



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CAMPUS PATOS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

ANA KERMA ARAUJO GOMES DE SOUSA

**INFERÊNCIA INDIRETA DE ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS DO
SEMIÁRIDO PARAIBANO POR CURVAS COTA-VOLUME E ANÁLISE
MULTIESCALA NO PLANO COMPLEXIDADE-ENTROPIA.**

PATOS-PB

2026

ANA KERMA ARAUJO GOMES DE SOUSA

**INFERÊNCIA INDIRETA DE ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS DO
SEMIÁRIDO PARAIBANO POR CURVAS COTA-VOLUME E ANÁLISE
MULTIESCALA NO PLANO COMPLEXIDADE-ENTROPIA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal da Paraíba – Campus Patos, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof. Dr. Fernando Henrique Antunes de Araújo.

PATOS-PB

2026

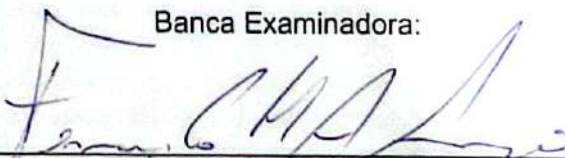
ANA KERMA ARAUJO GOMES DE SOUSA

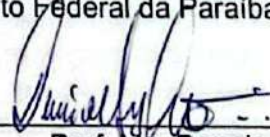
**INFERÊNCIA INDIRETA DE ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS DO
SEMIÁRIDO PARAIBANO POR CURVAS COTA-VOLUME E ANÁLISE
MULTIESCALA NO PLANO COMPLEXIDADE-ENTROPIA**

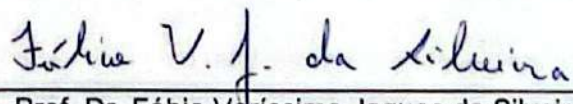
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso
de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal
da Paraíba – Campus Patos, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Data de aprovação: 17/06/2026

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Fernando Henrique Antunes de Araujo
Instituto Federal da Paraíba – IFPB – Campus Patos


Prof. Msc. Dennis Oliveira Galdino
Instituto Federal da Paraíba – IFPB – Campus Patos


Prof. Dr. Fábio Veríssimo Jaques da Silveira
Instituto Federal da Paraíba – IFPB – Campus João Pessoa

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CAMPUS PATOS/IFPB

S725i Sousa, Ana Kerma Araujo Gomes de.

Inferência indireta de assoreamento em reservatórios do semiárido paraibano por curvas cota-volume e análise multiescala no plano complexidade-entropia / Ana Kerma Araujo Gomes de Sousa. - Patos, 2026.

36 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)-Instituto Federal da Paraíba, Campus Patos-PB, 2026.

Orientador(a): Prof. Dr. Fernando Henrique Antunes de Araújo.

1. Assoreamento de reservatórios 2. Curva cota-volume 3. Entropia de permutação I. Título II. Araújo, Fernando Henrique Antunes de III. Instituto Federal da Paraíba.

CDU –627.157

Dedico este trabalho aos meus pais, Jacileide e Flávio (in memoriam), que enfrentaram as mais severas batalhas com coragem, dignidade e resiliência. Se hoje alcancei esta conquista, é porque sou fruto da força que sempre demonstraram diante das adversidades.

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu Pai Celestial, por me dar o dom da vida e me guiar para vivê-la com propósito e aprendizado.

Ao meu pai, Flávio Gomes (in memoriam), que me mostrou que, mesmo diante da escuridão, o conhecimento é sempre a luz que nos guia. Sua memória permanece viva em cada conquista alcançada.

À minha mãe, Jacileide, que me ensinou que somente o esforço constrói caminhos. Sua garra e perseverança são minhas forças e alicerces diários. desejo ser ao menos uma fração da mulher incrível que você é.

Aos meus irmãos, Hiago, Kleber e Bárbara, por sempre estarem na torcida, vibrando a cada passo e celebrando cada conquista como se fosse deles. O apoio e o carinho de vocês tornaram esta caminhada mais leve e significativa.

Ao meu orientador, Fernando Henrique, pela confiança, pelos ensinamentos e por sempre me direcionar e apoiar em minhas escolhas acadêmicas. Sua orientação foi o pilar para a realização deste trabalho.

Ao Instituto Federal da Paraíba (IFPB), pela formação acadêmica, pelas oportunidades proporcionadas e por contribuir de maneira significativa para meu crescimento pessoal e profissional.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta trajetória, meu mais sincero agradecimento. Esta conquista não é apenas minha, mas também de todos aqueles que caminharam ao meu lado e contribuíram para que este sonho se tornasse realidade.

O futuro tem vários nomes. Para os fracos, é o
inalcançável. Para os valentes, é a
oportunidade.

Victor Hugo, Os Miseráveis.

RESUMO

O assoreamento reduz progressivamente a capacidade útil de reservatórios e compromete a segurança hídrica, o abastecimento humano, a irrigação e a operação hidráulica. A mensuração direta desse processo, contudo, costuma depender de levantamentos batimétricos repetidos, eco-sondagens, modelagem hidrossedimentológica e campanhas de campo de alto custo. Este estudo propõe uma estratégia indireta para investigar mudanças estruturais e dinâmicas em cinco reservatórios da Paraíba com cobertura temporal comparável entre 2009 e 2026: Engenheiro Arcoverde, Jatobá I, Lagoa do Arroz, Mãe d'Água e Sumé. O núcleo espacial analisado é predominantemente sertanejo, com quatro reservatórios situados no sertão paraibano e um em zona de transição com o Cariri. A metodologia combinou quatro blocos: (i) reconstrução monotônica da relação volume-cota, $V(H)$, em três períodos fixos e no período completo; (ii) cálculo de diferenças médias de volume para cotas equivalentes, interpretadas como indícios indiretos de perda de capacidade; (iii) estimativa da entropia de permutação e da complexidade estatística no plano complexidade-entropia (CECP) a partir das séries de incrementos diários de volume; e (iv) análise em janelas deslizantes de 120 observações (4 meses) com passo de 7 observações (1 semana), para descrever a evolução temporal da distância ao ponto (1,0), que chamaremos de eficiência $[E]$ da combinação de várias variáveis implícitas no processo de assoreamento e manejo dos mananciais. Os resultados mostraram deslocamentos negativos de $V(H)$, especialmente em Mãe d'Água, Engenheiro Arcoverde e Lagoa do Arroz, sugerindo redução indireta da capacidade útil em períodos recentes. No CECP fixo, os reservatórios ocuparam regiões de alta entropia e baixa a moderada complexidade, indicando dinâmicas fortemente influenciadas por múltiplos forçantes, porém ainda portadoras de estrutura ordinal. Na análise móvel, a média e o desvio padrão da distância ao ponto (1,0) revelaram contrastes entre regularidade hidrológico-operacional e mobilidade temporal dessa estrutura. Sumé apresentou o padrão mais compatível com robustez funcional, ao combinar elevada distância no período completo, pequena alteração estrutural em $V(H)$ e recuperação parcial da eficiência geométrica no período recente. Mãe d'Água, por outro lado, reuniu a evidência mais forte de perda estrutural de capacidade e tendência de aproximação progressiva ao vértice (1,0), o que sugere simplificação da dinâmica ordinal ao longo do tempo, ou seja, menor instabilidade fenomenológica generalizada. A distância ao ponto (1,0) foi usada apenas como descritor geométrico complementar da posição no plano, sem interpretação causal isolada. Até onde a literatura primária consultada permitiu verificar, não identificamos aplicações do CECP especificamente à inferência indireta de assoreamento em reservatórios a partir de séries cota-volume, o que confere caráter metodológico original ao estudo. A principal contribuição do trabalho é mostrar que deslocamentos estruturais em $V(H)$, quantificadores do CECP e estatísticas de janelas deslizantes fornecem uma leitura complementar da dinâmica de reservatórios em contextos com restrição de dados experimentais.

Palavras-chave: Assoreamento; reservatórios; curva cota-volume; entropia de permutação; complexidade estatística; semiárido da Paraíba.

ABSTRACT

Sedimentation progressively reduces the effective storage capacity of reservoirs and compromises water security, human water supply, irrigation, and hydraulic operations. Direct measurement of this process, however, generally depends on repeated bathymetric surveys, echo sounding, hydrosedimentological modeling, and costly field campaigns. This study proposes an indirect approach to investigate structural and dynamic changes in five reservoirs in Paraíba, Brazil, with comparable temporal coverage between 2009 and 2026: Engenheiro Arcoverde, Jatobá I, Lagoa do Arroz, Mãe d'Água, and Sumé. The analyzed spatial core is predominantly located within the Sertão region, with four reservoirs situated in the Paraíba Sertão and one in a transition zone with the Cariri region. The methodology combined four components: (i) monotonic reconstruction of the storage-elevation relationship, $V(H)$, for three fixed periods and for the complete period; (ii) calculation of mean storage differences for equivalent water levels, interpreted as indirect evidence of storage capacity loss; (iii) estimation of permutation entropy and statistical complexity within the Complexity–Entropy Causality Plane (CECP) using daily storage increment series; and (iv) sliding-window analysis using windows of 120 observations and a step size of 7 observations to describe the temporal evolution of the distance to the point (1,0). The results revealed negative shifts in $V(H)$, particularly for Mãe d'Água, Engenheiro Arcoverde, and Lagoa do Arroz, suggesting an indirect reduction in effective storage capacity during recent periods. In the fixed CECP analysis, the reservoirs occupied regions characterized by high entropy and low-to-moderate complexity, indicating dynamics strongly influenced by multiple forcing factors while still preserving ordinal structure. In the moving-window analysis, the mean and standard deviation of the distance to the point (1,0) revealed contrasts between hydrological-operational regularity and the temporal mobility of this structure. Sumé exhibited the pattern most consistent with functional robustness, combining a high distance value over the complete period, minor structural changes in $V(H)$, and partial recovery of geometric efficiency during the most recent period. In contrast, Mãe d'Água presented the strongest evidence of structural storage-capacity loss and a trend of progressive convergence toward the vertex (1,0), suggesting a simplification of ordinal dynamics over time. The distance to the point (1,0) was employed solely as a complementary geometric descriptor of position within the plane and was not interpreted as an isolated causal indicator. To the best of our knowledge, based on the primary literature reviewed, no previous studies have applied the CECP specifically to the indirect inference of reservoir sedimentation from storage-elevation time series, which confers methodological originality to this research. The main contribution of this work is to demonstrate that structural shifts in $V(H)$, CECP quantifiers, and sliding-window statistics provide a complementary perspective on reservoir dynamics in contexts where experimental data are limited.

