

ESTRATÉGIAS DE GESTÃO E MITIGAÇÃO DE PERDAS EM CANAIS DE TRANSPOSIÇÃO: ESTUDO DE CASO DO CINTURÃO DAS ÁGUAS DO CEARÁ

José Gildézio de Souza Maia¹

RESUMO – A gestão eficiente dos recursos hídricos em regiões semiáridas é fundamental para a segurança hídrica, dependendo diretamente da integridade de grandes sistemas de adução. Este estudo investigou as perdas de água por evaporação e vazamentos no Lote 1 do Cinturão das Águas do Ceará (CAC). A metodologia envolveu levantamento de campo quantitativo, com medição direta de vazão em drenos profundos e aplicação do método de Penman para estimar a taxa de evaporação. Os resultados de três meses revelaram perdas expressivas: 139.053,63 m³ por evaporação e 233.920,70 m³ por vazamentos, volumes que supririam o consumo diário de pelo menos 27.249 pessoas. Foram diagnosticadas falhas estruturais críticas, como trincas em juntas de retração e o fenômeno de *piping* no maciço dos diques, gerando riscos operacionais e custos anuais de até R\$ 443.513,65. Como estratégias de mitigação, propõem-se a manutenção corretiva com uso de *rockfill* para estabilização de taludes e a automação operacional para controle rigoroso dos níveis de água, reduzindo o espelho d'água excedente. A mitigação dessas perdas é vital para a sustentabilidade econômica, resiliência estrutural e governança hídrica regional.

Palavras-Chave – Monitoramento de canais, Perdas por infiltração, Gestão hídrica.

ABSTRACT – Efficient water resource management in semi-arid regions is essential for water security, directly depending on the integrity of large adduction systems. This study investigated water losses due to evaporation and leakage in Lot 1 of the Cinturão das Águas do Ceará (CAC). The methodology involved quantitative field surveys, with direct flow measurement in deep drains and the application of the Penman method to estimate evaporation rates. The three-month results revealed significant losses: 139,053.63 m³ through evaporation and 233,920.70 m³ due to leakage, volumes that could supply the daily consumption of at least 27,249 people. Critical structural failures were diagnosed, such as cracks in shrinkage joints and the piping phenomenon in the dike embankments, generating operational risks and annual costs of up to R\$ 443,513.65. Proposed mitigation strategies include corrective maintenance using rockfill for slope stabilization and operational automation for rigorous water level control, reducing the excess water surface. Mitigating these losses is vital for economic sustainability, structural resilience, and regional water Governance.

Key-words – Channel monitoring, Seepage losses, Water management.

1) Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, pós-graduado em Gerenciamento da Construção Civil pela Universidade Regional do Cariri - URCA, pós-graduado em Engenharia de Estruturas Hidráulicas pela Faculdade Unyleya, graduado em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Maurício de Nassau - Recife, graduado em Recursos Hídricos/Irrigação pelo Instituto Centro de Ensino Tecnológico - CENTEC. Mensurah Engenharia e Planejamento. Tabuleiro do Norte-CE, (85) 9 9749-1013, E-mail: gildeziomaia@hotmail.com.

1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de eventos climáticos extremos no semiárido brasileiro eleva a preocupação com a gestão sustentável dos recursos hídricos, sobretudo diante da crescente demanda por água potável e dos desafios da escassez, especialmente em regiões áridas e semiáridas. Sistemas de transposição, como o Cinturão das Águas do Ceará (CAC), são vitais para a segurança hídrica, interligando bacias para abastecimento humano e atividades econômicas. O CAC é parte integrante do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) e visa garantir o fornecimento de água para 93% do território estadual.

