GESTÃO DESCENTRALIZADA COM BLOCKCHAIN: CONTRIBUIÇÕES DO AXOLODAO PARA A RASTREABILIDADE E AUDITORIA CIENTÍFICA DE ESPÉCIMES AMEAÇADOS

DECENTRALIZED MANAGEMENT WITH BLOCKCHAIN: CONTRIBUTIONS OF AXOLODAO TO THE TRACEABILITY AND SCIENTIFIC AUDITING OF ENDANGERED SPECIMENS

NATHÁLIA PIRES FIGUEREDO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA E LIDERANÇA - INTELI

VINICIUS LUCAS CIARDI

JOSÉ ROMUALDO DA COSTA FILHO
UNINOVE – UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO

BRYAN KANO FERREIRA

Comunicação:
O XIV SINGEP foi realizado em conjunto com a 14th Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge) e com a SPARK (Society for Promoting Academic Research and Knowledge), em formato híbrido, com sede presencial na UNINOVE - Universidade Nove de Julho, no Brasil.

Agradecimento à orgão de fomento:
Agradeço ao Inteli Research.

GESTÃO DESCENTRALIZADA COM BLOCKCHAIN: CONTRIBUIÇÕES DO AXOLODAO PARA A RASTREABILIDADE E AUDITORIA CIENTÍFICA DE ESPÉCIMES AMEAÇADOS

Objetivo do estudo
Este estudo apresenta o desenvolvimento do AxoloDAO, uma plataforma descentralizada baseada em tecnologia blockchain voltada ao monitoramento científico e rastreabilidade de axolotes (Ambystoma mexicanum) em cativeiro, integrando registro imutável de dados biológicos, tokenização de espécimes via padrão ERC-721 e mecanismos de

Relevância/originalidade
A combinação de tokenização de espécimes vivos, auditoria científica por consenso on-chain e monitoramento ambiental em tempo real configura uma abordagem ainda pouco documentada na literatura sobre gestão de dados em laboratórios de conservação.

Metodologia/abordagem
O projeto foi desenvolvido com arquitetura full-stack composta por frontend em React, backend com APIs REST e WebSockets, e smart contracts em Solidity implantados na rede de testes Sepolia, utilizando estruturas de Merkle Tree para ancoragem eficiente de medições ambientais, controle de

Principais resultados
A solução implementada permite o registro rastreável de medições por parâmetros ambientais, a emissão de identidades digitais únicas (NFTs) para cada espécime e validação científica auditável por especialistas certificados, com dados verificáveis publicamente na blockchain.

Contribuições teóricas/metodológicas
O trabalho demonstra a viabilidade de aplicar blockchain e NFTs à conservação de espécies ameaçadas, contribuindo para a discussão sobre integridade de dados científicos, rastreabilidade ambiental e governança descentralizada em contextos de pesquisa biológica.

Contribuições sociais/para a gestão
O relato disponibiliza a gestores de conservação um modelo de rastreabilidade e auditoria de dados científicos em blockchain, apoiando a coordenação interinstitucional, a prestação de contas a financiadores e a transparência no monitoramento de espécies ameaçadas em cativeiro.

Palavras-chave: Blockchain, Smart Contracts, Conservação de Espécies, Rastreabilidade, Tokenização

DECENTRALIZED MANAGEMENT WITH BLOCKCHAIN: CONTRIBUTIONS OF AXOLODAO TO THE TRACEABILITY AND SCIENTIFIC AUDITING OF ENDANGERED SPECIMENS

Study purpose
This study presents the development of AxoloDAO, a decentralized platform based on blockchain technology aimed at the scientific monitoring and traceability of axolotls (Ambystoma mexicanum) in captivity, integrating immutable biological data recording, specimen tokenization via the ERC-721 standard, and on-chain consensus auditing

Relevance / originality
The combination of live specimen tokenization, on-chain scientific consensus auditing, and real-time environmental monitoring represents an approach still scarcely documented in the literature on data management in conservation laboratories.

Methodology / approach
The project was developed with a full-stack architecture comprising a React frontend, a backend with REST APIs and WebSockets, and Solidity smart contracts deployed on the Sepolia test network, using Merkle Tree structures for efficient environmental measurement anchoring, Role-Based Access Control (RBAC),

Main results
The implemented solution enables the traceable recording of environmental parameter measurements, the issuance of unique digital identities (NFTs) for each specimen, and scientifically auditable validation by certified specialists, with data publicly verifiable on the blockchain.

Theoretical / methodological contributions
The work demonstrates the feasibility of applying blockchain and NFTs to endangered species conservation, contributing to the discussion on scientific data integrity, environmental traceability, and decentralized governance in biological research contexts.

Social / management contributions
This report provides conservation managers with a blockchain-based model for the traceability and auditing of scientific data, supporting interinstitutional coordination, accountability to funders, and transparency in the monitoring of endangered species kept in captivity.

Keywords: Blockchain, Smart Contracts, Species Conservation, Traceability, Tokenization

GESTÃO DESCENTRALIZADA COM BLOCKCHAIN: CONTRIBUIÇÕES DO AXOLODAO PARA A RASTREABILIDADE E AUDITORIA CIENTÍFICA DE ESPÉCIMES AMEAÇADOS

1 Introdução

A digitalização dos processos científicos e organizacionais tem ampliado a busca por soluções tecnológicas que assegurem eficiência operacional, confiabilidade, rastreabilidade e transparência na gestão de dados. Nesse contexto, a tecnologia blockchain oferece registros imutáveis, auditáveis e descentralizados (Swan, 2015), o que reduz a dependência de intermediários institucionais para a validação de informações (Drouin et al., 2017) e viabiliza serviços de notarização e de registro da integridade de conteúdos científicos (Kleinaki et al., 2018).