Keywords: Sedimentation; reservoirs; storage-elevation curve; permutation entropy; statistical complexity; semi-arid region.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização geográfica da área de estudo em escalas encadeadas.....	19
Figura 2 - Contexto hipsométrico da Paraíba e localização dos municípios associados aos cinco mananciais analisados.....	19
Figura 3 - Séries temporais de volume armazenado e cota d'água para os cinco reservatórios selecionados.....	23
Figura 4 - Curvas monotônicas cota-volume, $V(H)$, estimadas para os cinco reservatórios nos períodos 2009-2014, 2015-2019 e 2020-2026.....	23
Figura 5 - Diferenças de volume para cotas equivalentes entre períodos, $\Delta V(H)$, nos cinco reservatórios.....	24
Figura 6 - Plano complexidade-entropia para os incrementos diários de volume nos cinco reservatórios.....	28
Figura 7 - Evolução temporal da eficiência geométrica em janelas deslizantes para os cinco reservatórios. Localização geográfica da área de estudo em escalas encadeadas.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Diferenças médias de volume, Mean ΔV (hm ³), entre períodos para cotas equivalentes nos cinco reservatórios analisados.....	24
Tabela 2 - Valores de entropia, complexidade e distância ao ponto (1,0) [E] para os cinco reservatórios nos três períodos fixos e no período completo.....	28
Tabela 3- Número de janelas válidas, média e desvio padrão da eficiência geométrica por reservatório e período.....	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DESENVOLVIMENTO	15
2.1 Base de dados e seleção dos reservatórios.....	15
2.2 Contexto espacial do estudo.....	15
3 METODOLOGIA	17
3.1 Janela temporal, limpeza e padronização.....	17
3.2 Reconstrução da curva $V(H)$	17
3.3 Séries derivadas e CECF.....	22
3.4 CECF em janelas deslizantes.....	26
4 DISCUSSÃO E RESULTADOS	29
4.1 Mudanças estruturais na relação cota-volume.....	29
4.2 Assinaturas dinâmicas no CECF por período fixo.....	30
4.3 Estabilidade temporal nas janelas deslizantes.....	31
4.4 Integração entre estrutura e dinâmica.....	32
4.5 Diálogo com a literatura e contribuição do estudo.....	33
CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
REFERÊNCIAS	13

1 INTRODUÇÃO

O assoreamento de reservatórios é um processo cumulativo de grande relevância para a engenharia ambiental e para a gestão de recursos hídricos. Ao reduzir o volume útil, ele afeta o abastecimento humano, a irrigação, a segurança operacional, o controle de cheias e a regularização de vazões. Em regiões semiáridas, onde a intermitência pluviométrica e a forte variabilidade hidrológica já impõem limites ao armazenamento, a perda de capacidade pode ter efeitos particularmente severos. Estudos experimentais e batimétricos mostram que a sedimentação em reservatórios é um problema global e pode atingir magnitudes relevantes em intervalos de tempo relativamente curtos, sobretudo em sistemas sujeitos a elevada produção de sedimentos, perturbações hidrológicas e mudanças intensas de uso e cobertura da terra (Yan et al., 2018; Endalew e Mulu, 2022; Tessema, Zimale e Kebedew, 2024; Koffi et al., 2025).

Na literatura de referência, a inferência direta sobre assoreamento costuma ser sustentada por bases mais completas que uma série operacional de armazenamento. Entre as abordagens mais usuais estão levantamentos batimétricos, ecobatímetros mono ou multifeixe, modelos de eficiência de retenção, levantamentos topográficos, amostragem de sedimentos, análise de área inundada e modelagem hidrossedimentológica. Furnans e Austin (2008), por exemplo, mostram como levantamentos hidrográficos sucessivos permitem estimar perda volumétrica ao longo do tempo. Yan et al. (2018) quantificaram a sedimentação do reservatório de Zippingpu com eco-sondagem multifeixe e análise geomorfológica após um terremoto. Endalew e Mulu (2022) avaliaram sedimentação e vida útil de um reservatório etíope com batimetria e superfície TIN. Tessema, Zimale e Kebedew (2024) integraram batimetria, SIG e produção de sedimentos para demonstrar redução expressiva de capacidade no reservatório de Angereb. Koffi et al. (2025), por sua vez, combinaram medições de campo e modelagem hidrossedimentológica para estimar sedimentação e eficiência de retenção em ambiente tropical. Em conjunto, esses estudos deixam claro que a inferência direta sobre perda de capacidade é mais robusta quando acompanhada por variáveis geométricas, topográficas e sedimentológicas.

Entretanto, em contextos de monitoramento rotineiro, séries temporais de cota e volume tendem a ser mais frequentes, longas e acessíveis do que levantamentos batimétricos multitemporais. Surge, então, uma lacuna metodológica: como extrair informação fisicamente consistente sobre mudança estrutural do reservatório quando não se dispõe de levantamentos diretos da geometria submersa? Este artigo enfrenta essa lacuna propondo uma estratégia indireta baseada em duas camadas analíticas complementares. A primeira camada é geométrica, via reconstrução da relação volume-cota $V(H)$. A segunda é dinâmica, via quantificadores de teoria da informação no plano complexidade-entropia.

A entropia de permutação, introduzida por Bandt e Pompe (2002), e a complexidade estatística no contexto do CECF, conforme Rosso et al. (2007), são ferramentas particularmente úteis para séries temporais reais por preservarem causalidade temporal, serem robustas à monotonicidade e terem custo computacional relativamente baixo. Revisões e aplicações posteriores destacaram sua utilidade em sistemas complexos, inclusive em hidrologia (Zanin et al., 2012; Mihailović, 2025). Suriano, Caram e Rosso (2024), por exemplo, mostraram que séries diárias de vazão de rios argentinos podem ser classificadas por entropia e complexidade, com efeitos associados inclusive à operação de barragens. Em econofísica, Araujo et al. (2019), Araujo et al. (2020) e Fernandes e Araujo (2020) exploraram a geometria do CECF e a distância ao ponto (1,0) como descritores da posição relativa das séries no plano.

Apesar da expansão do uso do CECF em hidrologia e em sistemas complexos, a busca dirigida realizada nesta pesquisa em fontes primárias e revisões recentes não identificou aplicações específicas do CECF à inferência indireta de assoreamento em reservatórios a partir da combinação entre séries operacionais de volume e deslocamentos temporais da curva cota-volume. Esse ponto deve ser formulado com cautela: não se trata de afirmar ausência absoluta na literatura mundial, mas, sim, de registrar que, até onde a literatura consultada permitiu verificar, a articulação entre CECF, reconstrução de $V(H)$ e janelas deslizantes para inferir perda de capacidade em reservatórios ainda não constitui uma linha consolidada. Esse é, portanto, o principal elemento de originalidade metodológica deste estudo.

Assim, o objetivo do artigo é avaliar se a combinação entre deslocamentos temporais da curva $V(H)$, quantificadores no CECF e estatísticas em janelas deslizantes permite caracterizar, de modo indireto, mudanças compatíveis com perda de capacidade útil em reservatórios do semiárido paraibano. Em termos de física estatística, a questão central é se mudanças geométricas da relação armazenamento-nível e mudanças na organização ordinal dos incrementos temporais capturam dimensões distintas, porém complementares, do mesmo sistema hidrológico.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Base de dados e seleção dos reservatórios

A base empírica foi composta por séries temporais de volume armazenado e cota d'água obtidas no sistema estadual de monitoramento de açudes da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), com consulta em 2026 (AESA, 2026). Foram avaliadas cobertura temporal, completude das séries e possibilidade de comparação entre faixas de cota nos períodos definidos. Embora a base total disponibilizada pela AESA incluísse 10 reservatórios, apenas cinco permitiram aplicação homogênea da metodologia completa, com três períodos comparáveis e faixa de cota compartilhada suficiente: Engenheiro Arcoverde, Jatobá I, Lagoa do Arroz, Mãe d'Água e Sumé, constituindo, portanto, um recorte de mananciais importante do semiárido paraibano.

Esses cinco mananciais foram escolhidos porque sustentam, de forma simultânea, três exigências metodológicas do artigo: séries suficientemente longas para a reconstrução da curva $V(H)$, interseção hidrométrica mínima entre períodos para o cálculo de $Mean \Delta V$ e número de observações suficiente para quantificadores de informação calculados tanto no período completo quanto em subperíodos. O recorte final, portanto, não é apenas espacial, mas também estatístico-operacional.