Contudo, canais abertos enfrentam perdas inerentes por evaporação e infiltração, que podem ser agravadas por falhas operacionais e patologias estruturais. Este trabalho analisa as perdas de água no Lote 01 do CAC, buscando diagnosticar causas, mensurar impactos financeiros e socioambientais, e propor soluções técnicas. O estudo justifica-se pela necessidade de reduzir prejuízos decorrentes de retrabalho e garantir a eficiência de grandes obras de engenharia hídrica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O Cinturão das Águas do Ceará (CAC)

O CAC foi proposto em 2009 para interligar bacias hidrográficas do Ceará, com um orçamento total previsto de R\$ 9 bilhões. O projeto utiliza canais de concreto, túneis e sifões para transportar água por gravidade. A manutenção e conservação dessas estruturas devem ser vistas como investimento a longo prazo para evitar interrupções no fornecimento.

2.2. Perdas de Água em Canais Revestidos

Estudos indicam que vazamentos, evaporação e infiltração são as principais causas de perdas em canais revestidos em concreto. Fatores como o tipo de solo, o clima local, a idade do revestimento e a qualidade do concreto influenciam diretamente essa eficiência. Solos colapsíveis ou com alta compressibilidade, como argilas moles, são propensos a causar deformações e recalques nas estruturas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo

O estudo de caso concentrou-se no Lote 01 do projeto Cinturão das Águas do Ceará (CAC), uma infraestrutura hídrica estratégica situada na região do Cariri, no Nordeste setentrional. Este lote específico estabelece o início do sistema adutor a partir da barragem de Jati (CE), onde ocorre a captação das águas provenientes do Eixo Norte do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), estendendo-se por uma trajetória de 38,75 km até o sítio Ipueiras, no município de Brejo Santo-CE

(Figura 1). O sistema é concebido para operar com fluxo 100% por gravidade e integra um complexo composto por estruturas de captação, canais abertos, sifões invertidos e obras de controle hidráulico.

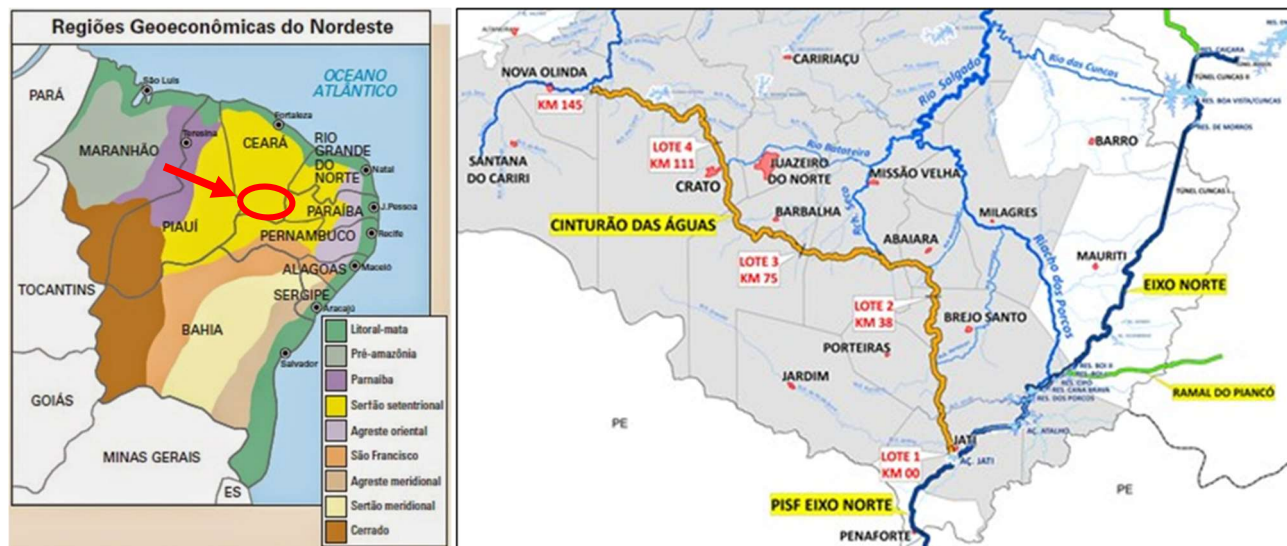


Figura 1 – Localização geográfica e contextualização regional da área de estudo: (a) localização do Cariri cearense no Nordeste Setentrional; (b) detalhamento do traçado do Lote 01 do CAC e sua interligação com o Eixo Norte do PISF. Fonte: SOHIDRA.

