

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

PLATAFORMA HIDRA - FINANCIAMENTO REGENERATIVO PARA SERVIÇOS AMBIENTAIS HÍDRICOS NA ERA DIGITAL

Ramon Porto da Mota Junior¹; Anderson Amendoeira Namen²; Gabrielle Ferreira de Oliveira³; Hugo Portocarrero⁴; Rafael Pinho Senra de Moraes⁵

Abstract: Water management in Brazil faces operational challenges that hinder the effectiveness and trust in instruments of the National Water Resources Policy, such as water use charges and Payments for Hydrological Environmental Services (PSAH). The HIDRA proposal — Digital Integration Hub for Environmental Regeneration — aims to reverse this scenario through a collaborative, transparent, and automated digital platform. By integrating Distributed Ledger Technologies (DLTs), smart contracts in DREX, and participatory dashboards, HIDRA enables multi-actor engagement, automates payments based on restoration targets, and ensures traceability of contracts and field evidence. The methodology includes document analysis, case studies in micro-watersheds with a regional river basin committee (CBH-R2R) and its supporting water agency (AGEVAP), and controlled environment testing through a PoC in LIFT Learning. The theoretical lens of sociocybernetics and systems theory guides the design of operational routines, seeking to mitigate informational “noise” and foster consensus. The proposal is grounded in integral ecology, decolonial thinking, and the economics of functionality, promoting socio-environmental justice and local autonomy. Aligned with SDGs 6, 9, 13, 15, and 17, HIDRA positions itself as a catalyst for Regenerative Finance, promoting a virtuous cycle of reinvestment in positive, measurable, and auditable environmental outcomes.

Resumo: O Pagamento por Serviços Ambientais Hídricos (PSAH), financiado por recursos da cobrança pelo uso da água — instrumento da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) —, tem se mostrado um mecanismo relevante de incentivo à conservação. No entanto, sua aplicação enfrenta entraves como a complexidade na gestão multissetorial, a falta de transparência nos fluxos financeiros e o baixo engajamento de partes interessadas. A HIDRA — Hub de Integração Digital para a Regeneração Ambiental — busca superar essas barreiras por meio de uma plataforma digital colaborativa e automatizada. Combinando tecnologias de registro distribuído (DLTs), contratos inteligentes vinculados ao DREX e painéis participativos, a plataforma viabiliza o engajamento de diversos atores, a automatização de pagamentos conforme metas ambientais e a rastreabilidade de dados e evidências. A tokenização dos ativos e resultados permite criar instrumentos digitais auditáveis, vinculados a métricas como extensão de áreas restauradas ou volume de água protegido. A metodologia inclui análise documental, estudo de caso junto a comitê de bacia hidrográfica (CBH-R2R) e teste de Prova de Conceito (PoC) em ambiente controlado. O desenho teórico baseia-se na sociocibernética e na teoria dos sistemas, buscando mitigar ruídos informacionais e ampliar o consenso. Sustentada por princípios da ecologia integral, pensamento decolonial e economia da funcionalidade e da cooperação, a HIDRA busca promover justiça socioambiental e autonomia local. Alinhada aos ODS 6, 9, 13, 15 e 17, posiciona-se como catalisadora de Finanças Regenerativas e de um ciclo virtuoso de reinvestimento em resultados ambientais mensuráveis.

¹ Mestrando UERJ - ProfÁgua; ramon.junior@profagua.uerj.br

² Professor UERJ - IPRJ (Departamento de Modelagem Computacional) e Professor da Universidade Veiga de Almeida; aanamen@iprj.uerj.br

³ Graduada de Engenharia da Computação da UERJ - IPRJ (Departamento de Modelagem Computacional); oliveiragabrielle662@gmail.com

⁴ Professor UERJ - ProfÁgua (Faculdade de Geologia); hportocarrero@gmail.com

⁵ Professor UERJ (Departamento de Análise Econômica); rpinhodemoraes@gmail.com

Palavras-Chave – Pagamento por Serviços Ambientais, Finanças Regenerativas, *Blockchain*

