UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E GESTÃO DE RECURSOS NATURAIS

ANÁLISE DE RISCOS DO ATENDIMENTO DAS DEMANDAS HÍDRICAS DO SISTEMA DE RESERVATÓRIOS POÇÕES – EPITÁCIO PESSOA

FRANCISCO DE ASSIS DA COSTA NETO

Campina Grande – PB

Agosto de 2026

FRANCISCO DE ASSIS DA COSTA NETO

ANÁLISE DE RISCOS DO ATENDIMENTO DAS DEMANDAS HÍDRICAS DO SISTEMA DE RESERVATÓRIOS POÇÕES – EPITÁCIO PESSOA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de doutor em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais.

Área de concentração: Engenharia de Recursos Naturais

Orientador: Prof. Dr. José Agnelo Soares

Coorientador: Prof. Dr. Valterlin da Silva Santos

Campina Grande – PB

Agosto de 2026

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Sistema de Bibliotecas - SISTEMOTECA
Catalogação de Publicação na Fonte. UFCG - Biblioteca Central

C837a Costa Neto, Francisco de Assis.

"Análise de riscos do atendimento das demandas hídricas do sistema de reservatórios Poções – Epitácio Pessoa" / Francisco de Assis Costa Neto. – 2026.

101 f. : il. color.

Tese (doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2026.

"Orientação: Prof. Dr. José Agnelo Soares, Prof. Dr. Valterlin da Silva Santos".

Referências.

1. Segurança Hídrica. 2. Operação de Reservatórios. 3. Geração de Séries Sintéticas. 4. Simulação Estocástica. 5. Recursos Hídricos no Semiárido Nordestino. 6. PISF. I. Soares, José Agnelo. II. Santos, Valterlin da Silva Santos. III. Título.

UFCG/BC CDU 556.18(043.2)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA ITAPUANA SOARES DIAS GONÇALVES CRB-15/93

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA E GESTAO DE RECURSOS NATURAIS
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

Francisco de Assis da Costa Neto

"ANÁLISE DE RISCOS DO ATENDIMENTO DAS DEMANDAS HÍDRICAS DO SISTEMA DE RESERVATÓRIOS POÇÕES – EPITÁCIO PESSOA"

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais como pré-requisito para obtenção do título de Doutor Engenharia e Gestão de Recursos Naturais.

Aprovada em: 21/08/2026

Dr.(a.) **José Agnelo Soares** (Orientador PPGEGRN).

Dr.(a.) **Valterlin da Silva Santos** (coorientador).

Dr.(a.) **Dayse Luna Barbosa/PPGEGRN**(Examinador Interno).

Dr.(a.) **Viviane Farias Silva/PPGEGRN** (Examinador Interno).

Dr.(a.) **Hudson Ellen Alencar Meneses/UACA/CTRN**(Examinador Externo).

Dr.(a.)**Ricardo de Aragão/UAEC/UFCG**(Examinador Externo).

Documento assinado eletronicamente por **JOSE AGNELO SOARES**, **PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/09/2026, às 10:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **VIVIANE FARIAS SILVA**, **COORDENADORA DE PÓS GRADUAÇÃO**, em 11/09/2026, às 13:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº

002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **DAYSE LUNA BARBOSA**, **PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/09/2026, às 14:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **VALTERLIN DA SILVA SANTOS**, **PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/09/2026, às 14:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **HUDSON ELLEN ALENCAR MENEZES**, **METEOROLOGISTA**, em 14/09/2026, às 15:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **RICARDO DE ARAGAO**, **PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/09/2026, às 16:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade, informando o código verificador **6858138** e o código CRC **54CC0B9B**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho
a **Rosiane** e a **João Felipe**.

AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente a Deus, criador do Céu e da Terra, por permitir aos homens alegrias como esta da realização de um grande sonho e pelo gozo de uma verdadeira sensação de vitória, tipo aquela gratificação genuína que vem de um grande processo de esforço, abnegação, lágrimas e suor.

A toda a minha família, e em especial aos meus queridos pais (João e Marília), que, novamente pela graça de Deus, se encontram vivos e em pleno gozo de suas faculdades físicas e mentais, podendo apreciar mais essa grande conquista que seu filho obtém na vida. Espero que isso reafirme no íntimo de seu coração que valeu a pena todo o investimento moral e espiritual que fizeram nesta humilde criatura.

À UFCG, essa instituição maravilhosa, respeitadíssima, que povoa meus sonhos desde quando estava no 1º ano do ensino médio, em 2001, estudando para o antigo PSS, rogando a Deus conquistar uma vaga no curso de engenharia civil. Minha vida, portanto, girou (e gira) em torno da UFCG: estudando para o vestibular, depois para me formar engenheiro, em seguida para passar no concurso como seu servidor. A ela, enfim, toda a minha gratidão.

Ao PPGEGRN, na pessoa da coordenadora **Viviane** e do secretário **Vinícius**.

Ao Departamento de Engenharia Civil da UFCG, que novamente a graça Deus me concedeu a honra de servir e viver essa repartição linda que sempre (desde aluno, e agora como servidor) respeitei e amei.

Nominalmente, expresso meus agradecimentos especiais a: **Marcos Simplício** (pela confiança, generosidade, compreensão e tolerância com as minhas ausências para concretizar esse grande projeto); **Aline** (pela generosidade, confiança, paciência e tolerância); **Marília** (pela benevolência, simpatia e tolerância); **Marco Aurélio** (pela inspiração máxima da sua carreira e trajetória de serviço ao departamento, à UFCG e à sociedade), **Milton** (pela inspiração máxima que transcende a técnica e o profissional beirando a relação paternal); **Carina** (pela parceria de toda santa semana e troca de ideias sobre os materiais de construção); **Dona Val**, pela simpatia, alegria, energia positiva, ajudas das mais variadas, pelo riso e pelo sorriso fraternal sempre a me afagar.

Ao meu colega e amigo **Arthur** (Químico), pela troca de ideias sempre de altíssimo nível em todos os sentidos.

A todo o pessoal do LEP: **Jadilson**, **Kennedy**, **Lêda**, **Ana Maria**, **Paulo**, **Jonny**... Sempre muito gentis, simpáticos, generosos e compreensivos comigo.

A **Valterlin** que, desde o meu mestrado em 2018, senti que me conduziria até o dia de hoje. Obrigado por sua generosa e paciente orientação até o termo desse projeto. Obrigado também pela mais fundamental ideia do tema de pesquisa (Análise de riscos do PISF em Boqueirão) até a metodologia-chave (cereja do bolo) – a Metodologia do TCU que me permitiu coroar de êxito essa maratona e cumprir lindamente o requisito de ineditismo.

A **Agnelo** por não ter desistido da orientação formal e ter ficado até o fim, me brindando com seu exemplo de fineza e elegância.

Ao meu amigo **Everton**, que esteve rigorosamente ao meu lado em toda essa trajetória, com a lealdade de um verdadeiro irmão, me amparando nas provas e nos seminários, e me alertando sobre todas as datas e prazos, não me deixando vacilar em nenhum momento.

Ao pessoal da banca examinadora: **Viviane**, **Dayse**, **Ricardo** e **Hudson**, por sua disponibilidade e por seu valioso tempo investido no cumprimento desse importante requisito formal. E a este último (**Hudson**) o meu mais especial agradecimento pela amizade, pela boa vontade, pelos conselhos, pela torcida, pela inspiração, pelo estímulo... Lembra, amigo, que esse é um plano que começamos a gestar em 2014? Caramba! 12 anos! Conseguimos!!!

RESUMO

A escassez hídrica é um dos principais desafios para a gestão dos recursos hídricos no semiárido nordestino. Nesse sentido, a análise de risco torna-se essencial na gestão de recursos hídricos pois permite antever eventos críticos como secas severas e inundações, otimizar o uso água e fornecer subsídios para a tomada de decisão. O presente trabalho teve como objetivo analisar os riscos de atendimento das demandas hídricas do sistema de reservatórios superficiais Poções – Epitácio Pessoa, considerando diferentes níveis de aporte exógeno provenientes do Eixo Leste do Projeto de Integração do rio São Francisco (PISF). A metodologia é baseada em uma abordagem estocástica e probabilística, utilizando uma série histórica de precipitação de 32 anos como referência para a geração de 1.000 séries sintéticas por meio de uma distribuição Normal truncada. As precipitações foram transformadas em vazões afluentes pelo modelo hidrológico SMAP e posteriormente utilizadas na simulação da operação do sistema de reservatórios no software AcquaNet, considerando um horizonte operacional de cinco anos. Foram estabelecidos 11 cenários, correspondentes a aportes entre 0 e 100% da vazão de 4,2 m^3/s prevista pelo PISF. Para cada cenário, foram calculados os indicadores de confiabilidade e vulnerabilidade, posteriormente convertidos em níveis de probabilidade de falha e impacto conforme metodologia adaptada do TCU, permitindo a classificação qualitativa dos riscos. Os resultados demonstraram que, nos reservatórios do eixo receptor – Poções, Camalaú e Epitácio Pessoa –, o aumento da vazão exógena promoveu redução progressiva das classes de risco elevado, mas com respostas distintas entre reservatórios e tipos de uso. O abastecimento público apresentou maior capacidade de resposta ao aporte exógeno devido à sua prioridade operacional, enquanto os demais usos necessitaram de maiores percentuais da vazão transposta para atingir condições de menor risco. Conclui-se que o PISF constitui elemento estratégico para a segurança hídrica do sistema, embora sua efetividade dependa da compatibilização entre disponibilidade hídrica, demandas, prioridades de atendimento, regras operacionais e características hidrológicas locais.

Palavras-chave: geração de séries sintéticas; simulação estocástica; operação de reservatórios; semiárido; segurança hídrica; PISF.

ABSTRACT

Water scarcity is one of the major challenges facing water resources management in the semiarid region of northeastern Brazil. This study aimed to analyze the risks associated with meeting water demands within the Poções – Epitácio Pessoa surface reservoir system, considering different levels of external inflow from the East Axis of the São Francisco River Integration Project (PISF). The methodology is based on a stochastic and probabilistic approach, using a 32-year historical precipitation record as the reference for generating 1,000 synthetic series through a truncated Normal distribution. Precipitation data were converted into reservoir inflows using the SMAP hydrological model and subsequently used to simulate the operation of the reservoir system in AcquaNet over a five-year operational horizon. Eleven scenarios were established, representing inflows ranging from 0 to 100% of the 4.2 m^3/s discharge allocated by the PISF. For each scenario, reliability and vulnerability indicators were calculated and subsequently converted into levels of failure probability and impact according to a methodology adapted from the Tribunal de Contas da União (TCU), allowing the results to be classified into low, medium, high, and extreme risk categories. The results showed that, in the reservoirs along the receiving axis – Poções, Camalaú and Epitácio Pessoa – increasing external inflow progressively reduced the occurrence of higher-risk classes, although the response varied among reservoirs and water-use categories. Public water supply showed a greater response to external inflow because of its operational priority, whereas other uses required larger shares of the transferred flow to reach lower-risk conditions. The Poções reservoir showed the greatest vulnerability and dependence on the PISF, while Camalaú exhibited a rapid public-supply response to external inflow, and Epitácio Pessoa demonstrated greater relative robustness. In the auxiliary reservoirs, risk levels remained unaffected by PISF inflows, with critical conditions particularly associated with other water uses in Sumé and Santo Antônio. It is concluded that the PISF is a strategic component of the system's water security, however its effectiveness depends on the proper alignment of water availability, demands, allocation priorities, operating rules, and local hydrological characteristics.

Keywords: risk analysis, synthetic hydrological series, reservoir operation simulation, semiarid region, water security, São Francisco River Integration Project (PISF).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Matriz de riscos simples. 31
Figura 2. Fluxograma dos procedimentos metodológicos. 36
Figura 3. Localização geográfica da área de estudo. 37
Figura 4. Localização dos reservatórios estratégicos. 39
Figura 5. Topologia do sistema. 40
Figura 6. Distribuição espacial dos postos pluviométricos. 42
Figura 7. Histogramas mensais de precipitação. 46
Figura 8. Boxplot mensal da série histórica. 46
Figura 9. Decomposição da SH em tendência, sazonalidade e resíduos. 47
Figura 10. Média mensal sintética x histórica. 50
Figura 11. Desvio-padrão mensal sintético x histórico. 51
Figura 12. Coeficiente de variação mensal sintético x histórico. 51
Figura 13. Assimetria mensal sintética x histórica. 52
Figura 14. Curtose mensal sintética x histórica. 52
Figura 15. Obtenção da série de precipitações (P) para calibração do SMAP. 53
Figura 16. Área de drenagem utilizada para a calibração do SMAP. 55
Figura 17. Comparação entre vazões simuladas e observadas. 56
Figura 18. Áreas de contribuição exclusivas aos reservatórios. 58
Figura 19. Eixo receptor das águas do PISF. 65
Figura 20. Análise de riscos para o abastecimento público do reservatório Poções. 66
Figura 21. Curva de regularização do reservatório Poções. 67
Figura 22. Análise de riscos para os demais usos associados ao reservatório Poções. 68
Figura 23. Análise de riscos do abastecimento público do reservatório Camalaú. 70
Figura 24. Curva de regularização do reservatório Camalaú. 71
Figura 25. Análise de riscos para os demais usos associados ao reservatório Camalaú. 72
Figura 26. Análise de riscos do abastecimento público do reservatório Epitácio Pessoa. 74
Figura 27. Curva de regularização do reservatório Epitácio Pessoa. 75
Figura 28. Análise de riscos para os demais usos do reservatório Epitácio Pessoa. 76
Figura 29. Evolução do risco crítico (RC=RA+RE) *versus* %Qpisf. 78
Figura 30. Análise de riscos do abastecimento público do reservatório Taperoá II. 81
Figura 31. Curva de regularização do reservatório Taperoá II. 82
Figura 32. Análise de riscos do abastecimento público do reservatório Sumé. 83

Figura 33. Análise de riscos para os demais usos associados ao reservatório Sumé. 84
Figura 34. Análise de riscos para os demais usos associados ao reservatório Santo Antônio . 85
Figura 35. Análise de riscos do abastecimento público do reservatório Cordeiros..... 87
Figura 36. Curva de regularização do reservatório Cordeiros. 88
Figura 37. Análise de riscos para os demais usos associados ao reservatório Cordeiros. 89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Escala de probabilidades.....32
Tabela 2. Escala de consequências (impactos).....32
Tabela 3. Níveis de classificação de risco.....33
Tabela 4. Matriz de riscos.....33
Tabela 5. Características volumétricas dos reservatórios.....39
Tabela 6. Demandas, fontes hídricas e áreas de contribuição dos componentes do sistema....41
Tabela 7. Postos pluviométricos e seus pesos relativos.....43
Tabela 8. Série histórica de referência para a área de drenagem exclusiva de Boqueirão.....44
Tabela 9. Funções de correlação entre os reservatórios estratégicos e o principal.....45
Tabela 10. Testes de estacionariedade da série histórica de referência.....47
Tabela 11. Postos pluviométricos e seus pesos relativos na área de drenagem de Caraúbas...54
Tabela 12. Série de evapotranspiração mensal.....54
Tabela 13. Parâmetros de calibração do SMAP para o posto fluviométrico de Caraúbas.....55
Tabela 14. Escala de probabilidade de ocorrência de um evento de falha.....61
Tabela 15. Escala do Impacto de ocorrência de um evento de falha.....62
Tabela 16. Escala para classificação do nível de risco.....63
Tabela 17. Cenários propostos.....64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Síntese das principais conclusões. 91

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO 16

2 – OBJETIVOS 21

2.1 – OBJETIVO GERAL 21

2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS 21

3 – RELEVÂNCIA E CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA 22

3.1 – INOVAÇÃO E INEDITISMO 22

3.2 – ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS 22

3.3 – OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 22

4 – REVISÃO DE LITERATURA 24

4.1 – CONTEXTO E RELEVÂNCIA DOS RECURSOS HÍDRICOS 24

4.2 – DESAFIOS E INCERTEZAS NA OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS 25

4.3 – ANÁLISE DE RISCOS 27

5 – MATERIAL E MÉTODOS 34

5.1 – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA 34

5.2 – ABORDAGEM METODOLÓGICA E INOVAÇÃO CIENTÍFICA 34

5.3 – ÁREA DE ESTUDO 37

5.4 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 41

5.4.1 – PREPARAÇÃO DOS DADOS INICIAIS DE PRECIPITAÇÃO 41

5.4.2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA SÉRIE HISTÓRICA DE REFERÊNCIA 45

5.4.3 – GERAÇÃO SINTÉTICA DAS SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO 47

5.4.4 – MODELAGEM HIDROLÓGICA DAS VAZÕES 53

5.4.5 – SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO DO SISTEMA 56

5.4.6 – CÁLCULO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO 59

5.4.7 – CONVERSÃO PROBABILÍSTICA DOS INDICADORES DE DESEMPENHO EM ANÁLISE DE RISCOS 60

5.4.8 – ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS OPERACIONAIS 63

6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO 65

6.1 – RESERVATÓRIOS DO EIXO PRINCIPAL 65

6.1.1 – RESERVATÓRIO POÇÕES 65

Abastecimento urbano 65

Demais usos 68
6.1.2 – RESERVATÓRIO CAMALAÚ 69
Abastecimento urbano 69
Demais usos 72
6.1.3 – RESERVATÓRIO EPITÁCIO PESSOA 74
Abastecimento urbano 74
Demais usos 76
6.1.4 – AGREGAÇÃO DAS CLASSES DE RISCO ELEVADO 78

6.2 – RESERVATÓRIOS ESTRATÉGICOS 80
6.2.1 – RESERVATÓRIO TAPEROÁ II 80
Abastecimento urbano 80
6.2.2 – RESERVATÓRIO SUMÉ 82
Abastecimento urbano 82
Demais usos 84
6.2.3 – RESERVATÓRIO SANTO ANTÔNIO 85
Demais usos 85
6.2.4 – RESERVATÓRIO CORDEIROS 86
Abastecimento urbano 86
Demais usos 88

7 – CONCLUSÃO 91

7.1 – SÍNTESE DOS PRINCIPAIS ACHADOS 92

7.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 93

8 – REFERÊNCIAS 94

1 – INTRODUÇÃO

Por se tratar de um recurso limitado e sujeito a variações espaciais e temporais, a água tem seu consumo influenciado por diversos fatores, com impactos diretos sobre os setores que dela dependem em todo o mundo. Nesse contexto, os efeitos das mudanças climáticas, associados ao crescimento populacional contínuo, têm intensificado as pressões sobre os sistemas hídricos, restringindo o desenvolvimento econômico e afetando áreas essenciais, como a saúde pública e a qualidade de vida das populações. Esse cenário evidencia a escassez hídrica como um problema presente em diferentes nações, demonstrando que a dificuldade de acesso à água constitui uma realidade de alcance global (Ferreira, 2019).