Paralelamente, a conservação de espécies ameaçadas enfrenta desafios crescentes relacionados à integridade e continuidade dos dados científicos coletados em cativeiro. O axolote (*Ambystoma mexicanum*), anfíbio criticamente ameaçado e relevante para pesquisas biomédicas em razão de sua capacidade regenerativa (Monaghan et al., 2014), exemplifica essa situação: o monitoramento de seus parâmetros biológicos e ambientais é frequentemente realizado de forma manual, fragmentada e suscetível a erros humanos, o que compromete tanto o valor científico dos dados quanto a tomada de decisões em tempo hábil. Sistemas de sensoriamento e de Internet das Coisas possibilitam a aquisição contínua de parâmetros físico-químicos em ambientes aquáticos (Akhter et al., 2022; Demetillo et al., 2019).

Diante desse cenário, originou-se o AxoloDAO, uma plataforma descentralizada com o objetivo de informatizar e descentralizar o monitoramento, o registro e a auditoria científica de axolotes em cativeiro. O sistema integra smart contracts em Solidity, tokenização de espécimes por meio de NFTs e mecanismos de consenso on-chain para validação por auditores certificados.

O escopo do projeto foi construído em estreita colaboração com seus stakeholders, cujas necessidades foram mapeadas por meio de personas e user stories, orientando cada decisão de design e arquitetura do sistema. Esse alinhamento entre tecnologia e demanda real dos usuários é apontado na literatura como fator relevante para projetos de implantação de ferramentas computacionais (Aaltonen et al., 2024; Eskerod & Larsen, 2018).

Diante desse cenário, o relato orienta-se pela seguinte questão de pesquisa: como uma infraestrutura descentralizada baseada em blockchain pode assegurar a rastreabilidade, a integridade e a auditabilidade dos dados científicos no monitoramento de axolotes em cativeiro?

Este relato técnico tem por objetivo apresentar o desenvolvimento e a implantação do AxoloDAO e analisar a intervenção realizada na organização parceira quanto à gestão científica, à rastreabilidade de espécimes e à transparência de dados em projetos de conservação animal, bem como suas implicações para a teoria e a prática de projetos de software em contextos de responsabilidade socioambiental. A seguir, são apresentados o referencial teórico, a metodologia, a análise e discussão dos resultados e as conclusões.

2 Referencial Teórico

O referencial teórico deste relato articula os campos da conservação de espécies ameaçadas, da integridade de dados científicos e das tecnologias de registro distribuído. A convergência entre esses domínios fundamenta a escolha da arquitetura blockchain como solução para os problemas de fragmentação e rastreabilidade identificados na organização

parceira.

2.1 Blockchain e Integridade de Dados Científicos

A blockchain é uma estrutura de dados distribuída que organiza registros em blocos encadeados por funções hash criptográficas, tornando qualquer alteração retroativa detectável por toda a rede (Swan, 2015). A imutabilidade resultante é um atributo crítico para a ciência: registros de monitoramento biológico, uma vez confirmados na rede, não podem ser adulterados sem que a violação seja evidenciada publicamente. Esse mecanismo atende a um requisito central da ciência aberta, que exige rastreabilidade e verificabilidade independente dos dados primários (Eskerod & Larsen, 2018), e serviços de notarização em blockchain têm sido propostos para registrar a integridade de conteúdos científicos (Kleinaki et al., 2018). Sistemas baseados em blockchain têm sido desenvolvidos para assegurar imutabilidade e rastreabilidade ao longo do ciclo de vida dos dados de pesquisa, com validação em cenários de transmissão, processamento e armazenamento (Li et al., 2025), e a tecnologia tem sido proposta como mecanismo para incentivar a disponibilização de dados ecológicos abertos (Lewis, Marstein, & Grytnes, 2023), inclusive por meio de bases descentralizadas orientadas aos princípios FAIR (Marstein, Grytnes, & Lewis, 2025). Revisões sistemáticas identificam a rastreabilidade e a auditabilidade como benefícios centrais dessas implementações (Dasaklis, Voutsinas, Tsoulfas, & Casino, 2022).

Em contrapartida aos sistemas centralizados, nos quais a confiança depende de uma entidade custodiante, a blockchain desloca essa confiança para o protocolo matemático, eliminando pontos únicos de falha ou manipulação. A tokenização de ativos por meio do padrão ERC-721 (Entriken et al., 2018) estende esse princípio à identificação de espécimes biológicos: cada token é não fungível, único e imutavelmente vinculado ao histórico do indivíduo que representa, criando uma identidade digital verificável por qualquer agente externo sem depender de servidor centralizado. A literatura recente documenta o uso de tokens não fungíveis para assegurar proveniência e identidade de ativos físicos e biológicos (Razi et al., 2024; Wang et al., 2024), bem como as implicações desses tokens para os ecossistemas de stakeholders (Wilson et al., 2022). A escolha desse padrão, em relação a identificadores incrementais em banco de dados relacional, associa-se à unicidade pública dos espécimes e à interoperabilidade com o ecossistema Web3.

2.2 Governança Descentralizada e Auditoria Científica

A governança descentralizada refere-se a mecanismos de tomada de decisão e validação que distribuem a autoridade entre múltiplos agentes, sem depender de uma instituição central (Drouin et al., 2017). As organizações autônomas descentralizadas sistematizam esse modelo por meio de contratos inteligentes e tokens, ampliando a coordenação horizontal e reduzindo assimetrias informacionais (Chambefort & Chaudey, 2024; Santana & Albareda, 2022). Revisão sistemática da literatura sobre governança em blockchain organiza abordagens on-chain e off-chain para coordenar a evolução e o uso dos protocolos, tema que ganhou relevância após o ataque ao The DAO em 2016 (Liu, Lu, Zhu, Paik, & Staples, 2023). Estudos empíricos associam elementos de governança, como a distribuição do poder de voto e os incentivos, à viabilidade de longo prazo dessas organizações (Rikken, Janssen, & Kwee, 2023). No contexto científico, esse modelo permite que especialistas de diferentes instituições validem registros de forma transparente e auditável, reduzindo assimetrias informacionais e aumentando a credibilidade dos dados perante órgãos reguladores e financiadores internacionais.

