ARQUITETURA DE *DIGITAL SHADOW* PARA MONITORAMENTO INTELIGENTE DE AQUÍFEROS URBANOS NO BRASIL – ESTUDO DE CASO SEHRES-VISUS

Nyvia Maria Santos Ribeiro Saturnino[1] ; Anna Beatriz Bastos Oliveira[2]; Clívia Santana Maia Santos[3]; Roger Dias Gonçalves[4]

RESUMO – O avanço das tecnologias de monitoramento e plataformas de visualização geoespacial impõe novos paradigmas para a gestão de recursos hídricos subterrâneos em ambientes urbanos. Este trabalho apresenta o SEHRES-VISUS, uma plataforma de *Digital Shadow* desenvolvida para o monitoramento de aquíferos urbanos, especificamente o Sistema Aquífero Quaternário que abrange o SEHRES (*Sergipe Hydrogeological Research Site,* no Campus da Universidade Federal de Sergipe em São Cristóvão). A arquitetura integra: (i) rede de poços de monitoramento com medição contínua de nível d'água e campanhas de coletas de dados hidroquímicos; e (ii) dashboard interativo desenvolvido em *Python/Streamlit* para visualização espacializada e análise de séries temporais. A plataforma estabelece um fluxo de dados unidirecional automatizável, do sistema físico para a representação digital. O SEHRES-VISUS posiciona-se como a primeira iniciativa documentada de arquitetura de *Digital Shadow* para hidrogeologia urbana no Brasil, oferecendo um modelo metodológico escalável para outros centros urbanos e consolidando o papel da Inteligência Territorial na governança de aquíferos.

ABSTRACT – The advancement of monitoring technologies and geospatial visualization platforms introduces new paradigms for the management of groundwater resources in urban environments. This paper presents SEHRES-VISUS, a *Digital Shadow* platform developed for urban aquifer monitoring, specifically the Quaternary Aquifer System encompassing the SEHRES (*Sergipe Hydrogeological Research Site*, Federal University of Sergipe campus, São Cristóvão). The architecture integrates: (i) a groundwater monitoring well network with continuous water-level measurements and hydrochemical data collection campaigns; and (ii) an interactive dashboard developed in Python/Streamlit for spatialized visualization and time-series analysis. The platform establishes an automatable unidirectional data flow, from the physical system to its digital representation. SEHRES-VISUS is positioned as the first documented *Digital Shadow* architecture for urban hydrogeology in Brazil, offering a scalable methodological framework for other urban centers and consolidating the role of Territorial Intelligence in aquifer governance.

Palavras-Chave – Monitoramento Hidrogeológico; Monitoramento de Águas Subterrâneas; Aquífero Costeiro.

[1]) Grupo de Pesquisas Hidrogeológicas e Ambientais (GPHIDRA), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil. nyviasaturnino@academico.ufs.br
[2]) Departamento de Geologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil. ab.bastos@academico.ufs.br
[3]) Departamento de Geologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil. cliviasantana@academico.ufs.br
[4]) Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PRORH), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil. roger.dias@academico.ufs.br

1 – INTRODUÇÃO

A literatura especializada distingue três estágios de maturidade na evolução de plataformas de representação digital de sistemas físicos (Kritzinger et al., 2018), conforme sintetizado na Tabela 1. Com base nessa taxonomia, o SEHRES-VISUS, produto deste trabalho, se enquadra no estágio de *Digital Shadow*: os dados coletados em campo alimentam a representação digital de forma estruturada, mas a sincronização bidirecional automática ainda não está implementada. O desenvolvimento do SEHRES-VISUS é estruturado em dois componentes integrados, correspondendo às camadas da arquitetura de *Digital Shadow*: Componente Físico, composto pela Rede de Monitoramento e o Componente Digital, composto pelo *Dashboard* Interativo (*Python*/*Streamlit*).

Tabela 1 — Estágios de maturidade de *Digital Twins* (adaptado de Kritzinger et al., 2018)

Estágio	Fluxo de dados	Característica
Digital Model	Manual / nenhuma sincronia automática	Modelo matemático construído com dados coletados em campo. Não há atualização automática.
Digital Shadow (SEHRES — estágio atual)	Físico → Digital (unidirecional, automatizável)	Dados do sistema real alimentam a representação digital de forma contínua ou periódica.
Digital Twin	Bidirecional, automático, em tempo real	Sincronização plena. A representação virtual retroalimenta o sistema físico com ações ou alertas preditivos.