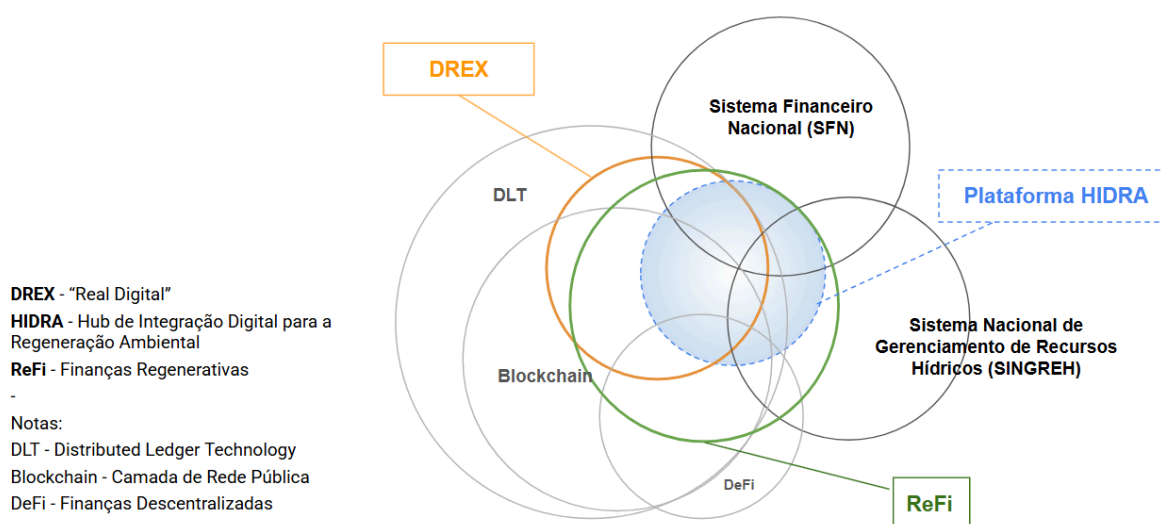
INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos no Brasil, orientada pela Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), estabelece instrumentos para o uso múltiplo e sustentável da água, como a cobrança pelo uso. Nesse contexto, os Pagamentos por Serviços Ambientais Hídricos (PSAH) emergem como mecanismos econômicos relevantes para a conservação. Apesar do PSAH ser uma ferramenta promissora para a recuperação de ecossistemas hídricos, sua implementação enfrenta desafios de operacionalização, transparência, engajamento e financiamento sustentável (Santos, 2020). A complexidade das interações ecológicas e sociais nas bacias hidrográficas exige abordagens que vão além da compensação financeira, buscando resultados regenerativos. Essa busca implica um deslocamento da gestão da escassez para a promoção da saúde ecossistêmica e do valor intrínseco dos ativos hídricos. Assim, esta pesquisa propõe a plataforma digital HIDRA - *Hub* de Integração Digital para a Regeneração Ambiental, um modelo inovador para aprimorar o engajamento dos atores e prover financiamento regenerativo para Serviços Ambientais Hídricos no Brasil (SAH). Este trabalho, baseado em análise documental e revisão da literatura, apresenta a conceituação da plataforma, seus alicerces (teórico, tecnológico, filosófico, ético e socioeconômico) e discute sua potencial contribuição para a sustentabilidade hídrica nacional, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS (ONU, 2015), como o ODS 6 - Água Limpa e Saneamento, ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura, ODS 13 - Ação Climática, ODS 15 - Vida Terrestre e ODS 17 - Parcerias e Meios de Implementação.

Teoricamente, a investigação se alinha à Teoria Geral dos Sistemas, compreendendo a bacia hidrográfica e os arranjos de PSAH como sistemas complexos. A sociocibernética, na abordagem de Umpleby e Dent (1999), oferece uma lente para analisar os fluxos de informação e comunicação, centrais para o engajamento em PSAH. A comunicação para o consenso representa um desafio na coordenação de múltiplos atores, algo que a plataforma HIDRA busca endereçar, facilitando a transmissão de informações e mitigando perdas de significado. Nesse contexto, a confiança é central. A coordenação de múltiplos atores com interesses diversos, como em arranjos de PSAH, exige uma base sólida de confiança, processos compartilhados e integridade dos dados. Fragilidades na gestão da informação minam essa confiança, gerando incertezas e custos de transação que inviabilizam programas (Andrade e Andrade de Abreu, 2023). É aqui que se destaca o diferencial das tecnologias de registro distribuído (DLTs), como a *blockchain*. Elas são, em sua essência, infraestruturas para a construção de confiança digital, conforme conclusões de Berg et al. (2019) e Paiva et al. (2019). Ao garantir que dados – financeiros, contratuais ou ambientais – sejam registrados de forma imutável, transparente e sem um intermediário centralizador, a *blockchain* cria um ambiente de veracidade e rastreabilidade intrínsecas. Isso reduz drasticamente assimetrias de informação e riscos de manipulação, fornecendo uma base verificável para as interações. A base tecnológica da proposta integra tecnologias emergentes. A *blockchain* é explorada por seu potencial em eliminar intermediários, reduzir custos de transação e automatizar pagamentos via contratos inteligentes condicionados a metas (Oberhauser, 2019; Granados e Schlüter, 2023), detalhando ações de conservação, indicadores de verificação e condições de pagamento. Essa característica promove rastreabilidade, segurança e transparência nos fluxos financeiros, essencial para a confiança nos arranjos de PSAH. O DREX, moeda digital oficial brasileira (em fase piloto), surge como um componente potencial para a infraestrutura financeira, permitindo transações programáveis e liquidação atômica via contratos inteligentes. O DREX não é apenas uma nova forma de dinheiro, mas a espinha dorsal da nova infraestrutura financeira nacional, construída sobre princípios de programabilidade e eficiência das DLTs (BCB, 2023). Ao viabilizar transações seguras, rastreáveis e automatizáveis, o DREX pavimenta o caminho para serviços financeiros com