De acordo com um estudo publicado pela ONU (2019), cerca de 900 milhões de pessoas vivem sem acesso à água potável, enquanto aproximadamente 40% da população mundial não dispõe de serviços adequados de saneamento básico. Esse cenário levou as Nações Unidas a reconhecerem a universalização do acesso à água e ao saneamento como uma das metas associadas ao desenvolvimento global.

No caso do Brasil, país de dimensões continentais, com mais de 8,5 milhões de km², observa-se acentuada heterogeneidade quanto à disponibilidade hídrica. Embora algumas regiões apresentem expressivo excedente hídrico médio anual, outras áreas do território nacional convivem com condições severas de escassez. Esse problema assume especial relevância no semiárido nordestino, região na qual está inserida grande parte do estado da Paraíba, cujas características climáticas são marcadas por elevadas taxas de evaporação, ciclos recorrentes de estiagem, grande variabilidade espaço-temporal das chuvas e baixos índices pluviométricos (Vieira, 1996; Morante-Carballo et al., 2022).

A obra de Lima e Magalhães (2018) evidencia que os registros de secas na região Nordeste remontam ao período colonial, com ocorrências documentadas desde 1553. O levantamento realizado pelos autores, entretanto, não se limita à apresentação histórica desses eventos, mas também aponta que, ao longo do tempo, as ações destinadas à mitigação de seus efeitos foram, em grande parte, marcadas pela ineficácia, pelo caráter emergencial e pela ausência de planejamento estrutural.

No âmbito social, os impactos mais expressivos das secas manifestam-se na insegurança hídrica e alimentar, bem como na intensificação do êxodo rural. Esses processos forçam famílias inteiras a migrarem para áreas urbanas, contribuindo para a desestruturação de

comunidades rurais e para a sobrecarga dos centros urbanos, onde situações de fome, pobreza e vulnerabilidade social tendem a se agravar.

No campo econômico, os prejuízos recaem principalmente sobre a agricultura, em especial sobre os sistemas de sequeiro, cuja dependência direta das chuvas torna a produção altamente vulnerável à variabilidade climática. Como consequência, há redução da produtividade, retração dos investimentos e limitação do desenvolvimento local. Cenários dessa natureza tendem a perpetuar ciclos de vulnerabilidade socioeconômica, frequentemente agravados pela dependência de medidas assistenciais, como cestas básicas e auxílios emergenciais governamentais (Mata; Freitas; Resende, 2019).

Segundo Ahmadi, Haddad e Loáiciga (2015), a elevada variabilidade climática, que afeta as vazões dos rios tanto em intensidade quanto em duração, torna indispensável a existência de sistemas integrados de informações hidrometeorológicas capazes de subsidiar o desenvolvimento e a aplicação de técnicas matemáticas e computacionais voltadas à representação mais precisa dos fenômenos hidrológicos. Apesar dos avanços tecnológicos observados nas últimas décadas, parte significativa das ferramentas empregadas na interpretação de sistemas hídricos e na solução de problemas de gestão ainda se apoia em abordagens predominantemente determinísticas. Tais abordagens, embora úteis em determinados contextos, apresentam limitações importantes diante das múltiplas influências, sobretudo de natureza estocástica, às quais os processos associados aos recursos hídricos estão sujeitos (Sun et al., 2018).

Nesse sentido, Nourani et al., (2020) destacam a necessidade de incorporar incertezas e processos estocásticos ao gerenciamento dos sistemas de recursos hídricos, a fim de se obter uma compreensão mais abrangente, realista e tecnicamente consistente de seu funcionamento. Indicadores como confiabilidade e vulnerabilidade têm sido amplamente utilizados na avaliação da sustentabilidade do atendimento às demandas hídricas de longo prazo, especialmente quando associados à definição de cenários de alocação de água e à aplicação de análises estocásticas de vazões por meio de simulações de balanço hídrico (Liu et al., 2015; Santana, 2022).

Nesse contexto, surge a hipótese de que a análise de riscos pode contribuir de forma significativa para ampliar a compreensão e aprimorar o diagnóstico dos problemas associados à escassez hídrica no semiárido nordestino. Essa hipótese fundamenta-se no potencial dessa abordagem para avaliar o desempenho de sistemas de recursos hídricos e, em especial, das

regras de operação de reservatórios, permitindo melhor equacionamento entre oferta e demanda, maior precisão na previsão de falhas e apoio mais consistente aos processos de tomada de decisão relacionados aos sistemas de distribuição e alocação de água (Sun et al., 2018).

Considerada por Hariri-Ardebili (2018) uma técnica de avaliação mais abrangente, a análise de riscos possibilita a incorporação de aspectos de aleatoriedade por meio da modelagem de sistemas hídricos com base em processos estocásticos. Uma das formas de desenvolver esse tipo de análise consiste na construção de um panorama probabilístico, obtido a partir da simulação estocástica do balanço hídrico de sistemas de reservatórios em bacias hidrográficas. Essa abordagem pode utilizar variáveis como precipitação e vazão geradas sinteticamente, reduzindo a dependência exclusiva de longas séries históricas observadas e ampliando a capacidade de investigação de cenários hidrológicos possíveis.

Admite-se, portanto, que um diagnóstico robusto dos riscos associados à operação de sistemas de reservatórios superficiais pode ser obtido a partir dos resultados das simulações de séries sintéticas geradas por métodos estocásticos, compondo espaços amostrais de indicadores como confiabilidade e vulnerabilidade. A partir desses espaços amostrais, torna-se possível calcular os níveis de probabilidade de ocorrência dos indicadores em diferentes cenários de disponibilidade hídrica, conferindo maior objetividade à avaliação do desempenho do sistema.

A área de estudo selecionada para o desenvolvimento desta pesquisa corresponde ao sistema de reservatórios Poções – Epitácio Pessoa, compreendido por sua bacia de contribuição, que abrange a Região do Alto Curso do rio Paraíba, a sub-bacia do rio Taperoá e demais reservatórios com capacidade superior a 10 hm^3. A escolha desse sistema justifica-se por seu histórico de crises hídricas recorrentes, característica marcante do semiárido nordestino, bem como por sua relevância socioeconômica, uma vez que sua área de influência abriga população superior a 300 mil habitantes.

Outro fator que reforça a relevância da área de estudo é a seca ocorrida entre 2012 e 2017, considerada por Lima e Magalhães (2018) uma das mais longas e severas da história recente do Nordeste. Seus efeitos foram particularmente expressivos na região, sendo ilustrativo o fato de que, somente no primeiro ano do evento, o número de municípios que declararam situação de emergência na área de atuação da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (Sudene) aumentou 1.409% em relação ao ano anterior.

No caso específico do açude Epitácio Pessoa, maior reservatório do sistema, Lucena (2018) afirma que esse evento representou a pior seca registrada desde sua construção, na década de 1950. Municípios inteiros abastecidos pelo reservatório, a exemplo de Campina Grande, segundo maior município do estado da Paraíba, enfrentaram o maior e mais severo ciclo de racionamento de sua história recente, aproximando-se de um cenário de colapso absoluto em seus sistemas de abastecimento.

Além desses fatores, destaca-se a inserção da área de estudo no Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), que prevê uma vazão firme de 4,2 m^3/s para o sistema. Diante dessa condição, torna-se necessário avaliar a suficiência, a sustentabilidade e os riscos associados a esse aporte hídrico exógeno, considerando não apenas sua disponibilidade nominal, mas também sua capacidade efetiva de atender às demandas hídricas de abastecimento urbano e demais usos sob diferentes cenários hidrológicos e operacionais.

Dessa forma, realizou-se uma análise detalhada dos riscos associados ao não atendimento das diferentes demandas hídricas existentes na área de estudo, considerando cenários que variam desde a ausência de aporte hídrico exógeno até a disponibilidade integral da vazão transposta projetada. A partir de uma série histórica de precipitação com 32 anos de extensão, buscou-se quantificar esses riscos e classificá-los em níveis baixo, médio, alto e extremo, com base na combinação entre as probabilidades de falha no atendimento às demandas e seus respectivos impactos. Nesse sentido, o presente trabalho busca avançar no preenchimento de uma importante lacuna quantitativa ainda existente, incorporando uma abordagem probabilística capaz de mensurar, comparar e classificar os riscos associados ao atendimento das demandas hídricas sob diferentes condições de disponibilidade hídrica.

Obteve-se ainda como resultado complementar um diagnóstico da condição atual do sistema hídrico delimitado pela área de estudo, bem como a proposição de alternativas efetivas para o uso das águas do PISF. Para tanto, foram estabelecidos diferentes cenários de disponibilidade hídrica e realizadas simulações estocásticas de séries sintéticas, de modo a considerar o maior número possível de condicionantes relevantes, tais como o abastecimento urbano de municípios, o atendimento a áreas irrigadas, os volumes-meta dos reservatórios, as regras de operação integrada e demais restrições associadas ao balanço hídrico do sistema.

O presente estudo oferece uma base técnico-científica consistente para subsidiar gestores e tomadores de decisão na formulação de políticas públicas voltadas à segurança hídrica, à eficiência operacional dos sistemas de reservatórios e à sustentabilidade ambiental da

região. Ao integrar simulação estocástica, indicadores de desempenho e análise probabilística de riscos, o estudo busca contribuir para uma compreensão mais precisa das vulnerabilidades do sistema Poções – Epitácio Pessoa e para o aprimoramento de estratégias de planejamento e gestão dos recursos hídricos no semiárido nordestino.

2 – OBJETIVOS

2.1 – OBJETIVO GERAL

Analisar os riscos do atendimento das demandas hídricas do sistema de reservatórios superficiais Poções – Epitácio Pessoa.

2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as principais estruturas e suas respectivas demandas hídricas no sistema estudado;
- Avaliar a sensibilidade do sistema hídrico (níveis de probabilidade de falha e impacto das demandas) à variação de diferentes níveis de vazão exógena;
- Estabelecer pontos de inflexão em termos dos níveis de vazão exógena onde o sistema colapsa ou muda de regime;
- Indicar componentes do sistema com maior fragilidade e propensão a eventos de falhas recorrentes, bem como seu grau de dependência do PISF;

3 – RELEVÂNCIA E CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

3.1 – INOVAÇÃO E INEDITISMO

O presente trabalho apresenta aspectos de originalidade à medida que se propõe a realizar uma análise de riscos do não atendimento das demandas hídricas de abastecimento urbano e demais usos do sistema hídrico Poções – Epitácio Pessoa, no estado da Paraíba, em face do aporte hídrico exógeno de 4,2 m³/s oferecido pelo Projeto de Integração do rio São Francisco (PISF).

Através de uma metodologia avançada, lastreada em modelagem estocástica, geração de dados hidrológicos sintéticos e simulação de balanço hídrico para o cálculo de probabilidades acerca de indicadores de desempenho, a pesquisa apresenta um foco regional, além de relevância científica e social demonstrada pela escolha da área de estudo, podendo culminar na discussão e proposição de ideias para o desenvolvimento de políticas potencialmente benéficas a mais de 700 mil pessoas em uma importante porção da região semiárida nordestina.

3.2 – ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS

Esta pesquisa apresenta o desenvolvimento regional e a insegurança hídrica, principal causa da insegurança alimentar, como os principais apelos justificantes de sua realização no âmbito social, fatores que com frequência culminam na desestruturação de comunidades e na sobrecarga de centros urbanos.

No que concerne ao desenvolvimento econômico, são apontados os prejuízos à agricultura de um modo geral que desestimulam investimentos, impedem o crescimento local e reduzem a produtividade. No aspecto ambiental, a maior expressão da degradação ambiental é o desmatamento e a poluição dos corpos d'água, que tendem a reduzir de uma forma geral a oferta para o consumo humano e para as atividades produtivas, justificando a realização da pesquisa à medida que busca diretamente desenvolver estratégias efetivas de conservação ambiental e uso sustentável dos recursos hídricos.

3.3 – OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

- Fome zero e agricultura sustentável (ODS 2);

- Água potável e saneamento (ODS 6); e
- Cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11).

4 – REVISÃO DE LITERATURA

4.1 – CONTEXTO E RELEVÂNCIA DOS RECURSOS HÍDRICOS

A utilização dos recursos hídricos obedece a princípios fundamentais que consideram a água como um bem de domínio público, recurso natural limitado e dotado de valor econômico, sendo fundamental para a evolução das sociedades e civilizações. À medida que interfere diretamente na dinâmica das relações sociais em termos de abastecimento urbano e atividades produtivas, a água permeia o exercício de funções ecológicas, prestação de serviços ambientais e condicionamento de valores sociais. Por ser um recurso limitado e variável, a sua demanda vai continuar aumentando nas próximas décadas em nível global, e o problema da escassez hídrica aflige também localmente o Brasil, em especial a sua região semiárida nordestina, o que tem promovido a tomada de várias iniciativas para solucioná-lo. A transferência de água entre bacias com excedentes hídricos em regiões com graves problemas de escassez é praticada desde que foram construídas as grandes cidades no início da civilização, sendo considerada ainda como um procedimento fundamental na organização do território e estratificação social (Fernández-Arroyo; Rodríguez-Marín, 2017).

A construção de modernas infraestruturas hidráulicas se intensificou no Século XIX, quando foram realizadas obras de grandes dimensões para levar água de bacias excedentárias para aquelas deficitárias, a exemplo do Rio Tejo para o Rio Segura, na Península Ibérica; do Rio Colorado à Califórnia, nos Estados Unidos; do Rio Yangtzé para as regiões áridas do norte da China (Gil, 2006; Hanak et al., 2011; Wang; Li, 2019). No Brasil, a transposição do Rio São Francisco é uma das principais alternativas técnicas para conferir segurança hídrica ao semiárido nordestino, aventada desde as épocas imperiais como possível solução impulsionadora do desenvolvimento regional (Rodrigues, 2023).

Em alguns casos e locais, medidas radicais de restrição de uso da água precisam ser implementadas para a dissolução de conflitos decorrentes da diminuição da oferta hídrica, o que leva consequentemente à redução do desenvolvimento econômico e à degradação da qualidade de vida da população (Morante-Carballo et al., 2022). Setores como o agrícola, industrial e energético destacam-se como os maiores demandantes hídricos mundiais, sendo o agrícola o maior consumidor e responsável por 70% do consumo, o qual se dá predominantemente por causa do maior número de áreas irrigadas, interiorização da agricultura e da pecuária (Ferreira, 2019).

A organização e a administração de sistemas de recursos hídricos têm como base a busca pela eficiência hídrica, econômica e operacional, sem deixar de considerar os aspectos sociais, ambientais e institucionais. O aumento da demanda global por água, aliado à redução de sua disponibilidade e qualidade, torna a coordenação estratégica uma prioridade essencial para suprir as crescentes necessidades e garantir um futuro ambientalmente equilibrado. A comunidade científica tem demonstrado interesse crescente na governança sustentável dos recursos hídricos, buscando evidenciar a relevância de políticas integradas e embasadas em dados para fortalecer a resiliência e a perenidade dos sistemas hídricos (Durán-Sánchez; Álvarez-García; Del Río-Rama, 2018).

As mudanças climáticas acrescentam um nível de complexidade à questão da escassez dos recursos hídricos e não podem ser ignoradas. Para enfrentar esse desafio, é fundamental desenvolver estratégias de adaptação na gestão dos recursos hídricos, ampliando a capacidade de previsão e planejamento com foco na eficiência dos sistemas, além de coordenar práticas de irrigação, uso da terra e alterações na cobertura do solo (Guemouria et al., 2023; Zhao; Boll, 2022). A gestão integrada e interdisciplinar é portanto essencial para equilibrar as múltiplas demandas e mitigar impactos negativos, promovendo a resiliência dos sistemas hídricos e a segurança alimentar das comunidades (Daus et al., 2021).

4.2 – DESAFIOS E INCERTEZAS NA OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

A interação entre as atividades humanas e a dinâmica hidrológica das bacias hidrográficas resulta em mudanças significativas na disponibilidade dos recursos hídricos, impactando diretamente a operação dos reservatórios. O uso intensivo da terra, a urbanização descontrolada e as práticas inadequadas de manejo do solo afetam tanto a qualidade quanto a quantidade da água disponível, intensificando os riscos de escassez hídrica. Essa situação se agrava com os desequilíbrios nos padrões pluviométricos, que podem ser amplificados por variabilidades climáticas e mudanças ambientais. Assim, a operação dos reservatórios não deve ser considerada um processo isolado, mas sim um elemento fundamental de um sistema complexo, onde a gestão eficiente é essencial para evitar a deterioração dos mananciais e minimizar conflitos pelo uso da água (Daus et al., 2021; Vieira, 2011).

O gerenciamento de reservatórios envolve desafios técnicos e operacionais que vão além da simples captação e armazenamento. A gestão eficiente deve garantir o abastecimento humano, a irrigação, a geração de energia, o controle de enchentes e a manutenção dos

ecossistemas aquáticos, conciliando múltiplos usos e interesses. Contudo, a limitação dos recursos hídricos exige a definição criteriosa de prioridades, com base no retorno social e econômico, levando em consideração aspectos de equidade, eficiência e sustentabilidade.

A incerteza hidrológica, típica de regiões semiáridas, e os riscos associados à operação de reservatórios demandam estratégias robustas para lidar com eventos extremos, como secas e enchentes. A capacidade de resposta do sistema a essas condições depende da adoção de modelos preditivos e de gestão que incorporem variáveis estocásticas, permitindo um planejamento mais eficaz frente a diferentes cenários. Modelos hidrológicos avançados são indispensáveis para a simulação dos regimes de escoamento em bacias hidrográficas, pois possibilitam a representação mais realista da interação entre fluxos naturais e gerenciados (Yassin et al., 2019).

