Operacionalizando a Gestão Proativa de Secas: Desenvolvimento e Validação de um Sistema de Apoio à Decisão no Semiárido Cearense

Guilherme Bessa Araújo Nojosa [1] ; Daniel Antônio Camelo Cid [2] ; Samiria Maria Oliveira da Silva[3] ; Francisco de Assis de Souza Filho [1] ; Daniele Costa da Silva [1] ; Amanda Rodrigues Costa [1] & Maitê Viana Paiva [1]

ABSTRACT: Water resources management in the Brazilian semiarid region faces the challenge of transitioning from reactive approaches to proactive risk management. In Ceará, although the Proactive Drought Management Plans (PGPS) provide robust guidelines, their practical implementation is still constrained by the static and complex nature of traditional technical documents. This study aims to address this operational gap through the development of a Web-based Decision Support System (DSS) for the operationalization of these plans. Adopting the *Design Science Research* (DSR) methodology, the artifact was implemented using a decoupled architecture based on modern technologies for processing modules, web interfaces, and database management. Validation, conducted with data from the Acarape do Meio Reservoir, demonstrated the system's effectiveness in integrating volumetric monitoring with decision matrices and generating prospective scenarios through water balance simulation. The platform automates drought-state identification and facilitates the visualization of mitigation actions. Results indicate that the DSS reduces information asymmetry while promoting transparency and accountability in water governance. It is concluded that the proposed solution represents a viable and replicable instrument for strengthening proactive drought management and water governance in the Brazilian semiarid region.

RESUMO: A gestão de recursos hídricos no semiárido brasileiro enfrenta o desafio de transitar de modelos reativos para uma gestão de risco proativa. No Ceará, embora os Planos de Gestão Proativa de Seca (PGPS) estabeleçam diretrizes robustas, sua aplicação prática é limitada pela natureza estática e complexa dos documentos tradicionais. Este trabalho objetiva preencher essa lacuna operacional desenvolvendo um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) Web para a operacionalização dos planos. Adotando a metodologia *Design Science Research* (DSR), o artefato foi implementado em arquitetura desacoplada, utilizando tecnologias modernas de módulos de processamento, interfaces web e gerenciamento de banco de dados. A validação, realizada com dados do Açude Acarape do Meio, demonstrou a eficácia da ferramenta em integrar o monitoramento volumétrico às matrizes de decisão e fornecer cenários prospectivos via simulação de balanço hídrico. O sistema automatiza a identificação dos estados de seca e facilita a visualização das ações de mitigação. Os resultados indicam que o SAD reduz a assimetria de informação, promovendo transparência e *accountability*. Conclui-se que a solução constitui um instrumento viável e replicável para fortalecer a governança hídrica.

Palavras-Chave – Gestão de Secas; Sistema de Apoio à Decisão; Recursos Hídricos

[1]) Centro Estratégico de Excelência em Políticas de Águas e Secas – CEPAS, Bloco 314, Campus do Pici. Pici; 60020-181, Fortaleza, CE, Brasil, (85) 33669522, guilhermebessanojosaaraujo@gmail.com, assis@ufc.br, danileta@gmail.com, amandarcosta28@gmail.com, maitevpaiva@gmail.com
[2]) Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), Av. Rui Barbosa, 1246, Aldeota, Fortaleza, Ceará. Email: daniel.cid@funceme.br
[3]) Professora do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, samiriamaria@gmail.com.

Introdução

A gestão de recursos hídricos no semiárido brasileiro enfrenta, historicamente, o desafio de transitar de um paradigma reativo, muitas vezes associado à "indústria da seca", para um modelo de governança adaptativa e de gestão proativa de riscos (WILHITE, 2000; DE NYS *et al.*, 2016). No Estado do Ceará, esse esforço de mudança materializou-se institucionalmente no âmbito do Programa Cientista Chefe: Recurso Hídricos, por meio da elaboração dos Planos de Gestão Proativa de Seca (PGPS), instrumentos técnicos robustos desenvolvidos para antecipar a escassez e mitigar seus impactos antes que a seca ocorra.