O controle de acesso baseado em papéis (RBAC) é uma técnica consolidada para implementar essa governança em sistemas de informação (Ferraiolo et al., 2001): cada perfil de usuário, biólogo, auditor ou administrador, recebe permissões específicas, garantindo que somente agentes certificados possam submeter ou aprovar registros críticos. O Ethereum

Attestation Service (EAS) aprofunda esse modelo ao permitir que atores autorizados emitamatestados criptograficamente verificáveis sobre dados ou eventos, criando um registro público e imutável da validação científica. A combinação de RBAC e atestados on-chain constitui a espinha dorsal do fluxo de auditoria do AxoloDAO, assegurando que apenas informações referendadas por especialistas sejam consolidadas de forma definitiva na plataforma.

2.3 Conservação Ex Situ e Rastreabilidade Biológica

O axolote (*Ambystoma mexicanum*) é classificado como criticamente ameaçado, com populações selvagens restritas aos canais de Xochimilco, no México. Populações em cativeiro mantidas em instituições científicas representam reservas genéticas para a sobrevivência da espécie (Monaghan et al., 2014). Programas de reprodução em cativeiro apoiam-se em tecnologias reprodutivas e no manejo genético das colônias para reduzir a perda de diversidade (Silla & Byrne, 2019). Estudos recentes com indivíduos criados em cativeiro e reintroduzidos em áreas restauradas e artificiais indicam a viabilidade de estratégias de conservação ex situ associadas ao monitoramento contínuo do ambiente aquático (Ramos, Mena, Schneider, & Zambrano, 2025). O monitoramento longitudinal de indicadores genômicos após a reintrodução condiciona a avaliação da persistência das populações (Marshall et al., 2022). A gestão dessas populações exige registros contínuos de parâmetros físico-químicos do ambiente aquático, cujos desvios em relação a faixas de referência desencadeiam respostas fisiológicas de estresse e aumentam a mortalidade.

O Protocolo de Nagoya (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2011), no âmbito da Convenção sobre Diversidade Biológica, estabelece requisitos de rastreabilidade genética e de repartição de benefícios para material biológico, o que situa a infraestrutura de registro como exigência normativa. A aplicação de blockchain à rastreabilidade em contextos de conservação e de cadeias de suprimento de fauna tem sido investigada como mecanismo para ampliar transparência e confiança nos registros (Howson, 2020; Keskin et al., 2023). Análises críticas ponderam que a transparência mediada por blockchain não elimina, por si, as assimetrias de governança nas cadeias globais (Bernards, Campbell-Verduyn, & Rodima-Taylor, 2024). A ausência de sistemas digitais integrados compromete a integridade científica dos dados longitudinais e a capacidade das instituições de demonstrar conformidade e atrair financiamento baseado em impacto verificável.

3 Metodologia

Para solucionar a fragmentação e a falta de rastreabilidade dos dados, a equipe mobilizou habilidades em engenharia de software e arquitetura de sistemas híbridos para propor uma infraestrutura pública descentralizada. De forma central, adotou-se o conceito de tokenização de ativos biológicos vivos para estabelecer identidades digitais exclusivas acopladas às características biológicas e ao registro físico de cada espécime em cativeiro, garantindo a unicidade e a titularidade dos exemplares dentro de um ecossistema distribuído.

Adicionalmente, desenhou-se uma estratégia de processamento de dados em camadas, capaz de consolidar grandes volumes de séries temporais de medições físico-químicas fora da rede principal e publicar apenas provas de integridade criptográfica de forma compacta na blockchain. Essa abordagem metodológica híbrida foi selecionada para assegurar a auditabilidade, a soberania e a verificação independente dos registros científicos abertos, preservando a viabilidade financeira do projeto de software por meio da minimização drástica do uso de armazenamento na rede de consenso e da consequente redução nas taxas de execução.

Quanto ao tipo de abordagem, o relato apoiou-se na participação direta da equipe no desenvolvimento do sistema e na observação direta dos fluxos operacionais da organização parceira. O embasamento do relato e a validação dos requisitos apoiaram-se em fontes de informação primárias e secundárias. As fontes primárias consistiram no contato direto com os stakeholders e na análise de documentos estratégicos do AxoloDAO, como as bases de dados de variáveis e indicadores. As fontes secundárias englobaram revisões técnicas de protocolos Web3, como o *Ethereum Name Service* (ENS) e o *Ethereum Attestation Service* (EAS), que serviram de referência para os mecanismos de atestação e identidade digital do protótipo.

4 Análise e discussão dos resultados

A seguir, serão apresentadas a caracterização da organização e do projeto analisado onde este relato técnico foi realizado.

4.1 Caracterização da organização

A organização parceira caracteriza-se como uma startup Web3 e iniciativa de pesquisa descentralizada, com sua base de operações centrada no México. Trata-se um laboratório de pesquisa e desenvolvimento (R&D) cujo setor de atividade concentra-se na criação de infraestrutura pública digital, desenvolvimento de software de código aberto e aplicação de tecnologias blockchain operando sobre a rede Ethereum. A empresa atua no mercado de inovação tecnológica aplicada, desenhando e prototipando ferramentas *on-chain* voltadas à resolução de problemas práticos em contextos sociais, científicos e produtivos. O seu diferencial e foco de atuação residem na garantia de rastreabilidade, na implementação de governança descentralizada e na viabilização de mecanismos de financiamento baseados em impacto verificável.