A literatura classifica os modelos de operação de reservatórios em diferentes abordagens, desde os mais simples, que negligenciam a gestão (como os Modelos de Captação – MC), até os Modelos de Gestão da Água – MGA, que incorporam representações detalhadas das decisões operacionais. Entre esses extremos, encontram-se os Modelos Globais de Segurança Hídrica – MGSH e os Modelos de Superfície – MS, ambos úteis para simulações em grande escala, mas frequentemente limitados pela escassez de dados operacionais detalhados. A escolha do modelo adequado depende do nível de detalhamento desejado e da disponibilidade de informações sobre a bacia em estudo (Archfield et al., 2015).

Os desafios operacionais são amplificados pela complexidade inerente ao comportamento não linear dos sistemas hídricos. Métodos tradicionais baseados em equações empíricas podem ser úteis para representações simplificadas, mas apresentam limitações quando aplicados a sistemas dinâmicos e altamente variáveis (Yang et al., 2019). Nesse contexto, tem ganhado destaque o desenvolvimento de espaços amostrais sintéticos por meio de simulações estocásticas do balanço hídrico, fundamentadas na aleatoriedade dos processos hidrológicos.

Através da aplicação do conceito da Simulação de Monte Carlo, é possível obter uma estimativa probabilística dos eventos no espaço amostral de variáveis críticas do sistema, como vazões afluentes, volumes armazenados e demandas atendidas. A partir dessas distribuições, é possível identificar a faixa de valores mais provável para a ocorrência de indicadores de desempenho do sistema, como confiabilidade e vulnerabilidade (Daus et al., 2021; Guemouria et al., 2023).

É possível deduzir então que a operação dos reservatórios está diretamente ligada à análise de riscos, uma vez que decisões inadequadas podem comprometer a segurança hídrica e econômica das regiões dependentes desses sistemas. Nesse âmbito, os riscos podem ser classificados em diferentes categorias, incluindo os hidrológicos, operacionais, ambientais e socioeconômicos, cuja mitigação exige a implementação de estratégias de gestão adaptativa, baseadas na combinação de monitoramento em tempo real, modelagem preditiva e planos de contingência. O uso de ferramentas de otimização e simulação permite avaliar diferentes cenários operacionais e tomar decisões mais tecnicamente fundamentadas, reduzindo vulnerabilidades e aumentando a resiliência dos sistemas hídricos (Yassin et al., 2019).

No que concerne à governança dos recursos hídricos, a operação dos reservatórios deve ser guiada por políticas integradas que considerem tanto os aspectos técnicos quanto os sociais e ambientais. A transparência na tomada de decisão e a participação de múltiplos atores – inclusive órgãos gestores, usuários e a sociedade civil – são fundamentais para garantir um planejamento equilibrado e eficiente. Além disso, a adoção de práticas baseadas no conceito de gestão de riscos fortalece a capacidade do sistema em lidar com incertezas, promovendo maior segurança hídrica e sustentabilidade a longo prazo (Daus et al., 2021; Guemouria et al., 2023).

Considerando esse panorama, a análise de riscos na operação de reservatórios emerge como um elemento central para a tomada de decisões estratégicas, permitindo a identificação de vulnerabilidades e a formulação de políticas mais resilientes. Em uma situação de mudanças climáticas e crescente demanda por recursos hídricos, a necessidade de aperfeiçoar os métodos de gestão torna-se ainda mais evidente, impulsionando o desenvolvimento de novas abordagens e ferramentas que garantam a eficiência e a segurança na operação dos sistemas hídricos.

4.3 – ANÁLISE DE RISCOS

A análise de riscos em sistemas de recursos hídricos se relaciona diretamente com a identificação, avaliação, monitoramento e controle dos riscos associados ao uso, gestão e conservação da água em uma bacia hidrográfica. Trata-se de uma abordagem que tem sido amplamente incorporada à gestão de sistemas hídricos por permitir que a tomada de decisão não se apoie apenas em cenários médios ou determinísticos e passe a considerar explicitamente a incerteza associada à oferta, à demanda e ao desempenho operacional. A garantia da segurança, sustentabilidade e eficiência no gerenciamento dos recursos hídricos depende intimamente dessa análise (Kombo Mpindou; Escuder Bueno; Chordà Ramón, 2022).

Ela pressupõe a capacidade de identificar fragilidades, riscos ambientais e antrópicos na bacia e diante disso propor alternativas eficazes, baseando-se num método claro que resulte efetivamente em praticidade para a maior parte dos cenários possíveis (Kombo Mpindou; Escuder Bueno; Chordà Ramón, 2022). Em sistemas de reservatórios, essa perspectiva é particularmente relevante, pois eventos de escassez, falhas de atendimento e déficits prolongados não dependem apenas da magnitude da disponibilidade hídrica, mas também da frequência com que ocorrem, da severidade dos impactos produzidos e da capacidade do sistema de recuperação após períodos críticos.

Pollard et al. (2004) afirmam que o uso de tecnologias e sistemas de informação são imprescindíveis para monitorar e identificar precocemente sinais de riscos iminentes, contudo apontam para a necessidade de atualizar periodicamente a base de dados através de revisões de tecnologias e mudanças nas condições socioambientais, como promotora de confiança para toda a análise desenvolvida. Ao longo de muitas décadas, a falta d'água, causa primária da baixa confiabilidade do abastecimento urbano, associada à má qualidade e aos eventos extremos de seca ou inundação têm sido objeto de discussão no mundo acadêmico. A complexidade dos sistemas impõe aos planejadores a necessidade de consideração aprofundada dos riscos nas tomadas de decisão, inclusive por meio de modelagem matemática (Li; Huang, 2013).

O uso de técnicas de simulação é um exemplo de modelagem que favorece a avaliação de cenários e a obtenção de resultados de variáveis qualitativas e quantitativas, compondo importante base de dados para as mais diferentes abordagens de análise (Cheng et al., 2017). Assim, o processo de simulação em sistemas de recursos hídricos é fundamental, pois, no contexto da previsão e gestão de recursos hídricos, permite prever a disponibilidade de água em diferentes cenários climáticos e de uso da terra. Isto é fundamental para planejar a alocação eficiente dos recursos hídricos, especialmente em regiões com alta variabilidade climática, como a do semiárido nordestino.

Estudos como o de Guyasa, Guan e Zhang (2024) destacam a importância de estimar as variações no balanço hídrico para gerenciar e desenvolver a gestão dos recursos hídricos de forma eficaz, evidenciando que as ferramentas de simulação oferecem suporte robusto para a obtenção de políticas de gestão de água, ajudando a formular planos de contingência e estratégias de mitigação para enfrentar eventos extremos, como secas e inundações. Ao evitar a necessidade de protótipos físicos e permitir a identificação de problemas antes da

implementação de sistemas reais, a simulação economiza recursos de forma significativa e ajuda a prever e mitigar potenciais desastres.

A simulação de Monte Carlo se insere nesse contexto como uma técnica matemática que usa a geração de números aleatórios para resolver problemas complexos, sendo frequentemente utilizada para analisar o comportamento de sistemas e processos complexos em áreas como finanças, engenharia, física, análise e gestão de riscos (Metropolis et al., 1953). Pela realização de várias simulações de possíveis cenários e consequente observação e anotação dos resultados, é possível obter uma estimativa probabilística dos eventos no espaço amostral, o que faz dela uma técnica amplamente utilizada para modelar a incerteza e calcular distribuições de probabilidade de possíveis resultados.

Nesse sentido, Moghadam et al. (2022) desenvolveram um estudo que aborda a Simulação de Monte Carlo para estimar a probabilidade de falha do reservatório Amir Kabir, no Irã, com base na variabilidade de condições de demanda e afluência, demonstrando que essa abordagem oferece uma base sólida para a tomada de decisões sob incerteza, incorporando de forma explícita os riscos associados ao comportamento hidrológico e à operação dos reservatórios.

Arefinia Aliand e Bozorg-Haddad (2021) concordam que um dos conceitos mais fundamentais de análise de riscos remete diretamente ao estudo das probabilidades de ocorrência de determinados eventos através de uma análise histórica e de modelos preditivos que determinem a frequência dos eventos de risco. Na gestão de sistemas de recursos hídricos, Chesnutt et al. (2021) afirmam que a probabilidade pode desempenhar um papel fundamental na tomada de decisões para a gestão de sistemas de recursos hídricos ao ajudar a quantificar e comunicar a incerteza associada a eventos hidrológicos, climáticos e operacionais. No contexto da modelagem e previsão de vazões e precipitação, segundo eles, os modelos probabilísticos são muito utilizados, ajudando a entender a variabilidade natural e a antecipar eventos extremos, como secas e inundações.

Na simulação de cenários climáticos, modelos estocásticos utilizam probabilidades para gerar múltiplos cenários de futuros possíveis, ajudando a planejar e adaptar estratégias de gestão de recursos hídricos. Nesse sentido, Wang e Liu (2023) empregaram modelos probabilísticos para capturar a incerteza associada às previsões climáticas e hidrológicas que ajudaram a prever a variabilidade dos parâmetros hidrológicos (precipitação e vazão) sob diferentes cenários climáticos. Através da utilização de cenários múltiplos, gerados por modelos climáticos globais

e técnicas de redução dinâmica de escala, incorporaram a incerteza inerente às previsões climáticas, peça-chave para entender as probabilidades de diferentes eventos hidrológicos e seus impactos.

Em seu estudo, eles utilizaram análise de riscos para avaliar os impactos de cenários climáticos de disponibilidade de água em eventos extremos (secas e inundações), sendo a probabilidade um componente central nessas análises, permitindo quantificar os riscos e desenvolver estratégias de mitigação. Os mesmos autores analisaram a frequência e intensidade de eventos extremos usando distribuições probabilísticas, tais como o mapeamento de quantis, para corrigir os vieses nos dados climáticos gerados pelos modelos climáticos globais, tendo sido a probabilidade de ocorrência de secas ou inundações extremas calculada para cada cenário, ajudando a entender a distribuição de risco ao longo do tempo e do espaço.

Trabalhos como o de Tang e Wang (2025) têm reforçado essa perspectiva: como a operação de reservatórios baseada em análise de riscos deve incorporar indicadores como confiabilidade (C) e vulnerabilidade (V) para avaliar segurança hídrica sob seca e incerteza hidrológica. Nesse mesmo sentido, Gong et al. (2024) pregam a adoção de modelos analíticos de risco aplicados à operação em tempo real de reservatórios, ao passo que Dash, Sahoo e Raghuwanshi (2023) recomendam a utilização de estruturas integradas de operação voltadas ao planejamento de recursos hídricos sob variabilidade climática. Todos esses estudos concordam que a gestão de reservatórios deve ser entendida como um problema probabilístico e operacional, no qual o risco emerge da combinação entre possibilidade de falha e magnitude das consequências.

Nesse contexto, o Tribunal de Contas da União (Brasil, 2018) fornece uma estrutura conceitual de análise de riscos que define o risco como a possibilidade de que um evento afete negativamente o alcance de objetivos e estabelece que sua análise deve considerar ao mesmo tempo a probabilidade de ocorrência e o impacto. A mesma fonte preconiza três etapas principais ao adequado desenvolvimento da análise de riscos, a saber: 1- Avaliação do impacto do evento; 2- Avaliação da sua probabilidade de ocorrência; e 3- Definição do nível de risco a partir de uma matriz impacto x probabilidade.

Para Brasil (2018), a análise de riscos consiste em compreender a natureza do risco e determinar o nível do risco, subsidiando a avaliação e a tomada de decisões. Segundo ele, o risco é função tanto da probabilidade de ocorrência de um evento como de suas consequências, e a combinação de ambos determina o nível de risco. Outro aspecto importante destacado pelo

autor é que a identificação de fatores que afetam a probabilidade e as consequências é parte fundamental de uma boa análise de riscos, que pode ser qualitativa, semiquantitativa, quantitativa ou uma combinação destas, cujo método e nível de detalhamento podem ser influenciados pelos objetivos, natureza do risco, dados e recursos disponíveis. A lógica por trás do nível de risco é proporcional à probabilidade e ao impacto, sendo essencialmente o produto dessas variáveis:

$$R = P \; x \; I \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Desse modo, a relação entre o nível de risco e as variáveis que o compõem pode ser visualizada por meio de uma matriz de risco, como mostra a Figura 1.

Figura 1. Matriz de riscos simples.



Fonte: Adaptado de Brasil (2018).

A metodologia do TCU (Brasil, 2018) utiliza escalas para fornecer um entendimento comum das classificações de probabilidade e impacto, conforme mostram as Tabelas 1 e 2, que

descrevem respectivamente a escala de probabilidades e a escala de consequências (ou impactos).

Tabela 1. Escala de probabilidades.

PROBABILIDADE	DESCRIÇÃO DA PROBABILIDADE	PESO
Muito baixa	**Improvável**. Em situações excepcionais, o evento poderá até ocorrer, mas nada nas circunstâncias indica essa possibilidade.	1
Baixa	**Rara**. De forma inesperada ou casual, o evento poderá ocorrer, pois as circunstâncias pouco indicam essa possibilidade.	2
Média	**Possível**. De alguma forma o evento poderá ocorrer, pois as circusntâncias indicam moderadamente essa possibilidade.	5
Alta	**Provável**. De forma até esperada, o evento poderá ocorrer, pois as circunstâncias indicam fortemente essa possibilidade.	8
Muito alta	**Praticamente certa**. De forma inequívoca, o evento ocorrerá, as circunstâncias indicam claramente essa possibilidade.	10

Fonte: Brasil (2018).

Tabela 2. Escala de consequências (impactos).

IMPACTO	DESCRIÇÃO DO IMPACTO (CASO O EVENTO OCORRA)	PESO
Muito baixo	**Mínimo**.	1
Baixo	**Pequeno**.	2
Médio	**Moderado**, porém recuperável.	5
Alto	**Significativo**, de difícil reversão.	8
Muito alto	**Catastrófico**, irreversível.	10

Fonte: Brasil (2018).

O nível de risco inerente (RI) de um evento resulta da combinação (multiplicação) da probabilidade com o impacto, de acordo com as tabelas anteriores, adotando-se a classificação apresentada na Tabela 3:

Tabela 3. Níveis de classificação de risco.

RB (Risco Baixo)	**RM** (Risco Médio)	**RA** (Risco Alto)	**RE** (Risco Extremo)
0 - 9,99	10 - 39,99	40 - 79,99	80 - 100

Fonte: Brasil (2018).

E os resultados das combinações de probabilidade e impacto, classificados de acordo com a escala de níveis de risco, formam uma matriz de riscos, conforme a Tabela 4 a seguir.

Tabela 4. Matriz de riscos.

IMPACTO						
	Muito alto 10	10 (RM)	20 (RM)	50 (RA)	80 (RE)	100 (RE)
	Alto 8	8 (RB)	16 (RM)	40 (RA)	64 (RA)	80 (RE)
	Médio 5	5 (RB)	10 (RM)	25 (RM)	40 (RA)	50 (RA)
	Baixo 2	2 (RB)	4 (RB)	10 (RM)	16 (RM)	20 (RM)
	Muito baixo 1	1 (RB)	2 (RB)	5 (RB)	8 (RB)	10 (RM)
		Muito baixa 1	Baixa 2	Média 5	Alta 8	Muito alta 10
		PROBABILIDADE				

Fonte: Brasil (2018).

5 – MATERIAL E MÉTODOS

5.1 – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

No que diz respeito à classificação da pesquisa, pode-se afirmar que quanto a(o):

1) Metodologia: Trata-se do método hipotético-dedutivo, pela percepção da possibilidade de aprimoramento de conhecimentos já existentes;

2) Natureza: Pesquisa aplicada, pois é voltada à aquisição de conhecimentos com vistas à aplicação numa situação específica;

3) Objetivo: Pesquisa exploratória, pois realiza a integração de várias técnicas sem a perspectiva de resultados totalmente previstos, mas ainda assim promove a discussão do problema, possibilitando a construção de hipóteses para a sua solução; e

4) Procedimentos: Estudo de caso, à medida que busca aprofundar o conhecimento sobre as causas e comportamento do elemento ou sistema estudado (Gil, 2007; Pereira et al., 2018).

5.2 – ABORDAGEM METODOLÓGICA E INOVAÇÃO CIENTÍFICA

A abordagem metodológica utilizada consiste numa estrutura de análise de riscos por meio de dados obtidos por simulação estocástica das redes de reservatórios, com o objetivo principal de dar suporte à decisão na previsão do risco do não atendimento às demandas frente a possíveis variações no fornecimento da vazão exógena proveniente do PISF, que podem ter diversas causas, entre elas: a) manutenções no canal; b) secas extremas no rio; ou 3) decisões políticas.

O modelo de classificação buscou trazer inovações para a análise de riscos através do uso de dados de entrada sintéticos, em que serão(á): a) Geradas 1000 séries sintéticas de precipitação; b) Obtidas as vazões afluentes correspondentes; e c) Simulada a operação do sistema sob essas condições. Em cada simulação, serão obtidos os indicadores de desempenho – Confiabilidade (C) e Vulnerabilidade (V), o que permite a construção de um espaço amostral probabilístico capaz de mostrar como o sistema responderia em termos de desempenho a restrições progressivas da vazão transposta, diante das incertezas naturais, como chuva e vazão.