Contudo, a eficácia destes instrumentos esbarra em limitações operacionais críticas. Lemos e Oliveira (2004) alertam que a excelência técnica, se isolada, pode gerar planos perfeitos na teoria, mas inviáveis politicamente se não houver comunicação clara com os usuários. Na prática atual, a complexidade das regras de negócio e das matrizes de decisão encontra-se confinada a documentos estáticos, relatórios técnicos e arquivos em formato PDF, o que dificulta a apropriação do conhecimento pelos *stakeholders*.

A literatura recente corrobora essa visão, apontando que a efetiva implementação de políticas hídricas frequentemente esbarra na dificuldade de traduzir modelos estáticos em ações práticas para os tomadores de decisão em tempo hábil (CANDIDO *et al.*, 2022). Relatórios contemporâneos sobre resiliência hídrica destacam a urgência no desenvolvimento de artefatos digitais e Sistemas de Apoio à Decisão (SAD) interativos, capazes de processar balanços hídricos e entregar informações quantitativas de forma direta (JANG; MOON; MOON, 2022; WORLD BANK, 2025).

Como destaca Gonçalves *et al.* (2023) e Abrucio (2014), a transparência e a *accountability*, entendida aqui como a responsabilização institucional e a capacidade de rastrear e auditar as decisões tomadas, na gestão das águas dependem não apenas da existência da informação, mas da sua acessibilidade e capacidade de ser auditada pela sociedade. A existência de dados técnicos, por si só, não garante uma gestão eficiente se estes não forem acessíveis e interpretáveis tempestivamente.

Diante deste cenário, e alinhando-se à demanda contemporânea por ferramentas ágeis na governança hídrica, o presente trabalho objetiva preencher essa lacuna operacional através do

desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) Web. A ferramenta proposta visa não apenas digitalizar os planos, mas operacionalizar a governança hídrica, simplificando a interpretação dos dados para os comitês de bacia. Dessa forma, busca-se reduzir a carga cognitiva dos gestores e garantir a execução efetiva e rastreável das ações de mitigação.

2. Fundamentação Teórica

Conforme discutido por Souza Filho *et al.* (2021), a resposta institucional às secas no semiárido brasileiro tem transitado de uma "Gestão de Crise", que é caracterizada por ações tardias, emergenciais e de alto custo financeiro (Wilhite, 2000), para um modelo proativa de "Gestão de Risco" (De Nys *et al.*, 2016). A operacionalização deste modelo ocorre através dos Planos de Gestão Proativa de Seca, cuja metodologia central baseia-se na definição de gatilhos (*triggers*). Segundo Studart *et al.* (2017) e Souza Filho (2019), esses gatilhos são níveis volumétricos críticos que, ao serem atingidos, disparam automaticamente a transição entre estados de seca – Normal, Alerta, Seca e Seca Severa. A fundamentação matemática dessas regras de operação, que baliza o cálculo de alocação de água sob incerteza, foi consolidada por Cid *et al.* (2023), conferindo o rigor quantitativo exato e necessário para a sua modelagem computacional.

Essa abordagem técnica serve de base para o processo de "Alocação Negociada de Água". Conforme explicam Campos e Studart (2011), trata-se de um processo decisório participativo onde os *stakeholders* (usuários, governo e sociedade civil) acordam previamente as regras de racionamento para cada cenário hidrológico. Dessa forma, a decisão de reduzir a vazão constitui o cumprimento das regras de restrição previamente acordadas na alocação negociada, garantindo a legitimidade do processo.