3.2. Procedimentos Metodológicos

A coleta de dados ocorreu entre março e maio de 2021, utilizando-se:

- Medição de Nível d'Água (NA): Obtida pela medição da borda livre (crista do canal até o nível da água) e cálculo por semelhança de triângulos, dada a inclinação de 1,5(H):1(V) dos taludes (Figura 2).



Figura 2 – Medição do talude (borda livre) para cálculo de N.A do canal.

- Vazão dos Drenos Profundos: medida in loco com recipientes aferidos e cronometragem das descargas nas saídas de drenagem.

- Estimativa de Evaporação: utilizou-se o método simplificado de Penman (Equação 1), com dados da estação meteorológica de Barbalha-CE.

$$E_{PEN} \approx 0,047 \cdot R_S \cdot (T + 9,5) - 2,4 \cdot \left(\frac{R_S}{R_A}\right)^2 + 0,09 \cdot (T + 20) \cdot \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (1)$$

Para determinar a eficiência operacional, aplicou-se a fórmula de Manning (Equação 2) para calcular o nível e espelho d'água mínimos necessários para a vazão de 10 m³/s.

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (2)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise de Perdas por Evaporação

A Tabela 1 resume as dimensões médias dos espelhos d'água monitorados em cada canal. O volume médio de perda foi de 46.351,21 m³/mês.

Tabela 1 - Dimensões médias e área do espelho d'água por canal

Canal	Extensão (m)	Nível d'água médio (m)	Largura média (m)	Área do espelho d'água (m²)
CANAL 01	487,00	2,38	12,13	5.905,17
CANAL 02	648,00	2,37	12,12	7.855,48
CANAL 03	2.600,00	2,42	12,27	31.893,23
CANAL 04	3.113,00	2,37	12,12	37.737,29
CANAL 05	2.035,00	2,21	11,63	23.658,97
CANAL 06	2.071,00	2,10	11,29	23.385,59
CANAL 07	5.288,00	2,07	11,21	59.292,45
CANAL 8.1	9.167,00	1,96	10,87	99.688,88
CANAL 8.2	2.303,00	1,96	10,87	25.044,56
CANAL 9.1	5.950,00	1,96	10,87	64.704,79
TOTAL	33.662,00	-	-	379.166,42

Comparando-se com a operação ideal, a perda excedente foi de 5,86% (30.809,76 m³/ano), causada pela manutenção de níveis de água acima do estritamente necessário para a vazão requerida.

4.2. Perdas por Vazamentos e Agentes Causadores

Identificaram-se 25 drenos ativos entre os 116 instalados. O volume total perdido por vazamento foi de 233.920,70 m³ no período, superando a perda por evaporação. O Canal 04 apresentou a situação mais crítica, com uma taxa de 2,89 m³ de perda por m² de área impermeabilizada.

Investigou-se que a geologia local (encostas rochosas) e a seção transversal mista (corte e aterro) foram determinantes. Cerca de 97% do volume perdido ocorreu em canais construídos nessas condições. Supõe-se que o atrito entre o concreto poroso (base) e as placas de revestimento, sob variações térmicas, fragilizou a geomembrana de PVC. Além disso, falhas nas juntas de retração situadas a 1,42 m de profundidade permitiram a infiltração quando o NA ultrapassava esse limite.

4.3. Impactos Estruturais e Socioambientais

As patologias evoluíram para danos severos:

- No âmbito estrutural, o diagnóstico realizado no Cinturão das Águas do Ceará (CAC) revelou patologias severas que comprometem a integridade da proteção mecânica e do sistema de impermeabilização. Foram identificadas com frequência trincas e fissuras no revestimento de concreto, localizadas predominantemente no fundo do canal e nas juntas de retração longitudinais situadas nos taludes (Figura 3). Em pontos críticos, como no Canal 4, essas aberturas atingiram dimensões alarmantes de até 3 cm de largura e 20 metros de extensão, facilitando a infiltração direta de água no maciço.