Dessa forma, a probabilidade associada a cada faixa de risco (baixo, médio, alto ou extremo) estará diretamente ligada a uma decisão a ser tomada pelos gestores, comitês de bacia

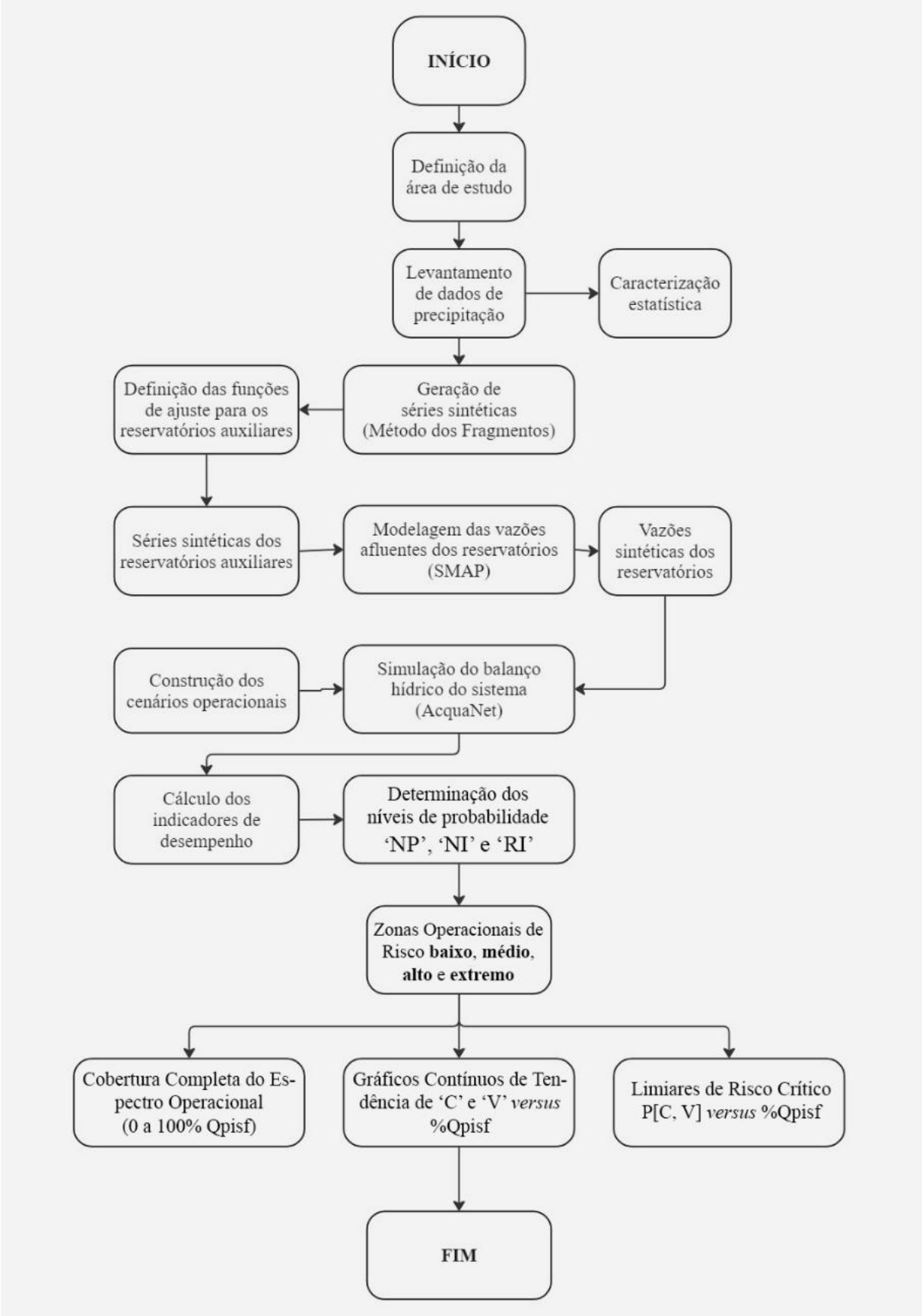
e/ou usuários de maneira especializada nos projetos de intervenção e na operação dos sistemas. Como consequência, haverá a possibilidade de identificação de níveis críticos de operação onde os riscos se tornam inaceitáveis, permitindo o diagnóstico do sistema frente ao fornecimento da vazão exógena efetivamente entregue à área de estudo, mostrando que uma política de corte de vazão sem medidas compensatórias pode reduzir drasticamente o desempenho do sistema.

Portanto, será possível a formulação de estratégias de alocação de água mais robustas, bem como a verificação se o sistema é muito sensível a reduções da transposição, podendo-se então revisar prioridades de uso, como garantir o abastecimento urbano. E enfim poderá ainda servir para instrumentar políticas públicas, sendo apresentado em comitês de bacia, reuniões técnicas ou apoiar a prospecção de recursos financeiros junto a órgãos de fomento.

Devido à grande quantidade de informações utilizadas e geradas, especialmente no que concerne ao processamento das operações matemáticas, tais como rotinas de tratamento, análise estatística e processamento de dados, foram utilizadas ferramentas computacionais e linguagens de programação, como R (R Core Team, 2023) e Python (Python Software Foundation, 2023), além de LAB Fit (Silva et al., 2004) e LabSid AcquaNet (Labsid, 2013).

A Figura 2 apresenta a sequência das etapas e procedimentos realizados, organizados e sintetizados em formato de fluxograma.

Figura 2. Fluxograma dos procedimentos metodológicos.

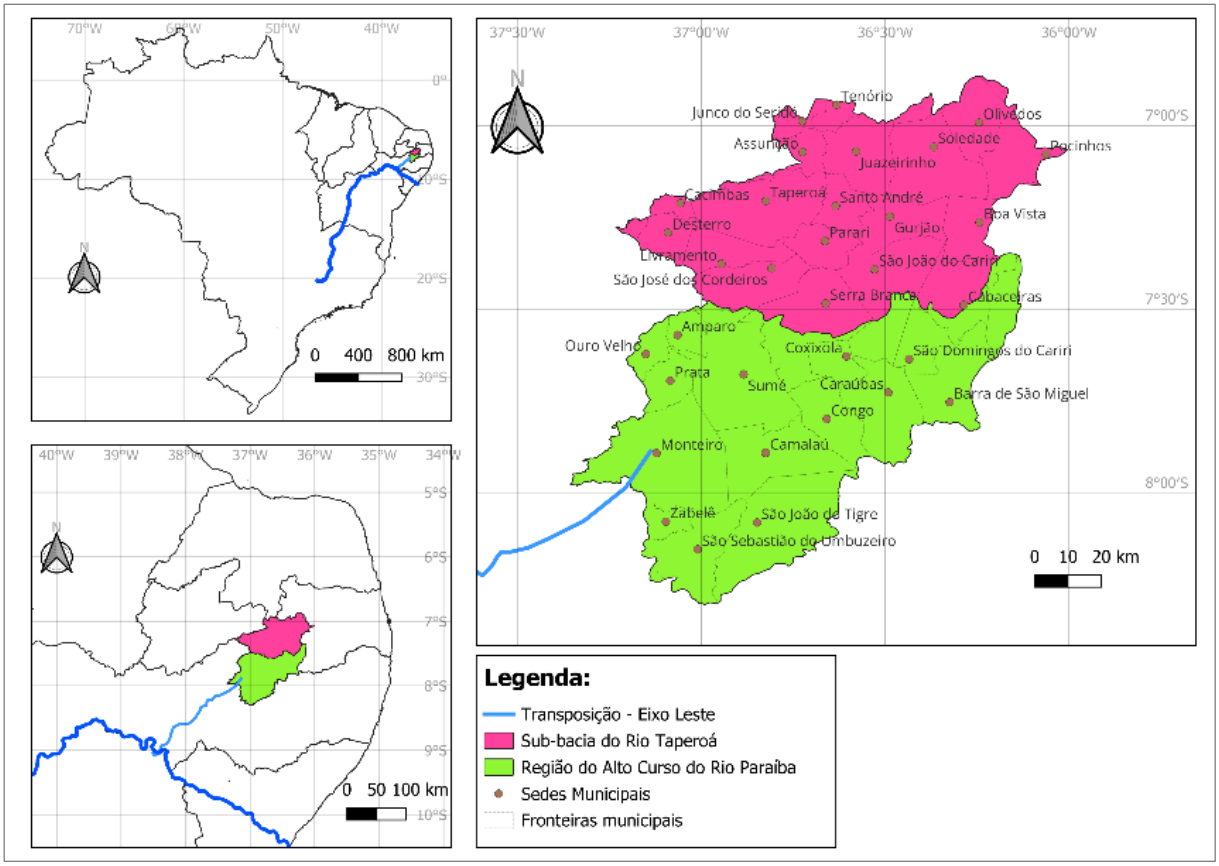


Fonte: Autoria própria (2025).

5.3 – ÁREA DE ESTUDO

A região alto curso do rio Paraíba e a sub-bacia do rio Taperoá compõem a área de estudo selecionada para a realização dos estudos de análise de riscos objeto desta pesquisa, e a Figura 3 mostra a sua localização geográfica. Situada no Planalto da Borborema (PB), ocupa uma área total de 12.378,23 km², sendo 6.727,70 km² (54,4%) correspondentes à região do alto curso do rio Paraíba e 5.650,53 km² (45,6%) à sub-bacia do rio Taperoá.

Figura 3. Localização geográfica da área de estudo.



Fonte: Autoria própria (2025).

Os motivos para sua escolha se devem ao histórico de secas recorrentes, típicos da região semiárida nordestina, além do fato de compor toda a bacia de contribuição do reservatório Epitácio Pessoa (2º maior em capacidade de armazenamento no estado), que, conforme Lucena (2018), entre os anos 2012 e 2017, enfrentou a pior crise hídrica já registrada desde a sua construção. Nesse período, as intensidades de precipitação estiveram muito abaixo da média

histórica, culminando em recargas insuficientes, levando ao nível crítico de menos de 3% de sua capacidade total em abril de 2017.

Os impactos dessa crise, segundo Azevedo et al. (2018), foram causados pela superposição de fenômenos meteorológicos de mesoescala, como El Niño (no Pacífico) e aumento da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) – no Atlântico Norte, quase levaram à calamidade pública os municípios abastecidos pelo açude Epitácio Pessoa, impondo-lhes severos processos de racionamento.

Justifica-se portanto o desenvolvimento de pesquisas como esta, que propõem o uso de ferramentas de apoio e análise de riscos para a melhoria da gestão de sistemas hídricos em períodos de escassez, usando a relevância dessa crise para desenvolver medidas preventivas de mitigação de eventos extremos.

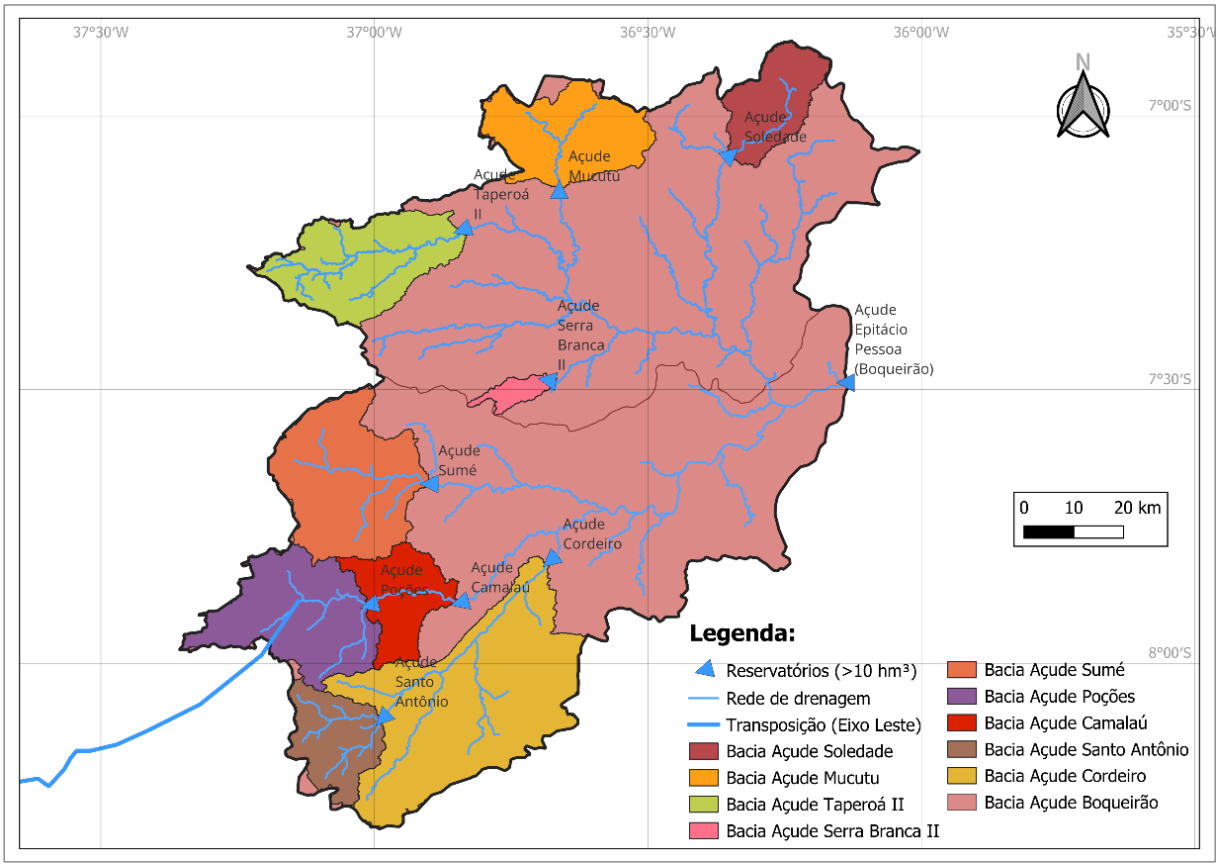
O clima da região é semiárido quente, com precipitação média anual variando entre 300 e 800 mm, concentrada de fevereiro a maio, com evaporação anual medida em tanque classe A variando entre 2500 e 3000 mm. A vegetação predominante é a caatinga, com áreas desmatadas usadas para agricultura e pecuária, e o solo é do tipo Bruno não cálcico, pouco espesso e pedregoso (PARAÍBA, 2024).

A área de estudo contém 33 sedes municipais (14 no alto curso e 19 na sub-bacia Taperoá) com uma população estimada em 331.694 habitantes, sendo sua economia baseada na agricultura e na pecuária, destacando-se as culturas de palma forrageira, agave, algodão, milho e feijão. A criação de gados ovino, bovino e caprino é uma atividade relevante na região, sendo praticada tanto de forma extensiva quanto intensiva, com enfoque na produção de leite e carne. A região também é conhecida pela coleta de produtos do extrativismo vegetal, como umbu, que tem significativa importância econômica (PARAÍBA, 2024).

Em termos de infraestrutura hídrica, a região possui importantes reservatórios que guardam forte relação de interdependência e influência hidrológica na bacia, conforme pode ser visto na Figura 4, sendo estes de fundamental importância para o abastecimento urbano e a irrigação. Para fins de execução deste trabalho, foram considerados todos os reservatórios com capacidade de armazenamento superior a 10 hm^3 presentes na área de estudo, cujas características volumétricas são mostradas na Tabela 5. Sua rede de abastecimento é extensa e detentora de várias outorgas destinadas principalmente à irrigação (BRITO, 2024). Os principais rios da região incluem o Paraíba, Monteiro, Sucuru e Taperoá, que contribuem para

o açude Epitácio Pessoa (PARAÍBA, 2024). A topologia do sistema, suas vazões demandadas e respectivas fontes hídricas foram definidas como apresenta a Figura 5.

Figura 4. Localização dos reservatórios estratégicos.



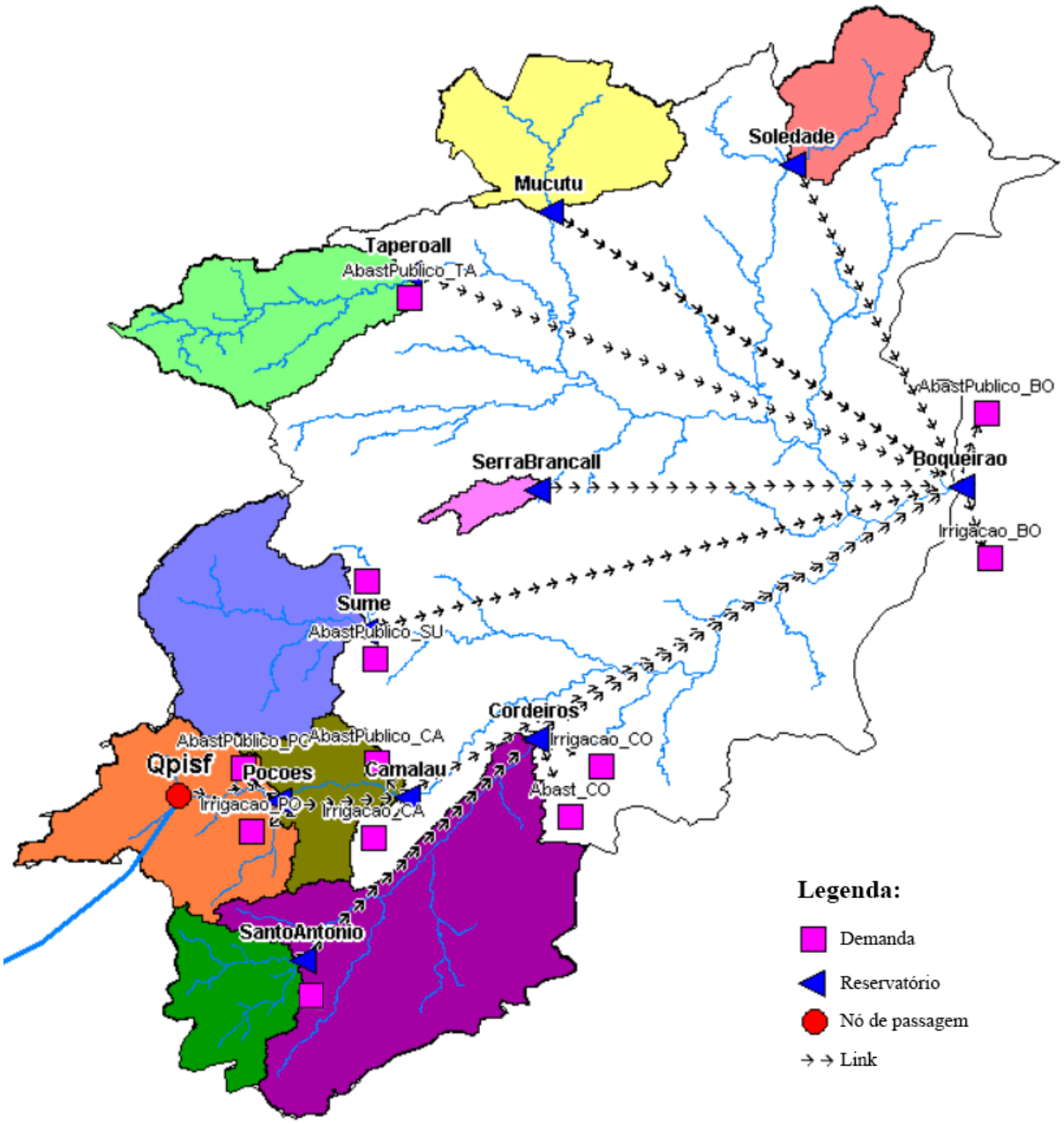
Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 5. Características volumétricas dos reservatórios.