elevada confiança tecnológica, permitindo à HIDRA processar⁶ pagamentos com maior segurança, auditabilidade e menor custo. É neste contexto que a HIDRA encontra uma oportunidade singular para potencializar as Finanças Regenerativas (ReFi). Ancorando sua operação na confiança e eficiência da *blockchain* e integrando-se à infraestrutura do DREX, a HIDRA pode ir além de otimizar os mecanismos de PSAH. Ela pode se tornar um veículo para operacionalizar os princípios da ReFi, direcionando capital para gerar resultados ambientais positivos, mensuráveis e verificáveis (Schletz et al., 2023). Via contratos inteligentes, pagamentos (em DREX) podem ser condicionados à entrega de serviços de regeneração hídrica, com resultados monitorados e registrados de forma transparente. Isso aumenta a atratividade para investimentos de impacto e filantropia, criando um ciclo virtuoso onde o financiamento impulsiona a regeneração, e os resultados regenerativos, valorados e tokenizados, podem atrair novos aportes, fortalecendo a sustentabilidade das bacias hidrográficas. Abaixo, a Figura 1 representa, em âmbito conceitual, a Plataforma HIDRA como um *hub* digital de financiamento regenerativo, compreendendo intersecções entre os domínios do Sistema Financeiro Nacional (SFN), do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), DREX, DLT, DeFi, ReFi e *Blockchain*.

Figura 1 - Âmbito conceitual da Plataforma HIDRA sobre os ecossistemas tecnológico, financeiro e hídrico.



Em nível filosófico, ético e socioeconômico, a HIDRA ancora-se em correntes convergentes. A sociocibernética contribui com a compreensão da auto-organização e aprendizagem adaptativa em sistemas socioecológicos complexos (Manzoor, 2018). O pensamento decolonial inspira o questionamento de estruturas de poder e a centralização das comunidades locais nas decisões sobre seus territórios (Schulz, 2017). O movimento Solarpunk oferece uma visão de futuros sustentáveis, com tecnologias ecologicamente corretas, socialmente justas e descentralizadas (Reina-Rozo, 2021). A Ecologia Integral defende uma interconexão holística entre as dimensões ambiental, social, econômica e espiritual (Francisco, 2015). Finalmente, a Economia da Funcionalidade e da Cooperação (EFC) orienta para modelos baseados no valor de uso e colaboração territorial, em detrimento do consumo linear (Da Silva et al., 2020). Essas correntes, ao enfatizarem interdependência, justiça socioambiental e soluções sistêmicas, convergem e sustentam a concepção das Finanças Regenerativas - ReFi. Esta que emerge como o enquadramento financeiro e filosófico

⁶ Inicialmente, a plataforma HIDRA não processará pagamentos diretamente, dependendo de um intermediário financeiro regulado. O objetivo é que, após a plena operacionalização e integração com o ecossistema DREX, as transações sejam liquidadas utilizando o Real Tokenizado (a representação de varejo da moeda digital brasileira), sob a orquestração dos *smart contracts* da HIDRA. Estes direcionarão os recursos, mas a liquidação final do pagamento será processada dentro da infraestrutura DREX por participantes autorizados, até que mecanismos de integração direta para plataformas como a HIDRA estejam plenamente estabelecidos e regulamentados.

central do modelo HIDRA, o elo entre economia e ecologia com a função de direcionar capital para ativamente restaurar a saúde ecológica e social, em vez de apenas mitigar danos. E fomentando, assim, um ciclo virtuoso de investimento, resultados verificáveis e reinvestimento. Aplicada ao PSAH, a ReFi visa catalisar investimentos não como mera compensação, mas como um fluxo contínuo para a regeneração dos ecossistemas hídricos e o bem-estar das comunidades envolvidas.

METODOLOGIA

O desenvolvimento do modelo HIDRA estrutura-se em três frentes: Pesquisa, Prototipagem e Produção. A frente de Pesquisa inclui revisão integrativa de literatura, análise documental e estudo de casos de PSAH para gerar conhecimento que subsidie políticas públicas de regeneração ambiental. Organiza-se em quatro eixos: (i) marco legal-institucional do PSAH; (ii) potencial de tecnologias digitais como DLTs, DREX e Tokenização; (iii) modelos como Finanças Regenerativas (ReFi) e Economia da Funcionalidade e Cooperação (EFC); e (iv) governança hídrica, engajamento e abordagens sistêmicas. O estudo da legislação pertinente (PNRH, marco de criptoativos, diretrizes do DREX, etc.) é fundamental para a viabilidade jurídica. A frente de Prototipagem foca no desenvolvimento de uma plataforma funcional, materializada na Prova de Conceito (PoC) da HIDRA em *Hyperledger Besu*⁷, para integrar DREX e *blockchain* ao PSAH. A PoC explora módulos como Endereço Hidrográfico (Arantes, 2020), tokenização e um painel de governança (interface *web*). A validação e o refino do modelo ocorrerão via pesquisa-ação com o Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Dois Rios (CBH-R2R), com sede no município de Nova Friburgo - RJ. Essa fase contempla a co-construção do Produto Mínimo Viável (MVP) com produtores, membros do comitê e técnicos da AGEVAP⁸, focando na usabilidade. A testagem em ambiente controlado, como o LIFT *Learning*⁹, avaliará a funcionalidade tecnológica. Para medir a eficiência, será aplicada uma Análise de Custos de Transação - ACT adaptada de Andrade e Andrade de Abreu (2023), com base nos fundamentos da teoria (Williamson, 1979) para demonstrar como a automação, a transparência e a redução de intermediários das DLTs podem diminuir custos de transação no PSAH. Por fim, a frente de Produção visa elaborar um guia de implementação e materiais de disseminação (cartilhas, artigos, plataforma *web*) para facilitar a replicação e o escalonamento da solução. A triangulação de dados quantitativos (ACT), qualitativos (análise documental) e insights dos testes do protótipo será usada para uma compreensão integrada da viabilidade da HIDRA.