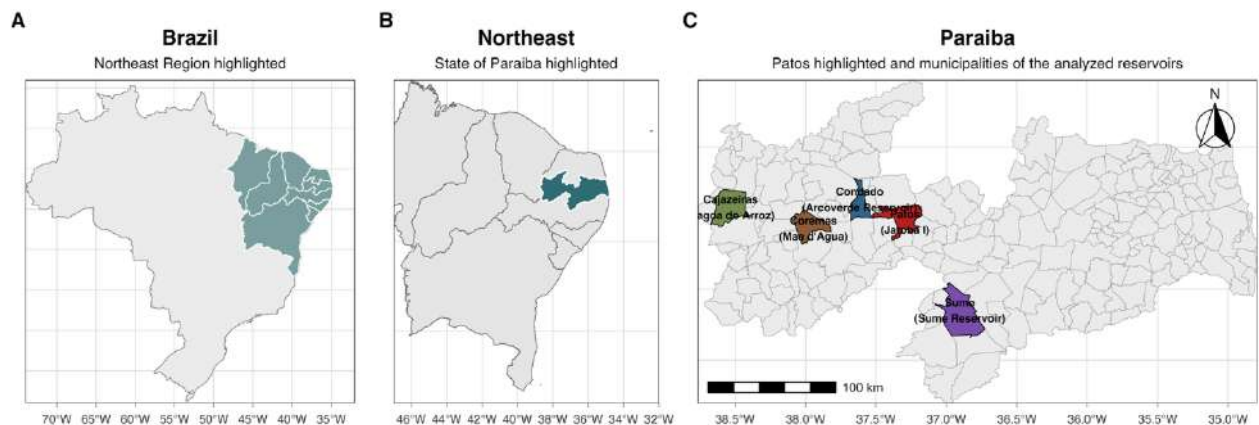
2.3 Contexto espacial do estudo

Os municípios associados aos mananciais selecionados foram identificados e destacados na base cartográfica produzida para o artigo. O Açude Engenheiro Arcoverde localiza-se em Condado; o Açude Jatobá I, em Patos; a Barragem Lagoa do Arroz, em Cajazeiras; o reservatório Mãe d'Água, em Coremas; e o Açude Sumé, no município de Sumé. A leitura conjunta desses pontos mostra uma forte concentração espacial no sertão da Paraíba: Condado, Patos, Cajazeiras e Coremas inserem-se diretamente nesse domínio, enquanto Sumé ocupa uma área de transição com o Cariri. Assim, o núcleo analítico do artigo representa predominantemente reservatórios sertanejos.

A Figura 1 situa o estudo em três escalas encadeadas: Brasil, Nordeste e Paraíba. Nos painéis nacionais e regionais, a figura posiciona o recorte empírico no semiárido nordestino. No painel estadual, Patos permanece em destaque por sua centralidade territorial, mas a mesma composição cartográfica também identifica os demais municípios associados aos cinco mananciais. A Figura 2 complementa esse enquadramento ao apresentar o relevo da Paraíba com a localização dos municípios sobre uma base hipsométrica. Embora este artigo não modele explicitamente produção de sedimentos em função da declividade, a presença do relevo é relevante

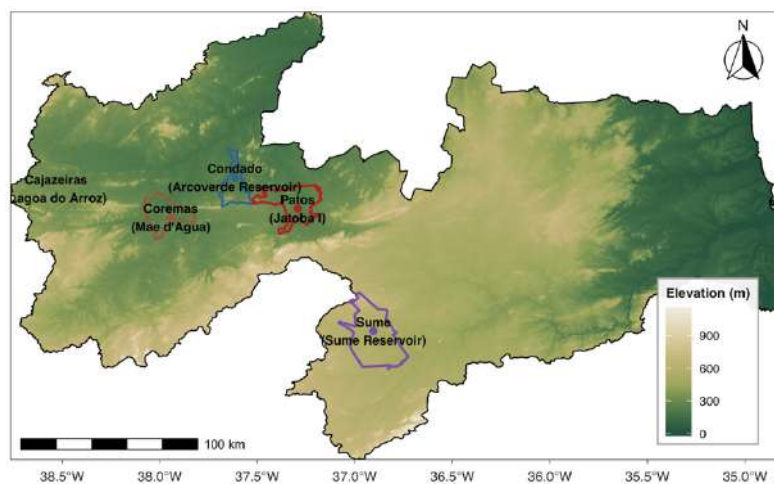
para a seção de dados porque reforça o caráter físico do problema e ajuda a contextualizar a heterogeneidade geomorfológica do estado.

Figura 1: Localização geográfica da área de estudo em escalas encadeadas. Os painéis A-C mostram a posição da Paraíba no Brasil e no Nordeste, bem como a localização dos municípios associados aos cinco mananciais selecionados: Condado, Patos, Cajazeiras, Coremas e Sumé.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2026.

Figura 2: Contexto hipsométrico da Paraíba e localização dos municípios associados aos cinco mananciais analisados. A base de relevo reforça o enquadramento geomorfológico do estudo e evidencia o predomínio espacial do sertão paraibano no recorte empírico.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2026.

3 METODOLOGIA

3.1 Janela temporal, limpeza e padronização

Os períodos fixos adotados foram 2009–2014, 2015–2019 e 2020–2026, além do período completo 2009–2026. A adoção de janelas fixas, em vez de simples tercis observacionais, melhora a interpretação hidrológica e permite associar os resultados a fases distintas da série histórica, sem misturar regimes operacionais muito diferentes.

Foram excluídas observações sem data, sem cota ou sem volume, bem como registros com cota menor ou igual a zero e volume menor ou igual a zero. Em seguida, para cada reservatório, aplicou-se um corte robusto nos percentis 1% e 99% da cota, com o objetivo de remover extremos claramente espúrios sem impor um filtro temporal artificial aos saltos observados. Essa decisão foi importante para preservar a variabilidade operacional e hidrológica efetivamente registrada, inclusive oscilações abruptas potencialmente reais.

3.2 Reconstrução da curva $V(H)$

A relação $V(H)$ representa o volume armazenado V em função da cota H . Como os pares cota-volume observados apresentam ruído e discretização irregular, a curva foi reconstruída por período de forma empírica. Primeiro, as cotas foram agregadas em classes finas; em seguida, calculou-se a mediana do volume em cada classe. Por fim, aplicou-se regressão isotônica para impor monotonicidade não decrescente à curva, respeitando a restrição física de que, para um mesmo reservatório e uma mesma curva operacional de referência, cotas maiores não devem corresponder a volumes menores.

Formalmente, para cada reservatório r e período p , considerou-se o conjunto de observações válidas $\{(H_i, V_i)\}_{i=1}^{n_{r,p}}$, em que H_i é a cota e V_i é o volume correspondente. As cotas foram discretizadas em classes h_j de amplitude fina, definindo subconjuntos locais de observações com níveis hidrométricos próximos. Para cada classe h_j , estimou-se um volume representativo pela mediana condicional:

$$\tilde{V}(h_j) = \text{median}\{V_i : H_i \in h_j\}$$

Esse passo reduz a influência de dispersões locais e de flutuações operacionais de alta frequência. Em seguida, a sequência $\{(h_j, \tilde{V}(h_j))\}$ foi ordenada por h_j crescente e submetida à regressão isotônica, produzindo uma curva monotônica não decrescente $V_r^{(p)}(H)$, tal que:

$$V_r^{(p)}(H_{j+1}) \geq V_r^{(p)}(H_j), \text{ se } H_{j+1} > H_j$$

Essa restrição é fisicamente coerente com a geometria de armazenamento. A curva final pode ser interpretada como uma reconstrução empírica regularizada da relação cota-volume observada no período p . Essa reconstrução não substitui curvas cota-volume oficiais obtidas por batimetria, mas fornece um estimador consistente da relação observada em cada janela temporal.

A comparação entre períodos foi feita apenas no intervalo comum de cotas. Seja $I_{ab} = [H_{min}^{ab}, H_{max}^{ab}]$ a interseção entre os domínios de cota de dois períodos a e b . Para cada cota H pertencente a essa interseção, foi calculada a diferença:

$$\Delta V(H) = V_b(H) - V_a(H)$$

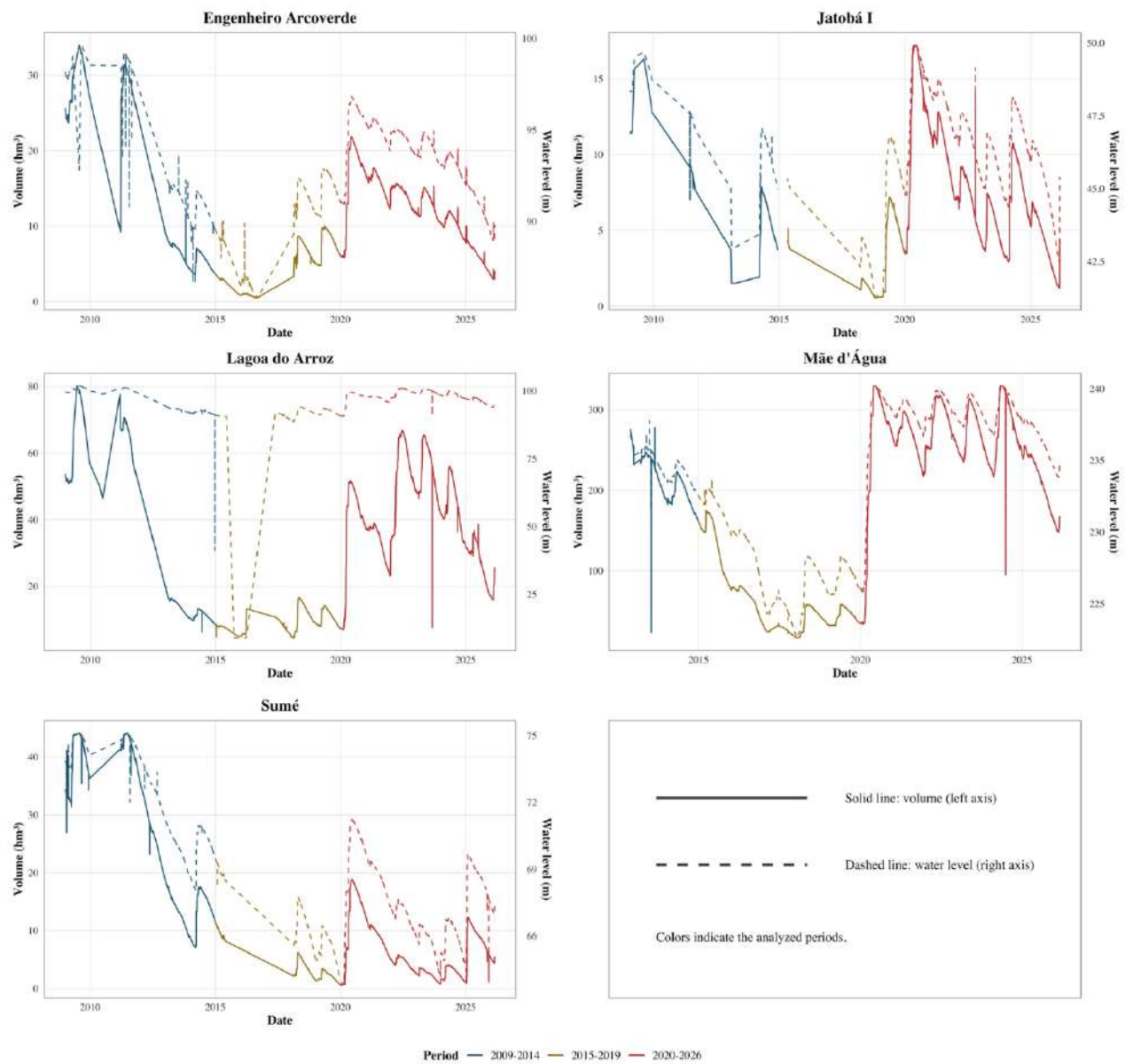
em que $V_a(H)$ e $V_b(H)$ são as curvas monotônicas estimadas para dois períodos distintos. Quando $\Delta V(H) < 0$, o período mais recente armazena menos água para a mesma cota, o que sugere indiretamente perda de capacidade útil compatível com assoreamento.