Reservatórios	Volume (hm³)	
	Capacidade máxima	Morto
Soledade	27,06	3,52
Mucutu	25,37	0,48
Taperoá	15,15	0,30
Poções	29,86	0,58
Camalaú	46,44	2,32
Boqueirão	466,53	37,32
Sumé	44,86	0,19
Serra Branca	14,04	0,93
Santo Antônio	24,42	0,49
Cordeiros	69,97	1,53

Fonte: AESA (2025).

Figura 5. Topologia do sistema.



Fonte: Autoria própria (2025).

Cada uma das áreas de contribuição destacadas em diferentes cores (Figura 5) foi devidamente considerada no cômputo das vazões afluentes aos respectivos elementos em que deságuam – reservatório ou nó de passagem. Ainda conforme apresentado na Figura 5, no extremo sudoeste da área de estudo o modelo de simulação implementado no software AcquaNet recebe a vazão exógena proveniente do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) por meio de um nó de passagem definido exclusivamente para essa finalidade.

A afluência ao reservatório Poções é então composta por duas contribuições, a saber: 1) a vazão gerada na sua área de contribuição, estimada a partir da precipitação incidente sobre essa região; e 2) a vazão exógena proveniente do PISF, transmitida ao reservatório pelo link conectado ao mencionado nó de passagem.

Em alguns reservatórios do sistema, são consideradas retiradas destinadas ao atendimento das demandas de abastecimento público e demais usos (vide Tabela 6). Caso ocorram vertimentos ou descargas de fundo, a vazão liberada é encaminhada, através dos links existentes no modelo, ao reservatório localizado a jusante. Nesse reservatório subsequente, a vazão afluente passa a ser composta pela contribuição proveniente do reservatório a montante e pela parcela gerada na sua própria área de contribuição, decorrente da precipitação ali incidente.

A Tabela 6 apresenta numericamente as vazões demandadas por gênero de consumo e suas respectivas fontes hídricas.

Tabela 6. Demandas, fontes hídricas e áreas de contribuição dos componentes do sistema.

Fonte hídrica	Demanda (m³/s)		Área de Drenagem (km²)
	Abastecimento público	Demais usos	
Açude Soledade	-	-	307,59
Açude Mucutu	-	-	538,12
Açude Taperoá II	0,026	-	581,36
Açude Poções	0,453	0,020	629,12
Açude Camalaú	0,389	0,473	308,06
Açude Boqueirão	2,000	0,911	7550,16
Açude Sumé	0,038	0,132	736,31
Açude Serra Branca II	-	-	64,17
Açude Santo Antônio	-	0,014	334,63
Açude Cordeiros	0,15	0,115	1302,35

Fonte: AESA (2025).

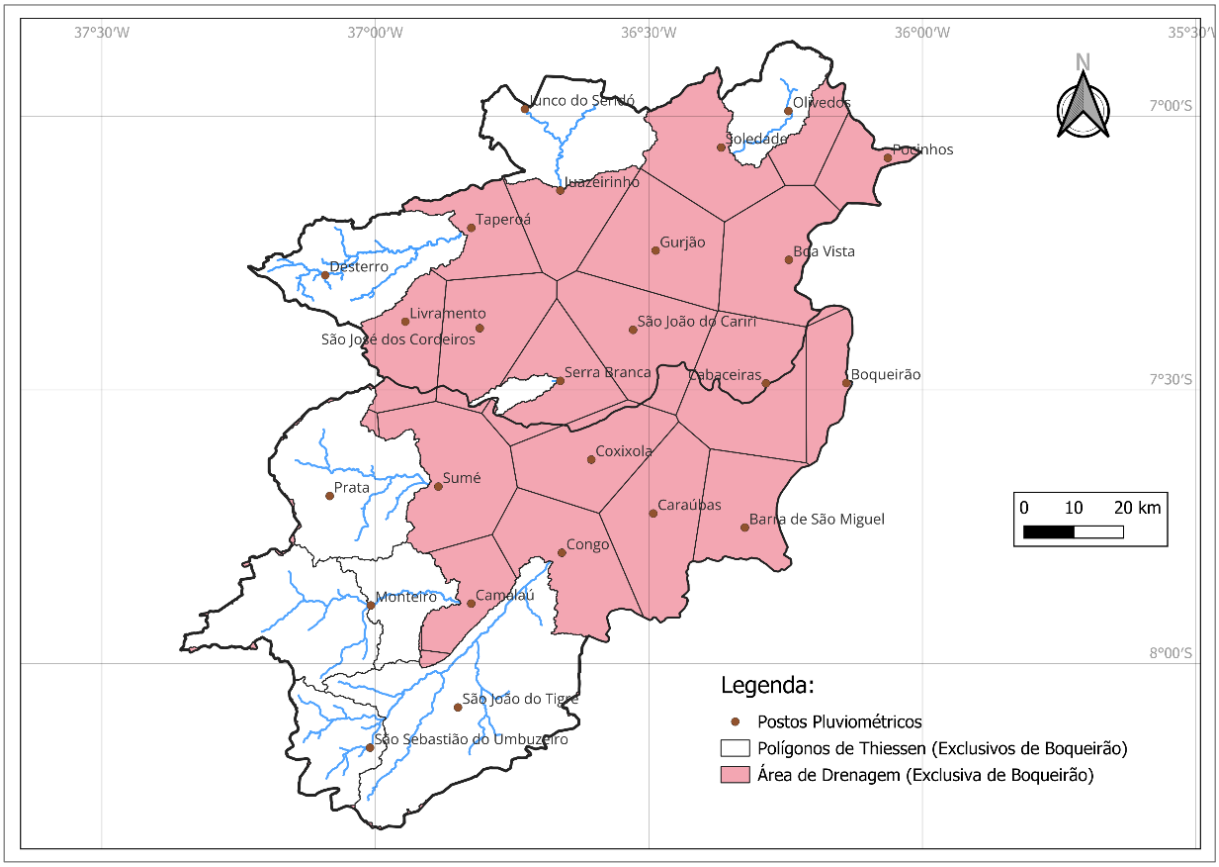
5.4 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

5.4.1 – PREPARAÇÃO DOS DADOS INICIAIS DE PRECIPITAÇÃO

Para a implementação da estrutura de análise de riscos proposta, inicialmente foi definida a precipitação como variável hidrológica estocástica, devido ao seu caráter de aleatoriedade e importância para a compreensão do panorama hídrico dos sistemas de reservatórios.

A escolha foi orientada pelo levantamento das informações de banco de dados da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), cuja coleta e tratamento resultou nas séries temporais históricas de precipitação dos postos pluviométricos apresentados na Figura 6, com extensão de 32 anos, de 1994 a 2025, em escala mensal.

Figura 6. Distribuição espacial dos postos pluviométricos e suas respectivas áreas de influência.



Fonte: Autoria própria (2025).

Foram realizados o levantamento e a organização dos dados pluviométricos de modo a construir a Série Histórica de Referência (SHR) da área de estudo, baseada no Método de Thiessen aplicado aos postos pluviométricos constantes apenas da área de drenagem exclusiva do reservatório Epitácio Pessoa, devido ao fato de ser o maior em capacidade, mais demandado e por isso o mais importante do sistema hídrico em questão. Logo, foram escolhidos aqueles postos com maior extensão e melhores condições de consistência de dados e distribuição espacial, a fim de assegurar a máxima representatividade da precipitação real na região.

A Tabela 7 apresenta as estações efetivamente consideradas na ponderação proposta por Thiessen, assim como suas áreas de influência (A_i) frente à área de drenagem exclusiva do reservatório Epitácio Pessoa ($A_{dren,BO}$ = 7.550,00 km²) na obtenção da SHR.

Tabela 7. Postos pluviométricos e seus pesos relativos.

Posto pluviométrico		Representatividade na área de drenagem exclusiva de Boqueirão (%)
1	Soledade	5,8
2	Juazeirinho	4,2
3	Taperoá	3,8
4	Monteiro	0,1
5	Camalaú	3,3
6	Boqueirão	2,7
7	Sumé	7,1
8	Serra Branca	4,9
9	São Sebastião do Umbuzeiro	0,0
10	Congo	6,4
11	Olivedos	2,4
12	Junco do Seridó	0,0
13	Desterro	0,0
14	Livramento	4,4
15	São José dos Cordeiros	6,0
16	São João do Cariri	7,0
17	Coxixola	5,9
18	Prata	0,3
19	São João do Tigre	0,3
20	Caraúbas	7,0
21	Barra de São Miguel	4,8
22	Cabaceiras	8,2
23	Boa Vista	6,1
24	Gurjão	6,7
25	Pocinhos	2,4

Fonte: Autoria própria (2025).

Dessa forma, foi obtida a série histórica de precipitações que será utilizada nas etapas seguintes, a qual pode ser visualizada na Tabela 8.

Tabela 8. Série histórica de referência para a área de drenagem exclusiva de Boqueirão.

Série Temporal de Precipitação (Referência Boqueirão)												
	Mês											
Ano	**jan**	**fev**	**mar**	**abr**	**mai**	**jun**	**jul**	**ago**	**set**	**out**	**nov**	**dez**
1994	48,3	68,4	93,7	38,6	65,6	67,8	33,9	8,1	11,0	0,1	0,0	19,4
1995	16,2	93,6	117,2	75,0	79,4	23,3	41,9	1,7	0,2	0,1	29,8	0,3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2023	14,0	68,2	140,8	52,2	66,1	65,6	25,1	4,6	4,3	0,1	10,8	43,6
2024	81,8	117,9	120,6	139,6	51,4	38,4	19,9	1,5	2,1	0,0	0,0	1,9
2025	109,9	40,2	57,4	43,1	40,4	32,0	24,6	21,7	13,5	0,1	0,0	1,1

Fonte: Adaptado de AESA (2026).

Contudo, em posse da série histórica de referência resultante do reservatório principal (Epitácio Pessoa – Boqueirão), observou-se a necessidade de correlacionar os valores de precipitação assim obtidos com aqueles observados localmente nos reservatórios estratégicos (>10 hm^3), a fim de manter a semelhança temporal e intensidade de precipitação mensal coerente e representativa de toda a área de estudo.

Para isto, foram determinadas equações de correlação ajustadas para cada mês da série de referência resultante, de modo que a escolha da melhor função se deu a partir do cruzamento dos dados históricos mensais dos reservatórios estratégicos com a série resultante da ponderação feita pelo Método de Thiessen para o reservatório principal, procedimento executado pelo software LabFIT.

A Tabela 9 apresenta as equações obtidas para cada um dos reservatórios, sendo "x" o valor da precipitação mensal na área de contribuição exclusiva do reservatório principal (Epitácio Pessoa – Boqueirão) e "y" o valor de precipitação estimado pelo modelo de regressão linear para o reservatório estratégico considerado. Nota-se que o NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency), indicador da qualidade do ajuste do modelo ao dados observados, o qual prioriza escala e magnitude, apresentou-se muito bom (0,75<NSE<1) em todos os casos (MORIASI et al., 2007), o que reforça a coerência do uso dessa abordagem.

Tabela 9. Funções de correlação entre os reservatórios estratégicos e o principal.

Açude	Melhor função de correlação	NSE
Soledade	y=0,8287.x	0,96
Mucutu	y=1,0279.x	0,98
Taperoá	y=1,4692.x	0,86
Poções	y=1,2104.x	0,92
Camalaú	y=1,1534.x	0,99
Sumé	y=1,228.x	0,97
Serra Branca	y=1,1554.x	0,98
Santo Antônio	y=1,0279.x	0,99
Cordeiros	y=0,9348.x	1,00

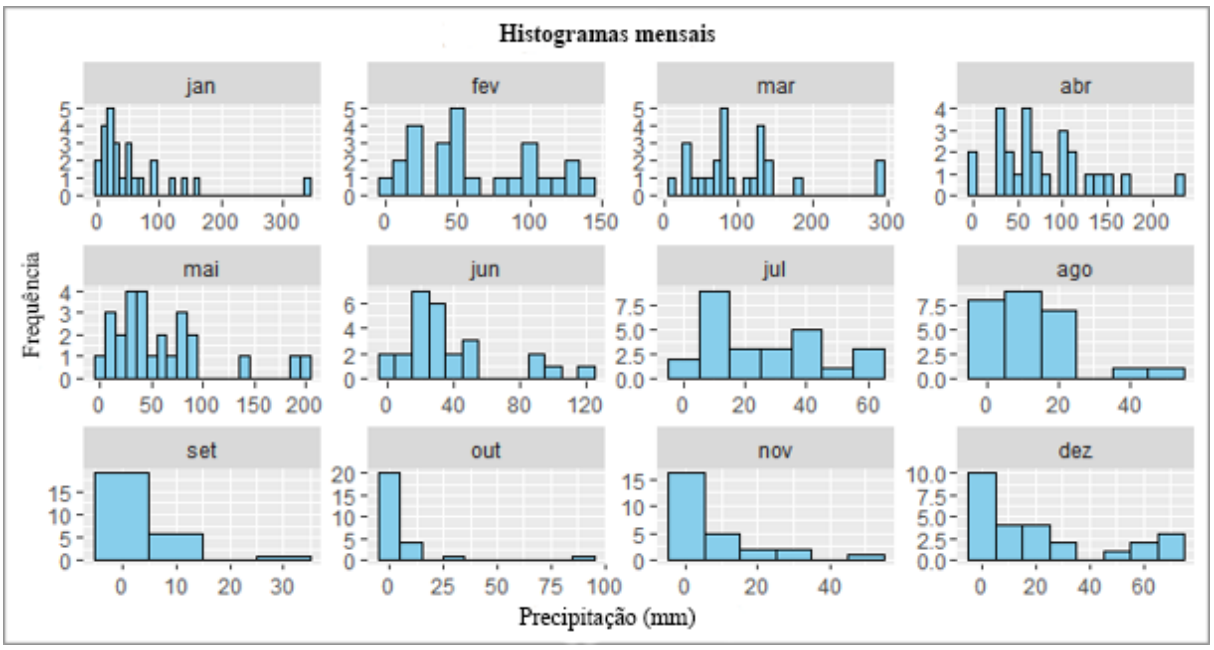
Fonte: Autoria própria (2025).

5.4.2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA SÉRIE HISTÓRICA DE REFERÊNCIA

Para a série histórica de referência (SHR) obtida conforme os procedimentos descritos no subtópico anterior, foram calculadas as propriedades estatísticas que serviram de base para a análise e interpretação dos dados, assegurando a qualidade de previsões futuras, a validação de hipóteses estatísticas, bem como a escolha adequada de modelos integrados (como o estocástico) para a consecução da análise de riscos proposta.

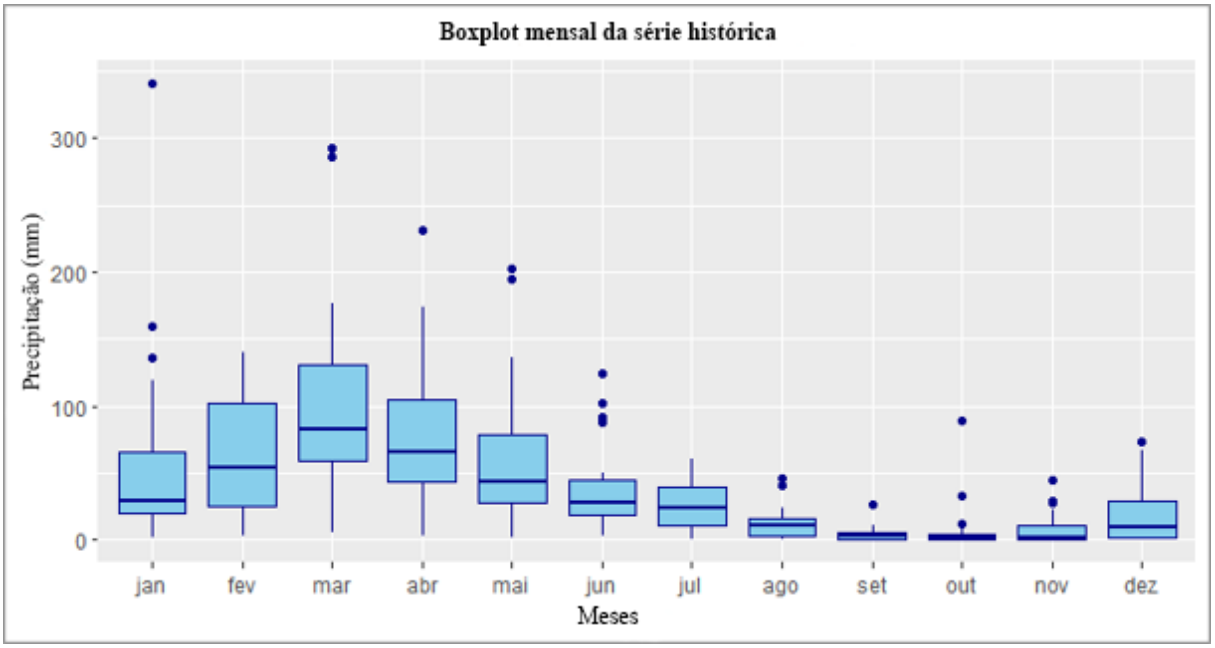
Nesse contexto, o comportamento da SH foi analisado através de histogramas mensais e gráficos boxplot, conforme mostram as Figuras 7 e 8, respectivamente.

Figura 7. Histogramas mensais de precipitação.



Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 8. Boxplot mensal da série histórica.