MARCOS E PRÓXIMOS PASSOS

Até meados de 2025, marcos significativos da pesquisa foram alcançados, incluindo: (i) o estudo e acompanhamento do Protocolo PRISMA¹⁰ - em execução na microbacia de Barracão dos Mendes, Nova Friburgo - RJ, implementado e financiado pelo Comitê de integração da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul (CEIVAP) e pelo CBH-R2R; (ii) a finalização da modelagem BPMN (*Business Process Model and Notation*) da PoC - metodologia que aplica uma notação gráfica para representar os processos envolvidos no protótipo; (iii) a formalização do acordo de parceria com o CBH-R2R; e (iv) a tramitação de um Acordo de Cooperação Técnica entre a Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e o Instituto Fenabac para participação no LIFT

⁷ O *Besu* é um dos projetos dentro do ecossistema *Hyperledger*, uma iniciativa de código aberto da Linux Foundation para promover o desenvolvimento de tecnologias *blockchain* públicas e privadas - e também o ecossistema de desenvolvimento do DREX.

⁸ A Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul - AGEVAP, é a agência delegatária do CBH Rio Dois Rios.

⁹ O LIFT *Learning* é o departamento de incentivo à aproximação entre a academia e a indústria financeira, uma iniciativa conjunta do Banco Central do Brasil e da Fenabac com o objetivo de fomentar a inovação no Sistema Financeiro Nacional.

¹⁰ O Protocolo PRISMA, parte do Programa Mananciais (CEIVAP), é um sistema de acompanhamento e análise de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA). Ele estabelece parâmetros e métricas para avaliar os resultados ambientais, sociais e econômicos, incentivando a participação da comunidade e a troca de informações para promover o incremento de serviços ambientais em microbacias das regiões hidrográficas afluentes do rio Paraíba do Sul.

Learning (com início previsto para o primeiro semestre de 2026), um ambiente propício para testagem e mentoria regulatória.

A trilha de desenvolvimento da pesquisa (*roadmap*) para 2025-2026 prevê, para o terceiro trimestre de 2025 (Q3-2025), o início da coleta de dados para a Análise de Custos de Transação (ACT) e reuniões com o CBH-R2R para refinamento da modelagem da PoC. No quarto trimestre (Q4-2025), espera-se a síntese preliminar desses dados e o design dos primeiros *smart contracts* para a PoC. O primeiro trimestre de 2026 (Q1-2026) será dedicado à implementação (*deploy*) da PoC no ambiente de testes (*sandbox*) do LIFT *Learning*, preparando para os testes de liquidação utilizando o DREX. Para o segundo trimestre (Q2-2026), projeta-se a análise comparativa dos custos de transação e a elaboração de um relatório com os resultados preliminares da PoC. Finalmente, o terceiro trimestre de 2026 (Q3-2026) será focado no refinamento de propostas regulatórias e na preparação de um guia de escalabilidade para a HIDRA.

ARTICULAÇÃO E VISÃO INSTITUCIONAL

A força e o diferencial da proposta HIDRA residem em sua sólida articulação institucional. A UERJ, através do Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, fornece a base acadêmica e a supervisão metodológica enquanto a parceria com sua Unidade de Desenvolvimento Tecnológico (UDT) é de vital importância para a frente de prototipagem. Nesse ecossistema, o CBH-R2R e a AGEVAP são parceiros estratégicos, oferecendo o arcabouço de governança e o contexto de aplicação real para a pesquisa. A Resolução CBH-R2R nº 066/2020 é um marco fundamental, pois institucionaliza a política de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) do comitê por meio do "Projeto Diagnóstico e Intervenção" (CBH-R2R, 2020). Este arranjo, no entanto, opera com uma limitação de recursos, uma vez que sua principal fonte de financiamento é a cobrança pelo uso da água. A plataforma HIDRA é concebida para superar essa barreira, alinhando-se à abordagem de "recurso-semente" que o próprio comitê adota. Ao utilizar tecnologias como *blockchain* e DREX para garantir transparência e rastreabilidade, a HIDRA visa potencializar o capital inicial do comitê, tornando seu programa de PSA atrativo para novas fontes de financiamento, como investidores de impacto e capital de finanças regenerativas (ReFi). Dessa forma, a proposta não apenas responde a uma demanda local, mas cria um mecanismo para escalar a regeneração, transformando um fluxo de recurso limitado em um ecossistema financeiro sustentável e diversificado.