Figura 3 – Pontos de vazamento: (a) trinca no fundo do canal; (b) junta de retração trincada.

A relação entre o tipo de solo e as deformações observadas no CAC corrobora os achados de Abdellah et al. (2019) e Marzouk e Ghazala (2017), que demonstram como a compressibilidade de solos argilosos e siltosos influencia diretamente o recalque e a fissuração de revestimentos em concreto. Esse umedecimento descontrolado no corpo do dique desencadeou recalques significativos nas bermas, onde foram detectados buracos e fissuras em trechos adjacentes a vazamentos ativos. A evolução dessa instabilidade resultou no escorregamento de massa (movimento de solo saturado) para o interior da seção hidráulica, provocando o colapso da proteção mecânica em concreto e comprometendo a estanqueidade da geomembrana (Figura 4). Em pontos críticos do talude externo, diagnosticou-se o fenômeno de *piping* em sua etapa de 'continuação', caracterizado por surgências hídricas que indicam o desenvolvimento de túneis erosivos internos. Esse processo de erosão interna manifesta-se por um fluxo hídrico contínuo capaz de promover o carreamento progressivo de partículas de solo, o que fragiliza a base da estrutura e coloca em risco iminente a estabilidade global e a integridade física do dique. Embora a água expelida tenha se apresentado cristalina durante as inspeções, a persistência dessas forças

erosivas sem a devida contenção por estruturas de *rockfill* pode levar ao colapso total da seção, gerando danos socioambientais e financeiros vultuosos.



Figura 4 – Patologias geotécnicas e danos ao revestimento: (a) recalque na berma do canal; (b) escorregamento de solo para a seção hidráulica com comprometimento da proteção mecânica.

- No que tange aos impactos financeiros, o desperdício de água bruta representa um ônus direto à sustentabilidade econômica do projeto. Com base nos parâmetros da Resolução nº 67/ANA (2021), que estabelece as tarifas para o PISF, as perdas por vazamento mensuradas no Lote 01 geram prejuízos anuais significativos. O custo do desperdício foi estimado entre R\$ 247.020,26, quando aplicada a tarifa de disponibilidade (R\$ 0,264/m³), e R\$ 443.513,65, sob a ótica tarifa de consumo (R\$ 0,474/m³).

Embora os custos da evaporação excedente sejam considerados irrisórios perante o orçamento operacional total, o montante financeiro perdido por vazamentos é expressivo e poderia ser integralmente reinvestido em manutenção preventiva e melhorias estruturais, como o aprimoramento dos acessos às pontes transversais ao longo do canal.

- Os impactos socioambientais manifestam-se principalmente pela desestruturação das rotinas das comunidades circunvizinhas e potenciais riscos ecológicos. A descarga contínua e descontrolada de água pelas saídas dos drenos profundos propiciou a formação de cursos d'água artificiais, que resultaram em atoleiros e severos processos erosivos nos acessos a propriedades rurais adjacentes, prejudicando a mobilidade de produtores e o escoamento da produção local. Adicionalmente, as falhas de estanqueidade provocaram alagamentos em áreas de baixada, com represamento de volumes hídricos em terrenos próximos a residências e à faixa de domínio da rodovia BR-116, elevando o risco de acidentes e danos a infraestruturas de terceiros.

Do ponto de vista biótico, a criação desses leitos artificiais pode fragmentar ecossistemas e alterar processos ecológicos fundamentais, demandando atenção dos gestores para evitar danos à fauna e flora locais.

5. ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO EFICIENTES

5.1. Manutenção Corretiva

Para estabilizar taludes saturados e conter o *piping*, aplicou-se a técnica de *rockfill* — estrutura de filtros de rocha composta por camadas de diferentes granulometrias (areia, brita e rochas), utilizada para estabilizar o talude e permitir o escoamento da água sem perda de solo. Esta estrutura, composta por camadas de areia, brita e rocha, permite o escoamento da água infiltrada sem o carreamento de partículas de solo, garantindo a integridade do dique (Figura 5).