Como estatística-síntese, foi utilizada a média da diferença no intervalo comum:

$$Mean \Delta V = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \Delta V(H_k)$$

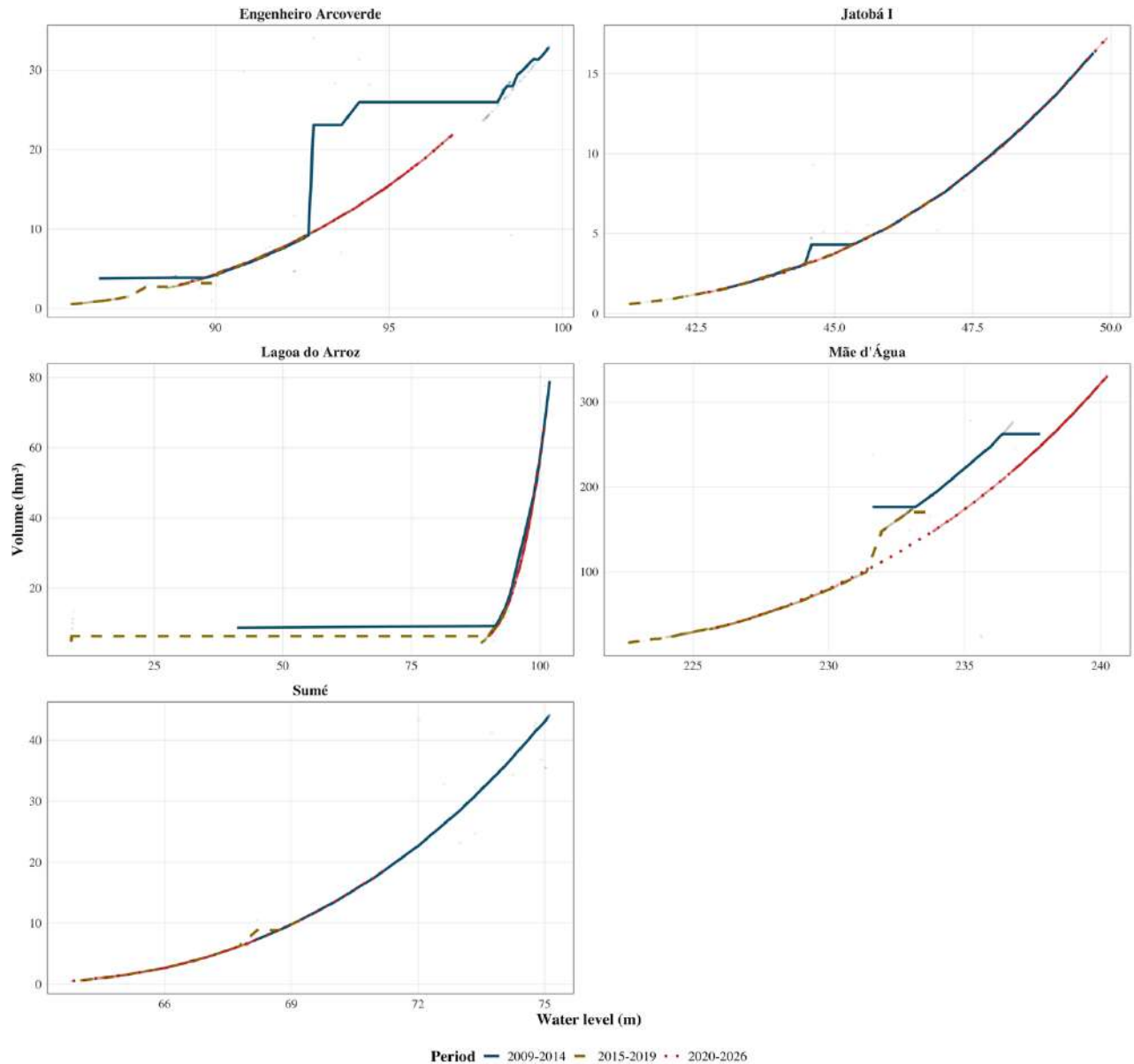
em que $\{H_k\}_{k=1}^m$ é a malha de cotas compartilhada pelos dois períodos comparados. Valores negativos de $Mean \Delta V$ indicam, em média, menor armazenamento para cotas equivalentes no período mais recente.

Figura 3: Séries temporais de volume armazenado e cota d'água para os cinco reservatórios selecionados. Em cada painel, a linha contínua representa o volume no eixo vertical esquerdo, enquanto a linha tracejada representa a cota no eixo vertical direito. As cores indicam os três períodos fixos do estudo



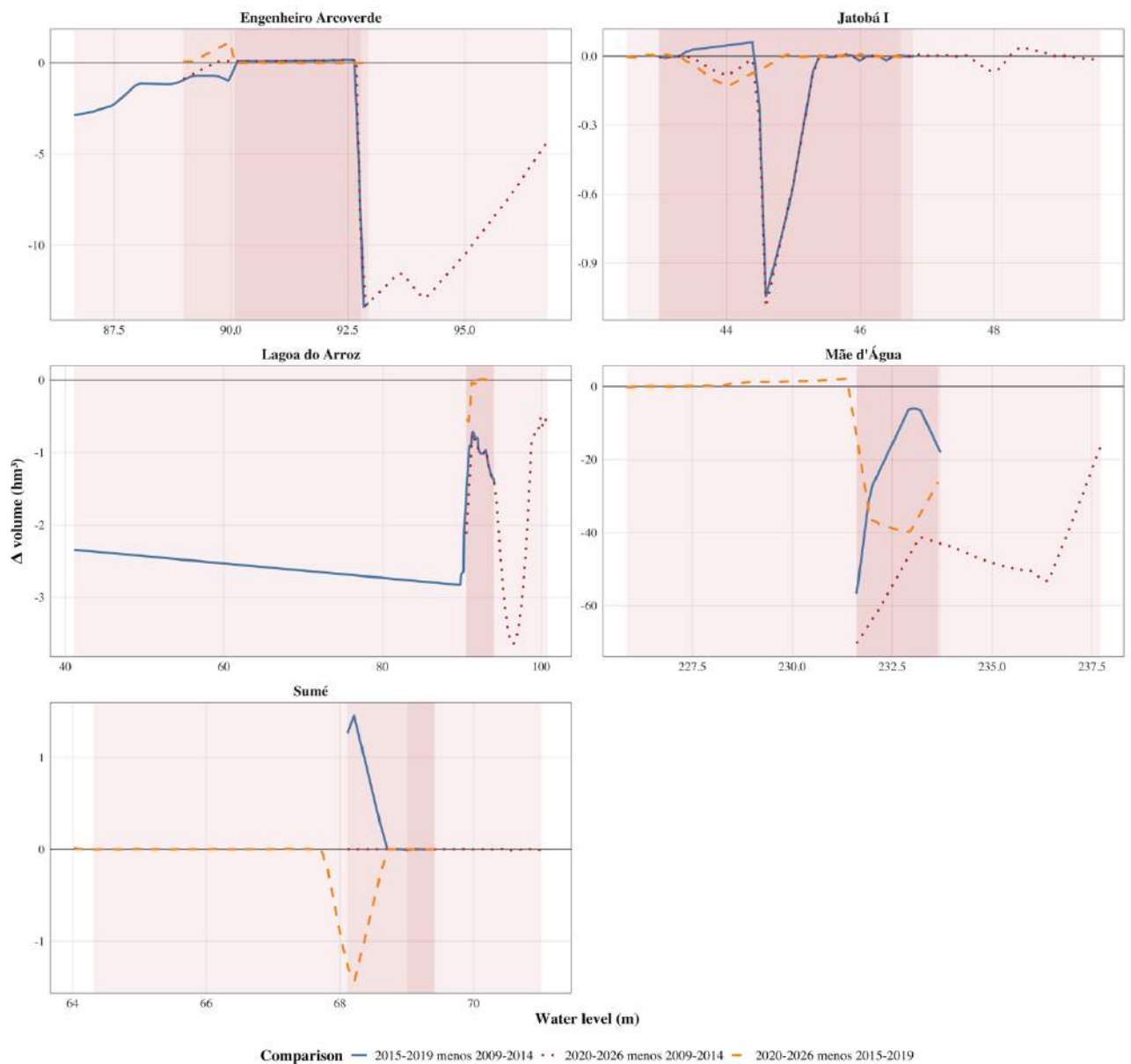
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2026.

Figura 4. Curvas monotônicas cota-volume, $V(H)$, estimadas para os cinco reservatórios nos períodos 2009-2014, 2015-2019 e 2020-2026. As curvas foram reconstruídas por mediana condicional e regressão isotônica, permitindo comparação estrutural da relação armazenamento-nível ao longo do tempo.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2026.