Idealmente, a proposta busca construir uma articulação sadia que alcance também concessionárias e outros provedores de serviços de saneamento. Num cenário mais avançado de implementação da HIDRA, o consumidor final poderia, ao pagar sua fatura desses serviços, destinar voluntariamente recursos adicionais para os projetos do comitê. Num nível intermediário, isso poderia já ocorrer via integração com o PIX¹¹ na fase plena de implementação, a transação seria orquestrada pelo DREX. Utilizando *tokens* R2R para governança, o cidadão-investidor selecionaria os projetos de sua preferência, e os fundos seriam automaticamente destinados via contratos inteligentes, criando um ciclo de financiamento transparente e participativo. Essa arquitetura transforma o recurso-semente do comitê em um catalisador para um ecossistema financeiro diversificado, que vai do grande investidor ao consumidor final de água.

A parceria com o Instituto Fenasbac (LIFT *Learning*) visa garantir a viabilidade técnica, regulatória e de governança do projeto, fortalecendo seu potencial de implementação. Isso inclui o acesso ao ambiente de testes do DREX (*sandbox*), essencial para a evolução tecnológica da PoC.

¹¹ Pix é o sistema de pagamentos instantâneos brasileiro, criado pelo Banco Central, que permite transferências e pagamentos 24 horas por dia, 7 dias por semana.

Com essa rede colaborativa, o projeto se destaca de iniciativas estritamente conceituais e fortalece seu potencial de implementação e visibilidade.

Ademais, o sucesso do piloto pode inspirar a replicabilidade pelo Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP). Isso representa uma relevância estratégica, com potencial para levar o Programa Mananciais a um novo patamar de inovação e reafirmar o histórico de pioneirismo do comitê. A destinação de recursos da cobrança pelo uso da água pode nutrir esse ecossistema, considerando que os Planos de Bacia do CEIVAP e de seus comitês afluentes permitem o aporte financeiro na agenda de produção de conhecimento (CEIVAP, 2019).

ARQUITETURA E PROCESSOS

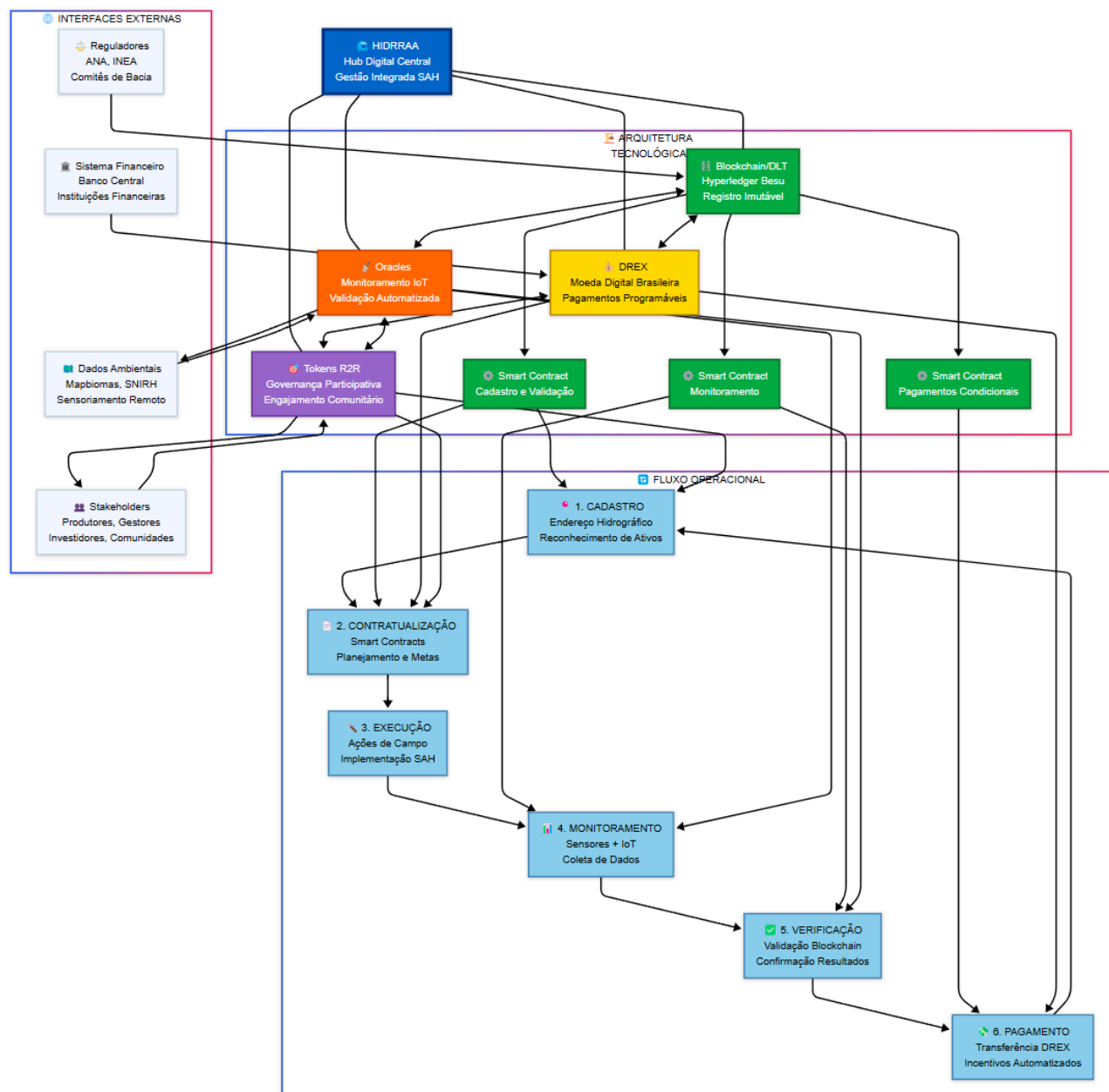
Operacionalmente, a plataforma HIDRA é concebida como um *hub* digital onde o ciclo do serviço ambiental hídrico é gerenciado de forma inovadora: inicia-se com o reconhecimento e cadastro de ativos ambientais hídricos através do Endereço Hidrográfico, seguido pelo planejamento e contratualização de ações via *smart contracts*. A execução das práticas de conservação é então submetida a um robusto sistema de monitoramento e verificação, utilizando serviços de interação com o mundo real (*oracles*) para validar dados de campo e sensoramento. Uma vez verificado o serviço, o processamento de pagamentos e incentivos aos provedores (no pagamento aos proprietários) ou aos fornecedores (no financiamento das intervenções) ocorre de forma eficiente e transparente via DREX. A gestão e governança participativa são fomentadas pelos *tokens* R2R, que empoderam os contribuintes. Este sistema incorpora modelos de engajamento baseados em cripto-incentivos, seguindo o conceito '*X-to-Earn*' (Wazinski, 2024) como um termo guarda-chuva para modelos no espaço ReFi que combinam incentivos financeiros com mudanças comportamentais ou ações específicas. Assim, a HIDRA propõe transformar o cidadão de mero usuário-pagador em investidor e guardião corresponsável. No processo de cadastro do contribuinte, por exemplo, poderia ser incorporada uma Calculadora de Pegada Hídrica (Arantes, 2020). O objetivo seria testar a percepção comum de que pagamos muito pouco pelo real valor da água. Essa calculadora não buscaria precisão absoluta, mas sim conscientizar sobre o impacto individual e coletivo, motivando doações voluntárias (arredondando valores no pagamento da conta de água, por exemplo) para a recuperação hídrica e fomentando uma cultura de responsabilidade compartilhada.