No que tange à sua estrutura organizacional e metodológica para a condução de projetos, ela opera de forma descentralizada e colaborativa, estabelecendo parcerias multissetoriais com a academia, a sociedade civil e órgãos reguladores. Atualmente, a organização conta com um quadro flexível de aproximadamente 27 colaboradores globais e distribuídos que atuam em seus projetos open source e enfrenta um mercado emergente, possuindo como principais concorrentes iniciativas como a GainForest. A sua sustentabilidade financeira é mantida por meio de um modelo de captação de recursos via subsídios do ecossistema Ethereum, prêmios em hackathons internacionais e parcerias estratégicas para inovação.

Para viabilizar a validação prática de suas ferramentas on-chain em contextos ecológicos reais, a organização atua em cooperação com um BioMuseu responsável pela operação diária e pela conservação de anfíbios. Essa articulação interdisciplinar entre o laboratório de desenvolvimento Web3 e os centros de pesquisa ecológica em campo evidenciou as vulnerabilidades e os gargalos estruturais dos fluxos informacionais analógicos até então adotados.

A organização enfrentava dores operacionais decorrentes da ausência de infraestrutura digital para o monitoramento dos axolotes. O controle manual dos dados biológicos e ambientais gerava inconsistências nos registros por erros humanos, comprometendo a confiabilidade do histórico dos animais. A fragmentação das informações entre pesquisadores, instituições e autoridades reguladoras dificultava a validação cruzada dos resultados. Essa baixa rastreabilidade prejudicava a captação de capital filantrópico, pois financiadores exigem transparência e evidências verificáveis de resultados para justificar aportes. Diante disso, a

organização identificou na tecnologia blockchain uma oportunidade de substituir o controle manual por uma infraestrutura digital descentralizada.

4.2 Caracterização do projeto analisado

O AxoloDAO é um projeto de desenvolvimento de sistemas desenvolvido por um grupo de cinco alunos de uma Faculdade de Tecnologia e Liderança em São Paulo em parceria com uma startup Web3, no contexto do módulo de Sistemas Descentralizados utilizando Blockchain. O projeto foi desenvolvido de fevereiro a abril de 2026, com o cronograma planejado para ter uma duração de 10 semanas, divididas em cinco Sprints de duas semanas cada, alinhado à metodologia ágil para entregas rápidas. A autoria do relato é atribuída à equipe discente responsável pelo desenvolvimento, cabendo à organização parceira a interlocução técnica e a aprovação das entregas. O tema central do projeto é a rastreabilidade e a auditoria científica de espécimes em conservação ex situ. O financiamento do desenvolvimento apoiou-se em subsídios do ecossistema Ethereum e em aporte em espécie da instituição parceira.

Os profissionais da organização parceira participaram ativamente do acompanhamento do projeto por meio de Sprint Reviews quinzenais, realizadas em conjunto com os orientadores e docentes da instituição. Nessas reuniões, eram avaliados os avanços no desenvolvimento do sistema e as documentações produzidas ao longo de cada ciclo. Essa interação contínua com os stakeholders permitiu que a plataforma se mantivesse alinhada às expectativas e necessidades reais da organização, viabilizando a validação iterativa de decisões e a incorporação de sugestões nas Sprints subsequentes. A proximidade com os stakeholders manteve-se ao longo de todo o ciclo de vida do projeto e sustentou a validação iterativa das decisões.

Iniciando-se pela fase de descoberta e levantamento de requisitos, foram realizados Kick-off e sessões de alinhamento com os profissionais da organização parceira, resultando na elaboração de personas, user stories e critérios de aceitação que orientaram todas as decisões subsequentes de design e arquitetura. Em paralelo, foi conduzida uma análise estratégica do contexto organizacional, incluindo o Canvas de Proposta de Valor, a Matriz de Risco e o estudo de diferenciação de mercado frente a soluções concorrentes.

Na sequência, foram definidos os requisitos de segurança da informação como autenticidade, integridade, disponibilidade e irretratabilidade, e iniciada a modelagem da arquitetura do sistema. A camada descentralizada foi implementada por meio de seis smart contracts em Solidity, organizados em camadas de registro imutável, dados mutáveis e governança de acesso. As medições ambientais foram ancoradas na blockchain por meio de estruturas de Merkle Tree, permitindo que os dados originais permanecessem off-chain com sua integridade verificável on-chain. O frontend foi desenvolvido em React, com integração a carteiras digitais via MetaMask e atualização em tempo real por WebSockets.

Ao longo da execução, os principais desafios envolveram a natureza híbrida do sistema off-chain e on-chain, a complexidade da integração entre o banco de dados relacional e a infraestrutura blockchain, e a definição de um modelo de governança descentralizada adequado às necessidades científicas da organização parceira.

4.3 Tipo de intervenção e mecanismos adotados

4.3.1 Anteprojeto

A intervenção realizada caracterizou-se como consultoria, com desenvolvimento de um projeto de intervenção, estruturada para substituir um modelo de gestão de dados

analógico por uma infraestrutura digital descentralizada. O trabalho concentrou-se nas fases de imersão, diagnóstico e desenho da solução, com o objetivo de tratar a fragmentação, as assimetrias e a falta de auditabilidade dos dados biológicos e ambientais observadas no monitoramento dos axolotes.

