

# Arquitetura de Registro Distribuído para Mitigação de Vazamento de Emissões e Dupla Contagem de Créditos de Carbono na Amazônia

Mateus Bastos<sup>1</sup>, Alan Veloso<sup>2</sup>, Antônio Abelém<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Pará (UFPA)  
Belém - PA

<sup>2</sup>Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP)  
Rio de Janeiro - RJ

mateus.araujo@icen.ufpa.br, alan.veloso@rnp.br, abelem@ufpa.br

**Abstract.** *This article proposes a permissioned blockchain-based architecture to strengthen the integrity of forest carbon credits in the Amazon. Credits are programmatically issued and retired through smart contracts on the blockchain network, reducing the risk of double counting and enhancing traceability. The validation included performance testing of the smart contracts. The results indicate the technical feasibility of the architecture to increase transparency in voluntary carbon markets.*

**Resumo.** *Este artigo propõe uma arquitetura baseada em blockchain permissionada para fortalecer a integridade de créditos de carbono florestais na Amazônia. Os créditos são emitidos e aposentados programaticamente por contratos inteligentes na rede blockchain, reduzindo riscos de dupla contagem e ampliando a rastreabilidade. A validação incluiu testes de desempenho dos contratos inteligentes. Os resultados indicam viabilidade técnica da arquitetura para aumentar a transparência em mercados voluntários de carbono.*

## 1. Introdução

A integridade de créditos de carbono florestais depende de mecanismos confiáveis de Monitoramento, Relato e Verificação (MRV), capazes de garantir consistência, rastreabilidade e auditabilidade dos dados utilizados. No contexto de projetos de redução de emissões por desmatamento e degradação florestal (REDD+), limitações técnicas como inconsistências em linhas de base, baixa frequência de verificação e ausência de mecanismos automatizados de validação comprometem a confiabilidade dos créditos gerados [Yang and Park 2025, Guardian 2023, Uruatpera 2025].

Tais limitações evidenciam a necessidade de soluções que integrem processamento de dados ambientais com mecanismos robustos de garantia de integridade. Nesse sentido, tecnologias de *blockchain* permissionadas emergem como alternativa para prover registro imutável, execução determinística e rastreabilidade de transações ao longo do ciclo de vida dos créditos, embora sua aplicação efetiva dependa da integração segura com fontes externas de dados confiáveis.

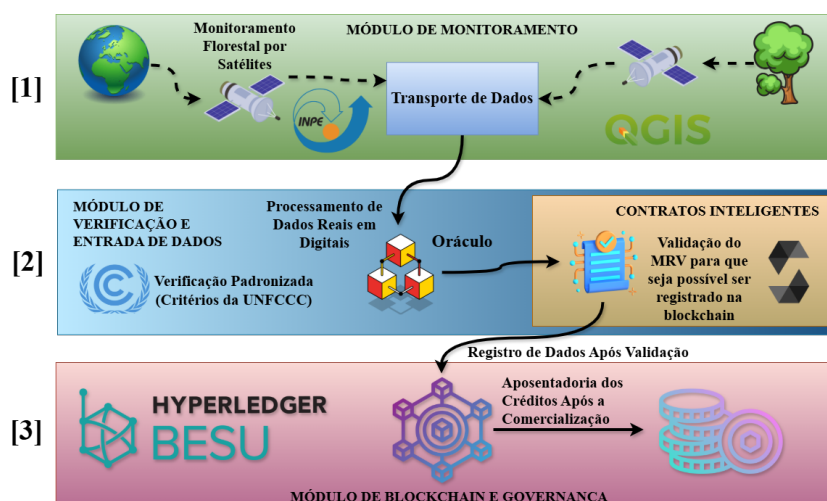
Este trabalho propõe uma arquitetura técnica que combina *blockchain* permissionada, contratos inteligentes e processamento geoespacial para integralizar etapas do MRV.

A abordagem adota *Hyperledger Besu* como infraestrutura de execução, explorando suporte a redes permissionadas e compatibilidade com a Ethereum Virtual Machine (EVM).

Como contribuições, destacam-se: (i) definição de uma arquitetura modular baseada em *blockchain* para o ciclo de vida de créditos de carbono com integração geoespacial; (ii) implementação de contratos inteligentes para emissão, rastreamento e aposentadoria de créditos via *tokens* não fungíveis (NFTs), assegurando unicidade e prevenindo dupla contagem; e (iii) avaliação experimental por meio de testes de desempenho (latência e *throughput*) e validação baseada em análise de cobertura florestal.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a arquitetura proposta; a Seção 3 discute os resultados obtidos; e a Seção 4 apresenta as conclusões.