No cenário internacional, o conceito de *Digital Shadow* vem sendo aplicado de forma crescente em domínios que envolvem monitoramento de sistemas físicos complexos com fluxo de dados unidirecional. No contexto geotécnico urbano, Yuan *et al.* (2022) demonstram sua aplicação para o monitoramento em tempo real de escavações profundas, mapeando dados de sensores em campo para uma representação BIM (*Building Information Modeling)* digital com avaliação automática de risco. Na ciência agrícola, De Swaef *et al.* (2026) propõem uma arquitetura de *Digital Shadow* para experimentos de campo em condições de déficit hídrico, integrando sensores de umidade do solo e dados meteorológicos em modelos solo-cultura para suporte à decisão em tempo diferido. Ambos os trabalhos compartilham a mesma lógica estrutural do SEHRES-VISUS: fluxo automatizável de dados físicos para uma representação digital, com intervenção humana nas decisões. Contudo, no domínio específico das águas subterrâneas urbanas, a aplicação de arquiteturas de *Digital Shadow* permanece sem registro documentado na literatura.

No Brasil, o conceito encontra aplicação avançada em setores estratégicos, como na indústria petrolífera com o sistema *Flexboard* da Petrobras para monitoramento de fadiga em *risers offshore* e

com o modelo estrutural da Usina de Itaipu. Tais iniciativas, contudo, situam-se no estágio pleno de *Digital Twin*, com sincronização bidirecional e automação consolidadas, enquanto o estágio precursor de *Digital Shadow*, tecnicamente mais acessível e igualmente relevante para a tomada de decisão, permanece pouco explorado no país.

Ao transpor essa tecnologia para a gestão de águas subterrâneas, observa-se uma disparidade entre os meios superficiais e subterrâneos: enquanto plataformas como o Hidroweb (ANA, 2026) e o SERHIDRO (SEMAC, 2026) operam como repositórios de dados históricos e inventários estáticos de qualidade indiscutível, a implementação de arquiteturas de *Digital Twin* ou *Digital Shadow* para aquíferos urbanos ainda é incipiente no território nacional. Diferente das águas superficiais, que contam com sistemas de alerta e monitoramento visual, as águas subterrâneas permanecem como um recurso "invisível" e frequentemente negligenciado nas políticas de planejamento urbano.

É precisamente nesse contexto que o SEHRES-VISUS (SEHRES-*Sergipe Hydrogeological Research Site*) se insere, propondo uma arquitetura de *Digital Shadow* como estágio técnico documentado e replicável na trajetória rumo a um pleno *Digital Twin* Hidrogeológico para aquíferos urbanos no Brasil. O SEHRES é um laboratório natural dedicado à investigação hidrogeológica e ambiental de águas subterrâneas em ambiente costeiro urbano, localizado no campus da Universidade Federal de Sergipe (UFS), no município de São Cristóvão, Sergipe (Saturnino et al., 2024). A área de estudo está inserida no Sistema Aquífero Quaternário (SAQ), um aquífero livre, raso e essencialmente arenoso, constituído por depósitos sedimentares costeiros quaternários.

A infraestrutura do SEHRES compreende 19 poços tubulares catalogados, com profundidade média de 20 metros e vazões de estabilização entre 2,0 e 13 m³/h, dos quais 15 são monitorados continuamente. O objetivo central do SEHRES é gerar um banco de dados estruturado, contínuo e de acesso público, capaz de subsidiar modelos hidrogeológicos e políticas de gestão dos recursos hídricos subterrâneos em ambientes costeiros urbanizados sujeitos a intensa pressão antrópica e climática.