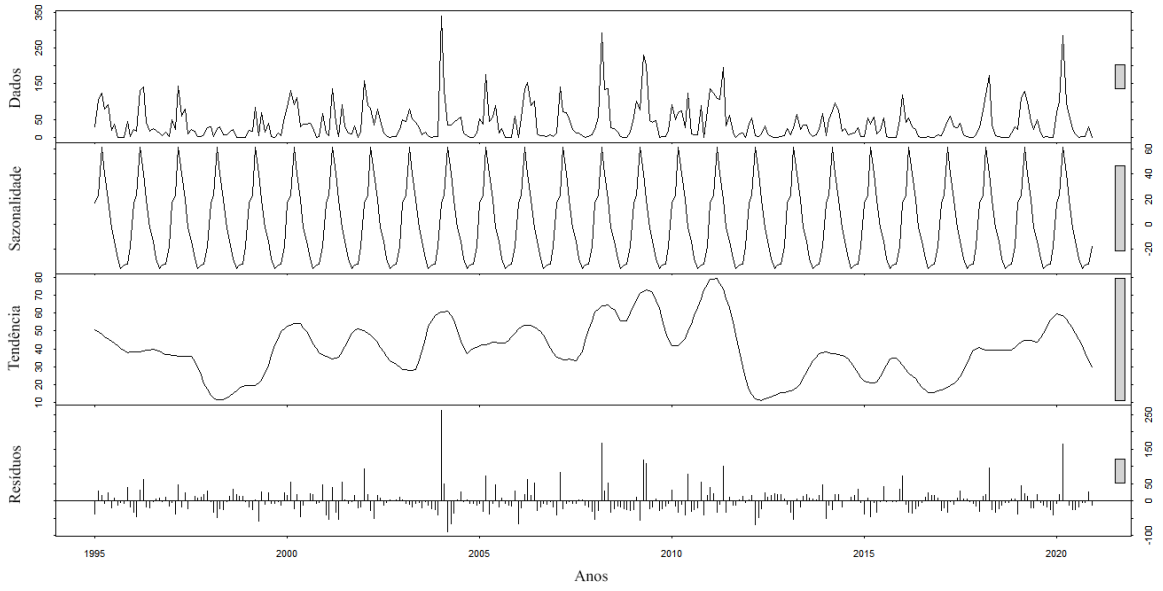


Fonte: Autoria própria (2026).

Além da estatística descritiva, a SHR também foi decomposta para análise dos comportamentos de tendência, sazonalidade e resíduos (Figura 9), tendo sido ainda confirmada sua estacionariedade pelos testes estatísticos de KPSS (1992) e DF (1979), cujos níveis de

significância (valores de p) apresentados na Tabela 10 corroboram essa hipótese. Isto significa que a série mantém sua estrutura estatística ao longo do tempo e a habilita para ser usada nas etapas seguintes deste trabalho.

Figura 9. Decomposição da SH em tendência, sazonalidade e resíduos.



Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 10. Testes de estacionariedade da série histórica de referência.

Teste	H_0	P-valor	Decisão
KPSS	Série estacionária.	$9{,}2 \times 10^{-2}$	Aceita-se H_0.
DF	Série **não** estacionária.	$2{,}2 \times 10^{-16}$	Rejeita-se H_0.

Fonte: Autoria própria (2025).

5.4.3 – GERAÇÃO SINTÉTICA DAS SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO

Posteriormente à análise estatística da série histórica de referência, foi então realizada a geração de séries sintéticas a fim de observar as variações hidroclimáticas possíveis na área de estudo a partir de condições meteorológicas representadas pela precipitação juntamente com variações no escoamento superficial representadas pela vazão afluente aos reservatórios e nós de passagem.

Entre os modelos estocásticos analisados (Thomas-Fiering e Método dos Fragmentos) para a obtenção das séries sintéticas, o Método dos Fragmentos (MF) foi o escolhido, pois, para

eventos hidrológicos altamente assimétricos e variáveis no espaço e no tempo, como os que ocorrem no semiárido, ele tende a preservar mais fielmente as características estatísticas essenciais da Série Histórica de Referência (SHR), principalmente em termos de média e percentual de zeros (Celeste; Curi; Curi (2007).

Os mesmos autores afirmam que ele consiste em um modelo de desagregação onde a precipitação em escala anual é gerada primeiro, para depois ser desagregada em precipitações mensais segundo uma forma padronizada, partindo do princípio de que as precipitações mensais podem ser representadas como uma fração da precipitação anual total, distribuindo-se os valores históricos de forma que cada ano possua fragmentos mensais cuja soma resulta em um valor unitário. Desse modo, o Método dos Fragmentos mantém as proporções mensais de anos passados, assegurando que propriedades essenciais como média, variância e porcentagem de eventos nulos sejam representadas com precisão (Celeste; Curi; Curi (2007).

Matematicamente, a padronização das precipitações mensais ocorre de modo que cada precipitação mensal histórica $Z_{\nu,\tau}$ de um determinado ano ν é dividida pela precipitação anual Z_ν correspondente, para gerar os fragmentos mensais $f_{\nu,\tau}$ que somam 1 em cada ano:

$$f_{\nu,\tau} = \frac{Z_{\nu,\tau}}{\sum_{\tau=1}^{12} Z_{\nu,\tau}} \quad \text{(Eq. 2)}$$

E no cálculo das precipitações mensais sintéticas, para um valor de precipitação anual sintético $Z_\nu^{(sint)}$, a precipitação mensal sintética $Z_{\nu,\tau}^{(sint)}$ para o mês t é calculada multiplicando-se o valor anual pela fração correspondente ao mês, do ano pertencente à mesma classe k:

$$Z_{\nu,\tau}^{(sint)} = Z_\nu^{k,(sint)} . f_\tau^k \quad \text{(Eq. 3)}$$

No procedimento utilizado por Celeste, Curi e Curi (2007), os anos históricos são categorizados em intervalos baseados nas precipitações anuais observadas. Isto para que as precipitações anuais sintéticas, obtidas do processo estocástico, sejam adequadamente associadas a padrões de distribuição mensal, representantes fiéis das condições observadas na série histórica de referência da área de estudo.

Assim, primeiramente, os valores de precipitação anual da série histórica são ordenados em ordem crescente, e os anos históricos são distribuídos em classes de valores de precipitação anual. A primeira classe inclui os anos com os menores valores de precipitação anual, e as classes subsequentes englobam eventos de precipitação cada vez maiores.

Os limites entre as classes são definidos pelas médias entre os valores anuais de precipitação de dois anos consecutivos na série ordenada. E por fim cada classe recebe os fragmentos mensais dos anos históricos que pertencem a essa classe. Dessa forma, quando uma precipitação anual sintética é gerada, logo é alocada à classe correspondente para que os fragmentos mensais apropriados sejam usados na sua desagregação (Celeste; Curi; Curi, 2007).

Neste estudo, a geração das séries sintéticas de precipitação foi precedida pela avaliação da aderência da série histórica de referência a duas funções de densidade de probabilidade: a distribuição Gamma e a distribuição Normal truncada. A verificação estatística foi realizada por meio do teste de Anderson-Darling, aplicado à FDP Gamma, e do teste de Shapiro-Wilk, aplicado à FDP Normal, ambos indicando ajustes satisfatórios aos dados observados de precipitação.

Embora a distribuição Normal apresente, por definição, a possibilidade matemática de geração de valores negativos, essa limitação foi devidamente tratada mediante a adoção de uma distribuição Normal truncada, com média de 452,2 mm e desvio-padrão de 177,3 mm, limitada ao intervalo entre $0{,}75.P_{mín}$ (97,5 mm) e $1{,}25.P_{máx}$ (1048,9 mm). Dessa forma, evitou-se a geração de precipitações fisicamente inconsistentes, ao mesmo tempo em que se preservou a variabilidade estatística compatível com a série histórica utilizada como referência.

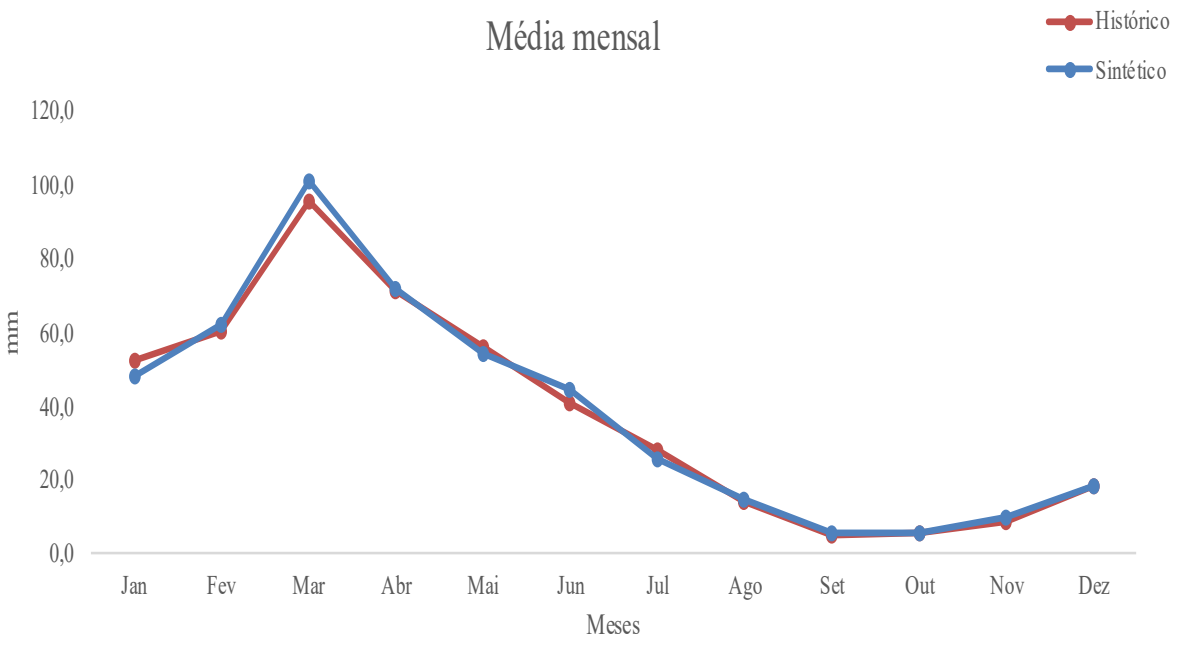
Os resultados dos testes de aderência indicaram que ambas as distribuições apresentaram desempenho adequado, contudo a FDP Normal truncada demonstrou ajuste ligeiramente superior na análise gráfica por meio do gráfico de Q-Q plot, especialmente quanto à representação e geração dos eventos de precipitação, metodologia que faz a comparação entre os quantis empíricos da série observada e os quantis teóricos esperados segundo uma determinada distribuição de probabilidade.

Essa diferença pode estar relacionada ao fato de que a abordagem originalmente proposta por Celeste, Curi e Curi (2007) empregava a distribuição Gamma diretamente para séries de vazões, enquanto, no presente estudo, a variável inicialmente sintetizada foi a precipitação, sendo as vazões posteriormente estimadas por meio de um modelo hidrológico chuva-vazão devidamente calibrado às condições específicas da área de estudo. Por esse motivo, então, optou-se pela utilização da FDP Normal truncada na geração das precipitações sintéticas.

O total de séries sintéticas geradas foi de 1000 unidades, suficiente para gerar um espaço amostral probabilístico robusto e representar a incerteza com evidência estatística, traduzindo a estocasticidade do sistema em uma quantidade viável de possibilidades de chuva que ao serem implementadas nos processos subsequentes permitiram avaliar cenários realistas e propor respostas gerenciais compatíveis com o risco identificado.

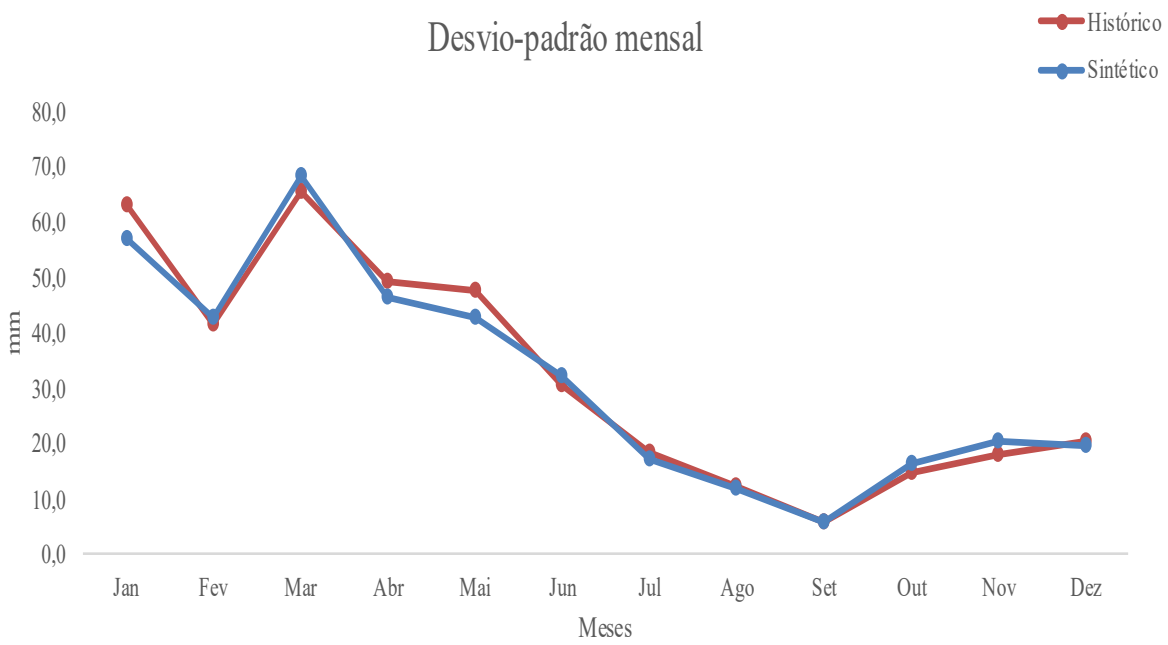
Para avaliar a capacidade do modelo estocástico de preservar as principais características estatísticas da série histórica de referência (SHR), foram calculados, em escala mensal, a média, o desvio-padrão, o coeficiente de variação, a assimetria e a curtose das 1000 séries sintéticas geradas. Os resultados obtidos foram comparados aos respectivos parâmetros da SHR, evidenciando desempenho satisfatório, conforme apresentado nas Figuras 10 a 14.

Figura 10. Média mensal sintética x histórica.



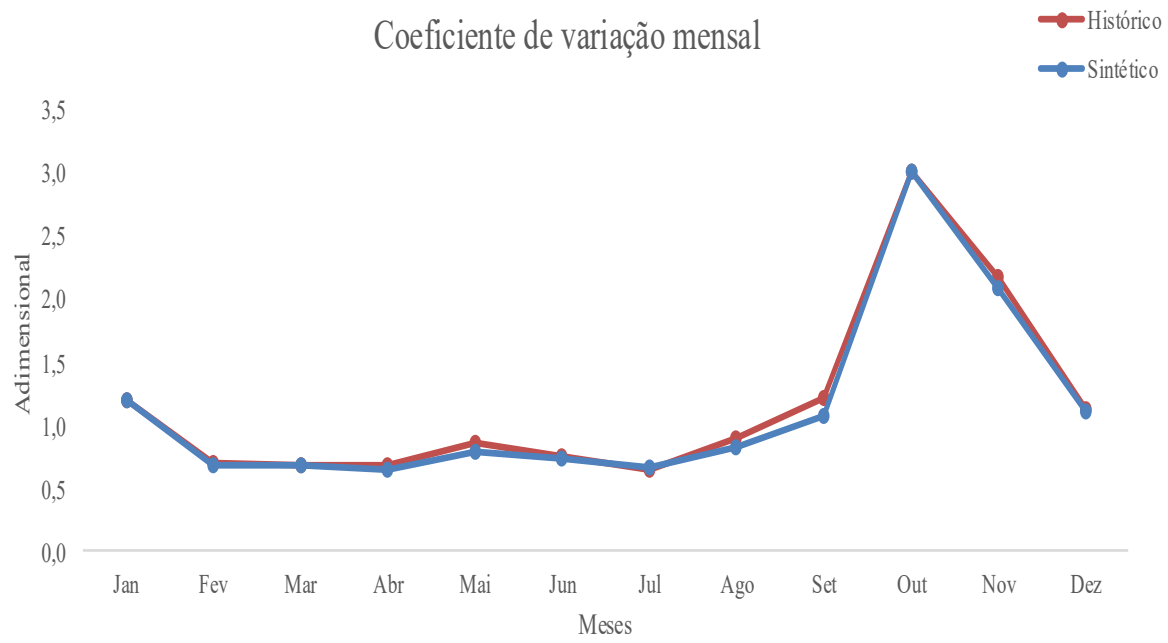
Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 11. Desvio-padrão mensal sintético x histórico.



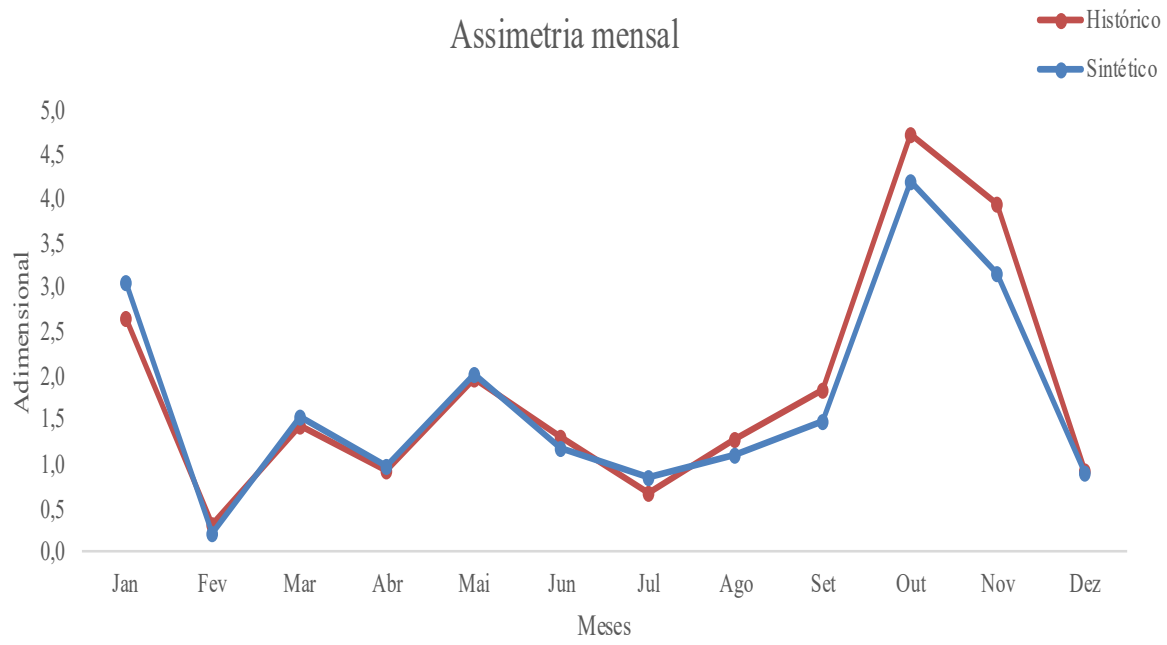
Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 12. Coeficiente de variação mensal sintético x histórico.