Figura 5: Diferenças de volume para cotas equivalentes entre períodos, $\Delta V(H)$, nos cinco reservatórios. Valores negativos indicam menor armazenamento no período mais recente para a mesma cota, sugerindo indiretamente perda de capacidade útil compatível com assoreamento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Tabela 1. Diferenças médias de volume, $Mean \Delta V (hm^3)$, entre períodos para cotas equivalentes nos cinco reservatórios analisados. Valores negativos indicam redução média do volume armazenado no período mais recente dentro da faixa comum de cotas.

Reservatório	Comparação temporal	Variação do nível de água (m)	ΔV médio (hm^3)
Engenheiro Arcoverde	2015-2019 vs 2009-2014	86.64 to 92.94	-1.265
Engenheiro Arcoverde	2020-2026 vs 2009-2014	88.98 to 96.78	-5.16

Reservatório	Comparação temporal	Variação do nível de água (m)	ΔV médio (hm^3)
Engenheiro Arcoverde	2020-2026 vs 2015-2019	88.98 to 92.88	0.142
Jatoba I	2015-2019 vs 2009-2014	42.99 to 46.79	-0.118
Jatoba I	2020-2026 vs 2009-2014	42.99 to 49.59	-0.086
Jatoba I	2020-2026 vs 2015-2019	42.51 to 46.70	-0.024
Lagoa do Arroz	2015-2019 vs 2009-2014	41.09 to 94.09	-2.478
Lagoa do Arroz	2020-2026 vs 2009-2014	90.53 to 100.83	-1.771
Lagoa do Arroz	2020-2026 vs 2015-2019	90.53 to 94.03	-0.101
Mae d'Agua	2015-2019 vs 2009-2014	231.61 to 233.71	-19.519
Mae d'Agua	2020-2026 vs 2009-2014	231.61 to 237.71	-46.871
Mae d'Agua	2020-2026 vs 2015-2019	225.85 to 233.65	-8.679
Sume	2015-2019 vs 2009-2014	68.11 to 69.41	0.395
Sume	2020-2026 vs 2009-2014	68.11 to 71.11	-0.001
Sume	2020-2026 vs 2015-2019	64.02 to 69.42	-0.131

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

3.3 Séries derivadas e CECp

Para a análise dinâmica, foram calculadas as séries de incrementos diários de volume:

$$\Delta V_t = V_t - V_{t-1}$$

e a taxa diária:

$$\delta V_t = \frac{\Delta V_t}{\Delta dias_t}$$

em que $\Delta dias_t$ representa o intervalo em dias entre duas observações consecutivas. O CECP foi estimado sobre δV_t , por entender-se que os incrementos carregam informação mais direta sobre a organização temporal das entradas, saídas e respostas operacionais do sistema do que o volume absoluto.

A formulação seguiu a abordagem de quantificadores por teoria da informação discutida por Araujo et al. (2019), Araujo et al. (2020) e Fernandes e Araujo (2020), com base no mapeamento ordinal de Bandt e Pompe (2002). Dada uma série temporal $X = \{x_t\}$, construiu-se, para cada instante s , o vetor embutido:

$$Y_s = [x_s, x_{s+\tau}, x_{s+2\tau}, \dots, x_{s+(D-1)\tau}]$$

em que D é a dimensão de incorporação e τ é o atraso temporal. Neste trabalho, adotou-se $D = 4$ e $\tau = 1$. Cada vetor Y_s foi associado a uma permutação $\pi = (r_0, r_1, \dots, r_{D-1})$ que ordena seus componentes de modo crescente:

$$x_{s+r_0\tau} \leq x_{s+r_1\tau} \leq \dots \leq x_{s+r_{D-1}\tau}$$

Assim, a série é convertida em uma sequência de padrões ordinais, cujo conjunto possível tem cardinalidade $5D!$. A partir da frequência relativa desses padrões, obteve-se a distribuição de probabilidades $P = \{p_i\}, i = 1, \dots, D!$.

A entropia de permutação normalizada foi calculada pela entropia de Shannon da distribuição ordinal:

$$H[P] = - \frac{\sum_{i=1}^{D!} p_i \ln(p_i)}{\ln(D!)}$$

de modo que $0 \leq H \leq 1$. Valores mais altos de H indicam maior desordem ordinal da série, enquanto valores menores refletem maior previsibilidade ou maior restrição dinâmica na sucessão dos padrões.

A complexidade estatística foi calculada na forma Martín-Plastino-Rosso:

$$C[P] = Q_J[P, P_e] \cdot H[P]$$

em que P_e é a distribuição uniforme e $Q_J[P, P_e]$ é o desequilíbrio baseado na divergência de Jensen-Shannon:

$$Q_J[P, P_e] = Q_0 \cdot J[P, P_e]$$

com

$$J[P, P_e] = S\left[\frac{P + P_e}{2}\right] - \frac{S[P]}{2} - \frac{S[P_e]}{2}$$

e $S[\cdot]$ representando a entropia de Shannon. O fator Q_0 é uma constante de normalização que garante $0 \leq Q_j \leq 1$.

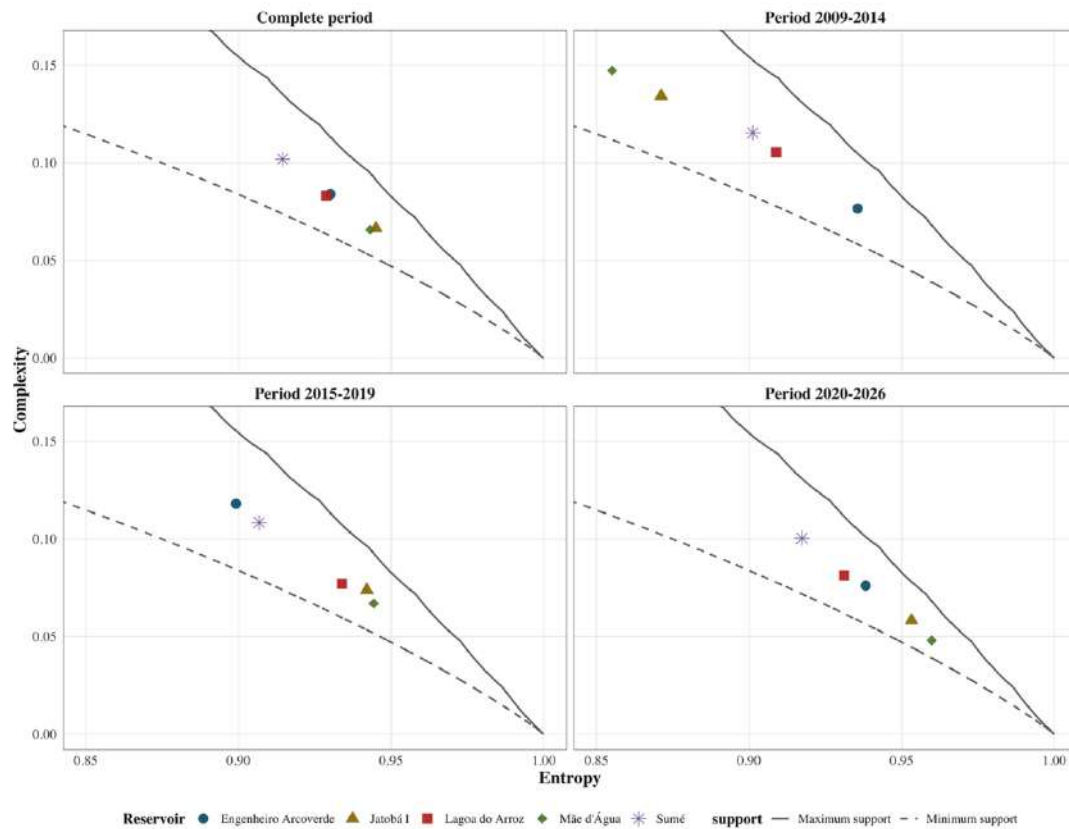
No CECP, cada série é representada por um ponto (H, C) . Seguindo a interpretação adotada por Araujo et al. (2019) e Fernandes e Araujo (2020), regiões próximas ao canto inferior direito correspondem a maior entropia e menor complexidade, enquanto deslocamentos para regiões mais centrais do plano indicam séries com maior organização estrutural. O plano complexidade-entropia foi traçado com suportes mínimo e máximo do método, além dos três períodos fixos, foi calculado um quarto painel para o período completo.

Para fins descritivos adicionais, calculou-se a distância geométrica de cada ponto ao vértice $(1,0)$ e chamamos de eficiência do modelo $[E]$:

$$[E] = \sqrt{(1 - H)^2 + C^2}$$

Essa distância não foi interpretada como indicador causal direto de eficiência e, sim, indireto, por exemplo, manejo ou assoreamento dos mananciais, através de inferência de maior ou menor (des)ordem das séries analisadas (Araujo et al., 2019; Araujo et al., 2020; Fernandes e Araujo, 2020).

Figura 6: Plano complexidade-entropia para os incrementos diários de volume nos cinco reservatórios. Cada ponto representa um reservatório em um dos períodos fixos ou no período completo. Os suportes mínimo e máximo do método delimitam a região teoricamente admissível do plano.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Tabela 2: Valores de entropia, complexidade e distância ao ponto (1,0) [E] para os cinco reservatórios nos três períodos fixos e no período completo. O ranking organiza os reservatórios em ordem decrescente da distância geométrica ao vértice de máxima entropia e mínima complexidade.