Figura 5 – Execução do *rockfill*: (a) aplicação de areia e brita; (b) aplicação de rochas.

O processo de manutenção corretiva do sistema de estanqueidade nos trechos críticos do canal foi iniciado com a demolição criteriosa das placas de concreto que atuavam como proteção mecânica. Esta etapa foi executada obrigatoriamente com o uso de ferramentas manuais, visando evitar danos acidentais à geomembrana subjacente e garantir que a identificação de furos e rasgos pré-existent não fosse mascarada pela intervenção. Uma vez exposta a área de vazamento, o reparo da impermeabilização prosseguiu com a remoção completa da seção da manta comprometida.

No local, foi instalada uma nova faixa de geomembrana de PVC (Figura 6), fixada através de soldagem química para assegurar a vedação total. A finalização do serviço envolveu a recomposição do revestimento em concreto não estrutural, disposta em placas de 3,50 metros de largura.



Figura 6 – Manutenção corretiva: (a) demolição do concreto; (b) reparo da geomembrana de PVC.

5.2. Automação e Monitoramento

A operação eficiente do sistema adutor tem como premissa fundamental a manutenção rigorosa dos níveis de água (N.A.) em estrita observância aos valores calculados para a vazão requerida, utilizando-se a fórmula de Manning para determinar a seção hidráulica ideal. Este procedimento é vital para evitar a formação de espelhos d'água excedentes, o que minimiza as perdas por evaporação adicional que, no monitoramento do CAC, representaram um acréscimo de 5,86% sobre o volume mínimo necessário.

Para alcançar esse nível de precisão e garantir a segurança operacional, justifica-se a modernização da infraestrutura através da implementação de sistemas de automação SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) e o emprego de sensores baseados em Internet das Coisas (IoT). Tais tecnologias possibilitam o monitoramento de níveis e vazões em tempo real, permitindo o controle remoto e automatizado das comportas situadas nos emboques dos sifões invertidos, superando as limitações da operação manual e assistida observada durante o período inicial de testes.

A recomendação pelo uso de sistemas SCADA e sensores IoT alinha-se às tendências globais de digitalização da irrigação para enfrentamento da escassez, conforme discutido por Rahman et al. (2020) e Buijs et al. (2021), visando uma tomada de decisão ágil frente a cenários de risco operacional. Complementarmente, para um monitoramento estrutural avançado, a aplicação de métodos de geofísica por eletrorresistividade demonstrou ser uma ferramenta altamente eficaz na gestão de perdas. Esta técnica permite a detecção de infiltrações e fluxos preferenciais de água que ocorrem de forma 'invisível' sob o revestimento de concreto e a geomembrana, onde não há sinais superficiais aparentes. A geração de perfis hidrogeológicos (Figura 7) através deste método fornece aos gestores indicadores precisos para orientar novas inspeções e reparos cirúrgicos na impermeabilização, sendo essencial para mitigar problemas crônicos e garantir a longevidade das estruturas de transporte hídrico.

