consortium*)" focou especificamente em estudos que abordam algoritmos de consenso em diferentes tipos de BC. Essa busca resultou em 32 artigos. Após a triagem, 23 artigos foram removidos por não atenderem critérios de inclusão estabelecidos e, restaram 9 artigos incluídos.

Dessa forma, considerando a primeira e a segunda busca, resultou em 60 excluídos e 31 artigos para análise. Após a segunda leitura, foram excluídos 11 artigos por não contribuírem efetivamente para a pesquisa. Dessa forma, foram utilizados 20 artigos para a realização desta RSL.

Esta abordagem foi possível pelo uso do aplicativo Ryann para comparação de artigos repetidos e a exclusão dos que não pertenciam ao tema. A Figura 1 apresenta o resumo desse processo de seleção de artigo segundo o protocolo PRISMA.

Figura 1 - Fluxograma do processo de seleção dos artigos segundo diretrizes PRISMA 2020



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a leitura criteriosa e fichamentos dos estudos, procurou-se identificar os conceitos relacionados à tecnologia BC, incluindo os tipos de *smart contract*, os benefícios da BC para a cadeia do agronegócio, os desafios para a implementação da BC e, por fim, caracterizar as plataformas de BC existentes e seus atributos. Essas informações foram organizadas em tabelas, o que possibilitou compreender a literatura, propor diretrizes de padronização para uso da BC na cadeia cafeeira e, por fim, o modelo de BC.

3. Análise dos artigos coletados

O presente capítulo apresenta análise sistemática e detalhada dos 20 artigos selecionados por meio da RSL literatura. As informações analisadas foram organizadas em cinco seções principais que abordam os objetivos específicos da pesquisa.

3.1 Identificação dos artigos analisados

Os 20 artigos analisados nesta pesquisa, encontram-se tabulados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização dos 20 artigos analisados na pesquisa

Ano	Journal	Título do artigo	Autores
2025	ACM Computing Surveys	Performance Modeling of Public Permissionless Blockchains: A Survey	Esmaili *et al.* (2025)
		BLPCA-ledger: Lightweight consensus protocol	Mehmood *et al*. (2025)
	Cyber Security Applications	A survey on scalable consensus algorithms	Jain, Gupta, Gupta (2025)
2024	Engineering Proceedings	Analysis of Data Sharing Systems in Context of Industry 4.0 via 5G	Hristova *et al*. (2024)
	ACM Computing Surveys	Performance evaluation of Private and Public Blockchains	Zahir *et al*. (2024)
	Environmental Research Communications	Blockchain technology for pay-for-outcome sustainable agriculture: implications for governance and transaction costs	Chung, Adriaens (2024)
2023	International Journal of Advanced CS Apps	Implementing Blockchain, Smart Contract, and NFT Framework for Waste Management Systems	Khiem (2023)
	Journal of Theoretical and Applied Ecommerce	Incentive-Driven Leasing Based on Consortium Blockchain and Evolutionary Game	Cheng *et al*. (2023)
	Operations Management Research	A blockchain platform for the truck freight marketplace	Choudhury *et al*. (2023)

	Multimed Tools Applications	Evolution of Blockchain and consensus mechanisms	Yadav *et al*. (2023)
	International Journal of Computational and Experimental	OTA 2.0: An Advanced and Secure Blockchain Steganography Algorithm	Takaoğlu *et al*. (2023)
	Journal of Web Semantics	Semantic Web and blockchain technologies: Convergence, challenges and research trends	Shkembi *et al*. (2023)
	Eastern-European Journal of Enterprise Tech	Implementation of blockchain technology in the public sector	Larikova *et al.* (2023)
2022	IEEE Transactions on Engineering Management	Understanding the Hybrid Opportunity in Blockchain: Case Study	Kim *et al*. (2022)
	Journal of Web Semantics	Research on model design and operation mechanism of enterprise blockchain digital system	Su, Wang (2022)
	Sensors	Consortium blockchain for electronic portfolio management	Merlec *et al*. (2022)
2021	Journal of Governance and Regulation	Different types of government and governance in blockchain	Covarribias, Covarribias (2021)
	BMJ	The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews	Page *et al*. (2021)
	Technical Report	Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering	Kitchenham & Charters (2021)
	Conference Paper BRAINS	Blockchain and its impacts on agri-food supply chain network	Scanu (2021)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Desses 20 estudos, foram encontradas 5 BCs em estágio comercial que estão referidas na tabela 2.

Tabela 2: Caracterização das Blockchains em estágio comercial

Solução	Tipo de Blockchain	Casos de Uso Principal	Benefícios Demonstrados	Limitações Identificadas	Status de Implementação
IBM Food Trust	Consórcio (Hyperledger Fabric)	Rastreabilidade alimentar; gestão de recalls	Redução de tempo de rastreamento de semanas para segundos	Custos altos de implementação; dependência de integração ERP	Produção (>4M produtos)
Walmart-IBM Traceability	Híbrida	Segurança alimentar; verificação de origem	50% redução em tempo de investigação de contaminação	Requer mudanças significativas em processos existentes	Produção (múltiplas categorias)
Bext360	Consórcio	Pagamentos automáticos; análise de qualidade	Pagamentos em horas vs. semanas; 15% aumento em preços para produtores	Dependência de dispositivos proprietários IoT	Produção (cooperativas selecionadas)
OriginTrail	Multi-chain (interoperável)	Interoperabilida-de entre sistemas; dados descentralizados	Suporte a múltiplas blockchains; flexibilidade tecnológica	Complexidade técnica para implementação	Piloto/Produção
VeChain	Pública (PoA)	Autenticidade de produtos; engagemento do consumidor	Baixos custos de transação; interface amigável	Escalabilidade limitada para grandes volumes	Produção (produtos premium)