Ranking	Rservatório	Período	Entopia	Complexidade	Eficiência
1	Sumé	Complete period	0.9144	0.1019	0.1330
2	Lagoa do Arroz	Complete period	0.9287	0.0832	0.1095
3	Engenheiro Arcoverde	Complete period	0.9301	0.0840	0.1093
4	Mãe d'Água	Complete period	0.9432	0.0658	0.0869

Ranking	Rservatório	Período	Entropia	Complexidade	Eficiência
5	Jatobá I	Complete period	0.9450	0.0666	0.0863
1	Mãe d'Água	2009-2014	0.8551	0.1473	0.2066
2	Jatobá I	2009-2014	0.8712	0.1343	0.1861
3	Sumé	2009-2014	0.9013	0.1154	0.1519
4	Lagoa do Arroz	2009-2014	0.9089	0.1054	0.1394
5	Engenheiro Arcoverde	2009-2014	0.9356	0.0766	0.1001
1	Engenheiro Arcoverde	2015-2019	0.8992	0.1180	0.1552
2	Sumé	2015-2019	0.9068	0.1083	0.1429
3	Lagoa do Arroz	2015-2019	0.9339	0.0770	0.1015
4	Jatobá I	2015-2019	0.9420	0.0739	0.0939
5	Mãe d'Água	2015-2019	0.9443	0.0669	0.0871
1	Sumé	2020-2026	0.9173	0.1003	0.1300
2	Lagoa do Arroz	2020-2026	0.9311	0.0812	0.1065
3	Engenheiro Arcoverde	2020-2026	0.9382	0.0761	0.0980
4	Jatobá I	2020-2026	0.9532	0.0582	0.0747
5	Mãe d'Água	2020-2026	0.9598	0.0480	0.0626

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

3.4 CECP em janelas deslizantes

Para investigar a estabilidade temporal da posição relativa dos reservatórios no espaço informacional, calculou-se adicionalmente o CECP em janelas deslizantes. Para cada reservatório, a série δV_t foi particionada em janelas de 120 observações, com passo de 7 observações entre janelas consecutivas. Para cada janela w , foram estimados H_w , C_w e a distância geométrica ao ponto (1,0), $[E]$:

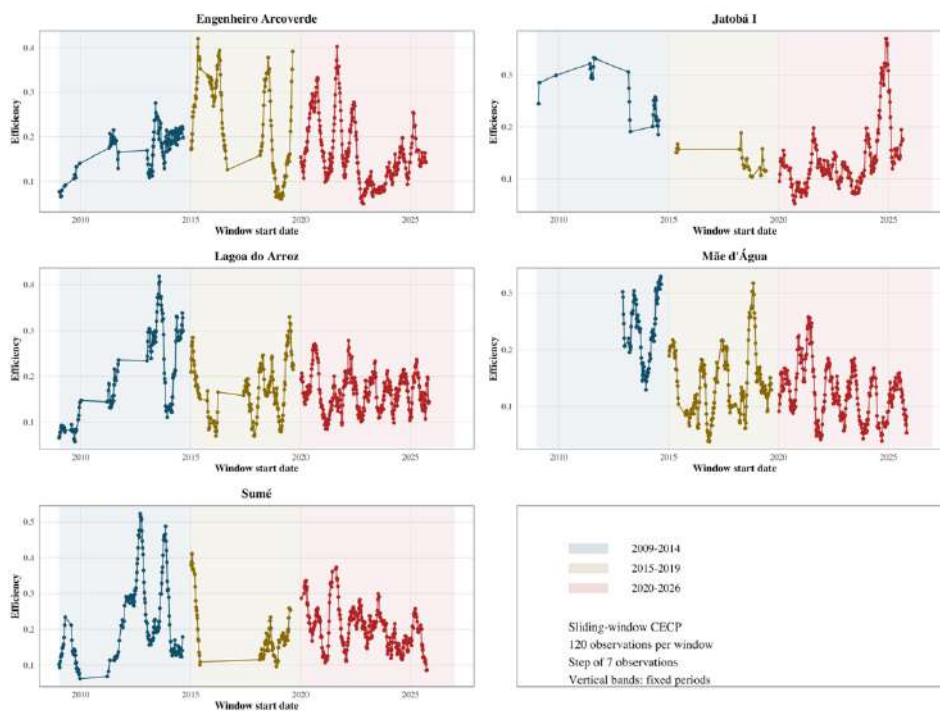
$$[E] = \sqrt{(1 - H_w)^2 + C_w^2}$$

Como o comprimento da janela foi definido em número de observações (dias), a extensão temporal efetiva de cada janela variou ao longo da série, preservando, porém, o mesmo suporte amostral para os quantificadores ordinais. Janelas que atravessavam fronteiras entre os três períodos fixos não foram utilizadas na síntese periodizada, de modo que a estatística de cada grupo temporal refletisse apenas janelas inteiramente contidas no respectivo intervalo.

Ao longo deste artigo, [E] é referido como eficiência geométrica apenas como abreviação descritiva da posição da série no CECP. Valores mais elevados de [E] indicam maior afastamento do canto de máxima entropia e mínima complexidade, isto é, maior estrutura ordinal e previsibilidade relativa da dinâmica dos incrementos. Essa interpretação, contudo, não deve ser confundida com eficiência operacional direta nem como prova isolada de melhor manejo; ela deve ser lida como um indicador de regularidade hidrológico-operacional compatível com regimes mais estruturados.

A Figura 7 apresenta, para os cinco reservatórios, a evolução temporal de [E] em arranjo 3×2, com uma célula explicativa adicional. As faixas verticais indicam os três períodos fixos do estudo. A Tabela 3 resume, por reservatório e período, o número de janelas válidas, a média e o desvio padrão da eficiência geométrica. Essa etapa não substitui o CECP pontual por período; ela o complementa, permitindo avaliar a persistência, a variabilidade intra-período e a estabilidade temporal da posição da série no plano complexidade-entropia.

Figura 7. Evolução temporal da eficiência geométrica em janelas deslizantes para os cinco reservatórios. Cada ponto corresponde a uma janela de 120 observações com passo de 7 observações, e as faixas verticais indicam os três períodos fixos adotados no estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Tabela 3: Número de janelas válidas, média e desvio padrão da eficiência geométrica por reservatório e período. A média resume a posição típica da série no espaço informacional, enquanto o desvio padrão resume a mobilidade temporal dessa posição.

Reservatório	Período	(N) janela	Eficiência média	Desvio padrão (eficiência)
Engenheiro Arcoverde	2009-2014	114	0.1804	0.0432
Engenheiro Arcoverde	2015-2019	130	0.2354	0.1039
Engenheiro Arcoverde	2020-2026	249	0.1700	0.0737
Jatobá I	2009-2014	33	0.2596	0.0468
Jatobá I	2015-2019	25	0.1356	0.0224
Jatobá I	2020-2026	208	0.1428	0.0680
Lagoa do Arroz	2009-2014	136	0.2082	0.0969
Lagoa do Arroz	2015-2019	157	0.1706	0.0606
Lagoa do Arroz	2020-2026	299	0.1670	0.0410
Mãe d'Água	2009-2014	82	0.2321	0.0548

Reservatório	Período	(N) janela	Eficiência média	Desvio padrão (eficiência)
Mãe d'Água	2015-2019	188	0.1395	0.0574
Mãe d'Água	2020-2026	278	0.1238	0.0482
Sumé	2009-2014	170	0.2334	0.1158
Sumé	2015-2019	88	0.1842	0.0748
Sumé	2020-2026	267	0.2028	0.0583

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

4.1 Mudanças estruturais na relação cota-volume

As séries temporais mostraram regimes distintos entre os cinco reservatórios, com amplitudes, persistências e padrões de recuperação diferenciados ao longo de 2009–2026. A inspeção conjunta da série temporal, das curvas monotônicas $V(H)$ e das diferenças $\Delta V(H)$ mostrou que a relação cota-volume não permaneceu invariável no tempo. Esse é o núcleo físico do resultado: a mesma altura da lâmina d'água não correspondeu sempre ao mesmo volume armazenado.

Os resultados sintetizados na Tabela 1 mostram que Mãe d'Água apresentou os deslocamentos negativos médios mais intensos, com $Mean \Delta V$ de $-19,519 \text{ hm}^3$ em 2015–2019 vs. 2009–2014, $-46,871 \text{ hm}^3$ em 2020–2026 vs. 2009–2014 e $-8,679 \text{ hm}^3$ em 2020–2026 vs. 2015–2019. Engenheiro Arcoverde também apresentou redução expressiva, chegando a $-5,160 \text{ hm}^3$ quando se compara 2020–2026 com 2009–2014. Lagoa do Arroz exibiu perdas intermediárias, mas sistematicamente negativas nas três comparações. Jatobá I apresentou deslocamentos negativos de menor magnitude absoluta, porém consistentes, enquanto Sumé foi o reservatório mais estável do conjunto, com pequeno ganho em 2015–2019 vs. 2009–2014 ($0,395 \text{ hm}^3$), valor praticamente nulo em 2020–2026 vs. 2009–2014 ($-0,001 \text{ hm}^3$) e discreta redução em 2020–2026 vs. 2015–2019 ($-0,131 \text{ hm}^3$).

Do ponto de vista físico, Mãe d'Água, Engenheiro Arcoverde e Lagoa do Arroz são os casos mais compatíveis com perda indireta de capacidade útil ao longo do período observado.

Jatobá I indica mudança estrutural mais sutil, porém detectável. Sumé, por sua vez, sugere estabilidade relativa da geometria funcional do armazenamento, ao menos na resolução observacional disponível. Em termos de engenharia ambiental, esse gradiente de comportamento é útil para priorizar campanhas futuras de batimetria, inspeção em campo e reavaliação operacional.

É importante reiterar que a inferência aqui é indireta. Deslocamentos negativos de $V(H)$ são compatíveis com assoreamento, mas também podem refletir recalibração operacional, atualização da curva cota-volume pelo órgão gestor, mudanças na forma de estimativa do volume ou inconsistências de monitoramento. Ainda assim, quando essas diferenças são persistentes e coerentes ao longo de uma faixa de cotas, passam a constituir um indício forte de perda de capacidade e não apenas um ruído aleatório.