## 2. Visão Geral e Implementação da Proposta



**Figura 1. Arquitetura proposta para integridade de créditos de carbono em projetos REDD+.**

Esta seção apresenta a arquitetura proposta para mitigar riscos de vazamento de carbono e fortalecer a integridade dos créditos gerados por projetos REDD+ na Amazônia. A solução integra monitoramento geoespacial baseado em dados oficiais, verificação padronizada de dados ambientais e registro imutável em blockchain permissionada, conforme ilustrado na Figura 1. O objetivo é garantir que reduções de emissões estejam associadas a evidências ambientais verificáveis e auditáveis. O fluxo operacional completo é apresentado na Figura 2.

Diferentemente de soluções focadas apenas na rastreabilidade transacional de créditos, a proposta aborda explicitamente o problema do vazamento de carbono, caracterizado pelo deslocamento do desmatamento para áreas adjacentes. A arquitetura foi projetada para detectar, registrar e auditar alterações florestais tanto dentro quanto no entorno das áreas monitoradas, reduzindo riscos de superestimação dos benefícios climáticos.

### 2.1. Monitoramento Geoespacial e Verificação de Dados

O monitoramento ambiental (Camada 1 da Figura 1) utiliza dados oficiais do INPE, amplamente empregados em sistemas de MRV em projetos REDD+. Para validação meto-

dológica, foram analisadas séries históricas de desmatamento no estado do Pará. O processamento geoespacial foi realizado em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica utilizando o software QGIS.

A análise espacial permitiu identificar e quantificar polígonos de desmatamento, fornecendo evidências objetivas para validação ambiental dos créditos. Essa abordagem reduz dependência de projeções do tipo *business-as-usual* e está alinhada às diretrizes da UNFCCC para definição de linhas de base e adicionalidade climática [Yang and Park 2025].

Os dados ambientais processados passam por um módulo de verificação padronizada alinhado aos critérios metodológicos do MRV, assegurando consistência e rastreabilidade antes da digitalização. A integração entre dados ambientais e blockchain ocorre por meio de um oráculo, responsável por encaminhar apenas informações verificadas à camada de contratos inteligentes (Camada 2 da Figura 1).

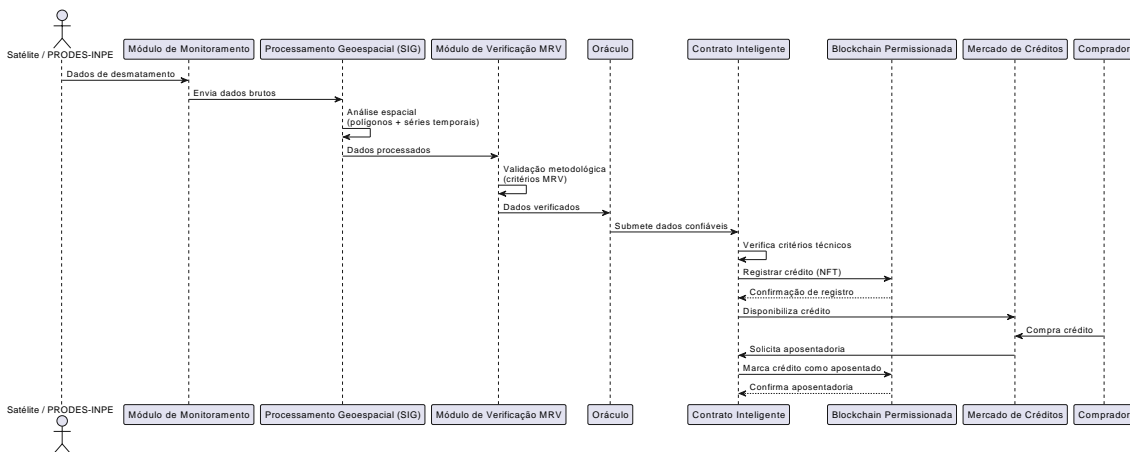


Figura 2. Diagrama de sequência do fluxo de operação da arquitetura.

## 2.2. Registro em Blockchain e Aposentadoria dos Créditos

Após a verificação, os dados ambientais são registrados de forma imutável em uma blockchain permissionada baseada no Hyperledger Besu (Camada 3 da Figura 1). Cada registro ambiental é representado por um NFT, garantindo unicidade, rastreabilidade e integridade das informações associadas ao crédito. Os metadados armazenados incluem área monitorada, período de análise e referências geográficas, possibilitando auditoria técnica contínua.

A validação dos critérios de MRV é realizada por contratos inteligentes, que determinam a elegibilidade do crédito para registro na blockchain. Após o registro, os créditos podem ser negociados em mercados voluntários mantendo vínculo direto com suas evidências ambientais.