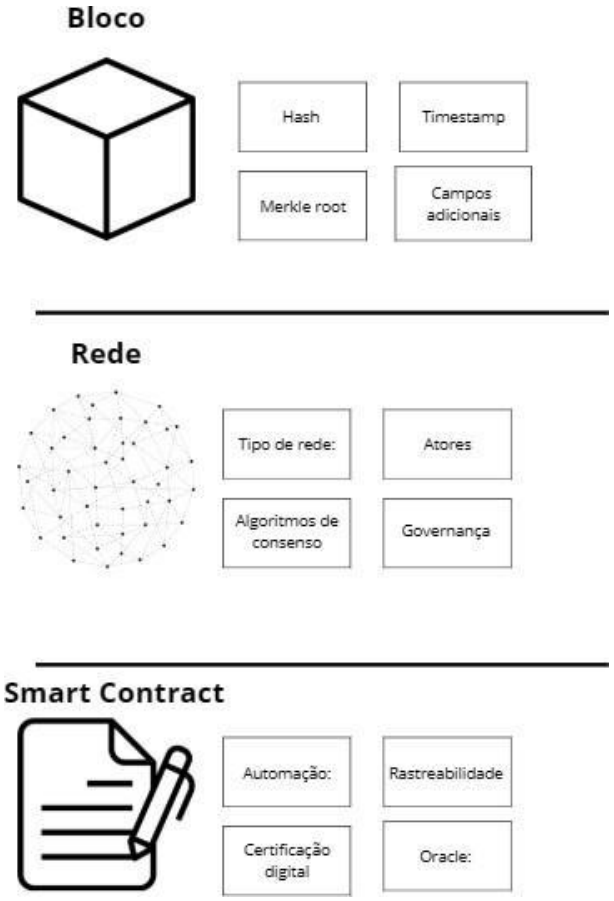
Fonte: Elaborado pelo autor baseado na literatura analisada.

As soluções comerciais apresentadas demonstram avanços significativos na aplicação do blockchain ao setor cafeeiro, mas ainda evidenciam lacunas importantes, sobretudo em termos de padronização e interoperabilidade entre plataformas distintas. O estudo desenvolvido na revisão sistemática identificou que, apesar do sucesso pontual de iniciativas como IBM Food Trust, Walmart-IBM Traceability, entre outras, persiste uma fragmentação técnica e conceitual no setor. Essa fragmentação dificulta o intercâmbio de informações e a expansão escalável dessas soluções para toda a cadeia. O trabalho propôs um modelo de blockchain padrão adaptado que atua exatamente sobre essas deficiências, estruturando diretrizes claras e integradas para as três camadas essenciais.

3.2 Tecnologia blockchain: conceitos e aplicações

A aplicação do modelo blockchain envolve a definição clara das camadas essenciais da arquitetura tecnológica: a camada de bloco, a camada de estrutura de rede e a camada de *smart contracts*, conforme ilustrado na figura 2 demonstrativa das camadas do blockchain.

Figura 2 - Representação das três camadas arquiteturais da BC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Camada de bloco: cada bloco contém um *hash* único para sua identificação e um cabeçalho que inclui o *hash* do bloco anterior. Isso mantém a continuidade da cadeia, impedindo alterações retroativas. Isso corresponde ao endereço do último bloco. Além disso, um *timestamp* em formato ISO 8601 no fuso UTC assegura a uniformidade temporal das transações em toda a rede. Para garantir a integridade dos dados, um campo fundamental é o Merkle root, uma raiz *hash* derivada da estrutura de árvore de Merkle. Essa técnica criptográfica permite apresentar um resumo único e imutável de todas as transações, facilitando a verificação rápida e segura da integridade dos dados do bloco sem a necessidade de processar todas as transações individualmente (Su & Wang, 2022). Campos adicionais reservados como identificação do lote, safra, e procedimento de beneficiamento são personalizados para as especificidades do setor cafeeiro, promovendo rastreabilidade detalhada e conformidade ambiental (Chung & Adriaens, 2024).

Estrutura de rede: o modelo desenvolvido privilegia a utilização de redes permissionadas e híbridas, predominantemente do tipo consórcio, que possibilitam a participação de múltiplos stakeholders com papéis diferenciados e acessos controlados. Entre esses atores estão produtores, cooperativas, certificadoras e comercializadores. A escolha por algoritmos de consenso que mantêm o equilíbrio entre segurança, eficiência e escalabilidade, permitindo que até um terço dos nós possa agir maliciosamente sem comprometer a operação da rede (Kim *et al*., 2022; Mehmood *et al*., 2025). Essa governança distribuída é fundamental para ambientes colaborativos e duplamente sensíveis à privacidade.

Smart contracts: nessa camada, processos críticos são automatizados graças à programação de contratos digitais autoexecutáveis. Estes contratos gerenciam a rastreabilidade automática dos dados de produção, pagamentos condicionais baseados em indicadores objetivos de qualidade, certificações digitais e seguros paramétricos vinculados a dados ambientais verificados. Tais contratos são apoiados por oracles, agentes externos confiáveis que alimentam o blockchain com dados do mundo real, como índices climáticos ou preços de commodities ampliando a precisão e segurança das decisões automáticas (Chung & Adriaens, 2024; Cheng *et al.,* 2023; Scanu, 2021).

Cada uma dessas camadas desempenha um papel crítico no funcionamento do sistema e exige recomendações específicas para garantir interoperabilidade, segurança e eficiência. Esta estrutura, fundamentada em padrões técnicos rígidos e flexibilidade operacional, busca superar a fragmentação do setor, fomentar a confiança entre os atores, garantir conformidade

regulatória e impulsionar a sustentabilidade econômica e ambiental da cadeia produtiva do café.

Como existe uma série de classificações de *smart contracts*, identificou-se a necessidade de um estudo mais aprofundado sobre o tema, importante para a estruturação de um bom modelo BC. O resultado do estudo pode ser encontrado na próxima seção.

3.2.1 Identificação e classificação dos tipos de *smart contracts* pertinentes ao setor

A RSL revelou cinco categorias principais de *smart contracts* especialmente aplicáveis à cadeia do café, cada uma atendendo as demandas operacionais e comerciais específicas deste setor. Essas categorias emergem da interseção entre as capacidades técnicas da BC e os requisitos práticos da cadeia produtiva, envolvendo desde pequenos produtores familiares até grandes corporações multinacionais. A tabela 3 caracteriza essas cinco categorias.