Dada a multiplicidade de variáveis hidrológicas e conflitos de uso, a capacidade humana necessita ser complementada por capacidade computacional para o processamento de cenários. Nesse contexto, um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) atua como a ponte essencial entre a modelagem matemática e a decisão política. Braga *et al*. (2008) reforçam que, no Brasil, os SADs são vitais para integrar dados quantitativos e qualitativos, permitindo simulações que embasam a outorga e a operação de reservatórios. O objetivo deste trabalho é justamente transformar essa complexa regra de gatilhos em uma interface interativa e intuitiva, garantindo que o planejamento teórico se reverta em ações auditáveis e transparentes.

3. **Metodologia**

A condução desta pesquisa fundamenta-se na *Design Science Research* (DSR), paradigma que busca ampliar as capacidades humanas e organizacionais por meio da construção de artefatos inovadores (HEVNER *et al.*, 2004). A adoção da DSR justifica-se pela natureza do problema investigado, que demanda um suporte tecnológico capaz de operacionalizar os conhecimentos teóricos relacionados aos Planos de Gestão Proativa de Seca (PGPS). Nesse contexto, o *framework* conceitual da pesquisa (Figura 1) estrutura-se na interação entre o ambiente do problema, o ciclo de desenvolvimento do artefato e a base de conhecimento, composta pelos fundamentos hidrológicos e computacionais que sustentam a solução proposta.

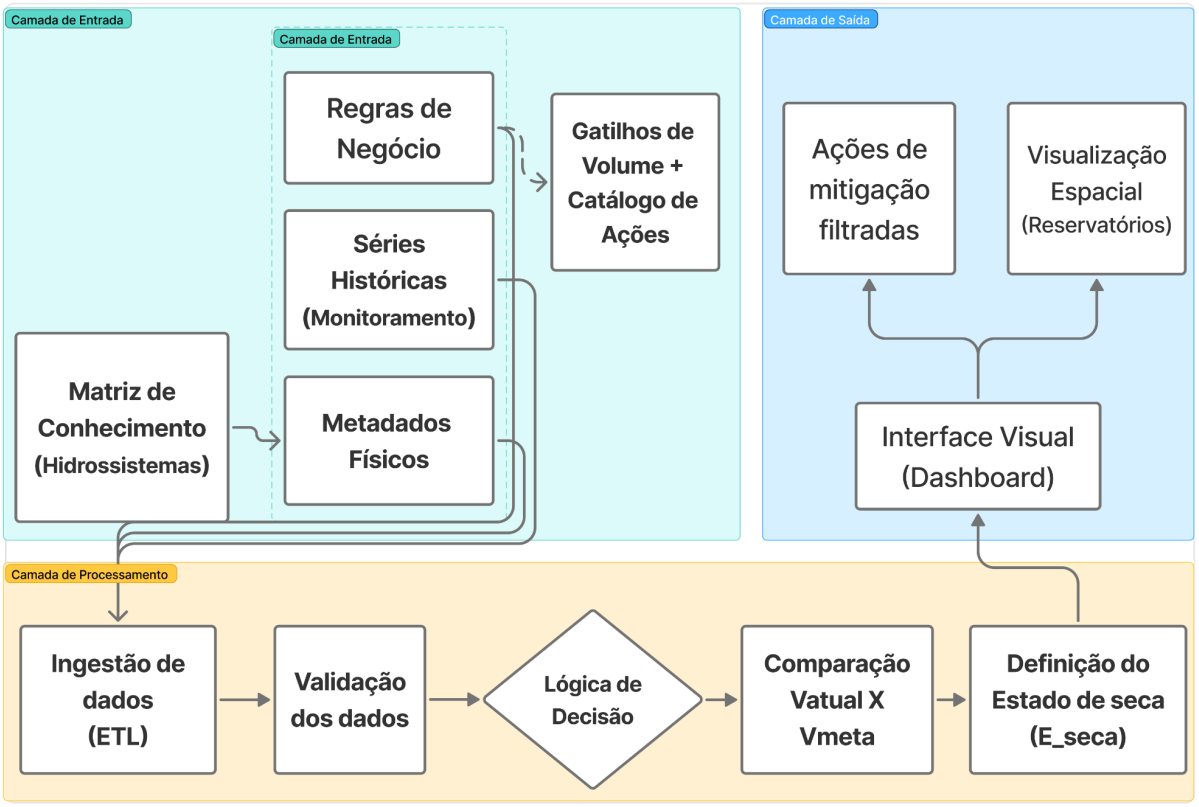


Figura 1: *Framework* conceitual da pesquisa, baseado em Hevner *et al*., 2004

A pesquisa foi operacionalizada através de três ciclos interativos:

3.1. Ciclo de Relevância

Este ciclo conectou o ambiente das organizações gestoras de recursos hídricos às necessidades de pesquisa. Identificou-se que, no Ceará, o distanciamento entre o planejamento e a operação decorre da dificuldade de integrar e processar, de forma ágil, os dados contínuos de

monitoramento. Para solucionar essa lacuna, o artefato foi concebido para abranger os reservatórios do estado que possuem Planos de Gestão Proativa de Seca vigentes. A partir da integração com as bases de dados volumétricos e históricos fornecidas pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), estabeleceram-se dois requisitos funcionais primordiais: o monitoramento dinâmico, que cruza o volume atual do reservatório com os gatilhos matemáticos para ditar o estado de seca vigente, e a simulação de balanço hídrico prospectivo, além disso também é possível acompanhar o andamento das ações previstas em cada plano.

3.2. Ciclo de Design

A construção do artefato envolveu o desenvolvimento de uma arquitetura de software robusta e escalável, estruturada em três camadas principais. Na camada de persistência e regras de negócio, utilizou-se o PostgreSQL, visando garantir a integridade referencial dos dados volumétricos e a correta aplicação dos gatilhos definidos por Cid *et al.* (2023). O backend, responsável pelo motor de processamento, foi desenvolvido em Go (Golang) com o *framework* Gin, cuja escolha se justifica pela elevada performance na execução de cálculos concorrentes e pela eficiência no consumo de recursos computacionais, características essenciais para o processamento de extensas séries temporais hidrológicas. Já o frontend foi implementado em Next.js, priorizando componentes reativos voltados à visualização de dados e ao apoio à tomada de decisão. A interface foi projetada para representar de forma intuitiva os estados de seca permitindo maior clareza interpretativa aos gestores de recursos hídricos.

3.3. Ciclo de Rigor

A validação do artefato consistiu na realização de testes de aderência entre as recomendações geradas pelo sistema e as diretrizes estabelecidas nos PGPS. Para o ciclo de avaliação, submeteu-se o artefato a uma Prova de Conceito baseada em um estudo de caso real, utilizando séries históricas de longo prazo (1911–2017) para a simulação e matrizes de decisão vigentes. O rigor científico foi garantido pela fundamentação teórica prévia em políticas de racionamento preventivo, assegurando que o suporte computacional reflita fielmente o conhecimento hidrológico consolidado.

4. Resultados e Discussão

A avaliação prática do artefato foi conduzida através da sua aplicação ao Açude Acarape do Meio. O sistema materializa-se através de interfaces desenhadas para traduzir a complexidade dos

dados presentes nos planos em informações visuais diretas, estruturando-se em dois módulos principais que compõem a experiência do utilizador.

4.1. Módulo de Monitoramento e *dashboard* Central

A página inicial de monitoramento atua como o painel de controle central para a gestão contínua. Alimentada pelos dados de monitoramento contínuo da FUNCEME, esta interface processa o volume atual do reservatório e cruza-o, de forma automatizada, com as matrizes de decisão do PGPS. Como ilustrado na Figura 2, a página exibe de forma proeminente o estado de seca vigente (Normal, Alerta, Seca ou Seca Severa) através de indicadores visuais claros. O principal ganho desta interface é a eliminação da ambiguidade interpretativa. Em vez de exigir que o gestor consulte planilhas extensas para verificar se um gatilho volumétrico foi acionado, a página destaca a posição exata do volume atual em relação aos limites críticos. O design responsivo da tela garante que a equipa técnica tenha uma percepção imediata da situação do hidrossistema.