A aposentadoria dos créditos é executada programaticamente por contratos inteligentes, garantindo que créditos utilizados não sejam reintroduzidos no mercado (Camada 3 da Figura 1). Esse mecanismo reduz riscos de dupla contagem e reforça a integridade ambiental do sistema, em conformidade com diretrizes internacionais e regulamentações nacionais [United Nations 2025, Imprensa Nacional 2024].

A integração entre monitoramento geoespacial, verificação técnica de dados e registro imutável em blockchain estabelece um fluxo auditável de ponta a ponta, contribuindo para fortalecer a integridade dos créditos de carbono gerados por projetos REDD+ na Amazônia.

### 3. Resultados e Discussão

Esta seção apresenta os resultados da validação da arquitetura proposta, com foco em sua capacidade de reforçar a integridade ambiental de projetos REDD+ na Amazônia. A análise concentra-se na avaliação de desempenho da infraestrutura de registro distribuído e dos contratos inteligentes implantados na rede.

#### 3.1. Metodologia de Avaliação e Condução dos Experimentos

Para assegurar a reprodutibilidade da pesquisa e validar a viabilidade técnica da arquitetura, a avaliação concentrou-se em testes de desempenho computacional da infraestrutura *blockchain*. O núcleo operacional foi implantado em uma rede permissionada baseada em Hyperledger Besu<sup>1</sup>.

O ambiente foi configurado com quatro nós validadores executando o algoritmo de consenso *Quorum Byzantine Fault Tolerance* (QBFT<sup>2</sup>). A escolha do QBFT deve-se à sua adequação a redes permissionadas corporativas, garantindo finalidade imediata das transações e evitando bifurcações (*forks*), o que assegura a unicidade e imutabilidade no registro e aposentadoria de créditos de carbono.

Para submeter os contratos inteligentes da arquitetura, especificamente `forestMonitor.sol` e `carbonRetirement.sol`, a cenários de estresse, utilizou-se a ferramenta de testes de carga Locust<sup>3</sup>. Os experimentos seguiram um protocolo de injeção de carga gradual (*step load*), variando a concorrência de 10 a 250 usuários simultâneos. Essa abordagem permitiu avaliar a resiliência da rede e o impacto computacional associado ao consenso e à persistência de estado. Foram definidas duas métricas principais de avaliação:

- **Latência:** tempo médio necessário para confirmação das transações.
- **Throughput (Vazão):** número de transações processadas por segundo.

Durante os testes, as operações foram analisadas separadamente conforme sua natureza: requisições de leitura (*read*) e de escrita (*write*). Essa distinção permitiu identificar com maior precisão limites de processamento e gargalos de latência associados ao processo de validação.

#### 3.2. Testes de Desempenho

A Figura 4 apresenta a relação entre carga, *throughput* e latência. O *throughput* agregado exibiu crescimento aproximadamente linear ( $R^2 \approx 0,98$ ), atingindo 113 requisições por segundo sem sinais de saturação da rede Hyperledger Besu.

<sup>1</sup><https://besu.hyperledger.org/>

<sup>2</sup><https://besu.hyperledger.org/private-networks/how-to/configure/consensus/qbft>

<sup>3</sup><https://locust.io/>

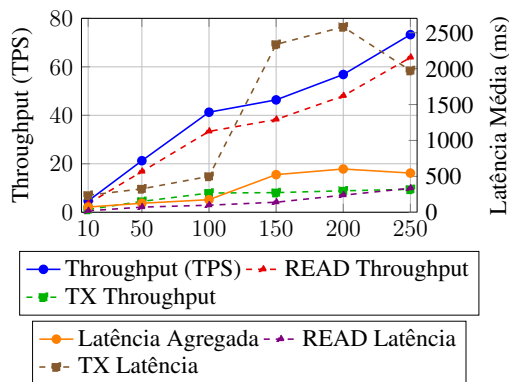


Figura 3. Throughput e latência do contrato carbonRetirement.sol

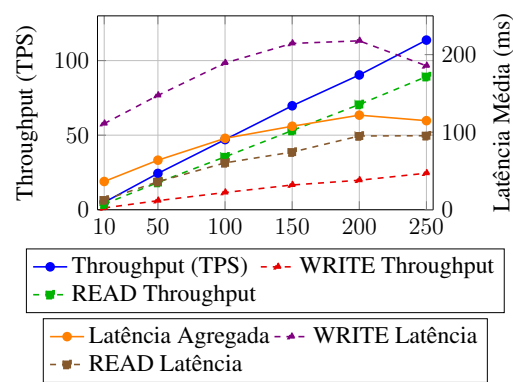


Figura 4. Throughput e latência do contrato forestMonitor.sol

Quanto à latência, operações de leitura (`getforestRecord`) permaneceram estáveis abaixo de 100 ms, enquanto operações de escrita (`createforestRecord`) alcançaram até 200 ms, refletindo o custo computacional associado ao consenso e à persistência de estado.