Tabela 3 - Classificação dos *smart contracts* aplicáveis à cadeia cafeeira

Tipo de Smart Contract	Funcionalidade Principal	Benefícios Específicos	Casos de Uso	Tecnologias Integradas	Referências
Rastreabilidade Automatizada	Registro automático de eventos da cadeia produtiva	Redução de 30% em custos de auditoria; transparência end-to-end	Certificação de origem; histórico de qualidade	IoT, GPS, oráculos	Scanu (2021)
Pagamento Condicional	Liberação automática baseada em critérios objetivos	Redução de 25% em custos de transação; pagamentos rápidos	Programas fair trade; pagamentos por qualidade	Oráculos de preços; APIs bancárias	Chung; Adriaens (2024)
Certificação Digital	Validação automática de conformidade	Eliminação de fraudes; verificação instantânea	Orgânico; rainforest alliance; fair trade	NFTs; bases de certificadores	Khiem *et al*. (2023)
Supply Chain Inteligente	Gestão automatizada de fluxos logísticos	Redução de burocracia; otimização de custos	Transferência de propriedade; documentação fiscal	ERP integration; IoT de transporte	Choudhury *et al*. (2023)
Seguro Paramétrico	Compensações automáticas por eventos climáticos	Pagamentos rápidos; eliminação de avaliações subjetivas	Seguros climáticos; proteção de safras	Sensores climáticos; dados satelitais	Cheng *et al*. (2023)

Fonte: Elaborado pelo autor baseado na literatura analisada.

Os cinco tipos principais de *smart contracts* aplicáveis à cadeia cafeeira são:

1. Contratos de rastreabilidade automatizada: registram automaticamente eventos da produção (plantio, colheita, processamento, transporte) com integração IoT, GPS e *timestamp* s, reduzindo em até 30% os custos de auditoria (Scanu, 2021).

2. Contratos de pagamento condicional: liberam pagamentos automáticos baseados em critérios de qualidade ou sustentabilidade, utilizando oráculos para dados externos confiáveis, eliminando intermediários e reduzindo custos transacionais (Chung & Adriaens, 2024).

3. Contratos de certificação digital: gerenciam certificados digitais de origem e práticas sustentáveis, para garantir autenticidade e rastreabilidade das credenciais (Khiem *et al.,* 2023).

4. Contratos de gerenciamento logístico: automatizam operações complexas como transferência de propriedade, documentação fiscal e coordenação entre agentes, integrando sistemas ERP e IoT para otimização logística (Choudhury *et al.,* 2023).

5. Contratos de seguro paramétrico: implementam compensações automáticas vinculadas a eventos climáticos ou indicadores econômicos via oráculos, oferecendo proteção rápida contra riscos naturais da agricultura (Cheng *et al.,* 2023).

Esta taxonomia oferece um roteiro para implementação tecnológica no setor cafeeiro, orientando os atores nas funcionalidades necessárias para otimizar processos, fortalecer governança e promover sustentabilidade na cadeia produtiva.

3.3 Benefícios da blockchain para a cadeia do agronegócio

A RSL evidenciou que a BC oferece contribuições significativas para a cadeia produtiva do agronegócio. Esses benefícios são distribuídos pelas três principais camadas arquiteturais: camada de bloco, estrutura da rede e *smart contracts*. Cada camada agrega benefícios específicos que impactam positivamente a eficiência, transparência e sustentabilidade do setor.

A camada de bloco garante a rastreabilidade dos produtos ao longo de toda a cadeia produtiva, uma vez que a imutabilidade é sustentada tanto pelos registros criptográficos quanto pela estrutura de ligação entre blocos, os quais asseguram a integridade e autenticidade dos dados. Nesse contexto, informações críticas, como a origem, a safra e os eventos de processamento, tornam-se auditáveis e verificáveis, promovendo maior confiança entre produtores, consumidores e certificadores (Hristova *et al.,* 2024; Su,Wang, 2022). Além

disso, a adoção de padrões técnicos, como o *timestamp* em formato ISO 8601 UTC, fortalece a confiabilidade dessa camada, enquanto mecanismos como a Merkle root, utilizada para resumo criptográfico, exemplificam os avanços técnicos disponíveis e aplicáveis à prática.

No nível da estrutura de rede, a BC favorece a criação de ecossistemas colaborativos por meio de arquiteturas permissionadas e de consórcio, nas quais diferentes atores podem assumir o papel de validadores mantendo níveis ajustados de acesso às informações. Assim, produtores, cooperativas, distribuidores e financiadores conseguem controlar dados sensíveis de forma adequada, elevando o grau de segurança e reduzindo a ocorrência de fraudes. Esse modelo de governança distribuída contribui também para ganhos de eficiência operacional, especialmente em setores fragmentados como o agronegócio (Mehmood *et al.,* 2025; Kim *et al.,* 2022). A utilização de algoritmos de consenso tolerantes a falhas bizantinas acrescenta maior robustez às redes, visto que, mesmo em situações em que determinados nós funcionam de forma maliciosa ou fornecem informações incorretas, os demais conseguem manter a estabilidade e a consistência das transações.

Os *smart contracts* complementam essa estrutura ao proporcionar automação, segurança e transparência nas transações comerciais e operacionais, permitindo que eventos sejam registrados automaticamente e que pagamentos sejam liberados de forma condicional ao cumprimento de critérios previamente definidos. Além disso, essas funcionalidades viabilizam a emissão digital de certificados e a implementação de seguros paramétricos vinculados a dados meteorológicos ou de qualidade, o que amplia as possibilidades de integração tecnológica no setor. Tais recursos reduzem custos administrativos, aumentam a agilidade dos processos e favorecem o surgimento de novos modelos de negócios mais sustentáveis e justos, reforçando práticas éticas nas cadeias agroindustriais (Chung & Adriaens, 2024; Cheng *et al.,* 2023; Scanu, 2021).

A tabela 4 compreende as definições apresentadas nesta seção.

Tabela 4- Benefício da blockchain para a cadeia do agronegócio

Camada	Benefício	Descrição	Autores
Bloco	Rastreabilidade	Garante a integridade e imutabilidade dos dados através de registros criptografados com mecanismos como *timestamp* padrão ISO 8601 e Merkle root, facilitando auditorias e transparência da produção.	Hristova *et al*. (2024); Su & Wang (2022)

Estrutura da rede	Governança e Segurança	Permite criação de redes permissionadas e consórcio com múltiplos validadores que controlam acessos e asseguram a confiabilidade do sistema via protocolos tolerantes a falhas bizantinas.	Mehmood *et al*. (2025); Kim *et al*. (2022)
Smart contract	Automação e Eficiência	Automatiza processos como rastreamento, pagamentos condicionais, certificações digitais e seguros paramétricos, integrando oráculos para validação de dados externos vinculados à produção e mercado.	Adriaens (2024); Cheng *et al*. (2023) Scanu (2021); Chung &

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4 Desafios para a implementação da blockchain

A implementação da tecnologia BC na cadeia do agronegócio enfrenta diversos desafios. Estes estão principalmente relacionados à padronização e interoperabilidade entre plataformas distintas. Os desafios perpassam as três camadas arquiteturais do BC: bloco, estrutura da rede e *smart contracts*. Eles impactam diretamente a integração, eficiência e escalabilidade das soluções tecnológicas.