O objetivo deste trabalho é desenvolver o SEHRES-VISUS como uma plataforma brasileira de *Digital Shadow* Hidrogeológico para aquíferos urbanos costeiros, integrando rede de monitoramento sistemático e dashboard interativo para suporte à decisão na gestão hídrica.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

A base do sistema físico é composta por 15 poços de monitoramento distribuídos na área de estudo, instrumentados para medição semanal de nível d'água e coleta em campanhas de água

subterrânea para análise de parâmetros hidroquímicos. Foram realizadas duas campanhas de caracterização físico-química: estação seca (outubro de 2023) e estação chuvosa (julho de 2024), utilizando sondas multiparamétricas para medição de temperatura, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, salinidade, pH e turbidez. O monitoramento sistemático do nível d'água abrange o período de abril de 2023 a janeiro de 2026, gerando séries temporais com 144 medições por poço. As cotas dos poços foram obtidas por levantamento topográfico, então utilizadas para o cálculo da carga hidráulica (h = Cota − N.A.), sendo N.A. a profundidade do nível d'água em relação à cota de referência do poço

O componente digital foi desenvolvido integralmente em Python, utilizando as bibliotecas *Streamlit* (interface web), *Leafmap/Folium* (visualização geoespacial), *Plotly* (gráficos interativos), *GeoPandas* (dados vetoriais) e *Pandas* (análise de séries temporais). O fluxo de dados entre os componentes físico e digital, eixo estruturante da arquitetura de *Digital Shadow*, segue a sequência: coleta em campo → estruturação em planilhas → carregamento no dashboard → visualização e análise.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

O SEHRES-VISUS encontra-se operacional com ambos os componentes integrados (Figura 1). A plataforma é organizada em seis módulos: (i) Mapa Territorial interativo com popups de fotografias e estatísticas dos poços sobre imagem de satélite; (ii) Gráficos Gerais de nível d'água e carga hidráulica; (iii) Análise por Poço Individual; (iv) Estatísticas Descritivas Interativas; (v) Galeria Fotográfica dos pontos de monitoramento; e (vi) Análise Hidroquímica comparativa entre as campanhas seca e chuvosa.

O módulo de Mapa Territorial exibe a localização georreferenciada dos poços de monitoramento sobre imagem de satélite de alta resolução; ao clicar sobre qualquer poço, o usuário acessa um painel resumido contendo fotografia do poço, total de medições, valores mínimo, máximo e médio de nível d'água, além da data da última leitura registrada (Figura 2).

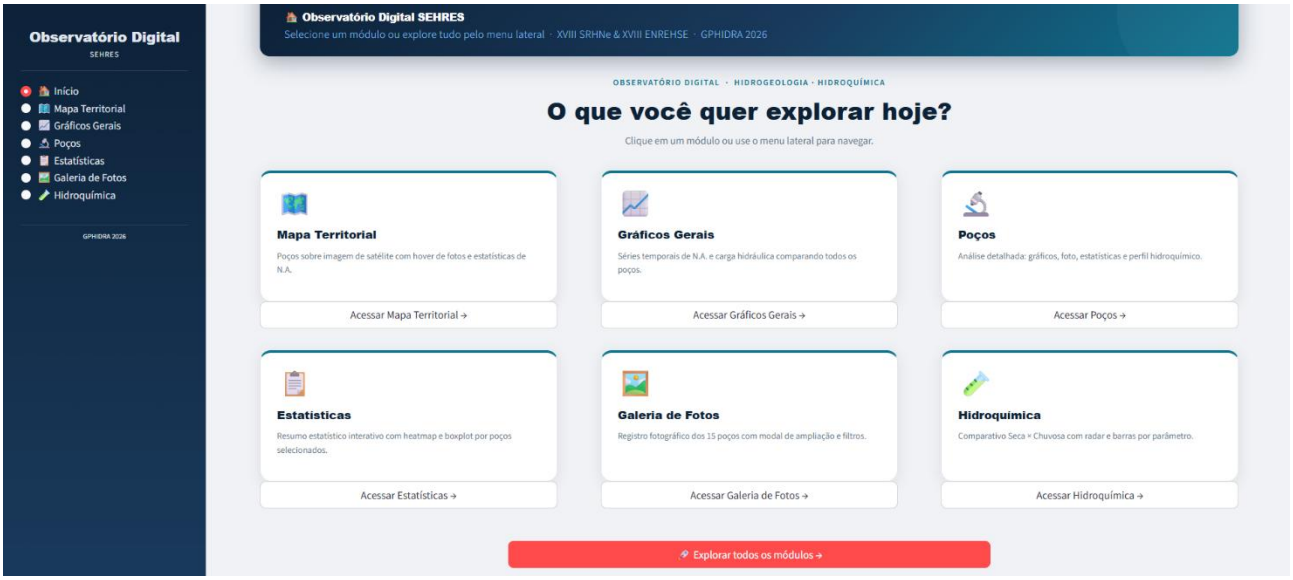


Figura 1 — Interface inicial do SEHRES-VISUS, composta por painel de navegação modular com acesso direto aos seis módulos da plataforma.