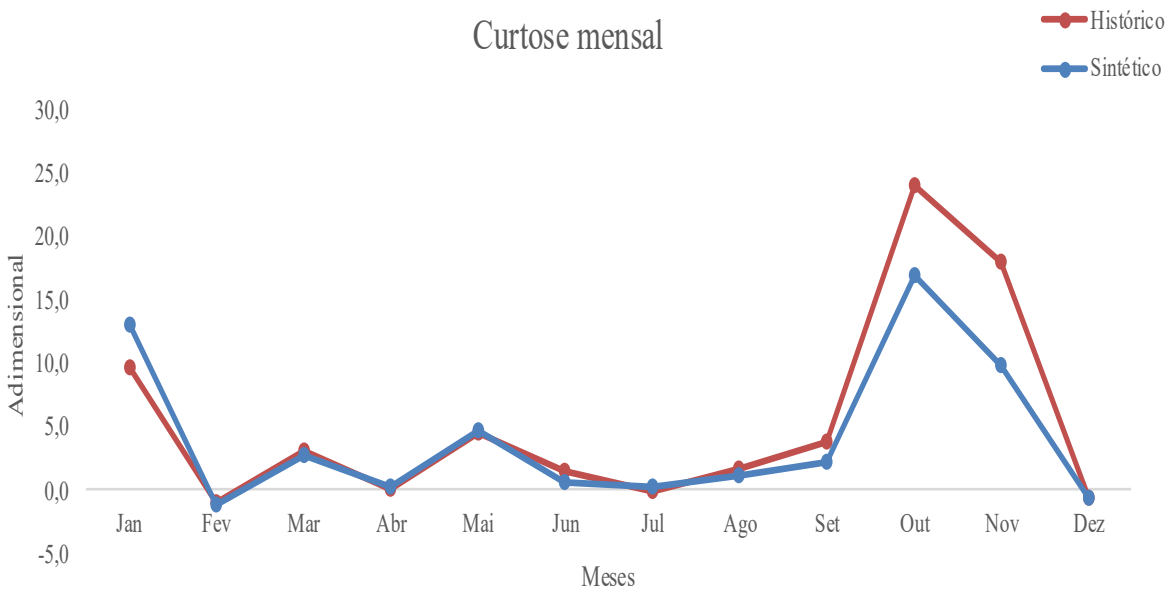
Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 13. Assimetria mensal sintética x histórica.



Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 14. Curtose mensal sintética x histórica.



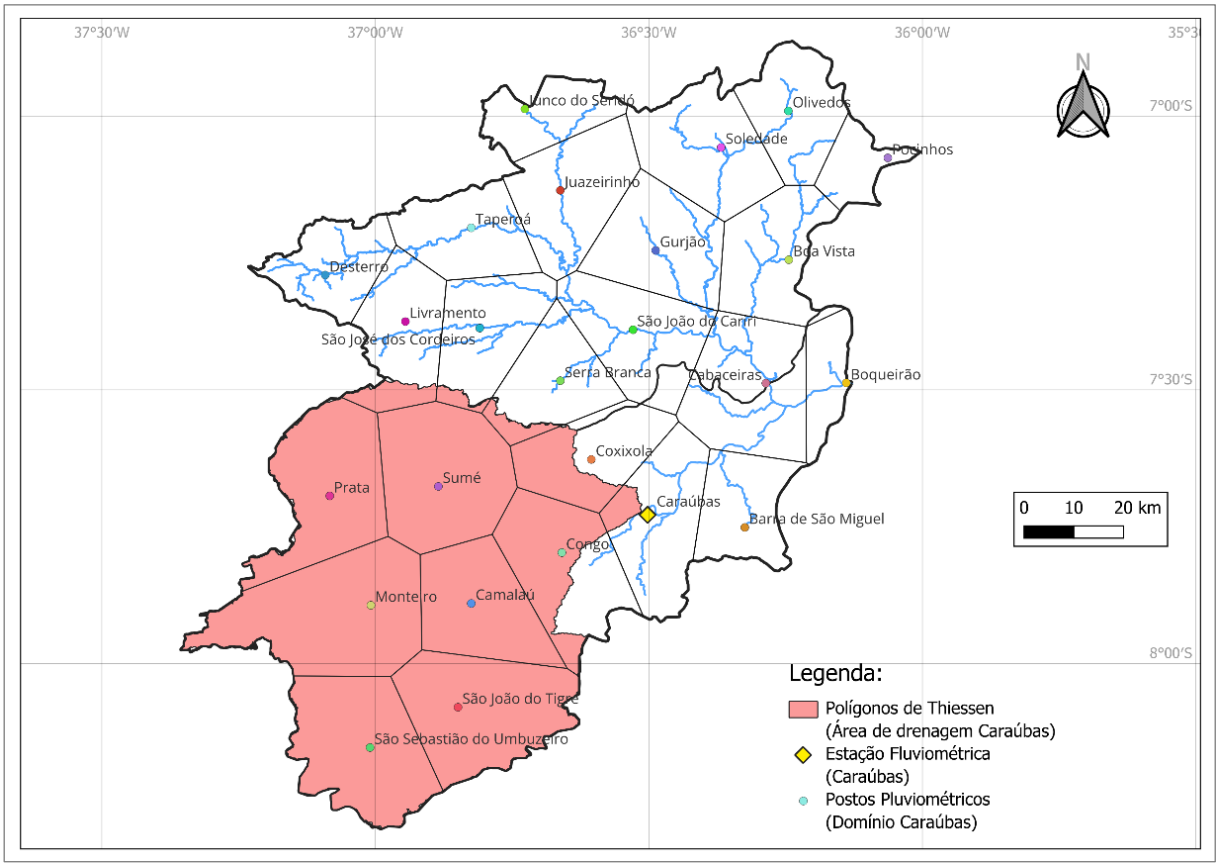
Fonte: Autoria própria (2026).

5.4.4 – MODELAGEM HIDROLÓGICA DAS VAZÕES

Para a modelagem das vazões afluentes aos reservatórios, foi utilizado o modelo hidrológico SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*), que é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação de chuva em vazão. O SMAP necessita de dados de precipitação (P), evapotranspiração (E) e vazões médias (Q) para um período mínimo necessário para calibração (Lopes; Braga; Conejo, 1981).

A série de precipitações (P) utilizada para a calibração do SMAP foi obtida pela aplicação do Método de Thiessen sobre a área de drenagem do posto fluviométrico de Caraúbas (A_d = 4.778,97 km²), conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15. Obtenção da série de precipitações (P) para calibração do SMAP.



Fonte: Autoria própria (2025).

A Tabela 11 apresenta os postos pluviométricos considerados, suas áreas de influência e pesos relativos.

Tabela 11. Postos pluviométricos e seus pesos relativos na área de drenagem de Caraúbas.

Posto pluviométrico		Representatividade na área de drenagem do Posto Caraúbas (%)
1	Monteiro	17,6
2	Camalaú	10,6
3	Sumé	14,2
4	Serra Branca	1,0
5	São Sebastião do Umbuzeiro	13,9
6	Congo	7,9
7	Livramento	1,6
8	São José dos Cordeiros	0,5
9	Coxixola	4,3
10	Prata	13,1
11	São João do Tigre	14,3
12	Caraúbas	1,0

Fonte: Autoria própria (2025).

Por sua vez, a série de evapotranspiração potencial (ETP) foi obtida do banco de dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) para a estação meteorológica de Monteiro, cuja extensão contempla a Normal Climatológica do Brasil de 1981 a 2010. A Tabela 12 apresenta os valores médios mensais utilizados.

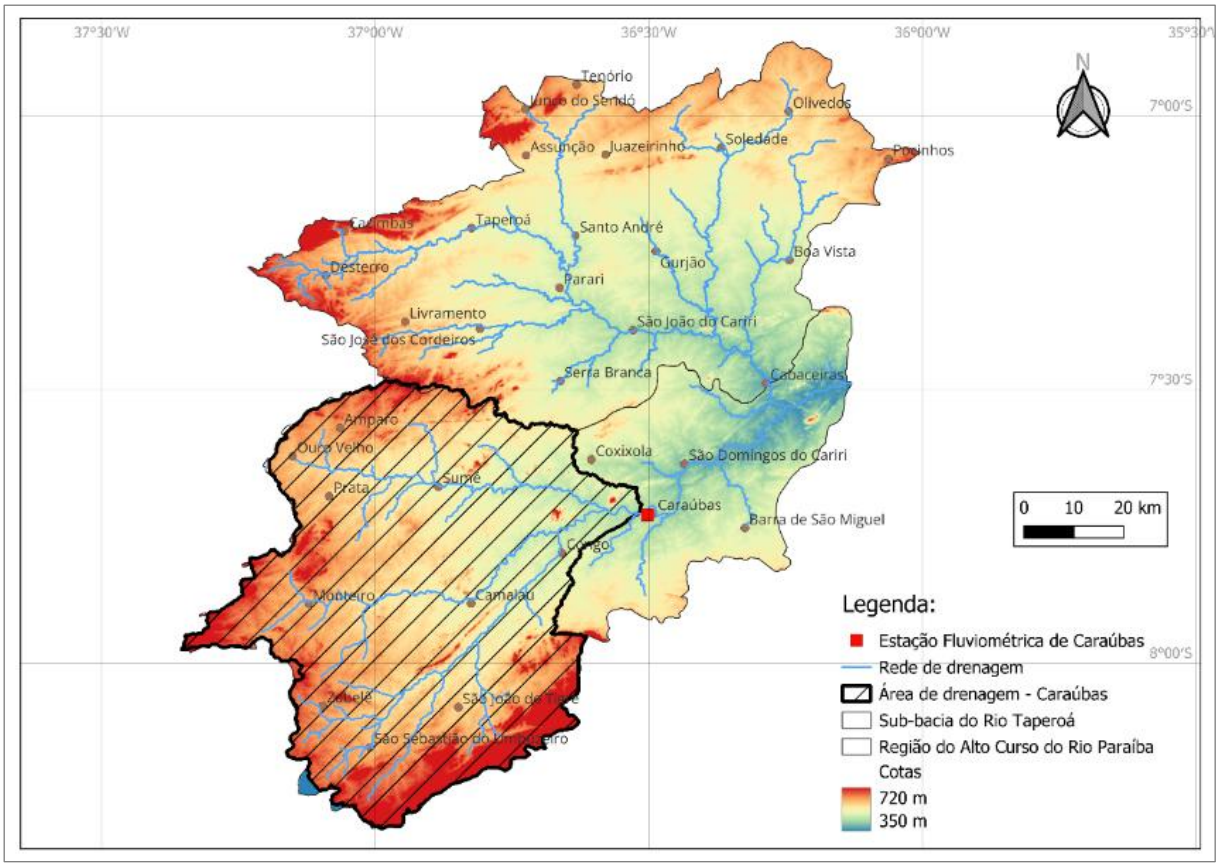
Tabela 12. Série de evapotranspiração mensal.

Evapotrans-piração mensal (mm)	jan	Fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	Dez
	162,5	143,4	150,4	132,3	121,2	95,5	94,4	105,0	128,1	146,5	149,6	163,9

Fonte: Autoria própria (2025).

A série de vazões de referência (Q) utilizada na calibração do modelo corresponde ao posto fluviométrico de Caraúbas (Figura 16), abrangendo o período de 1995 a 2016 (22 anos). A série dispunha de dados ainda mais recentes, mas é de domínio público que, a partir de 2017, passaram a ocorrer aportes regulares da transposição do rio São Francisco, o que comprometeria a representatividade hidrológica natural da série, devido à influência de vazões exógenas do PISF.

Figura 16. Área de drenagem utilizada para a calibração do SMAP.



Fonte: Autoria própria (2025).

Dessa forma, foi adotado o intervalo de análise 1995 a 2016 para calibração e validação dos parâmetros do SMAP, o que levou à obtenção dos parâmetros "S_{at}" (coeficiente de saturação do solo), "P_{es}" (parâmetro de escoamento superficial), "C_{rec}" (coeficiente de recarga do aquífero) e "k" (coeficiente de recessão do hidrograma) constantes da Tabela 13.

Tabela 13. Parâmetros de calibração do SMAP para o posto fluviométrico de Caraúbas.

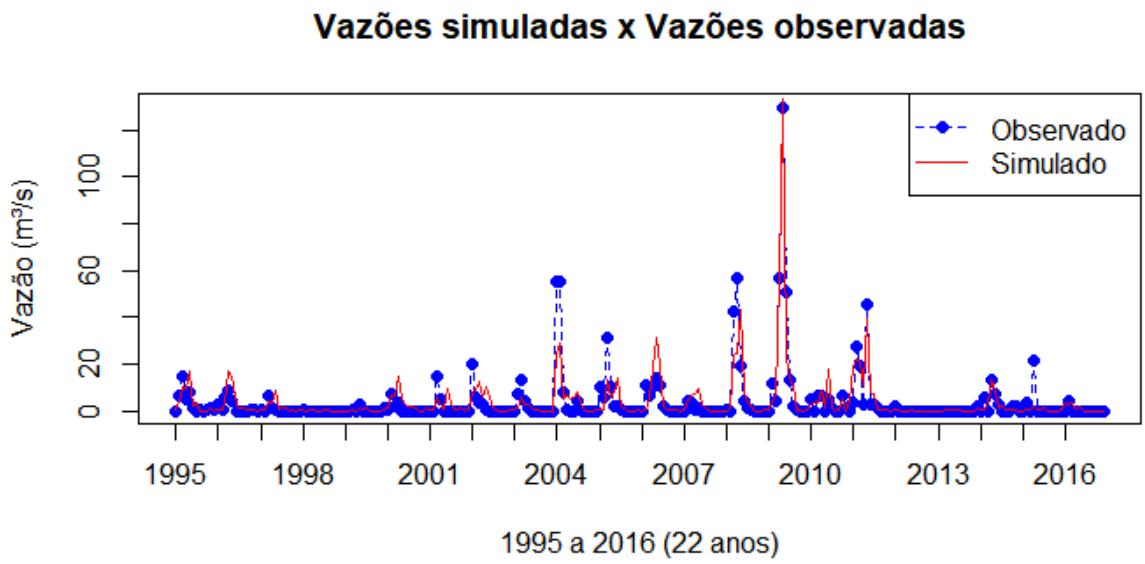
Sat	P_{es}	C_{rec}	k
827,02	2,51	0,00	0,89

Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 17 apresenta a relação gráfica entre as vazões simuladas pelo SMAP calibrado e as observadas no posto fluviométrico de referência (Caraúbas). Nota-se graficamente que entre ambas existe uma forte correlação, expressa e reforçada numericamente pelo valor de r =

0,906 do coeficiente de correlação de Pearson, bem como pela métrica de desempenho Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), cujo valor se apresentou em NSE = 0,778.

Figura 17. Comparação entre vazões simuladas e observadas.



Fonte: Autoria própria (2025).

O nível de significância (p-valor = 2,2 x 10^{-16}) do teste estatístico de correlação também nega fortemente a hipótese nula (H_0) de não haver correlação entre as séries simulada e observada. Isto portanto significa um ótimo ajuste do modelo às condições reais da área de estudo, credenciando-o a ser utilizado nas próximas fases deste trabalho.

5.4.5 – SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO DO SISTEMA

Com a reunião de informações acerca da topologia da área de estudo, foi então realizada a simulação do balanço hídrico através do software Labsid AcquaNet – desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões (LabSid) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. O AcquaNet consiste em um programa computacional especializado em modelagem de sistemas hídricos que permite a análise integrada de diversos componentes em termos de suas demandas e infraestruturas.

Auxiliando principalmente na simulação de redes de fluxo hídrico, possibilita ainda a avaliação de diferentes cenários de alocação de água e fundamenta tecnicamente a tomada de decisão de maneira mais precisa no âmbito da gestão de recursos hídricos, devido também à sua capacidade de incorporar prioridades de uso e restrições, o que confere alto nível de detalhamento e praticidade na simulação do balanço hídrico.