O Mínimo Produto Viável (MVP) v0.1 da plataforma HIDRA, em sua fase experimental na bacia do rio Dois Rios, delineia um fluxo operacional relativamente simples, focado na transparência e rastreabilidade via *blockchain* permissionada. Este processo inicia-se com o cadastro de todos os atores – incluindo o CBH-R2R, AGEVAP, fornecedores, produtores rurais e investidores. Posteriormente, embora o aporte financeiro à AGEVAP ocorra *off-chain*¹² por meios convencionais, seu evento é registrado *on-chain* na rede, estabelecendo uma trilha de auditoria digital e fomentando a confiança. Na sequência, os fornecedores cadastram os projetos na plataforma, que são então avaliados e aprovados pelo CBH-R2R, com a alocação de fundos sendo igualmente registrada *on-chain* para garantir transparência nas decisões. A execução das intervenções pelos fornecedores é acompanhada pelo envio de evidências, que são verificadas pela equipe técnica da AGEVAP – um processo de Monitoramento, Verificação e Reporte (MVR) cuja conclusão também é atestada *on-chain*. Finalmente, a autorização e a efetivação do pagamento ao fornecedor/executor, embora realizadas *off-chain* pela AGEVAP, têm seus eventos igualmente registrados de forma imutável na *blockchain*, consolidando uma cadeia de responsabilização e abrindo caminho para a integração futura com o DREX e outras inovações. A figura 2 traz a

¹² Os termos "*on-chain*" e "*off-chain*" definem onde as transações são registradas. "*On-chain*" refere-se a ações na *blockchain*, como registro de atores, alocação de fundos, evidências de execução e autorização de pagamentos, garantindo imutabilidade e transparência. "*Off-chain*" abrange ações fora da *blockchain*, como aporte financeiro à AGEVAP e pagamentos utilizando métodos tradicionais.

representação expandida da arquitetura da HIDRA, incluindo os componentes que podem ser integrados em expansões futuras:

Figura 2 - Arquitetura expandida da plataforma HIDRA e seus componentes potenciais para integrações futuras



PERSPECTIVAS FUTURAS

As perspectivas futuras para a HIDRA, subsequentes à validação do MVP, apontam para a sua implementação faseada e estratégica no CBH-R2R, com potencial para escalonamento e replicação. Este avanço vislumbra um horizonte onde, de forma análoga ao conceito de "Cidades Inteligentes" que floresce com a aplicação estratégica de tecnologias emergentes, será possível conceber e operacionalizar "Bacias Hidrográficas Inteligentes". Estas seriam ecossistemas onde a convergência de *Big Data* com Inteligência Artificial permitiria uma gestão hídrica otimizada, previsões mais acuradas, intervenções personalizadas e uma governança adaptativa em tempo real.