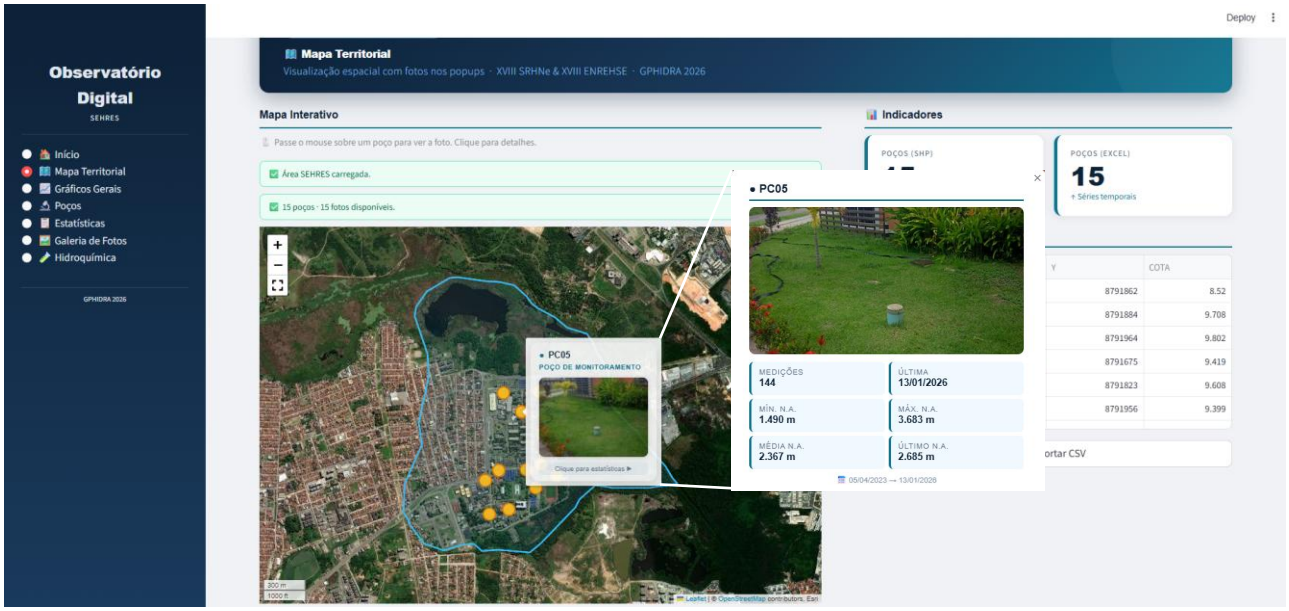


Figura 2 — Módulo Mapa Territorial do SEHRES-VISUS: localização dos poços sobre imagem de satélite com delimitação da área de estudo (polígono azul) e painel de estatísticas do poço PC05 ativado por clique.

A rede de monitoramento fornece séries temporais contínuas para 15 dos 19 poços instalados, cobrindo um período de quase três anos (abril/2023 – janeiro/2026). A plataforma digital processa e exibe os níveis d'água e as cargas hidráulicas calculadas no módulo de Gráficos Gerais (Figura 3), onde o usuário pode alternar entre as duas variáveis e selecionar quais poços incluir na visualização. O gráfico é interativo, ao posicionar o cursor sobre qualquer curva, são exibidos o nome do poço e o valor correspondente na data indicada.



Figura 3 — Módulo Gráficos Gerais do SEHRES-VISUS: séries temporais de nível d'água (N.A.) para os 15 poços monitorados, com seleção interativa de variável (N.A. ou carga hidráulica h) e de poços, hover com valor individual por curva.

O módulo de Poços permite uma análise detalhada e individualizada de cada ponto de monitoramento (Figura 4). Ao selecionar um poço, o usuário visualiza simultaneamente a fotografia de campo, os indicadores de cota, N.A., carga hidráulica média e total de medições. O módulo integra ainda o perfil hidroquímico do poço selecionado (Figura 5), consolidando em uma única interface toda a informação disponível para aquele ponto.