A primeira etapa consistiu no mapeamento do fluxo de trabalho e do framework operacional manual anterior à intervenção, conduzido em conjunto com os biólogos da organização parceira e do BioMuseo. Constatou-se que o monitoramento dos 10 parâmetros físico-químicos ambientais críticos, compreendendo temperatura da água, pH, oxigênio dissolvido, condutividade, turbidez, fosfatos, dióxido de nitrogênio, nitrato, amoníaco e dureza, ocorria de forma estritamente manual e esporádica, utilizando kits comerciais baseados em reagentes químicos com baixa frequência de amostragem. Os registros gerados a partir dessas medições esporádicas eram documentados sem qualquer padronização estrutural, sendo consolidados de maneira isolada em bitácoras físicas escritas à mão e planilhas digitais fragmentadas no Microsoft Excel ou Google Sheets. Esse modelo operacional analógico gerava silos de informação, dada a ausência de vínculo lógico ou automático entre o identificador do exemplar, o contexto do tanque e o carimbo de data/hora do responsável técnico pela captura.

Esse cenário gerava dores operacionais que limitavam a continuidade do projeto de conservação biológica. Sob o aspecto científico, a baixa frequência e a inconsistência dos registros inviabilizavam análises longitudinais e a correlação multivariável de dados, o que retardava a detecção de anomalias na água e as ações preventivas diante de episódios de mortalidade em espécies criticamente ameaçadas. Além disso, os protocolos vigentes exigiam a manipulação constante e invasiva dos anfíbios para avaliações morfológicas e anotações em fichas de papel, o que elevava os índices de estresse e afetava o bem-estar animal. Por fim, a ausência de uma infraestrutura pública de dados imutável, transparente e publicamente verificável criava assimetrias informacionais perante órgãos reguladores e limitava a atração de capital filantrópico internacional, uma vez que doadores e fundos de incentivo baseados em impacto requerem evidências técnicas e provas de resultados auditáveis para a liberação de aportes financeiros.

4.3.2 Cenário Atual

Após a implantação do AxoloDAO, o processo de monitoramento e registro de dados dos axolotes passou a ser conduzido de forma digitalizada, descentralizada e rastreável, por meio de uma arquitetura full-stack composta por frontend em React, backend com APIs REST e WebSockets, banco de dados relacional em PostgreSQL e seis smart contracts em Solidity implantados na rede de testes Sepolia.

O acesso ao sistema é realizado por meio de autenticação com carteira digital via MetaMask, que funciona como identidade digital de cada usuário. O sistema opera com perfis distintos de acesso (administrador, biólogo, auditor e visitante), controlados pelo contrato GestorCarteiras, que implementa um mecanismo de Role-Based Access Control (RBAC) (Ferraiolo et al., 2001). Cada perfil possui permissões específicas: o administrador gerencia os acessos e designa funções; o biólogo registra medições ambientais e biométricas; o auditor valida os dados submetidos; e o visitante consulta os registros de forma somente leitura.

O registro de um novo espécime gera sua tokenização no padrão ERC-721 (Entriken et al., 2018) por meio do contrato RegistrarAxolote, criando uma identidade digital única e imutável na blockchain, o tokenId, que se torna a âncora permanente de todo o histórico do animal. De forma análoga, cada aquário é registrado pelo contrato RegistrarAquario, também gerando um NFT associado ao ambiente monitorado. Essa decisão foi tomada em contraposição ao uso de simples identificadores incrementais no banco de dados relacional,

solução que, embora funcional para consultas internas, não oferece garantias de unicidade verificável publicamente nem rastreabilidade auditável por terceiros. O padrão ERC-721 garante que cada espécime possua um tokenId único, imutável e registrado na blockchain, tornando sua identidade verificável por qualquer parte interessada sem depender da confiança em um servidor centralizado. Além disso, a adoção desse padrão confere interoperabilidade com o ecossistema Web3, abrindo possibilidades futuras de integração com outras plataformas de conservação, mecanismos de financiamento baseado em impacto e sistemas de auditoria descentralizados. Dessa forma, o tokenId gerado no momento do registro torna-se a âncora imutável de todo o histórico do animal, conectando de forma permanente os dados off-chain ao registro on-chain correspondente.

A arquitetura do sistema foi concebida de forma híbrida, combinando componentes off-chain e on-chain de maneira complementar. Essa decisão se justifica pela natureza dos dados científicos envolvidos: armazenar integralmente na blockchain cada medição ambiental coletada implicaria custos operacionais de gás elevados e limitações de escalabilidade, inviabilizando o uso contínuo do sistema em contexto de pesquisa. Por outro lado, manter os dados exclusivamente off-chain comprometeria a imutabilidade, a rastreabilidade e a auditabilidade exigidas para fins científicos e institucionais. A solução adotada equilibra essas restrições ao preservar os dados completos no banco de dados relacional, garantindo consulta eficiente, flexibilidade e baixo custo operacional, enquanto ancora on-chain apenas as provas criptográficas de integridade, por meio de estruturas de Merkle Tree.

As medições ambientais dos aquários, incluindo temperatura, pH, compostos nitrogenados, amônia e saturação de oxigênio, são inseridas pelos biólogos por meio de formulários validados na interface. Após o preenchimento, o frontend encaminha os dados ao backend, que organiza as informações e constrói uma estrutura de Merkle Tree, gerando uma raiz criptográfica, merkleRoot, que representa de forma resumida e verificável todo o conjunto de medições. Apenas essa raiz é ancorada on-chain pelo contrato DadosAquario, mantendo os dados originais off-chain com integridade verificável na blockchain, o que reduz os custos operacionais de armazenamento em rede.