Neste contexto evolutivo, o módulo *Marketplace* da HIDRA e sua integração com plataformas geoespaciais – como o Mapbiomas para análise de uso e cobertura do solo e o próprio geoportal do CBH-R2R para dados locais, trariam avanços consideráveis. Essa sinergia tecnológica, além de reforçar o estabelecimento do Endereço Hidrográfico como um ponto focal para a gestão de ativos, também permitiria um acompanhamento temporal dinâmico e preciso das intervenções de conservação e regeneração, fornecendo dados verificáveis para os *oracles* e incremento de integridade para os *smart contracts*. O *marketplace* na HIDRA visaria a negociação aberta dos créditos por serviços ambientais hídricos reconhecidos pelo Comitê de Bacia, promovendo um ecossistema de valorização de co-benefícios na relação Água-Alimento-Energia sobre o território hidrográfico. Seria então um serviço para proporcionar a venda de produtos e serviços de alto valor agregado, como alimentos agroflorestais e consultoria técnica, incentivando práticas regenerativas com potencial de impacto positivo, por exemplo, na segurança alimentar do consumidor urbano e na receita do produtor no campo.

Um possível desdobramento paralelo ao desenvolvimento da HIDRA seria estudar a viabilidade institucional e jurídica de uma fintech vinculada à AGEVAP, para otimizar a gestão de recursos e oferta de produtos financeiros genuinamente regenerativos. Assumindo que o cenário de florescimento de soluções como a HIDRA abre espaço para serviços financeiros nativamente digitais, a AGEVAP como uma ‘*Fintech* das Águas’ poderia gerar receita ao oferecer serviços atualmente prestados por bancos tradicionais, a preços competitivos e com o benefício adicional de promover o retorno ambiental, já intrínseco à sua finalidade institucional. E dada a continuidade do cenário de rápidas mudanças tecnológicas e crescente urgência climática, a HIDRA deverá priorizar tecnologias negativas ou neutras em carbono. Embora a Prova de Conceito inicial utilize a já eficiente plataforma *Hyperledger Besu*, uma visão sustentável e regenerativa pode demandar a avaliação e migração para DLTs com menor pegada ecológica, como as baseadas em Grafos Acíclicos Direcionados (DAG), a exemplo da rede Hedera. Essa transição dependerá da maturidade, segurança, escalabilidade e adoção dessas tecnologias no ecossistema financeiro digital.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo HIDRA abarca, portanto, diversas dimensões essenciais. Primeiramente, adota uma compreensão sistêmica das intrincadas interações socioecológicas na bacia, embasada na Teoria Geral dos Sistemas e nos princípios da sociocibernética. Em segundo lugar, fundamenta-se em um alicerce ético e estético calcado na Ecologia Integral e no movimento Solarpunk, visando futuros hídricos sustentáveis, justos, prósperos e tecnologicamente avançados. Materialmente, integra tecnologias digitais como *blockchain* e DREX para otimizar os fluxos informacionais e financeiros - canalizando capital em prol de resultados regenerativos, na conexão entre Ecologia e Economia via ReFi. Por fim, a Economia da Funcionalidade e da Cooperação (EFC) orienta a criação de modelos baseados no valor de uso (da água) e na colaboração territorial (na bacia).

No entanto, a análise crítica e preliminar da viabilidade do modelo aponta para a necessidade de superar barreiras regulatórias, garantir a interoperabilidade entre as plataformas *blockchain* e a infraestrutura do DREX (DLT) e desenvolver capacidades institucionais e comunitárias para o uso das tecnologias. Dentre os principais desafios, destacam-se a consolidação dos marcos regulatórios para a tokenização de ativos ambientais e para a operação de plataformas baseadas em DREX para esta finalidade, a criação e validação de oráculos (*oracles*) confiáveis para o monitoramento preciso dos serviços ambientais, e a indispensável capacitação dos diversos participantes para o uso de novas tecnologias e a participação efetiva na governança digital. Neste sentido, o papel estratégico da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA é também fundamental, na orientação de gestores e técnicos para o desenvolvimento e utilização prática de tecnologias inovadoras, como

as de registro distribuído. Por outro lado, as oportunidades são significativas, incluindo o potencial de atração de capital diversificado via ReFi para projetos de impacto, a possibilidade de emissão de títulos verdes hidrológicos (*blue bonds*¹³) com lastro nos ativos e resultados gerados pela plataforma, e o grande potencial de replicar o modelo HIDRA em outras bacias hidrográficas. Essas questões demandam articulação institucional atenta ao ambiente regulatório e busca de fomento para a inovação.

O sucesso desta empreitada – uma pesquisa em andamento que avança no preenchimento das lacunas mapeadas – dependerá fundamentalmente da colaboração contínua entre múltiplos atores e de uma atuação proativa no campo regulatório. A complexidade dos desafios hídricos e ambientais, tal como a ‘Hidra de Lerna’ da mitologia grega, cujas múltiplas cabeças regeneravam-se, exige não apenas força de atuação, mas inteligência estratégica e, fundamentalmente, cooperação – simbolizada no mito pela parceria entre Hércules e seu sobrinho Iolaus. A HIDRA, ao propor um ecossistema digital integrador, busca ser esse catalisador de cooperação, unindo esforços para vencer os desafios da regeneração hídrica.