Os desafios relacionados à camada de bloco são particularmente críticos para a interoperabilidade do sistema. Entre eles destacam-se: i) grande diversidade de formatos de dados, esquemas transacionais e protocolos criptográficos adotados; ii) ausência de padrões consolidados dificulta a integração entre sistemas; iii) troca confiável de informações críticas da cadeia produtiva; iv) coletar as informações como identificação de safra, certificações e registros de qualidade (Shkembi *et al.,* 2023; Su & Wang, 2022).

A estrutura da rede apresenta complexidades específicas tais como: i) coordenação entre diferentes atores da cadeia; ii) coexistência de plataformas públicas, privadas, de consórcio e híbridas gera dificuldades operacionais; iii) diferentes tipos de plataformas coexistem no mercado sem padronização adequada; iv) governança distribuída exige frameworks robustos para uniformização de processos; v) protocolos de consenso e comunicação sem padronizados entre diferentes redes; vi) segurança e eficiência devem ser mantidas mesmo em redes distintas (Mehmood *et al.,* 2025; Kim *et al.,* 2022). Sem esses padrões, a criação de ecossistemas integrados para o agronegócio fica limitada.

Os *smart contracts* também enfrentam desafios significativos de padronização em múltiplas dimensões técnicas. Os desafios encontrados dizem respeito: i) à falta de uniformização em linguagens de programação torna-se um problema central; ii) as interfaces de programação de aplicativos (APIs) também carecem de padronização adequada; iii) oráculos descentralizados não seguem padrões estabelecidos no mercado. Essa situação

aumenta custos e riscos de implementação para todas as partes envolvidas. A reutilização de códigos fica significativamente restringida. A expansão das funcionalidades automatizadas é limitada por essas inconsistências (Chung & Adriaens, 2024; Khiem *et al.,* 2023).

A superação desses desafios depende da adoção coletiva de padrões técnicos consolidados. Frameworks interoperáveis devem ser desenvolvidos para atender às especificidades do agronegócio. A tabela 5 resume esses desafios por camada da BC.

Tabela 5- Desafios da blockchain para a cadeia do agronegócio

Camada	Desafio	Descrição	Autores
Bloco	Interoperabi-lidade	Falta de padrões unificados para dados, formatos e protocolos, dificultando integração e compartilhamento de informações.	Shkembi *et al*. (2023); Su & Wang (2022)
Estrutura da rede	Coordenação e Governança	Diversidade das plataformas sem frameworks comuns que garantam consenso e comunicação integrados.	Mehmood *et al*. (2025); Kim *et al*. (2022);
Smart contract	Padronizaçã o e Segurança	Linguagens, APIs e oráculos não padronizados elevam custos, riscos e limitam escalabilidade.	Chung & Adriaens (2024); Khiem *et al*. (2023)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5 Caracterização das plataformas blockchain e seus atributos

A tipologia das redes BC reflete diferentes modelos de governança, acesso e arquitetura tecnológica. Estes impactam diretamente sua aplicabilidade e adequação a setores verticais, como a cadeia cafeeira. A literatura apresenta consenso sobre quatro tipos principais de plataformas blockchain. Cada uma possui características e atributos técnicos específicos que influenciam sua adoção e desempenho.

BCs públicas são redes abertas onde qualquer participante pode aderir, validar transações e acessar dados completos. Oferecem máximo grau de descentralização e transparência. Utilizam algoritmos de consenso como *Proof of Work* (PoW) e *Proof of Stake* (PoS). Garantem segurança e resistência à censura, mas enfrentam limitações em escalabilidade e alto consumo energético (Esmaili & Christensen, 2025). O *throughput* fica restrito a cerca de 7-15 transações por segundo (TPS). São adequadas para aplicações que valorizam transparência absoluta, como rastreabilidade ao consumidor final.

BCs privadas são controladas por uma entidade única que gerencia rigidamente o acesso e operações. Utilizam algoritmos de consenso otimizados como *Practical Byzantine Fault Tolerance* (PBFT) e RAFT. Permitem alta eficiência e baixa latência, porém com

transparência restrita (Zahir *et al.,* 2024). Atingem throughput superior a 1000 throughput por segundo com latências inferiores a 1 segundo. São ideais para ambientes corporativos em tempo real.

BCs de consórcio configuram um modelo híbrido com governança multi-stakeholder. Um conjunto pré-selecionado de organizações compartilha a validação e manutenção da rede. Protocolos de consenso adaptados equilibram descentralização e eficiência operacional (Mehmood *et al.,* 2025; Shkembi *et al.,* 2023). Asseguram transparência regulada via Access Control Lists (ACL). São adequadas para o agronegócio, onde várias entidades colaboram mantendo controle sobre dados sensíveis. A rede atinge valores intermediários de escalabilidade (100-500 TPS).

BCs híbridas combinam elementos públicos e privados. Permitem a coexistência de dados públicos com informações privadas criptografadas em camadas segregadas. Políticas de interoperabilidade entre *sidechains* e protocolos de ponte asseguram segurança variada (Kim *et al.,* 2022). Oferecem soluções estratégicas para aumentar a adoção empresarial. Facilitam a interoperabilidade técnica e comercial críticas para modelos complexos do agronegócio.

A tabela 6 apresenta uma síntese comparativa dos tipos de plataformas blockchain e seus atributos técnicos e operacionais. Esta taxonomia oferece panorama detalhado para subsidiar decisões sobre arquitetura tecnológica na cadeia cafeeira. Alinha requisitos de governança, performance, segurança e conformidade regulatória.