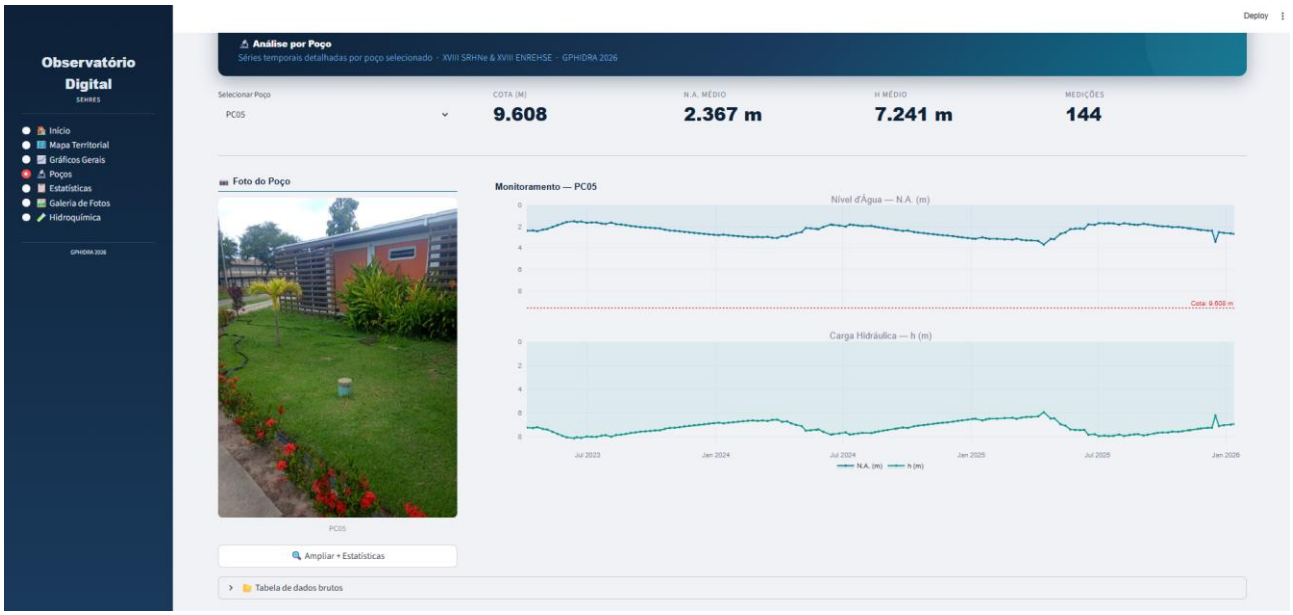


Figura 4 — Módulo Poços do SEHRES-VISUS: análise individualizada do poço PC05, exibindo fotografia de campo, indicadores-resumo, séries temporais de nível d'água (N.A.) e carga hidráulica (h).



Figura 5 — Módulo Poços do SEHRES-VISUS: análise individualizada do poço PC05, exibindo o perfil hidroquímico.

O módulo de Estatísticas oferece uma análise descritiva completa e interativa dos dados de monitoramento (Figura 6). O usuário seleciona a variável de interesse (N.A. ou carga hidráulica) e define quais poços incluir na análise, com recalculo automático de todos os indicadores. Uma tabela com gradiente de cores apresenta, por poço, os valores de cota, mínimo, máximo, média, mediana, desvio padrão, amplitude e número de medições. Abaixo, uma visão consolidada exibe os indicadores globais do conjunto selecionado, seguida de um boxplot comparativo que sintetiza a distribuição estatística do nível d'água de cada poço ao longo do período monitorado (Figura 7).