4.2 Assinaturas dinâmicas no CECP por período fixo

No CECP fixo, os cinco reservatórios ocuparam uma região de alta entropia e baixa a moderada complexidade, isto é, uma faixa compatível com sistemas fortemente influenciados por múltiplos forçantes, mas ainda portadores de estrutura ordinal. No período completo, o ranking por [E] foi: Sumé (0,1330), Lagoa do Arroz (0,1095), Engenheiro Arcoverde (0,1093), Mãe d'Água (0,0869) e Jatobá I (0,0863). Em termos interpretativos, isso significa que, quando a série inteira é agregada, Sumé é o reservatório que permaneceu mais afastado da região de máxima entropia e mínima complexidade, portanto o mais compatível com maior regularidade dinâmica relativa e maior previsibilidade ordinal do conjunto. No extremo oposto, Jatobá I e Mãe d'Água aparecem mais próximos do vértice (1,0), sugerindo dinâmica agregada mais próxima de um regime de maior entropia e menor estrutura.

Nos subperíodos, a hierarquia variou de forma substantiva. Em 2009–2014, Mãe d'Água (0,2066) e Jatobá I (0,1861) foram os mais distantes do vértice, o que indica que, naquele início de série, ambos possuíam dinâmica ordinal mais estruturada e relativamente mais previsível que os demais. Em 2015–2019, Engenheiro Arcoverde passou à primeira posição (0,1552), seguido por Sumé (0,1429), enquanto Mãe d'Água caiu para a última posição (0,0871). Em 2020–2026, Sumé tornou-se o mais distante do vértice (0,1300), ao passo que Mãe d'Água (0,0626) e Jatobá I (0,0747) passaram a ocupar as posições mais próximas do canto de máxima entropia e mínima complexidade. Visualmente, a Figura 6 confirma essa reorganização: os pontos se deslocam no plano ao longo do tempo e não descrevem um padrão único para todos os mananciais.

Essa variação temporal é importante porque permite diferenciar duas ideias que, intuitivamente, poderiam ser confundidas. A primeira é estabilidade estrutural do armazenamento, inferida por $V(H)$. A segunda é regularidade dinâmica da série de incrementos, inferida pelo CECP. Maior distância a (1,0) não implica, por si só, menor assoreamento; ela indica, antes, maior estrutura ordinal e previsibilidade relativa da dinâmica observada. Quando esse comportamento aparece combinado com pequenas mudanças em $V(H)$, o resultado pode ser lido como compatível com maior robustez funcional e maior regularidade hidrológico-operacional. Quando aparece desacoplado de $V(H)$, a leitura deve ser mais cautelosa.

Esse desacoplamento parcial é um dos resultados centrais do artigo. Se a perda estrutural de capacidade inferida por $V(H)$ e a posição no CECP fossem essencialmente a mesma informação, esperar-se-ia uma correspondência monotônica entre perdas médias de volume e distância ao ponto $(1,0)$. Não foi isso que se observou. Mãe d'Água, por exemplo, apresentou os maiores deslocamentos negativos em $V(H)$, mas no período completo ocupou apenas a quarta posição em $[E]$, porém é a penúltima posição. Engenheiro Arcoverde, por outro lado, combinou perda estrutural expressiva com uma fase intermediária de maior estrutura dinâmica. Isso sugere que perda estrutural de capacidade e organização ordinal da dinâmica diária são dimensões relacionadas, porém não redutíveis uma à outra.

4.3 Estabilidade temporal nas janelas deslizantes

As janelas deslizantes refinam decisivamente a leitura do CECP fixo ao mostrar que a posição geométrica da série não é estática dentro de cada período. A Figura 7 evidencia trajetórias intra-série distintas para cada reservatório, enquanto a Tabela 3 resume, de forma objetiva, a localização média e a dispersão temporal dessas trajetórias. Em termos interpretativos, a média das janelas resume a estrutura ordinal típica do período, enquanto o desvio padrão resume o grau de mobilidade dessa estrutura no tempo.

Os resultados mostram quatro padrões principais. O primeiro é de queda persistente da eficiência geométrica, como em Mãe d'Água: a média passou de 0,2321 em 2009–2014 para 0,1395 em 2015–2019 e 0,1238 em 2020–2026, acompanhada de desvios padrão moderados (0,0548; 0,0574; 0,0482). A inspeção visual confirma que a série recente se concentra em patamares mais baixos e com oscilação relativamente contida. Esse comportamento é compatível com perda progressiva de estrutura ordinal da dinâmica dos incrementos, isto é, com aproximação a um regime mais entrópico e menos complexo. Como Mãe d'Água também apresentou os deslocamentos mais negativos em $V(H)$, trata-se do caso mais coerente de convergência entre fragilidade estrutural e enfraquecimento da regularidade dinâmica.

O segundo padrão é o de queda abrupta seguida de estabilização em patamar mais baixo, como em Jatobá I. A média caiu de 0,2596 em 2009–2014 para 0,1356 em 2015–2019, com desvio padrão muito baixo nesse intervalo (0,0224), e permaneceu próxima em 2020–2026 (0,1428), embora com dispersão maior (0,0680). Visualmente, a Figura 7 mostra que o período intermediário de Jatobá I é bastante compacto, com pouca mobilidade interna. Isso sugere que a série não apenas se aproximou do vértice $(1,0)$, mas o fez de maneira persistente, o que é compatível com dinâmica menos estruturada e menor previsibilidade ordinal. Como as perdas estruturais em $V(H)$ foram pequenas, o resultado de Jatobá I parece indicar alteração mais forte da regularidade dinâmica do que da geometria efetiva do armazenamento.

O terceiro padrão é o de regime intermediário mais estruturado, porém muito mais móvel, como em Engenheiro Arcoverde. A média de eficiência aumentou de 0,1804 em 2009–2014 para 0,2354 em 2015–2019, mas com o maior desvio padrão de toda a amostra nesse período (0,1039), antes de recuar para 0,1700 em 2020–2026. A inspeção visual confirma essa interpretação: o reservatório apresenta oscilações fortes e recorrentes, incluindo janelas muito afastadas e muito próximas do vértice ao longo do mesmo período. Isso sugere alternância entre estados dinâmicos relativamente organizados e estados mais erráticos, o que é

compatível com heterogeneidade hidrológico-operacional. Como Engenheiro Arcoverde também apresentou perda estrutural relevante em $V(H)$, especialmente na comparação 2020–2026 vs. 2009–2014 ($-5,160 \text{ hm}^3$), o caso aponta para um sistema estruturalmente pressionado e dinamicamente instável.

O quarto padrão é o de relativa robustez funcional, representado sobretudo por Sumé, e em menor medida por Lagoa do Arroz. Sumé combinou o menor sinal estrutural de perda de capacidade com a maior distância no período completo do CECF fixo (0,1330). Nas janelas deslizantes, sua média foi alta em 2009–2014 (0,2334), caiu em 2015–2019 (0,1842) e voltou a crescer em 2020–2026 (0,2028), enquanto o desvio padrão diminuiu de 0,1158 para 0,0583 ao final da série. Esse padrão é especialmente importante: ele sugere recuperação parcial da estrutura ordinal recente acompanhada de menor dispersão temporal, isto é, dinâmica relativamente mais regular e menos móvel no período mais novo. Entre os cinco reservatórios, Sumé é o caso mais compatível com maior estabilidade hidrológico-operacional e maior robustez funcional do armazenamento.

Lagoa do Arroz ocupa uma posição intermediária. A média decresceu de 0,2082 para 0,1706 e 0,1670, enquanto o desvio padrão caiu de 0,0969 para 0,0410. Visualmente, a trajetória recente é menos espalhada do que a inicial. Isso sugere convergência progressiva para um regime de menor estrutura ordinal, porém também mais estável temporalmente. Em outras palavras, Lagoa do Arroz parece ter perdido parte da complexidade e da previsibilidade relativa, mas ganhou regularidade interna na posição geométrica das janelas. Como $V(H)$ também mostrou perdas persistentes, o reservatório ocupa uma posição de vulnerabilidade estrutural moderada com dinâmica mais estável que Engenheiro Arcoverde e menos favorável que Sumé.

Do ponto de vista da física estatística, a principal implicação é que a posição de uma série no CECF deve ser tratada como uma distribuição temporal de estados geométricos, e não apenas como um ponto agregado. O CECF fixo resume o estado médio; as janelas deslizantes revelam se esse estado é persistente, intermitente ou instável. Em sistemas reais, isso permite diferenciar maior previsibilidade ordinal persistente, maior mobilidade entre regimes e maior proximidade prolongada da região de máxima entropia e mínima complexidade.

4.4 Integração entre estrutura e dinâmica

A combinação entre Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3 mostra que a componente estrutural e a componente dinâmica não se movem de forma trivial. Mãe d'Água é o caso mais claro de convergência negativa: apresentou o sinal mais forte de perda indireta de capacidade e, simultaneamente, queda persistente da eficiência geométrica média, o que sugere enfraquecimento concomitante da robustez estrutural e da regularidade dinâmica. Engenheiro Arcoverde representa um caso de tensão estrutural com forte mobilidade dinâmica: a perda estrutural é relevante, mas a trajetória das janelas revela alternância entre estados relativamente previsíveis e estados mais erráticos. Jatobá I indica outro tipo de desacoplamento: pequena perda estrutural, porém forte deterioração da previsibilidade ordinal entre o primeiro e os períodos subsequentes. Lagoa do Arroz ocupa uma posição intermediária, com perda estrutural persistente e progressiva estabilização em um regime

dinâmico menos estruturado. Sumé, por fim, reúne o conjunto mais favorável de evidências: pequena alteração estrutural, maior distância no CECP completo e recuperação parcial da eficiência geométrica com menor dispersão recente.

Essa síntese permite propor uma leitura profissionalmente mais precisa. Em vez de falar em “melhor manejo” de forma direta, o que exigiria variáveis operacionais e climáticas adicionais, é mais adequado falar em maior regularidade hidrológico-operacional, maior previsibilidade ordinal relativa e maior robustez funcional do sistema. Sob essa terminologia, Sumé é o reservatório mais compatível com maior robustez funcional do conjunto; Mãe d’Água é o mais compatível com fragilização conjunta da estrutura e da dinâmica; Engenheiro Arcoverde é o mais compatível com instabilidade hidrológico-operacional; Lagoa do Arroz apresenta regularização de um regime menos estruturado; e Jatobá I sugere perda de organização dinâmica sem sinal estrutural tão intenso quanto o de Mãe d’Água ou Engenheiro Arcoverde.