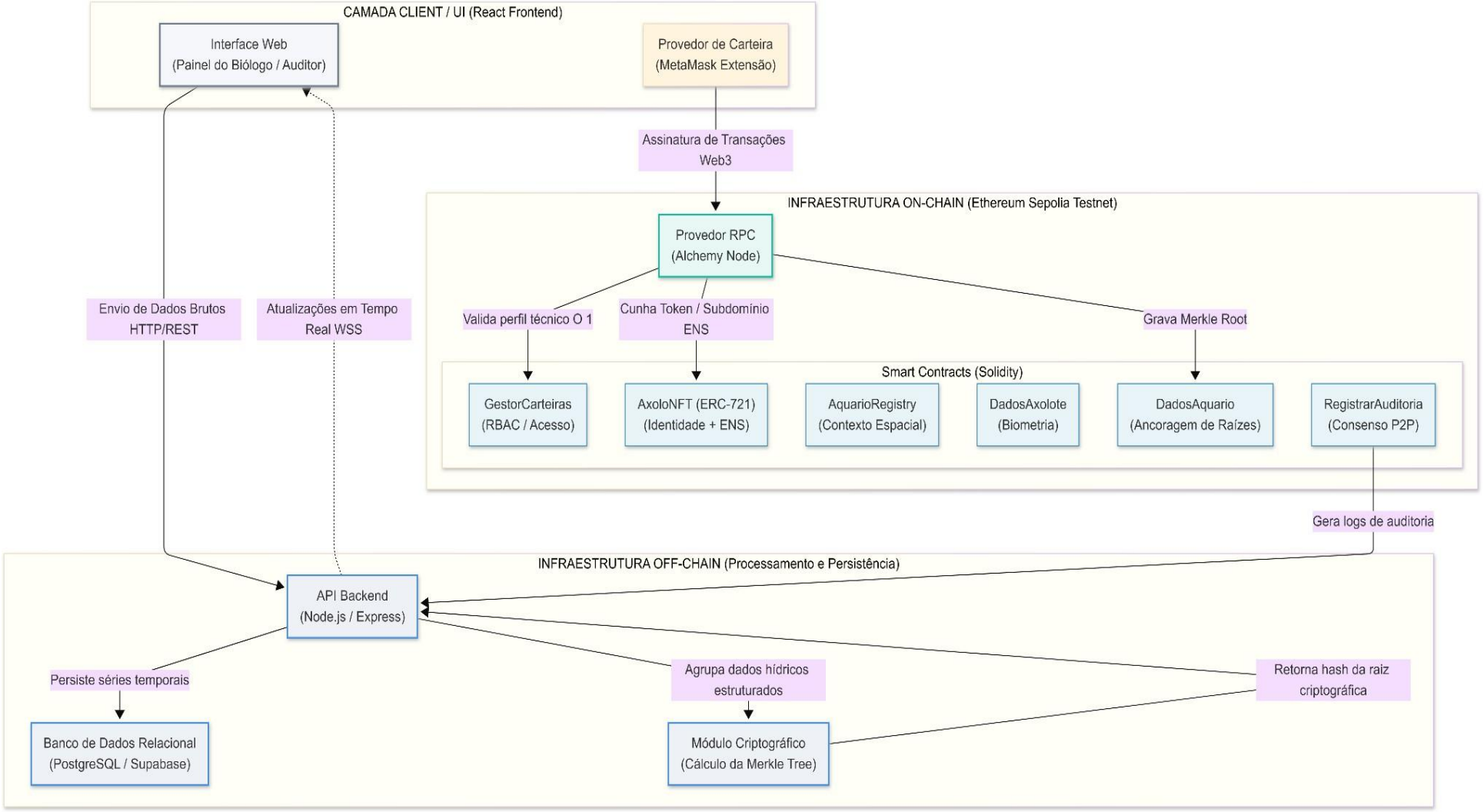
Antes de serem consolidados de forma imutável, os registros passam por um fluxo de auditoria: o auditor revisa os dados submetidos por meio de uma tela exclusiva da interface e emite sua decisão de aprovação ou rejeição por meio de assinatura digital. O contrato RegistrarAuditoria registra o resultado do consenso on-chain, garantindo que apenas informações validadas por especialistas certificados sejam definitivamente persistidas. Em caso de rejeição, o sistema notifica o biólogo responsável com uma justificativa registrada.

A interface web apresenta, para biólogos e gestores, um dashboard central com indicadores operacionais em tempo real, dashboards de monitoramento por aquário com histórico gráfico de parâmetros ambientais, fichas detalhadas por espécime com dados biométricos e atestações verificáveis on-chain, além de alertas automáticos disparados quando parâmetros ambientais ultrapassam os limites ideais configurados. As atualizações da interface são sincronizadas em tempo real via WebSockets, refletindo imediatamente as confirmações de transações na rede Ethereum.

O sistema foi validado por meio de mais de 30 casos de teste unitários com 100% de aprovação, utilizando o framework Hardhat com Ethers.js em TypeScript, cobrindo cenários de registro de aquários e axolotes, controle de permissões, auditoria por consenso e integridade criptográfica dos dados, encerrando-se com o deploy dos contratos na rede Sepolia e a produção de um vídeo de demonstração funcional do fluxo completo da aplicação. A Figura 1 sintetiza a arquitetura híbrida descrita.

Figura 1

Arquitetura híbrida do sistema AxoloDAO



Nota. Elaborada pelos autores (2026).

4.4 Resultados obtidos e análise

A intervenção tecnológica resultou na entrega de um protótipo funcional full-stack, implantado na rede de testes Sepolia do ecossistema Ethereum. A solução implementada permitiu a tokenização inicial de 13 exemplares de axolotes através do padrão ERC-721 (NFTs), garantindo uma identidade digital única e imutável para cada espécime. O sistema consolidou o monitoramento de 10 parâmetros ambientais críticos, utilizando estruturas de *Merkle Tree* para ancorar a integridade dessas medições na blockchain de forma eficiente, reduzindo os custos de transação sem comprometer a verificabilidade científica. Adicionalmente, o uso do *Ethereum Attestation Service* (EAS) viabilizou um fluxo de auditoria por consenso, permitindo que especialistas certificados validem registros e diagnósticos de forma auditável e pública.