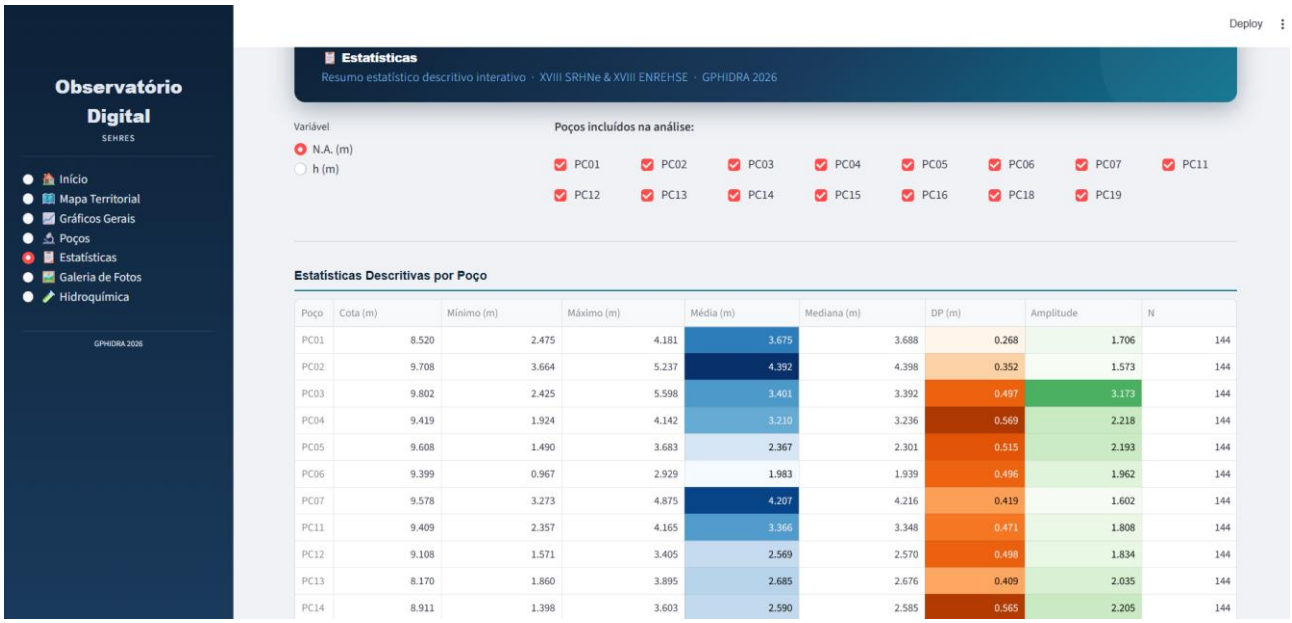


Figura 6 — Módulo Estatísticas do SEHRES-VISUS: tabela descritiva para os 15 poços monitorados.

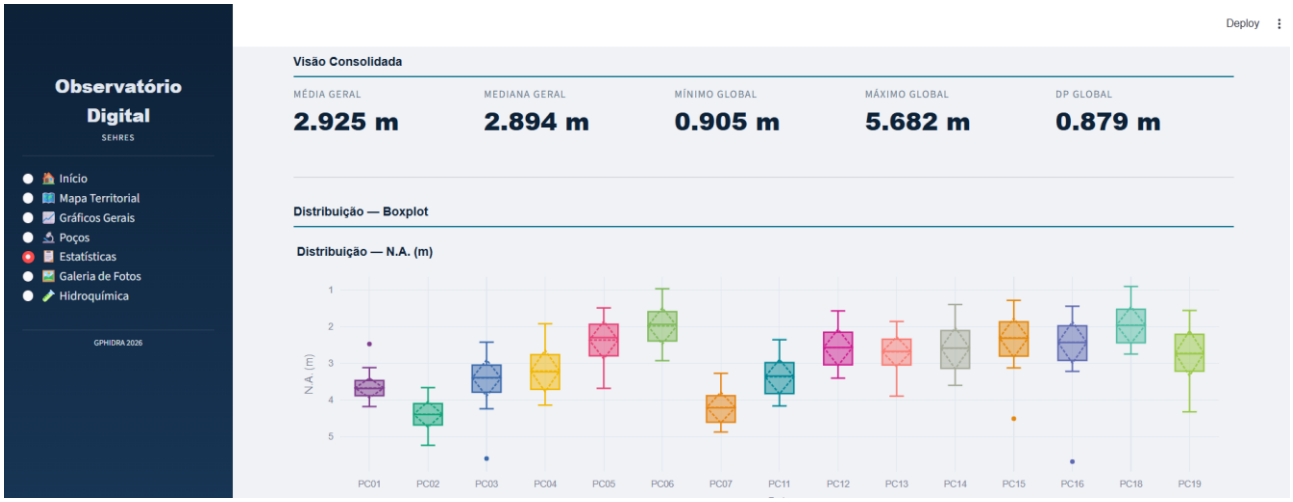


Figura 7 — Módulo Estatísticas do SEHRES-VISUS: visão consolidada e boxplot.