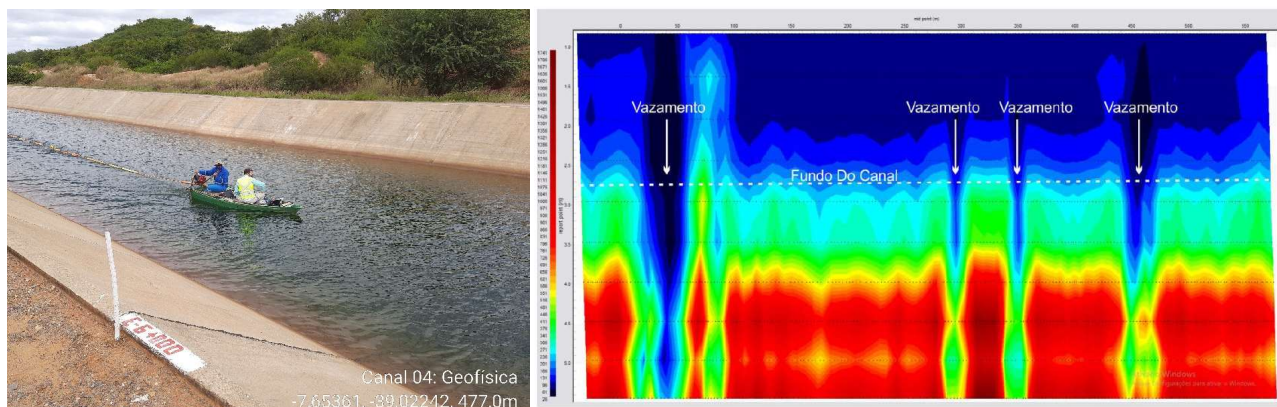


Figura 7 – Monitoramento estrutural: (a) execução de inspeção por eletrorresistividade; (b) perfil hidrogeológico resultante evidenciando zonas de percolação hídrica sob a seção hidráulica do canal.

6. CONCLUSÃO

A análise do Lote 01 do Cinturão das Águas do Ceará (CAC) demonstra que a eficiência hídrica de grandes sistemas de adução no semiárido é comprometida por falhas construtivas e operacionais. As perdas por vazamentos (233.920,70 m³ em três meses) superaram quantitativamente a evaporação (139.053,63 m³). O fenômeno *piping* identificado não representa apenas uma perda volumétrica, mas um risco de desastre tecnológico, onde a erosão interna pode evoluir para o colapso total do dique, exigindo estratégias de mitigação resilientes como o rockfill.

O impacto financeiro anual chega a R\$ 443.513,65, representando um volume hídrico que supriria o consumo diário de 27.249 pessoas.

A mitigação de perdas no CAC atende à necessidade de governança holística sugerida por Allan et al. (2018), onde a eficiência técnica é integrada à responsabilidade socioeconômica no manejo de bacias sob estresse hídrico, onde a redução dessas perdas é imperativa para a governança sustentável e a segurança hídrica regional. Recomenda-se a implementação de tecnologias de automação (SCADA e IoT) para o controle rigoroso dos níveis operacionais, reduzindo a evaporação excedente. Adicionalmente, o uso de monitoramento geofísico por eletrorresistividade e intervenções corretivas com *rockfill* são fundamentais para garantir a resiliência estrutural e a estabilidade dos diques. Tais medidas asseguram a viabilidade do empreendimento, integrando a eficiência técnica ao desenvolvimento socioeconômico sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABDELLAH, M. et al. (2019). Experimental analysis of concrete-lined irrigation canals on clayey soil. *Irrigation and Drainage Systems Engineering*, 8(1), pp. 1-11.
- ALLAN, J. A. et al. (2018). “Water availability: from research to policy and practice”. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 376(2121)
- BUIJS, F. A. et al. (2021). “A Critical Review of Internet of Things Applications in Water Management: Opportunities and Challenges”. *Water* 13(1), pp. 1-28
- CASTRO NETO, P. et al. (2020). Perdas de água em sistemas de irrigação: causas e formas de redução. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 14(2), pp. 265-285.
- CHOW, V. T. et al. (1988). *Open - Channel Hydraulics*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill.
- LUNA, H. A. (2013). *Manutenção em Canais de Irrigação Revestidos em Concreto*. Dissertação (Mestrado). UFPE, Recife-PE.
- MARZOUK, M.; GHAZALA, M. (2017). “Performance of concrete-lined irrigation canals in different soils”. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 143(4)
- RAHMAN, A. et al. (2020). “Automation and Digitalization of Irrigation Systems: Potential, Challenges, and Policy Implications”. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 146(8), pp. 1-17.
- SOHIDRA. (2020). Cinturão das Águas do Ceará – CAC. Disponível em: <https://www.sohidra.ce.gov.br/>.
- VALIANTZAS, J. D. (2006). Simplified Versions for the Penman Evaporation Equation Using Routine Weather Data. *Journal of Hydrology*, 331, pp. 690-702.