Esse desacoplamento parcial é coerente com a interpretação física do problema. A curva $V(H)$ captura uma propriedade estrutural efetiva do armazenamento, enquanto o CECP resume a organização ordinal dos incrementos no tempo. Um reservatório pode sofrer forte mudança estrutural e ainda manter dinâmica diária relativamente organizada por operação e regulação; de modo análogo, pode apresentar dinâmica mais móvel no espaço informacional sem forte evidência de deslocamento estrutural da curva cota-volume. Em termos de gestão, isso significa que os dois instrumentos devem ser lidos em conjunto: $V(H)$ é mais diretamente associado à hipótese de perda de capacidade, enquanto o CECP, sobretudo em janelas deslizantes, descreve a estabilidade temporal da resposta do sistema.

4.5 Diálogo com a literatura e contribuição do estudo

Os estudos experimentais de sedimentação costumam estimar diretamente perda de capacidade com base em levantamentos batimétricos e modelagem físico-sedimentológica (Furnans e Austin, 2008; Yan et al., 2018; Endalew e Mulu, 2022; Tessema, Zimale e Kebedew, 2024; Koffi et al., 2025). Nosso trabalho não pretende substituir essa linha; ao contrário, pretende oferecer uma estratégia de triagem para contextos nos quais levantamentos experimentais repetidos ainda não foram realizados ou não estão disponíveis.

Quanto ao CECP, a literatura já demonstra sua utilidade para classificar dinâmica em sistemas complexos, séries financeiras e séries hidrológicas (Rosso et al., 2007; Araujo et al., 2019; Araujo et al., 2020; Fernandes e Araujo, 2020; Suriano, Caram e Rosso, 2024; Mihailović, 2025). No entanto, a revisão dirigida realizada para este estudo não localizou aplicações específicas do CECP para inferência indireta de assoreamento em reservatórios a partir da combinação entre incrementos de volume, deslocamentos temporais de $V(H)$ e estatísticas de janelas deslizantes. Assim, o ineditismo do trabalho não está no uso isolado da entropia de permutação, nem no uso isolado da curva cota-volume, mas na articulação entre ambas, acrescida de uma leitura temporal móvel, como método de diagnóstico preliminar de reservatórios com dados operacionais.

Essa contribuição é relevante porque amplia a interface entre física estatística e engenharia ambiental. O CECP entra aqui como ferramenta de caracterização dinâmica; a curva $V(H)$, como ferramenta de caracterização estrutural; e as janelas deslizantes, como ferramenta de caracterização da persistência temporal dos estados dinâmicos. Juntas, essas três camadas

permitem distinguir reservatórios com maior sinal estrutural de vulnerabilidade, reservatórios com maior mobilidade temporal no espaço informacional e reservatórios relativamente estáveis em ambas as dimensões

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo mostrou que a comparação temporal da relação cota-volume, associada ao plano complexidade-entropia e a estatísticas em janelas deslizantes, constitui uma abordagem promissora para diagnóstico indireto de reservatórios em contextos de dados limitados. Entre os cinco reservatórios analisados, Mãe d'Água, Engenheiro Arcoverde e Lagoa do Arroz apresentaram os sinais mais fortes de deslocamento negativo da curva $V(H)$, compatíveis com perda indireta de capacidade útil. Jatobá I exibiu mudanças menores, porém persistentes, enquanto Sumé foi o caso estruturalmente mais estável do conjunto. Como a amostra é predominantemente composta por reservatórios do sertão paraibano, os resultados devem ser lidos prioritariamente como um diagnóstico estatístico-hidrológico desse domínio regional.

No CECP fixo, todos os reservatórios permaneceram em uma região de alta entropia e baixa a moderada complexidade, mas a análise em janelas deslizantes mostrou que essa posição não é fixa ao longo do tempo. A média da eficiência geométrica e seu desvio padrão permitiram diferenciar regularidade dinâmica persistente, mobilidade temporal entre estados e aproximação prolongada da região de máxima entropia e mínima complexidade. Nesse quadro, Sumé foi o reservatório mais compatível com maior robustez funcional e maior regularidade hidrológico-operacional relativa, ao passo que Mãe d'Água reuniu a evidência mais forte de fragilização simultânea da estrutura de armazenamento e da organização ordinal da dinâmica. Engenheiro Arcoverde destacou-se pela maior instabilidade intra-período, Jatobá I por perda acentuada de previsibilidade ordinal com dano estrutural moderado e Lagoa do Arroz por convergência para um regime menos estruturado, porém mais estável.

Do ponto de vista aplicado, a principal implicação é que a metodologia pode servir como triagem para priorizar campanhas batimétricas, vistorias e monitoramento mais detalhado. Do ponto de vista científico, o trabalho sugere que o CECP pode ser incorporado a estudos de reservatórios não como substituto da batimetria, mas como descritor estatístico adicional da dinâmica do sistema, especialmente quando combinado com leitura estrutural de $V(H)$ e com janelas deslizantes. Como agenda futura, recomenda-se validar os indícios aqui observados com levantamentos batimétricos independentes; incorporar precipitação, evaporação e regras operacionais; testar outras dimensões de incorporação e atrasos no CECP; e expandir a análise móvel para múltiplas escalas de janela, de modo a detectar transições de regime com maior resolução.

REFERÊNCIAS

- Araujo, F. H. A., Bejan, L., Rosso, O. A. e Stosic, T. (2019). Permutation Entropy and Statistical Complexity Analysis of Brazilian Agricultural Commodities. *Entropy*, 21(12), 1220. <https://doi.org/10.3390/e21121220>
- Araujo, F. H. A., Bejan, L., Stosic, B. e Stosic, T. (2020). An analysis of Brazilian agricultural commodities using permutation-information theory quantifiers: The influence of food crisis. *Chaos, Solitons & Fractals*, 139, 110081. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110081>
- AESA. (2026). Monitoramento dos açudes da Paraíba. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. <https://site2.aesa.pb.gov.br/aesa/volumesAcudes.do?metodo=listarAcudesUltimaCota>
- Bandt, C. e Pompe, B. (2002). Permutation Entropy: A Natural Complexity Measure for Time Series. *Physical Review Letters*, 88(17), 174102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.174102>
- DNOCS. (2024). Açude Engenheiro Arcoverde: a obra do DNOCS que deu início ao município de Condado, na Paraíba. Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. <https://www.gov.br/dnocs/pt-br/assuntos/nossas-historias/acude-engenheiro-arcoverde-a-obra-do-dnocs-que-deu-inicio-ao-municipio-de-condado-na-paraiba>
- Endalew, L. e Mulu, A. (2022). Estimation of reservoir sedimentation using bathymetry survey at Shumburit earth dam, East Gojjam zone Amhara region, Ethiopia. *Heliyon*, 8(12), e11819. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11819>
- Fernandes, L. H. S. e Araujo, F. H. A. (2020). Taxonomy of commodities assets via complexity-entropy causality plane. *Chaos, Solitons & Fractals*, 137, 109909. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109909>
- Furnans, J. e Austin, B. (2008). Hydrographic survey methods for determining reservoir volume. *Environmental Modelling & Software*, 23(2), 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.05.011>
- IBGE. (s.d.). Açude Jatobá: Patos, PB. Biblioteca do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?id=449856&view=detalhes>
- Koffi, B., Kouakou, K. E., Brou, A. L., Sanchez, M., Blaise, O. G., Coulibaly, B. W., Akaffou, F. H., Habel, M., Kouassi, A. M., Brou, D. e Kouassi, K. L. (2025). Assessment of the sedimentation and trapping efficiency in dam reservoirs by applying the settling basin framework. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 57, 102172. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.102172>
- Mihailović, D. T. (2025). Permutation Entropy and Its Niche in Hydrology: A Review. *Entropy*, 27(6), 598. <https://doi.org/10.3390/e27060598>
- Rosso, O. A., Larrondo, H. A., Martin, M. T., Plastino, A. e Fuentes, M. A. (2007). Distinguishing Noise from Chaos. *Physical Review Letters*, 99(15), 154102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.154102>

- Suriano, M., Caram, L. F. e Rosso, O. A. (2024). Daily Streamflow of Argentine Rivers Analysis Using Information Theory Quantifiers. *Entropy*, 26(1), 56. <https://doi.org/10.3390/e26010056>
- Tessema, Y. M., Zimale, F. A. e Kebedew, M. G. (2024). Understanding sedimentation trends to enhance sustainable reservoir management in the Angereb reservoir, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Frontiers in Water*, 6, 1387915. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1387915>
- Yan, Z.-L., Qin, L.-L., Wang, R., Li, J., Wang, X.-M., Tang, X.-L. e An, R.-D. (2018). The Application of a Multi-Beam Echo-Sounder in the Analysis of the Sedimentation Situation of a Large Reservoir after an Earthquake. *Water*, 10(5), 557. <https://doi.org/10.3390/w10050557>
- Zanin, M., Zunino, L., Rosso, O. A. e Papo, D. (2012). Permutation Entropy and Its Main Biomedical and Econophysics Applications: A Review. *Entropy*, 14(8), 1553-1577. <https://doi.org/10.3390/e14081553>



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
Campus Patos - Código INEP: 25281925
Br 110, S/N, Alto da Tubiba, CEP 58700-000, Patos (PB)
CNPJ: 10.783.898/0006-80 - Telefone: None

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC - Ana Kerma (com ficha catalográfica)

Assunto:	TCC - Ana Kerma (com ficha catalográfica)
Assinado por:	Larissa Layerr
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Documento Original

Documento assinado eletronicamente por:

- Larissa Layerr Oliveira de Medeiros e Lima, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CBEC-PT, em 29/06/2026 10:26:45.

Este documento foi armazenado no SUAP em 29/06/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1898568

Código de Autenticação: ea83274f45