Tabela 6 - Tipos de plataformas blockchain e atributos comparativos

Tipo de Plataforma	Acesso e Permissão	Modelo de Consenso	Transparência	Escalabilidade	Casos de Uso Típicos	Referências
Pública	Aberto a qualquer participante; sem controle central	Proof of Work (PoW), Proof of Stake (PoS)	Total, com possibilidade de anonimato	Baixa (~7-15 TPS)	Tokens acessíveis ao consumidor, rastreabilidade	Esmaili & Christensen (2025)
Privada	Acesso restrito, controlado por organização única	Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT), RAFT	Restrita aos participantes autorizados	Alta (>1000 TPS)	Controle interno, processos empresariais	Zahir *et al*. (2024)
Consórcio	Governança compartilhada por várias organizações	PBFT modificado, consenso por quórum	Transparência regulada com ACL	Média (100-500 TPS)	Rastreamento de commodities, financiamento sustentável	Mehmood *et al*. (2025)
Híbrida	Combina elementos públicos e privados	Protocolos diversos, bridge entre redes	Seleciona transparência pública e controle privado	Variável, escalável via sharding	Tokenização de ativos, aplicações multi-stakeholder	Kim *et al*. (2022)

Fonte: Elaborado pelo autor baseado na literatura analisada.

4. Proposição do modelo de blockchain padrão adaptado

Este capítulo apresenta o modelo de BC padrão adaptado, baseado na análise detalhada da literatura científica, especialmente após identificação das lacunas e desafios atuais nas implementações existentes. Para orientar o desenvolvimento e a padronização das soluções blockchain no contexto estudado, propõe-se um framework de diretrizes estruturado segundo as três camadas essenciais que compõem a arquitetura blockchain: a camada de bloco, a camada de estrutura da rede e a camada de *smart contracts*.

4.1 Diretrizes essenciais para padronização da blockchain

A partir da RSL, percebeu-se que a heterogeneidade nos formatos, protocolos e padrões adotados dificulta a integração ampla entre diferentes redes BC. Assim, o estabelecimento de diretrizes claras nas três camadas técnicas é fundamental.

4.1.1 Diretrizes para a camada de bloco

A camada de bloco constitui a base estrutural do BC, garantindo registro persistente e imutável das transações ou eventos. A padronização dessa camada é fundamental, pois variações na estrutura dos blocos geram incompatibilidades entre sistemas, comprometendo a interoperabilidade (Su & Wang, 2022; Kim *et al.,* 2022).

A estrutura do cabeçalho do bloco deve ser uniforme, contemplando elementos mínimos essenciais. O *timestamp* deve seguir o padrão ISO 8601 em UTC, garantindo registro universal e inequívoco da temporalidade das transações. O *hash* do bloco anterior, calculado pela função criptográfica SHA-256, assegura que cada bloco esteja ligado de forma segura ao seu predecessor, impedindo alterações retroativas. O Merkle *root*, também gerado por SHA-256, sintetiza e organiza de maneira eficiente todas as transações do bloco, permitindo verificação rápida da integridade dos dados. É recomendada a inclusão de identificação da versão do protocolo para facilitar a evolução e compatibilidade do sistema. Para adaptação ao setor específico, devem ser previstos campos opcionais para metadados, armazenando informações como localização, categorização ou características do conjunto de dados (Su & Wang, 2022).

Os formatos das transações devem adotar padrões comuns, preferencialmente *JavaScript Object Notation* (JSON), devido à sua ampla aceitação e facilidade de processamento. Este formato permite padronização de diferentes tipos de eventos - transferências, atualizações, certificações ou pagamentos condicionais - facilitando a interoperabilidade semântica entre sistemas heterogêneos (Su & Wang, 2022).

A codificação dos dados deve respeitar padrões internacionais específicos: UTF-8 para dados textuais, garantindo compatibilidade com os principais idiomas e sistemas; ISO 8601 para registro uniforme de datas e horas (Kim *et al.,* 2022). Essa padronização técnica assegura que diferentes implementações blockchain possam comunicar-se de forma eficiente e confiável.

4.1.2 Diretrizes para a camada de estrutura da rede

A camada de rede é responsável pela arquitetura descentralizada e pelos protocolos que governam a comunicação e consenso entre os nós participantes da BC. A escolha correta da estrutura de rede influencia diretamente a escalabilidade, segurança e governança do sistema (Zahir *et al.,* 2024; Mehmood *et al.,* 2025).

Para garantir transparência ampla, especialmente para usuários finais e terceiros, redes híbridas são recomendadas, combinando ambiente público para exposição controlada de metadados - como informações de origem e certificação - com redes privadas que mantêm dados sensíveis protegidos. Esta abordagem equilibrada atende aos requisitos crescentes por transparência sem comprometer a confidencialidade das informações comerciais (Kim *et al.,* 2022).

Em contextos de colaboração multi-stakeholder envolvendo organizações, cooperativas e entidades reguladoras, redes de consórcio baseadas em mecanismos de consenso otimizados como PBFT modificado - algoritmo que permite consenso mesmo com até 33% de nós maliciosos - possibilitam alta eficiência transacional e governança distribuída robusta. Estas redes toleram falhas e comportamentos adversos até limite previsto e propiciam personalização nos níveis de permissão e governança, indispensável para ambientes empresariais complexos (Mehmood *et al.,* 2025).

Para aplicações corporativas com necessidades intensas de performance e privacidade, recomenda-se redes privadas, que apresentam alta capacidade de processamento (superior a 1000 transações por segundo) e baixa latência, facilitando integrações com sistemas internos como ERPs corporativos (Zahir *et al.,* 2024).

Complementarmente, deve-se implementar protocolos de interoperabilidade reconhecidos, como o *Inter-Blockchain Communication* (IBC) - protocolo que permite comunicação segura entre diferentes blockchains - que suportam comunicação segura entre redes distintas. A adoção de APIs padronizadas nas arquiteturas Representational State Transfer (REST)- padrão de arquitetura web para comunicação entre sistemas ou GraphQL,

asseguram a integração eficiente da blockchain com demais sistemas corporativos e governamentais (Zahir *et al.,* 2024; Kim *et al.,* 2022).

4.1.3 Diretrizes para a camada de *smart contracts*

Os *smart contracts* representam programas automáticos que executam regras e lógicas de negócio na blockchain. A padronização dessa camada é fundamental para assegurar segurança, auditabilidade, reuso e interoperabilidade dos processos automatizados (Chung e Adriaens, 2024; Su & Wang, 2022).

Os contratos voltados para registro e rastreamento devem implementar interfaces padronizadas, baseados no padrão ERC-721 - protocolo que define regras para criação de tokens únicos - que conferem singularidade e rastreabilidade a ativos digitais concretos. Eventos padronizados devem ser emitidos automaticamente para refletir mudanças de propriedade, geolocalização, certificações e resultados de auditorias, garantindo transparência e permitindo monitoramento em tempo real das operações da cadeia produtiva (Chung e Adriaens, 2024; Scanu, 2021).