Figura 2 – Interface da página de Monitoramento indicando o estado de seca atual

4.2. Módulo de Simulação e Balanço Hídrico

A página dedicada à simulação constitui o núcleo analítico e prospectivo do artefato. Esta interface (Figura 3) foi desenhada para permitir que os utilizadores modelem o comportamento futuro do reservatório face a diferentes cenários de alocação de água. O destaque desta página recai sobre os gráficos interativos, que projetam as curvas de deplecionamento simuladas sobrepostas às

linhas horizontais que representam os gatilhos de restrição (*hedging policies*). O utilizador pode parametrizar a simulação inserindo demandas hipotéticas ou selecionando recortes das séries históricas (1911-2017) de vazão e evaporação. A robustez do motor de processamento em Go garante que, mesmo ao calcular balanços hídricos para dezenas de meses, a interface atualize os gráficos quase instantaneamente. Esta página atua, assim, como uma ferramenta visual de negociação, facilitando a compreensão dos riscos de colapso hídrico por todos os intervenientes do comitê de bacia.

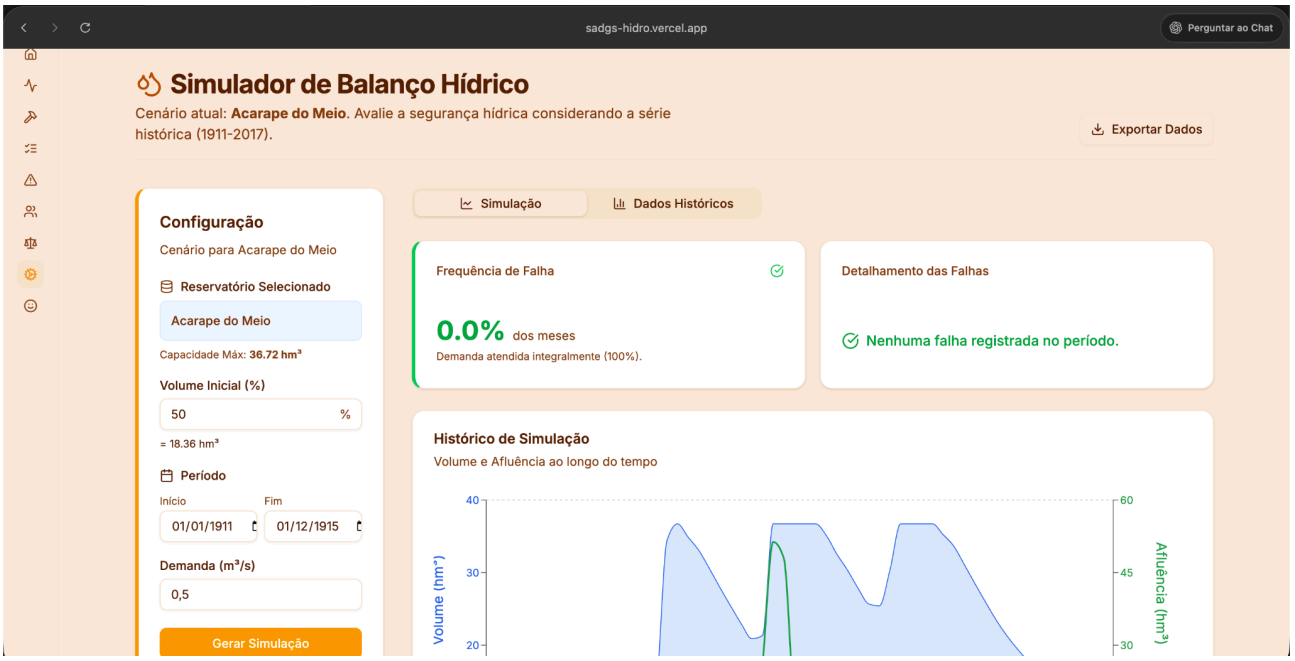


Figura 3 – Interface da página de Simulação com o gráfico interativo de balanço hídrico