O módulo de Galeria de Fotos (Figura 8) reúne o registro fotográfico dos 15 poços de monitoramento em uma grade visual organizada, onde cada card exibe a fotografia de campo acompanhada do N.A. médio, total de medições e período de monitoramento, com acesso direto à análise detalhada individual. O módulo conta ainda com filtro de busca por poço e opção de exibição restrita aos pontos com fotografia disponível, integrando ao contexto espacial do aquífero a dimensão visual do ambiente em que cada ponto está inserido.



Figura 8 — Módulo Galeria de Fotos do SEHRES-VISUS: grade fotográfica dos poços de monitoramento com cards individuais exibindo fotografia de campo, N.A. médio, total de medições e período monitorado. Em destaque, os poços PC16, PC18 e PC19, inseridos em diferentes contextos de uso do solo no campus da UFS.

O módulo de Hidroquímica integra os resultados das duas campanhas de campo em uma interface comparativa direta entre a estação seca (outubro de 2023) e a estação chuvosa (julho de 2024) (Figura 9). Na seção de Análise Geral por Parâmetro, o usuário seleciona a variável de interesse e visualiza um gráfico de barras agrupadas comparando os valores de todos os poços entre as duas campanhas. Na seção de Perfil Hidroquímico por Poço, ao selecionar um poço específico, são gerados simultaneamente um gráfico radar com a assinatura multivariada normalizada, permitindo identificar visualmente o padrão hidroquímico e sua variação sazonal, e um gráfico de barras horizontais com os valores absolutos de cada parâmetro por campanha. Os dados tabulares completos das duas campanhas estão disponíveis para consulta e exportação ao final do módulo.