Nos contratos financeiros, o uso de oráculos descentralizados confiáveis como o provedor Chainlink - serviço que conecta blockchains com dados do mundo real - permite incorporar dados externos válidos para execução automática de pagamentos condicionais ou outras cláusulas contratuais. Estes oráculos fornecem informações críticas como preços de mercado, indicadores ambientais, resultados de análises de qualidade e dados climáticos, assegurando que as condições contratuais sejam baseadas em informações verificáveis e atualizadas (Chung e Adriaens, 2024).

Para certificações digitais e validações regulatórias, os contratos devem operar integrados a sistemas externos por meio de APIs padronizadas, permitindo emissão e verificação de certificados digitais exclusivos. Essas certificações devem prever funcionalidades de renovação automática baseadas em auditorias periódicas para assegurar conformidade contínua e vigência dos certificados, eliminando processos manuais demorados e reduzindo riscos de fraudes (Khiem *et al.,* 2023).

A segurança dos *smart contracts* deve ser garantida por práticas rigorosas de desenvolvimento, incluindo prevenção de vulnerabilidades comuns como overflow, utilização de bibliotecas auditadas como OpenZeppelin e validação robusta de dados de entrada. A realização de auditorias independentes por especialistas em segurança blockchain antes da implantação final é indispensável para mitigar riscos técnicos e construir confiança nas aplicações (Zahir *et al.,* 2024; Su & Wang, 2022).

A tabela 7 demonstra quais diretrizes foram escolhidas em cada camada da BC

Tabela 7 - Diretrizes de padronização por camada arquitetural

Camada	Diretriz Principal	Especificações Técnicas	Ferramentas Sugeridas	Benefícios Esperados
Bloco	Estrutura uniforme de cabeçalho e formato padronizado de transações	*Timestamp* ISO 8601 UTC; *Hash* SHA-256; Merkle root; Formato JSON; Codificação UTF-8	Hyperledger Fabric, Ethereum, SHA-256, JSON	Interoperabilidade técnica; facilidade de integração; verificação
Estrutura da Rede	Arquitetura híbrida/consórcio com protocolos de interoperabilidade	PBFT modificado; Redes híbridas; APIs REST/GraphQL; Protocolo IBC	Hyperledger Fabric, Polygon, Quorum, Chainlink IBC	Governança distribuída; escalabilidade adequada; comunicação cross-chain
Smart contracts	Interfaces padronizadas com bibliotecas auditadas e validação robusta	Padrão ERC-721; Oráculos Chainlink; Bibliotecas OpenZeppelin; Auditorias obrigatórias	Solidity, OpenZeppelin, Chainlink, Truffle, Hardhat	Reutilização de código; redução de vulnerabilidades; automação confiável

Fonte: Elaborado pelo autor baseado na literatura analisada.

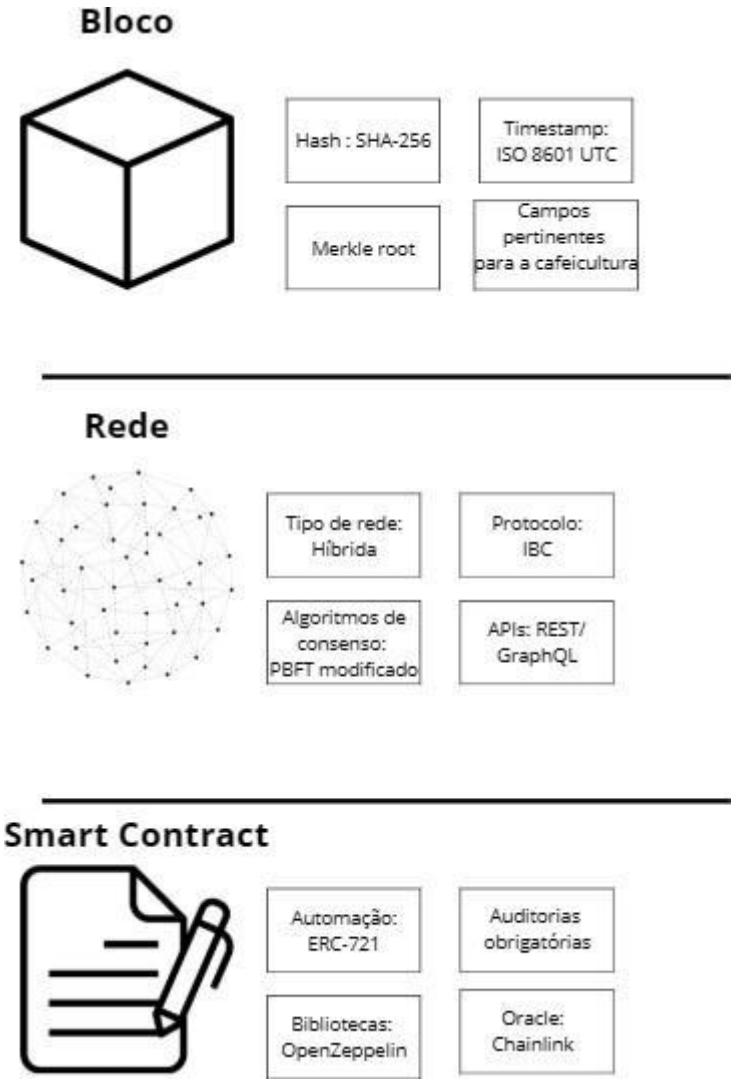
4.2 Blockchain padrão adaptado para a cadeia cafeeira

A construção de um modelo de BC adaptado para a cadeia cafeeira requer diretrizes claras e integradas para superar os desafios de interoperabilidade e fragmentação técnica presentes no setor. A diversidade de plataformas blockchain e a falta de padrões unificados dificultam a comunicação eficiente entre os diferentes atores da cadeia produtiva, prejudicando a transparência, rastreabilidade e segurança dos dados críticos, como identificação de safra e certificações (Shkembi *et al.,* 2023; Su & Wang, 2022). Além disso, a inexistência de padronizações para *smart contracts* eleva custos e riscos, limitando o reaproveitamento e a automatização de processos essenciais no agronegócio (Chung & Adriaens, 2024; Khiem *et al.,* 2023).