4.3. Impacto na Governança Digital

A disposição e o detalhamento das páginas evidenciam que o sistema transcende a mera digitalização de dados. O design da interface converte regras matemáticas de alocação sob incerteza numa experiência visual acessível, reduzindo a sobrecarga cognitiva dos responsáveis pelas tomadas de decisão e promovendo uma governança hídrica mais ágil, auditável e fundamentada em dados.

Nesse contexto, o Quadro 01 sintetiza as principais contribuições operacionais e institucionais da solução proposta. A comparação evidencia como a integração entre monitoramento hidrológico, critérios operacionais e interfaces interativas contribui para reduzir dificuldades associadas à interpretação manual dos planos, à fragmentação das informações e à baixa rastreabilidade das decisões, aproximando o planejamento técnico da prática operacional.

Quadro 01 – Contribuição do Artefato

Problema Atual	Solução Proposta
Planos estáticos em PDF	Interface interativa
Interpretação manual dos gatilhos	Classificação automática
Baixa rastreabilidade	Histórico de decisões
Simulações dispersas	Ambiente integrado
Assimetria informacional	Visualização acessível

É Importante frisar que a arquitetura desacoplada e baseada em serviços permite a replicação do sistema para outros hidrossistemas, desde que existam séries históricas e regras operacionais previamente definidas.

Apesar dos avanços obtidos, a efetividade do sistema depende diretamente da disponibilidade e confiabilidade das bases de monitoramento hidrológico. Além disso, a ferramenta não substitui o processo deliberativo dos comitês de bacia, atuando apenas como suporte técnico à tomada de decisão. Outro desafio refere-se à necessidade de integração institucional entre os órgãos gestores para manutenção contínua das bases de dados e atualização das regras operacionais.

5. **Considerações Finais**

A gestão de recursos hídricos no semiárido brasileiro exige inteligência institucional e capacidade analítica para antecipar riscos. O desenvolvimento e a validação do Sistema de Apoio à Decisão demonstraram que a digitalização dos processos decisórios mitiga a lacuna entre o planejamento técnico dos Planos de Gestão Proativa de Seca e sua efetiva execução. Ao substituir documentos estáticos por uma aplicação web dinâmica, o sistema reduziu a complexidade na interpretação dos estados de seca, permitindo que os gestores concentrem esforços na coordenação das ações de mitigação.

Sob a ótica da *Design Science Research*, o artefato converteu a teoria dos PGPS em uma ferramenta de governança baseada em evidências. Dessa forma, o sistema atua como uma infraestrutura sócio-técnica que reduz a assimetria de informação e fortalece a responsabilização institucional.

Como o artefato encontra-se em estágio de protótipo funcional (MVP), trabalhos futuros devem focar na ampliação de suas capacidades. Destacam-se a implementação de logs de auditoria para rastrear alterações no banco de dados, a criação de um módulo de gestão colaborativa com controle de acesso para os órgãos responsáveis e a incorporação de modelos de aprendizado de máquina para previsões volumétricas. Em suma, o trabalho evidencia que a tecnologia é um componente central para a governança e a construção da segurança hídrica regional.

REFERÊNCIAS

ABRUCIO, F. L.; *et al.* "Accountability democrática e o desenho institucional dos conselhos gestores de políticas públicas", in Burocracia e política no Brasil. Rio de Janeiro: FGV, 2014.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Monitor de Secas do Brasil. Brasília: ANA, 2021. Disponível em: https://monitordesecas.ana.gov.br.

BRAGA, B. P. F.; *et al.* Introdução à Engenharia Ambiental. 2. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

CAMPOS, J. N. B. "Secas e políticas públicas no semiárido: ideias, pensadores e períodos". Estudos Avançados, v. 28, n. 82, pp. 65-88, 2014.

CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. "Conflitos por águas e alocação negociada: o caso do vale dos Carás no Ceará". Revista de Administração Pública, v. 45, n. 5, pp. 1655-1672, 2011.

CID, D. A. C.; DE SOUZA FILHO, F. A.; PORTO, V. C. (2023). “Collaborative modeling to construct a hedging policy for drought management in reservoir systems”. Journal of Water Resources Planning and Management, 149(1), p. 05022012.

CANDIDO, L. A.; COÊLHO, G. A. G.; MORAES, M. M. G. A. de; FLORÊNCIO, L. "Review of Decision Support Systems and Allocation Models for Integrated Water Resources Management Focusing on Joint Water Quantity-Quality". Journal of Water Resources Planning and Management, v. 148, n. 2, 2022.

COGERH. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. Relatório de Gestão e Situação dos Recursos Hídricos do Ceará. Fortaleza: COGERH, 2022.

DE NYS, E.; ENGLE, N. L.; MAGALHÃES, A. R. Secas no Brasil: política e gestão proativas. Brasília: CGEE / Banco Mundial, 2016.

FREITAS, M. A. S. "Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semi-áridas". Revista Tecnologia, Fortaleza, v. 19, n. 1, pp. 19-30, 1998.

GONÇALVES, S. T. N.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. C.; COSTA, J. M. F. da; SILVEIRA, C. da S.; MARCOS JUNIOR, A. D. "Avaliação de Índices de Seca no Monitoramento Hidrológico de Reservatórios Estratégicos do Ceará, Brasil". Revista Brasileira de Meteorologia, v. 38, e38230018, 2023. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863810018.

HEVNER, A. R.; MARCH, S. T.; PARK, J.; RAM, S. "Design science in information systems research". MIS Quarterly, v. 28, n. 1, pp. 75-105, 2004.

JANG, O.-J.; MOON, H.-T.; MOON, Y.-I. "Drought Forecasting for Decision Makers Using Water Balance Analysis and Deep Neural Network". Water, v. 14, n. 12, pp. 1922, 2022. DOI: 10.3390/w14121922. Disponível em: https://doi.org/10.3390/w14121922. Acesso em: 30 abr. 2026.

LEMOS, M. C.; OLIVEIRA, J. L. F. "Can Water Reform Survive Politics? Institutional Change and River Basin Management in Ceará, Northeast Brazil". World Development, v. 32, n. 12, pp. 2121-2137, 2004.

MAGALHÃES, A. R. "A vida com a seca", in Secas no Brasil: política e gestão proativas. Org. por De Nys, E. *et al.* Brasília: CGEE / Banco Mundial, 2016.

SOUZA FILHO, F. A. de. Metodologia para Elaboração de Planos de Gestão Proativa de Seca em Sistemas de Abastecimento Urbano. Fortaleza: Programa Cientista Chefe Recursos Hídricos/FUNCAP, 2019.

SOUZA FILHO, F. A. de; AQUINO, S. H. S. de; SILVA, S. M. O. da. "Drought Management in the Brazilian Semiarid: From Crisis to Risk Management", in Water Scarcity and Drought in the Americas. Ed. por Maples, S. Springer Water, 2021.

STUDART, T. M. C.; *et al.* "Integrated proactive drought management in hydrosystems and cities", in Proceedings of the 7th International Conference on Flood Management, Leeds, 2017. Leeds: ICFM, 2017.

TURBAN, E.; ARONSON, J. E.; LIANG, T. P. Decision Support Systems and Intelligent Systems. 9. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.

WILHITE, D. A. "Drought Preparedness and Response in the Context of Sub-Saharan Africa". Journal of Contingencies and Crisis Management, v. 8, n. 2, pp. 81-92, 2000.

WORLD BANK. Drought Risk and Resilience Assessment Methodology: A Proactive Approach to Managing Drought Risk. Washington, DC: World Bank, 2025.