Sob a perspectiva financeira, e em caráter projetado, o modelo de negócios do MVP estima receita direta de US$ 6.750 em um período de 12 meses, composta por bolsas de pesquisa, doações e patrocínios corporativos, e custos operacionais em caixa de US$ 5.285, referentes a despesas com hospedagem, taxas *on-chain* e manutenção de domínios. Considera-se ainda o aporte em espécie proveniente do BioMuseo, com investimento total no ecossistema estimado em US$ 20.971.

A solução prescreve um modelo replicável para outras iniciativas de conservação que busquem atrair capital filantrópico por meio de evidências de impacto verificáveis. Os resultados respondem às dores identificadas na análise inicial da organização. A fragmentação e a inconsistência dos registros foram tratadas pela adoção da arquitetura híbrida com integridade verificável on-chain, com restabelecimento da confiabilidade e da continuidade dos dados. O mecanismo de auditoria por consenso on-chain, ao tornar os registros publicamente verificáveis, tende a fortalecer a credibilidade institucional dos dados e a facilitar a colaboração entre pesquisadores, instituições e autoridades reguladoras. A rastreabilidade on-chain dos espécimes monitorados constitui elemento previsto de demonstração de impacto perante financiadores. O confronto com o referencial teórico confirma que a aplicação de RBAC (Ferraiolo et al., 2001) e do registro imutável em blockchain atende a requisitos de proveniência e integridade associados à gestão de dados científicos (Eskerod & Larsen, 2018). Cabe registrar que os resultados relatados decorrem de validação em rede de testes e de inserção manual de dados, condições conjunturais que delimitam a generalização das medidas apresentadas.

5 Conclusões, considerações finais e contribuições

Os resultados obtidos com o desenvolvimento e a implantação do protótipo AxoloDAO indicam que os objetivos do projeto foram atendidos. A plataforma proveu um registro imutável e descentralizado de dados biológicos e ambientais, com a tokenização via padrão ERC-721 para as identidades dos espécimes e estruturas de Merkle Tree para a integridade dos dados com eficiência operacional. A arquitetura híbrida e o modelo financeiro projetado compõem uma ferramenta de coordenação interinstitucional e de transparência. Esses resultados dialogam com o referencial adotado: a imutabilidade descrita por Swan (2015) e os requisitos de integridade e proveniência associados à gestão de dados científicos (Eskerod & Larsen, 2018) sustentam a arquitetura implementada, enquanto os mecanismos de governança e auditoria on-chain correspondem às abordagens sistematizadas por Liu et al. (2023).

Para organizações e entidades de conservação que enfrentam cenários semelhantes de fragmentação de dados e dependência de sistemas de registro centralizados, propõe-se a adoção de infraestruturas públicas digitais e modelos de governança *on-chain*. A

transparência e a auditabilidade próprias da blockchain sustentam novas formas de captação de recursos, como o financiamento baseado em impacto, que exige a verificação pública e imutável de metas atingidas para a liberação de aportes filantrópicos.

O trabalho apresenta limitações: a validação ocorreu em ambiente de testes (rede Sepolia), sem integração com sensores IoT para a coleta automatizada de dados, e as estimativas financeiras têm caráter projetado, sem realização em produção.

Para trabalhos técnicos futuros e novos relatos de produção, sugere-se a expansão do sistema para a integração direta com *dataloggers* e dispositivos de hardware, eliminando a intermediação humana na inserção de parâmetros ambientais. Recomenda-se, ainda, a investigação de modelos econômicos que incorporem mecanismos de *staking* de dados para incentivar a validação científica por pares e a aplicação de algoritmos de inteligência artificial sobre o histórico imutável construído para a realização de análises preditivas de saúde e bem-estar animal.

Referências

Aaltonen, K., Derakhshan, R., Di Maddaloni, F., & Turner, R. (2024). Stakeholder engagement: Theoretical and methodological directions for project scholarship. *International Journal of Project Management, 42*(7), 102649. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2024.102649

Akhter, F., Siddiquei, H. R., Alahi, M. E. E., Jayasundera, K. P., & Mukhopadhyay, S. C. (2022). An IoT-enabled portable water quality monitoring system with MWCNT/PDMS multifunctional sensor for agricultural applications. *IEEE Internet of Things Journal, 9*(16), 14307–14316. https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3069894

Bernards, N., Campbell-Verduyn, M., & Rodima-Taylor, D. (2024). The veil of transparency: Blockchain and sustainability governance in global supply chains. *Environment and Planning C: Politics and Space, 42*(5), 742–760. https://doi.org/10.1177/23996544221142763

Chambefort, C., & Chaudey, M. (2024). Blockchain, tokens, smart contracts, and "decentralized autonomous organization": Expanding and renewing the mechanisms of governance? *European Management Review, 21*(3), 511–515. https://doi.org/10.1111/emre.12677

Dasaklis, T. K., Voutsinas, T. G., Tsoulfas, G. T., & Casino, F. (2022). A systematic literature review of blockchain-enabled supply chain traceability implementations. *Sustainability, 14*(4), 2439. https://doi.org/10.3390/su14042439

Demetillo, A. T., Japitana, M. V., & Taboada, E. B. (2019). A system for monitoring water quality in a large aquatic area using wireless sensor network technology. *Sustainable Environment Research, 29*(1), Article 12. https://doi.org/10.1186/s42834-019-0009-4