O modelo proposto enfatiza a padronização das três camadas fundamentais da arquitetura blockchain para garantir interoperabilidade semântica e integração *cross-chain*. Esta padronização fortalece a segurança, transparência e agilidade das operações, promovendo um ecossistema colaborativo e sustentável para a cadeia produtiva do café.

A figura 3 ilustra este modelo adaptado de BC para a cadeia cafeeira, destacando as camadas arquiteturais e suas características específicas.

Figura 3 – Modelo de blockchain adaptado para a cadeia cafeeira.



Fonte: Elaborado pelo autor

5 Discussão

Esta seção está dividida em três tópicos: i) contribuições teóricas, ii) implicações práticas para a cadeia cafeeira e iii) limitações e desafios identificados.

5.1 Contribuições teóricas

A partir da RSL observou-se que a literatura é fragmentada, com falta de padronização das linguagens e ausência de framework holístico organizando informações sobre conceitos, tipologias e características das blockchains e suas camadas - bloco, estrutura e *smart contracts* (Larikova *et al.,* 2023; Shkembi *et al.,* 2023; Su & Wang, 2022; Kim *et al.,* 2022). Essa lacuna gera problemas críticos de interoperabilidade entre diferentes implementações, dificultando comunicação semântica e técnica entre sistemas distribuídos e limitando integração *cross-chain* (Mehmood *et al.,* 2025; Zahir *et al.,* 2024; Yadav *et al.,* 2023). Assim, emergiu a pergunta problema: "Quais são as diretrizes para a padronização do uso da BC na cadeia produtiva cafeeira que possam superar os desafios de interoperabilidade e fragmentação existentes, promovendo implementação efetiva, integrada e sustentável dessa tecnologia?"

A pesquisa apresenta duas contribuições principais. Primeiro, compilou e organizou informações dispersas em framework padronizado oferecendo visão integrada dos elementos constitutivos da blockchain. A literatura não apresenta essa visão holística dos conceitos e elementos blockchain. Os artigos analisados são fragmentados, apresentando uma camada específica como *smart contracts* (Cheng *et al.,* 2023; Khiem *et al.,* 2023) ou estruturas de rede (Mehmood *et al.,* 2025; Kim *et al.,* 2022). Esta pesquisa integra e padroniza esses conceitos criando frameworks de referência. As padronizações específicas incluem: benefícios por camada arquitetural, desafios de implementação, tipos de *smart contracts* aplicáveis ao setor cafeeiro, tipologias e características das plataformas blockchain (Chung & Adriaens, 2024; Shkembi *et al.,* 2023).

A segunda contribuição foi identificar diretrizes específicas e propor modelo de blockchain padrão adaptado para cadeia cafeeira. Os artigos existentes na literatura são predominantemente teóricos. Estudos como o de Choudhury *et al.,* (2023) sobre plataforma BC para marketplace de transporte na Índia demonstram aplicação prática, porém permaneceram apenas como proposições teóricas sem validação empírica. Esta pesquisa busca trazer uma proposição que, embora não validada empiricamente, oferece interpretação teórica para contexto prático específico da cadeia cafeeira.

5.2 Implicações práticas para a cadeia cafeeira

O modelo de blockchain padrão proposto oferece contribuições significativas para as empresas da cadeia cafeeira ao fornecer um guia estruturado e diretrizes claras para a implementação da tecnologia. Com base nesse modelo, as organizações poderão estruturar a adoção da blockchain de forma segura e confiável, assegurando a integridade e rastreabilidade dos dados ao longo da cadeia produtiva. Essa padronização fortalece a confiança entre os atores e reduz riscos operacionais decorrentes da fragmentação e da falta de interoperabilidade entre sistemas (Shkembi *et al.,* 2023; Su & Wang, 2022).

Além disso, o modelo facilita a digitalização da cadeia de suprimentos em um contexto *cross-chain*, permitindo que múltiplas plataformas e tecnologias se integrem por meio de protocolos interoperáveis e formatos padronizados. Isso representa um avanço para a transformação digital do setor, historicamente pouco digitalizado, ao possibilitar um ecossistema colaborativo onde informações críticas como certificações, histórico de safra e transações são acessíveis e auditáveis em tempo real (Mehmood *et al*., 2025; Chung & Adriens, 2024). Essas contribuições posicionam o setor para uma adoção mais ampla, eficiente e segura da tecnologia, fortalecendo sua competitividade no mercado global.

5.3 Limitações e desafios identificados para a implementação da BC

Embora esta pesquisa tenha avançado na sistematização das informações e proposição de diretrizes, há limitações inerentes ao escopo e metodologia adotados. A condução da revisão sistemática com foco restrito em publicações acadêmicas indexadas em bases como SCOPUS pode ter excluído experiências e inovações documentadas em literatura cinzenta, relatórios de empresas e projetos não publicados formalmente (Page *et al.,* 2021).

Uma limitação encontrada refere-se à rápida evolução da BC e dos ecossistemas associados, exigindo constante atualização das diretrizes e modelos (Yadav *et al.,* 2023). Além disso, alguns desafios técnicos permanecem em aberto, como a interoperabilidade plena entre plataformas distintas, a escalabilidade eficiente e a garantia de segurança robusta frente a ataques complexos (Esmaili & Christensen, 2025; Zahir *et al.,* 2024).

Aspectos regulatórios e legais também configuram barreiras críticas. A diversidade de legislações em temas como proteção de dados, validade jurídica de contratos inteligentes e regulamentação de ativos digitais varia amplamente, podendo dificultar a implementação universal e confiável dos sistemas (Larikova *et al.,* 2023; Kim *et al.,* 2022).

Por fim, a infraestrutura digital insuficiente em algumas regiões produtoras, especialmente em áreas remotas, representa um desafio prático dominante, limitando a efetiva inserção da tecnologia em parte do setor (Hristova *et al.,* 2024).

Esses fatores indicam a necessidade de pesquisas contínuas, testes piloto ampliados e políticas públicas de suporte, para superar as limitações e possibilitar a evolução sustentável do uso da BC na cadeia cafeeira e outros setores.

6 Conclusão

Este trabalho propôs um modelo de BC padrão adaptado para a cadeia cafeeira baseado em RSL. A pesquisa formulou diretrizes estruturadas nas três camadas arquiteturais fundamentais sendo elas, bloco, estrutura de rede e *smart contracts*, visando superar lacunas de interoperabilidade e segurança identificadas.