Os resultados apresentados na Figura 3 indicam estabilidade operacional até aproximadamente 150 usuários simultâneos. Acima desse limiar, observou-se um ponto de inflexão: embora o *throughput* continuasse crescendo, a latência das operações de escrita (`retireCredit`) aumentou significativamente, passando de aproximadamente 100 ms para picos superiores a 2000 ms.

Esse comportamento sugere saturação de recursos de I/O ou da interface RPC do nó validador sob alta concorrência, diferindo do gargalo de consenso observado no contrato anterior.

### 3.3. Discussão dos Resultados

Os resultados demonstram a estabilidade da rede Hyperledger Besu sob cargas moderadas, apresentando crescimento linear do *throughput* ( $R^2 \approx 0.98$ ) e latências controladas. Operações de leitura mantiveram latência inferior a 100 ms, enquanto operações de escrita atingiram aproximadamente 200 ms, refletindo o custo computacional associado ao consenso distribuído e à persistência de estado.

Entretanto, os experimentos revelaram um limite de escalabilidade. Acima de 150 usuários simultâneos, a latência das operações de escrita do contrato `carbonRetirement.sol` aumentou significativamente, ultrapassando 2000 ms mesmo com crescimento contínuo do *throughput*. Esse comportamento sugere saturação de recursos de I/O ou da interface RPC dos nós validadores, indicando que implantações em larga escala demandarão otimizações de infraestrutura, como dimensionamento adequado de hardware e mecanismos de balanceamento de carga para requisições RPC.

## 4. Conclusão e Perspectivas Futuras

Este trabalho apresentou uma arquitetura baseada em blockchain permissionada para fortalecer a integridade de créditos de carbono em projetos REDD+ na Amazônia, integrando monitoramento geoespacial, dados oficiais e contratos inteligentes auditáveis. Os resultados obtidos em ambiente controlado indicam que a arquitetura é tecnicamente viável e

conceitualmente consistente, enquanto sua estrutura modular sugere potencial como arquitetura de referência para aplicações de computação ambiental em diferentes contextos regulatórios e territoriais.

Entretanto, o estudo apresenta limitações relacionadas à ausência de oráculos automatizados, à execução dos experimentos em infraestrutura local e à ausência de validação empírica da governança distribuída com usuários reais. Dessa forma, os resultados devem ser interpretados como evidência de viabilidade arquitetural, e não como validação de um sistema pronto para operação em larga escala. Como perspectivas futuras, destacam-se:

- Integração de **oráculos automatizados** para ingestão contínua e validação de dados de sensoriamento remoto.
- Avaliação da arquitetura em **ambientes distribuídos de maior escala**, analisando desempenho, escalabilidade e tolerância a falhas.

## Disponibilidade de Artefatos

Os arquivos referentes aos contratos de implementação e testes se encontram no repositório pessoal do autor<sup>4</sup>.

## Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio da Chamada Pública nº 068/2022; e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), sob os auxílios 2023/00811-0, 2023/00673-7, 2021/00199-8 (CPE SMARTNESS), 2020/04031-1 e 2018/23097-3. Também contou com o apoio da Propesp/UFPA.

## Referências

- Guardian 2023 Guardian, T. (2023). Revealed: more than 90% of rainforest carbon offsets by biggest certifier are worthless, analysis shows. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/environment/2023/jan/18/revealed-forest-carbon-offsets-biggest-provider-worthless-verra-aoe>. Acesso em: 28 de Maio. 2025.
- Imprensa Nacional 2024 Imprensa Nacional (2024). Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024 - dou - imprensa nacional. <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-15.042-de-11-de-dezembro-de-2024-601124199>.
- United Nations 2025 United Nations (2025). UNFCCC. Disponível em: <https://unfccc.int/>. Acesso em: 11 jun. 2025.
- Uruatapera 2025 Uruatapera (2025). Ong denuncia violações de direitos no sistema de redd+ do Pará. <https://uruatapera.com/ong-denuncia-violacoes-de-direitos-no-sistema-de-redd-do-para/> Acesso em: 26 jun. 2025.
- Yang and Park 2025 Yang, D. and Park, H. (2025). Integrity challenges in carbon markets: Comparing unfccc and voluntary redd+ verification in the amazon biome. *Environmental Science & Policy*, 169:104080.

---

<sup>4</sup><https://github.com/mattbasttos/forest-blockchain-contracts.git>