Drouin, N., Müller, R., & Sankaran, S. (Eds.). (2017). *Cambridge handbook of organizational project management*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781316662243

Entriken, W., Shirley, D., Evans, J., & Sachs, N. (2018). *EIP-721: Non-fungible token standard*. Ethereum Improvement Proposals. https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-721

Eskerod, P., & Larsen, T. (2018). Advancing project stakeholder analysis by the concept 'shadows of the context'. *International Journal of Project Management, 36*(1), 161–169. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2017.05.003

Ferraiolo, D. F., Sandhu, R., Gavrila, S., Kuhn, D. R., & Chandramouli, R. (2001). Proposed NIST standard for role-based access control. *ACM Transactions on Information and System Security, 4*(3), 224–274. https://doi.org/10.1145/501978.501980

Howson, P. (2020). Building trust and equity in marine conservation and fisheries supply chain management with blockchain. *Marine Policy, 115*, 103873. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103873

Keskin, B. B., Griffin, E. C., Prell, J. O., Dilkina, B., Ferber, A., MacDonald, J., Hilend, R., Griffis, S., & Gore, M. L. (2023). Quantitative investigation of wildlife trafficking supply chains: A review. *Omega, 115*, 102780. https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102780

Kleinaki, A.-S., Mytis-Gkometh, P., Drosatos, G., Efraimidis, P. S., & Kaldoudi, E. (2018). A blockchain-based notarization service for biomedical knowledge retrieval. *Computational and Structural Biotechnology Journal, 16*, 288–297. https://doi.org/10.1016/j.csbj.2018.08.002

Lewis, R. J., Marstein, K.-E., & Grytnes, J.-A. (2023). Incentivising open ecological data using blockchain technology. *Scientific Data, 10*, 605. https://doi.org/10.1038/s41597-023-02496-2

Li, X., Huang, Y., Liu, Y., Yi, H., Li, L., Wu, Y., Zhang, X., Yang, X., Lin, Y., Lu, D., & Jiang, G. (2025). Enhancing data integrity in data-driven environmental science research through blockchain technology. *Environmental Science & Technology, 59*(35), 18696–18705. https://doi.org/10.1021/acs.est.5c03461

Liu, Y., Lu, Q., Zhu, L., Paik, H.-Y., & Staples, M. (2023). A systematic literature review on blockchain governance. *Journal of Systems and Software, 197*, 111576. https://doi.org/10.1016/j.jss.2022.111576

Marshall, I. R., Brauer, C. J., Wedderburn, S. D., Whiterod, N. S., Hammer, M. P., Barnes, T. C., Attard, C. R. M., Möller, L. M., & Beheregaray, L. B. (2022). Longitudinal monitoring of neutral and adaptive genomic diversity in a reintroduction. *Conservation Biology, 36*(4), e13889. https://doi.org/10.1111/cobi.13889

Marstein, K.-E., Grytnes, J.-A., & Lewis, R. J. (2025). ECKOchain: A FAIR blockchain-based database for long-term ecological data. *Methods in Ecology and Evolution, 16*(6), 1020–1027. https://doi.org/10.1111/2041-210X.14280

Monaghan, J. R., Stier, A. C., Michonneau, F., Smith, M. D., Pasch, B., Maden, M., & Seifert, A. W. (2014). Experimentally induced metamorphosis in axolotls reduces regenerative rate and fidelity. *Regeneration, 1*(1), 2–14. https://doi.org/10.1002/reg2.8

Ramos, A. G., Mena, H., Schneider, D., & Zambrano, L. (2025). Movement ecology of captive-bred axolotls in restored and artificial wetlands: Conservation insights for amphibian reintroductions and translocations. *PLOS ONE, 20*(4), e0314257. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314257

Razi, Q., Devrani, A., Abhyankar, H., Chalapathi, G. S. S., Hassija, V., & Guizani, M. (2024). Non-fungible tokens (NFTs): Survey of current applications, evolution, and future directions. *IEEE Open Journal of the Communications Society, 5*, 2765–2791. https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2023.3343926

Rikken, O., Janssen, M., & Kwee, Z. (2023). Governance impacts of blockchain-based decentralized autonomous organizations: An empirical analysis. *Policy Design and Practice, 6*(4), 465–487. https://doi.org/10.1080/25741292.2023.2270220

Santana, C., & Albareda, L. (2022). Blockchain and the emergence of decentralized autonomous organizations (DAOs): An integrative model and research agenda. *Technological Forecasting and Social Change, 182*, 121806. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121806

Secretariat of the Convention on Biological Diversity. (2011). *Nagoya Protocol on access to genetic resources and the fair and equitable sharing of benefits arising from their utilization to the Convention on Biological Diversity*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity. https://www.cbd.int/abs/doc/protocol/nagoya-protocol-en.pdf

Silla, A. J., & Byrne, P. G. (2019). The role of reproductive technologies in amphibian conservation breeding programs. *Annual Review of Animal Biosciences, 7*(1), 499–519. https://doi.org/10.1146/annurev-animal-020518-115056

Swan, M. (2015). *Blockchain: Blueprint for a new economy*. O'Reilly Media.

Wang, G., Chen, C., Jiang, Z., Li, G., Wu, C., & Li, S. (2024). Efficient use of biological data in the Web 3.0 era by applying nonfungible token technology. *Journal of Medical Internet Research, 26*, e46160. https://doi.org/10.2196/46160

Wilson, K. B., Karg, A., & Ghaderi, H. (2022). Prospecting non-fungible tokens in the digital economy: Stakeholders and ecosystem, risk and opportunity. *Business Horizons, 65*(5), 657–670. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2021.10.007