A RSL evidenciou fragmentação significativa no campo, com ausência de padronização unificada para integração e intercâmbio seguro de dados. Identificaram-se quatro tipos principais de plataformas (públicas, privadas, consórcio e híbridas) e cinco categorias de *smart contracts* relevantes (rastreabilidade automatizada, pagamento condicional, certificação digital, supply chain inteligente e seguro paramétrico), culminando na proposição de diretrizes técnicas capazes de promover sistema robusto para identificar vulnerabilidades em tempo real e mitigar riscos operacionais.

Academicamente, foi proposto um framework estruturado integrando conceitos, tipologias e funções BC para o agronegócio, preenchendo algumas lacunas da literatura (Chung & Adriaens, 2024; Kim *et al.,* 2022; Su & Wang, 2022). Reconhecem-se limitações metodológicas incluindo exclusão de fontes não acadêmicas, necessidade de revisões periódicas devido à evolução tecnológica (Yadav *et al.,* 2023; Page *et al.,* 2021), especificidade para setor cafeeiro limitando generalização, e ausência de validação empírica em campo.

6.1 Trabalhos futuros

Como desdobramentos futuros, recomenda-se a realização de estudos empíricos que testem a implantação do modelo proposto em diferentes contextos da cadeia cafeeira, avaliando sua eficácia na identificação de vulnerabilidades e mitigação de riscos operacionais. A ampliação da pesquisa para contemplar cadeias de outros setores do agronegócio e indústrias correlatas pode enriquecer a aplicabilidade das diretrizes.

Sugere-se o aprofundamento em aspectos técnicos avançados, como mecanismos de interoperabilidade *cross-chain* emergentes, escalabilidade aprimorada e padrões internacionais em governança regulatória e jurídica da blockchain para cadeias produtivas globais (Esmaili & Christensen, 2025; Mehmood *et al.,* 2025).

Recomenda-se também a realização de estudos empíricos testando a implantação do modelo proposto, ampliação para outros setores do agronegócio, aprofundamento em aspectos técnicos avançados como mecanismos de interoperabilidade *cross-chain* emergentes

(Esmaili & Christensen, 2025; Mehmood *et al.,* 2025), e investigação sobre integração da BC com outras tecnologias disruptivas como IoT e inteligência artificial.

Referências bibliográficas

Cheng, H.; Li, J.; Lu, J.; Lo, S.-L.; Xiang, Z. Incentive-Driven Information Sharing Based on Consortium Blockchain. Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research, v. 18, n. 1, p. 206-236, 2023.

Choudhury, S.; Jayaprakash, P.; Srinivas, S.; Shah, T. Blockchain platform for truck freight marketplace in India. Operations Management Research, v. 16, n. 2, p. 684-704, 2023.

Chung, K.H.; Adriaens, P. Blockchain technology for pay-for-outcome sustainable agriculture financing: implications for governance and transaction costs. Environmental Research Communications, v. 6, n. 1, p. 015009, 2024.

Covarribias, J.Z.; Covarribias, I. Different types of government and governance in blockchain. J. Governance Regul., v. 10, n.1, p. 8-21, 2021

Esmaili, M.; Christensen, K. Performance Modeling of Public Permissionless Blockchains: A Survey. ACM Computing Surveys, v. 57, n. 7, p. 776-791, 2025.

Hristova, T.; Mihaylov, G.; Hristov, P.; Taneva, A. Analysis of Data Sharing Systems in Industry 4.0 via Blockchain in 5G Mobile Networks. Engineering Proceedings, v. 70, n. 1, p. 2, 2024.

Jain, A.; Gupta, N.; Gupta, B. A survey on scalable consensus algorithms for blockchain technology. Cyber Security Applications, v. 3, p. 100065, 2025.

Khiem, H.G.; Khan, V.; Huong, H.L.; Bao, Q.T.; Khoa, D. Implementing Blockchain, Smart Contract, and NFT Framework for Waste Management. Int. J. Adv. Comput. Sci., v. 14, n.8, p. 985-996, 2023.

Kim, H.M.; Turesson, H.; Laskowski, M.; Bahreini, A. Permissionless and Permissioned, hybrid blockchain case study. IEEE Trans. Eng. Manage., v. 69, n. 3, p.776-791, 2022.

Kitchenham, B.; Charters, S. Guidelines for systematic software reviews. Technical Report EBSE 2007-001, 2021.

Larikova, T.; Ivankov, V.; Novichenko, L. Implementation of blockchain technology in the public sector. Eastern-European J. Enterprise Technologies, v. 5, n. 13(125), p. 77-87, 2023.

Mehmood, F.; Khan, A.A.; Wang, H.; Khalid, U.; Zhao, F. BLPCA-ledger: lightweight consensus protocols for consortium blockchain based on hyperledger indy. Computer Standards Interfaces, v. 91, p. 103876, 2025.

Merlec, M.; Islam, M.; Lee, Y.; In, H. Consortium blockchain-based electronic portfolio management. Sensors, v. 22, n. 3, 2022.

Page, M.; Mckenzie, J.; Bossuyt, P.; *et al*. PRISMA 2020 statement. BMJ, v. 372, n. 71, p.1-9, 2021.

Shkembi, K.; Kochovski, P.; Papaioannou, T.G.; Barel, C.; Stankov, V. . Semantic Web and blockchain technologies: Convergence, challenges and research trends. J. Web Semantics, v. 79, p. 100809, 2023.

Scanu, F. Blockchain impacts on agri-food supply chain network. Sustainability, v. 13, n. 4, p. 2168, 2021.

Su, X; Wang, S. Research on blockchain digital system design. Scientific Reports, v. 12, p. 20286, 2022.

Takaoğlu, M.; Özyavaş, A.; Ajluni, N.; Takaoğlu, F.; Demir, S. OTA 2.0: Advanced blockchain steganography algorithm. Int. J. Comput. Exp. Sci. Eng., 2023.

Yadav, A.S.; Singh, N.; Kushwaha, D.S.Evolution of blockchain and consensus & applications. Multimedia Tools Appl., v. 82, n. 22, p.34363-34408, 2023.

Zahir, A.; Groshov, M.; Antevski, K.; Bernard, C.; Ayimba, C.; De la oliva, A. Performance evaluation of public and private blockchains. ACM Int. Conf. Proceedings, p. 217-221, 2024.