Em suma, este trabalho oferece um recorte inicial da proposta da plataforma HIDRA, enfatizando a integração de fundamentos teóricos robustos, com tecnologias de ponta como *blockchain* e DREX, e o paradigma financeiro da ReFi. Ao abordar as fragilidades dos modelos de PSAH existentes e propor soluções baseadas na transparência digital e na automatização de processos, a pesquisa contribui para o debate sobre inovação na gestão de recursos hídricos no Brasil. Espera-se que os resultados incluam não apenas a validação de um modelo conceitual, mas também a demonstração da então potencial redução de custos de transação, o aumento da confiança entre os atores e, conseqüentemente, a criação de um ecossistema de financiamento regenerativo para serviços ambientais hídricos. A HIDRA é apresentada não como uma panaceia tecnológica, mas como um instrumento potente para fomentar uma governança policêntrica e adaptativa, capaz de catalisar um futuro hídrico mais regenerativo, participativo e justo para todos, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Guilherme Paulo; ANDRADE DE ABREU, Júlio Cesar. Contribuição da Tecnologia Blockchain em Processos de Compras Públicas sob a Ótica dos Custos de Transação: Um Estudo de Caso. *GESTÃO. Org: Revista Eletrônica de Gestão Organizacional*, v. 21, n. 1, 2023.

ARANTES, Marcia Regina Lopez. Os desafios da aplicação da pegada hídrica em uma bacia hidrográfica urbana: contribuições para a gestão ambiental. 2024.

BCB - BANCO CENTRAL DO BRASIL. *Voto 31/2023–BCB, de 14 de fevereiro de 2023*. Brasília: BCB, 2023. Disponível em: https://www.bcb.gov.br/content/estabilidadefinanceira/real_digital_docs/voto_bcb_31_2023.pdf.

BERG, C.; DAVIDSON, S.; POTTS, J. (2019). “Blockchain technology as economic infrastructure: Revisiting the electronic markets hypothesis”. *Frontiers in Blockchain* 2, pp. 22.

BRASIL. (1997). Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. *Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Brasília: Diário Oficial da União. Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm.

¹³ Títulos de dívida voltados para o financiamento de iniciativas ligadas à água e aos oceanos, os *Blue Bonds* têm como propósito impulsionar a sustentabilidade e a proteção dos recursos hídricos e marinhos. Representam uma categoria específica de *Green Bonds*, que se dedicam a projetos ambientais, porém com ênfase na água.

COMITÊ DE BACIA DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO DOIS RIOS. (2020). Resolução CBH-R2R N° 066, de 19 de junho de 2020. *Dispõe 'ad referendum' sobre a institucionalização do Projeto Diagnóstico e Intervenção e da aprovação de seu escopo, no âmbito do CBH-R2R*. Nova Friburgo, RJ. Disponível em <https://cbhriodoisrios.org.br/resolucoes.php>.

COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (CEIVAP). (2019). *Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul - PIRH-PS*. Resumo Executivo. Resende, RJ. Disponível em https://sigaceivap.org.br/publicacoesArquivos/ceivap/arq_pubMidia_Processo_030-2018_PF02.pdf.

FRANCISCO, Papa. *Laudato Si': sobre o cuidado da casa comum*. Vaticano: Libreria Editrice Vaticana, 2015.

GRANADOS, Julian; SCHLÜTER, Achim. *Blockchain and payments for environmental services: tools and opportunities for environmental protection*. 2023.

MANZOOR, Talha. Towards a cybernetic foundation for natural resource governance. *arXiv preprint arXiv:1803.09369*, 2018.

OBERHAUSER, Daniel. Blockchain for environmental governance: can smart contracts reinforce payments for ecosystem services in Namibia?. *Frontiers in Blockchain*, v. 2, p. 463035, 2019.

ONU – Organização das Nações Unidas. *Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável*. Nações Unidas no Brasil. Disponível em <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>

PAIVA, Ranulfo et al. Blockchain technology and complex flow systems as opportunities for water governance innovation. *Revista Brasileira de Inovação*, v. 18, n. 01, p. 157-176, 2019.

REINA-ROZO, Juan David. Art, energy and technology: the Solarpunk movement. *International Journal of engineering, social justice, and peace*, v. 8, n. 1, p. 47-60, 2021.

SANTOS, Flávio Augusto Monteiro dos et al. Programa Piloto de Pagamento por Serviços Ambientais com foco em recursos hídricos do Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul: impacto, dimensões e perspectivas. 2020.

SCHLETZ, Marco et al. Blockchain and regenerative finance: charting a path toward regeneration. *Frontiers in Blockchain*, v. 6, p. 1165133, 2023.

SCHULZ, Karsten A. Decolonizing political ecology: ontology, technology and 'critical' enchantment. *Journal of Political Ecology*, v. 24, n. 1, p. 125-143, 2017.

DA SILVA, Pedro Santa Rita Siqueira et al. A economia da funcionalidade e da cooperação: caso Gesnord. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 10, p. 80236-80249, 2020.

UMPLEBY, Stuart A.; DENT, Eric B. The origins and purposes of several traditions in systems theory and cybernetics. *Cybernetics & Systems*, v. 30, n. 2, p. 79-103, 1999.

WAZINSKI, F. P. *Beyond sustainability?: a taxonomy of blockchain applications in regenerative finance*. Universidade Católica Portuguesa, Lisboa. 2024.

WILLIAMSON, Oliver E. Transaction-cost economics: the governance of contractual relations. *The Journal of Law and Economics* 22(2), pp. 233–261, 1979.