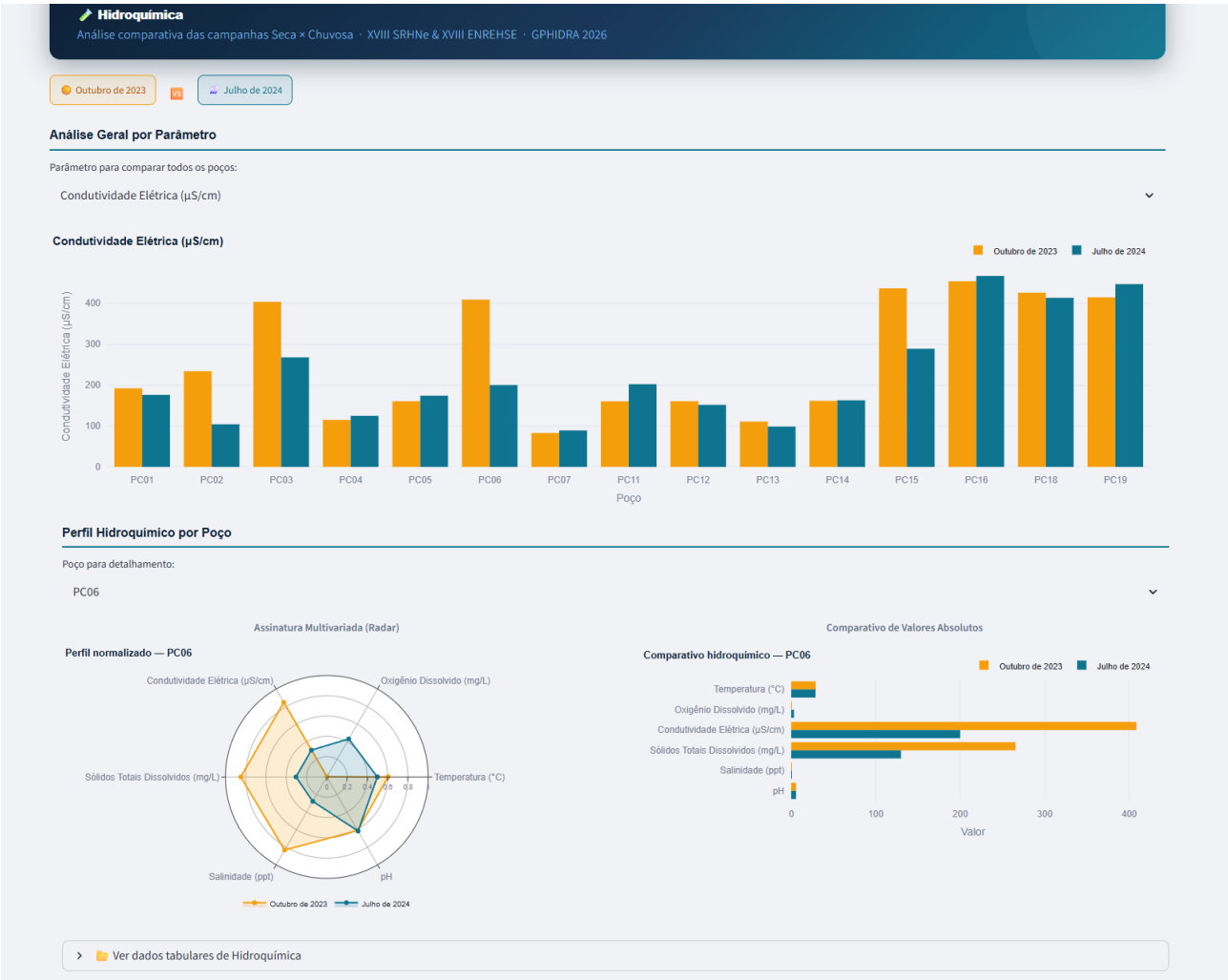


Figura 9 — Módulo Hidroquímica do SEHRES-VISUS: comparativo entre as campanhas de estação seca (outubro de 2023) e estação chuvosa (julho de 2024).

4 – CONCLUSÃO

O desenvolvimento do SEHRES-VISUS representa um avanço estratégico na gestão de recursos hídricos subterrâneos em Sergipe, configurando-se como a primeira iniciativa documentada de arquitetura de *Digital Shadow* para aquíferos urbanos no Brasil. A integração bem-sucedida entre o componente físico e o digital demonstra que é possível converter dados de campo complexos em interfaces acessíveis e intuitivas para o suporte à governança territorial.

Ao dar visibilidade à dinâmica invisível dos mananciais subterrâneos, historicamente negligenciados nas políticas de planejamento urbano em favor dos recursos hídricos superficiais, o SEHRES-VISUS ocupa uma lacuna técnica inédita no cenário nacional de monitoramento hidrogeológico. A plataforma promove uma gestão proativa e baseada em evidências, essencial para a mitigação de impactos e para o planejamento resiliente frente à variabilidade climática. Por fim, a metodologia estabelecida serve como modelo escalável e replicável para outros centros urbanos brasileiros, consolidando o papel da Inteligência Territorial na promoção da sustentabilidade hídrica nacional.

REFERÊNCIAS

ANA (2026). Hidroweb: Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/hidroweb.

DE SWAEF, T.; SCHREEL, J.; BLANCHY, G.; GARRÉ, S.; LOOTENS, P.; VERBRIGGHE, N.; VLEMINCKX, B.; ROLDÁN-RUIZ, I. (2026). "Digital models and shadows for planning, running and interpreting field drought experiments". *Field Crops Research* 341, 110399. DOI: 10.1016/j.fcr.2026.110399.

KRITZINGER, W.; KARNER, M.; TRAAR, G.; HENJES, J.; SIHN, W. (2018). "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification". *IFAC-PapersOnLine* 51(11), pp. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

SATURNINO, N. M. S. R.; JESUS, M. F. S. DE; DIAS, L. S. S.; SANTOS, C. S. M; DIAS GONÇALVES, R. D. (2024). "Aplicação do método WTF para estimativa de recarga subterrânea no Sistema Aquífero Quaternário em Sergipe, Brasil". *Scientia Plena* 20(8), pp. 1–10. DOI: 10.14808/sci.plena.2024.089909.

SEMAC (2026). SERHidro: Observatório de Recursos Hídricos de Sergipe. Disponível em: https://serhidro.semac.se.gov.br.

YUAN, M.; YUAN, C.; CHEN, F.; LI, L.; HONG, Y.; YU, G.; LEI, J. (2022). "BIM Digital Shadow Technology and Risk Assessment Method of the Deep Foundation Pit's Behavior for Zibo Light Rail". *Frontiers in Earth Science* 10, 908032. DOI: 10.3389/feart.2022.908032.