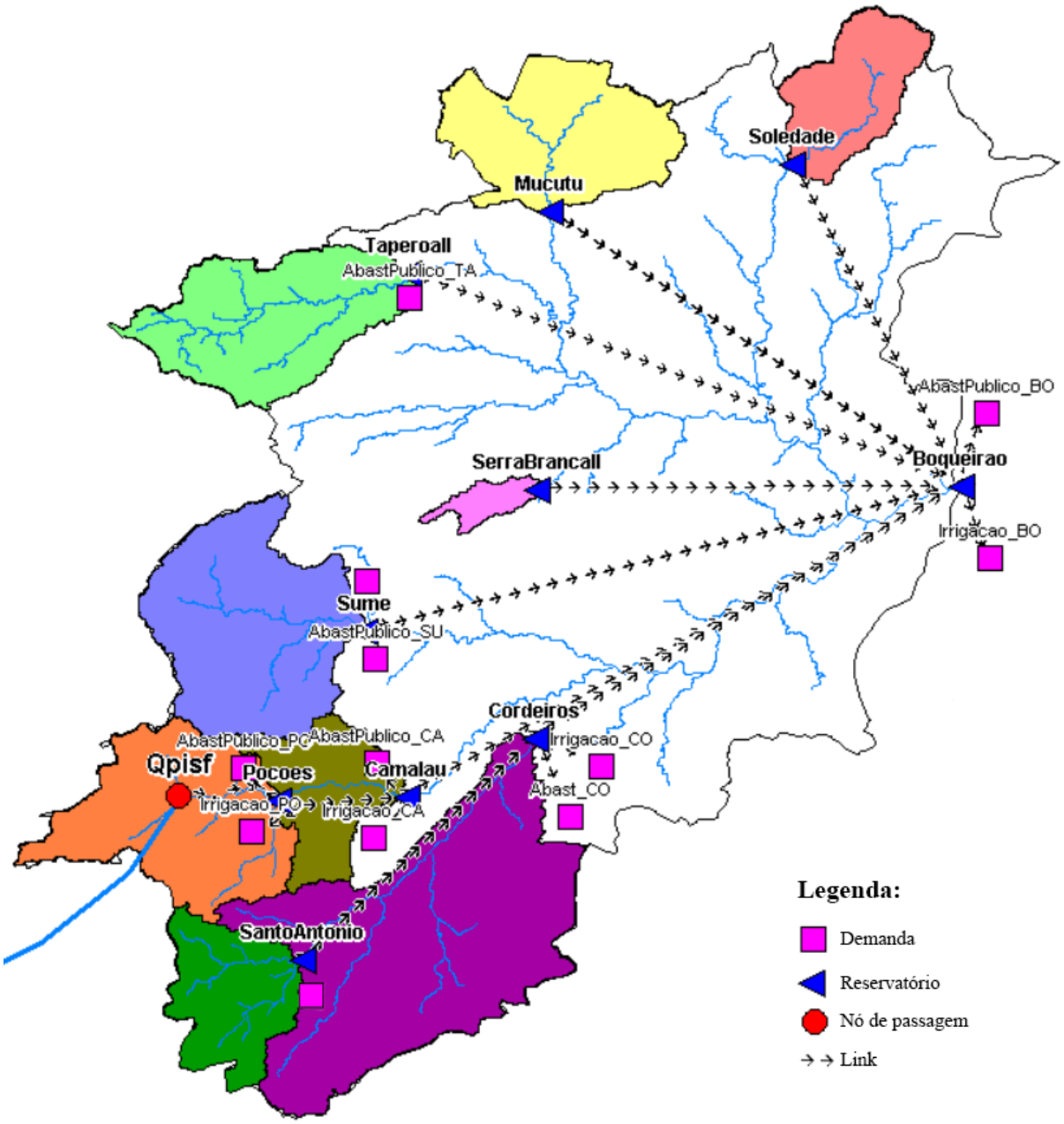
Para a execução das simulações, foram primeiramente definidos os cenários operacionais do sistema, e então criados os arquivos base para simulação no software, sendo estes previamente configurados para manterem suas características hidrológicas idênticas em todas as séries sintéticas de vazão implementadas, em que cada arquivo de cada cenário teria as vazões naturais diferentes para os reservatórios.

O período de operação do sistema foi definido em 5 anos (60 meses) por representar um horizonte de análise compatível com o planejamento e a gestão de médio prazo. Ao contrário das variáveis hidrológicas, que demandam séries extensas para a adequada caracterização estatística, as condições operacionais do sistema – tais como demandas hídricas, prioridades de atendimento, regras de operação, vazões exógenas, infraestrutura disponível e demais condicionantes institucionais e/ou socioeconômicos – podem sofrer alterações significativas em intervalos de tempo mais curtos.

Assim, adotar o período de operação igual à totalidade da série histórica (32 anos) poderia induzir uma interpretação artificialmente estática do sistema, como se suas características atuais permanecessem inalteradas por mais de três décadas. A escolha de um horizonte operacional de 60 meses busca, portanto, equilibrar a necessidade de avaliar o desempenho do sistema sob variabilidade hidrológica relevante, restringindo a análise gerencial a um intervalo temporal plausível para cenários de médio prazo.

Vale destacar que, conforme a Figura 18, foram devidamente consideradas, tanto no processo de simulação do balanço hídrico quanto no de modelagem hidrológica das vazões afluentes, as áreas de contribuição exclusivas e sua influência hidrológica nos regimes de escoamento superficial a montante de cada reservatório tomado como estratégico, bem como sua interdependência.

Figura 18. Áreas de contribuição exclusivas aos reservatórios.



Fonte: Autoria própria (2025).

Assim, para cada arquivo de simulação a ser implementado e processado pelo AcquaNet, foram definidos alguns parâmetros dos reservatórios, tais como: a) volume inicial em hm^3; b) volumes máximos e mínimos; c) vetores de evaporação em mm/mês; d) tabela com os dados da curva cota-área-volume; e e) respectivas vazões naturais afluentes. Além disso, foram definidas as vazões e as prioridades de atendimento das demandas urbanas e demais usos, com prioridade máxima para as urbanas e, em seguida, os demais usos.

5.4.6 – CÁLCULO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO

A avaliação da operação de sistemas hídricos sob condições de incerteza exige o uso de ferramentas capazes de quantificar seu comportamento diante de situações adversas. Nesse contexto, os indicadores de desempenho surgem como instrumentos fundamentais para a realização da análise de riscos, auxiliando na identificação de fragilidades operacionais e na comparação entre alternativas de gestão.

Eles são capazes de oferecer métricas claras para monitoramento e avaliação, constituindo a base analítica para a elaboração de estratégias de mitigação de riscos, adaptação a eventos extremos e formulação de políticas públicas voltadas à segurança hídrica (Farias; Curi; Diniz, 2017). Entre os indicadores mais consolidados na literatura destacam-se a Confiabilidade e a Vulnerabilidade, cujas interpretações, tanto conceituais quanto matemáticas, permitem compreender a capacidade do sistema de atender às demandas de forma contínua e quantificar a severidade dos déficits, respectivamente (Hashimoto; Stedinger; Loucks, 1982).

A Confiabilidade (C) representa a frequência com que o sistema hídrico atende à demanda estabelecida, sendo interpretada como a probabilidade de sucesso operacional ao longo do tempo. É uma medida da ausência de falhas e dessa forma associa-se diretamente à segurança e previsibilidade do sistema. Matematicamente, pode ser expressa por

$$C = P\{X_t > X_0\} = 1 - \frac{n}{N} \qquad \text{(Eq. 4)}$$

Onde:

"X_0" é o nível de atendimento desejado;

"X_t", o valor observado em cada tempo t;

"n", o número de falhas registradas; e

"N", o total de observações.

A alta confiabilidade indica que o sistema é robusto frente às variações hidrológicas, sendo uma das principais metas operacionais em cenários de escassez hídrica.

A Vulnerabilidade (V), por sua vez, quantifica a magnitude média dos déficits de abastecimento, ou seja, a severidade das falhas quando estas ocorrem. Essa medida reflete o grau de descompasso entre a oferta e a demanda hídrica durante os períodos de falha. Matematicamente, pode ser expressa por:

$$V = \frac{1}{NF}\sum_{t=1}^{NT}\left|\frac{D_{t,i}-Q_{t,i}}{D_{t,i}}\right| \quad \text{(Eq. 5)}$$

Em que:

"$D_{t,i}$" é a vazão requerida no instante 't' pelo componente 'i';

"$Q_{t,i}$" é a vazão ofertada no instante 't' ao componente 'i';

"NF", número de falhas; e

"NT", número total de períodos.

Após a obtenção dos resultados de cada cenário de simulação, foram calculados os valores dos indicadores de Confiabilidade (C) e Vulnerabilidade (V) para cada demanda do sistema simulado, compondo o espaço amostral probabilístico desses indicadores.

5.4.7 – CONVERSÃO PROBABILÍSTICA DOS INDICADORES DE DESEMPENHO EM ANÁLISE DE RISCOS

Considerando o espaço amostral probabilístico de indicadores construído pelas 1000 simulações sintéticas do balanço hídrico do sistema em cada cenário analisado, representado pelos conjuntos de valores de confiabilidade $\{C_1, C_2, ..., C_{1000}\}$ e de vulnerabilidade $\{V_1, V_2, ..., V_{1000}\}$, buscou-se conferir significado prático e gerencial às probabilidades de ocorrência dos indicadores de desempenho obtidos em função do aumento progressivo da vazão exógena do PISF. Para tanto, adotou-se a metodologia de análise de riscos do Tribunal de Contas da União Brasil (2018), adaptando-a ao contexto da avaliação do desempenho hídrico do sistema.

Nessa abordagem, a probabilidade de ocorrência de um evento de falha "P" é definida pela relação:

$$\mathrm{P} = 1 - \mathrm{C}\,, \quad \text{(Eq. 6)}$$

de modo que cada valor de confiabilidade obtido nas simulações é convertido em uma respectiva probabilidade de falha. Assim, para cada cenário de vazão exógena, cada uma das 1000 simulações passa a estar associada a um valor específico de P, o qual é enquadrado em uma escala qualitativa de probabilidade (vide Tabela 14) composta pelas classes "muito baixa", "baixa", "média", "alta" e "muito alta", associadas, respectivamente, aos pesos 1, 2, 5, 8 e 10.

O peso atribuído à faixa em que cada valor de P se enquadra passa a representar o nível de probabilidade da respectiva simulação, denominado NP.

Tabela 14. Escala de probabilidade de ocorrência de um evento de falha.

Probabilidade de ocorrência	Faixa de valores da probabilidade	Peso
Muito baixa	$0 \leq P < 0,1$	1
Baixa	$0,1 \leq P < 0,2$	2
Média	$0,2 \leq P < 0,5$	5
Alta	$0,5 \leq P < 0,8$	8
Muito alta	$0,8 \leq P < 1,0$	10

Fonte: Adaptado de Brasil (2018).

De forma análoga, o impacto do evento de falha foi associado diretamente à vulnerabilidade do sistema, admitindo-se a relação de equivalência entre I e V. Desse modo, cada valor de vulnerabilidade obtido nas 1000 simulações sintéticas passa a representar o impacto correspondente daquela condição simulada. Assim como ocorre com a probabilidade de falha, os valores de impacto são enquadrados em uma escala qualitativa composta pelas classes “muito baixa”, “baixa”, “média”, “alta” e “muito alta”, também associadas, respectivamente, aos pesos 1, 2, 5, 8 e 10, como mostrado na Tabela 15. O peso atribuído à faixa de impacto em que cada valor de V se enquadra define o nível de impacto da simulação, denominado por sua vez de NI.

Tabela 15. Escala do Impacto de ocorrência de um evento de falha.

Probabilidade de ocorrência	Faixa de valores do impacto	Peso
Muito baixa	$0 \leq I < 0,1$	1
Baixa	$0,1 \leq I < 0,2$	2
Média	$0,2 \leq I < 0,5$	5
Alta	$0,5 \leq I < 0,8$	8
Muito alta	$0,8 \leq I < 1,0$	10

Fonte: Adaptado de Brasil (2020).

Dessa forma, para cada cenário de aumento da vazão exógena do PISF, o procedimento permite transformar os 1000 valores simulados de confiabilidade e vulnerabilidade em 1000 pares ordenados de níveis de risco, representados por (NP_i, NI_i), preservando a variabilidade do espaço amostral e evitando que situações críticas sejam mascaradas por valores médios agregados.

A partir da obtenção dos níveis de probabilidade (NP) e de impacto (NI) em cada simulação, o risco inerente (RI) é calculado pelo produto:

$$RI = NP \times NI \quad \text{(Eq. 7)}$$

Assim, cada uma das 1000 simulações de cada cenário passa a apresentar um valor particular de risco inerente (RI), resultante da combinação entre a probabilidade de ocorrência da falha (P) e o impacto (I) associado à vulnerabilidade do sistema. Esses valores de RI (risco inerente) são posteriormente classificados em quatro faixas de risco, a saber: risco baixo, risco médio, risco alto e risco extremo, conforme mostrado na Tabela 16.

Tabela 16. Escala para classificação do nível de risco.

Classificação do Risco	Faixa
Risco Baixo (RB)	0 - 9,99
Risco Médio (RM)	10 - 39,99
Risco Alto (RA)	40 - 79,99
Risco Extremo (RE)	80 - 100

Fonte: Adaptado de Brasil (2018).

Com isso, torna-se possível quantificar, para cada cenário de vazão exógena do PISF, a frequência relativa de ocorrência de cada classe de risco, permitindo avaliar de forma probabilística a transição do sistema entre condições mais críticas e condições mais seguras de atendimento.

Adicionalmente, adotou-se neste estudo o conceito de risco crítico (RC), definido como a soma das frequências relativas das classes de risco alto (RA) e risco extremo (RE), isto é:

$$\mathrm{RC} = \mathrm{RA} + \mathrm{RE}. \qquad \text{(Eq. 8)}$$

Essa agregação é justificável pelo fato de que ambas as classes representam combinações de probabilidade (NP) e impacto (NI) suficientemente severas para indicar condições de maior exposição do sistema à falha, exigindo maior atenção do ponto de vista operacional e gerencial. Dessa forma, o risco crítico funciona como um índice da parcela do espaço amostral em que o sistema se encontra sob condições desfavoráveis de desempenho, permitindo avaliar de maneira direta a efetividade do incremento da vazão exógena na redução das situações mais indesejáveis.

5.4.8 – ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS OPERACIONAIS

Foram simulados 11 cenários, variando-se o percentual do aporte hídrico exógeno, a fim de realizar uma cobertura completa do espectro operacional do sistema e verificar a sensibilidade desde a operação plena até a inexistência de aporte exógeno. Em todos eles, as demandas hídricas atuais foram mantidas constantes, enquanto a vazão transposta foi aumentada gradativamente em 10%, partindo de 0% no Cenário 1 e chegando a 100% (4,2 m³/s) no Cenário 11 (Tabela 17).

Tabela 17. Cenários propostos.

Cenário	Vazão exógena utilizada (%)	Observação
Cenário 1	0%	Sem vazão exógena
Cenário 2	10%	Aumento de 10%
Cenário 3	20%	Aumento de 20%
Cenário 4	30%	Aumento de 30%
Cenário 5	40%	Aumento de 40%
Cenário 6	50%	Aumento de 50%
Cenário 7	60%	Aumento de 60%
Cenário 8	70%	Aumento de 70%
Cenário 9	80%	Aumento de 80%
Cenário 10	90%	Aumento de 90%
Cenário 11	100%	Vazão exógena integral

Fonte: Autoria própria.

A escolha dos 11 cenários resultou em uma discretização suficiente para a realização de uma análise de tendência, que pôde informar como variam as classes de risco em função do percentual da vazão transposta efetivamente entregue. Desse modo, foi possível capturar mudanças graduais nos indicadores, permitindo a construção de gráficos contínuos de tendência que permitiram enxergar pontos de inflexão onde o sistema colapsa ou muda de regime.

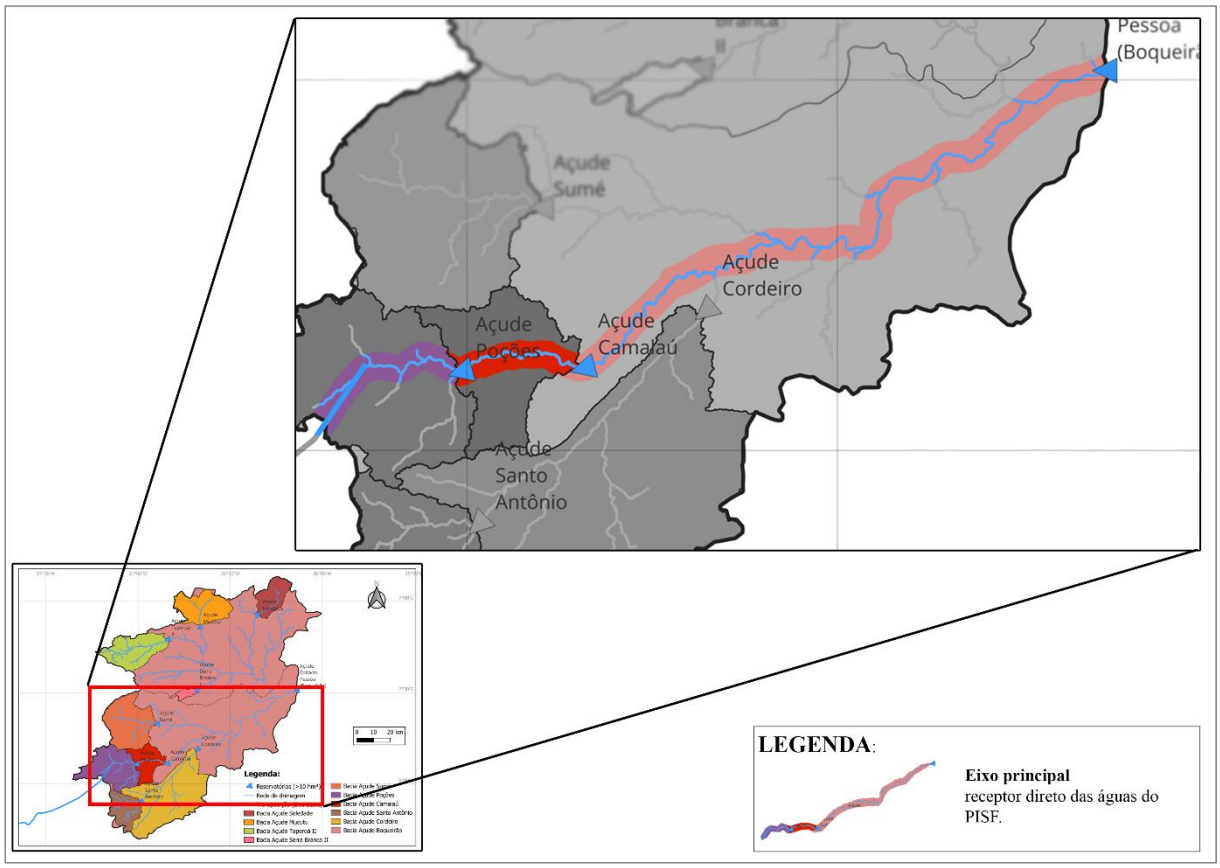
Cada um dos 11 cenários foi simulado 1000 vezes, resultante do processamento das 1000 séries sintéticas de precipitação, permitindo a construção do espaço amostral probabilístico dos indicadores C e V para cada cenário, para posterior determinação dos níveis de probabilidade (NP) e impacto (NI), cujo produto resultou no RI (risco inerente) de cada simulação, conforme a metodologia adaptada de Brasil (2018).

6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 – RESERVATÓRIOS DO EIXO PRINCIPAL

A seguir, são apresentados os resultados da análise de riscos referentes aos reservatórios que compõem o eixo principal do sistema (Figura 19), os quais barram o rio Paraíba e recebem diretamente as águas provenientes da transposição, a saber: Poções, Camalaú e Epitácio Pessoa.

Figura 19. Eixo receptor das águas do PISF.



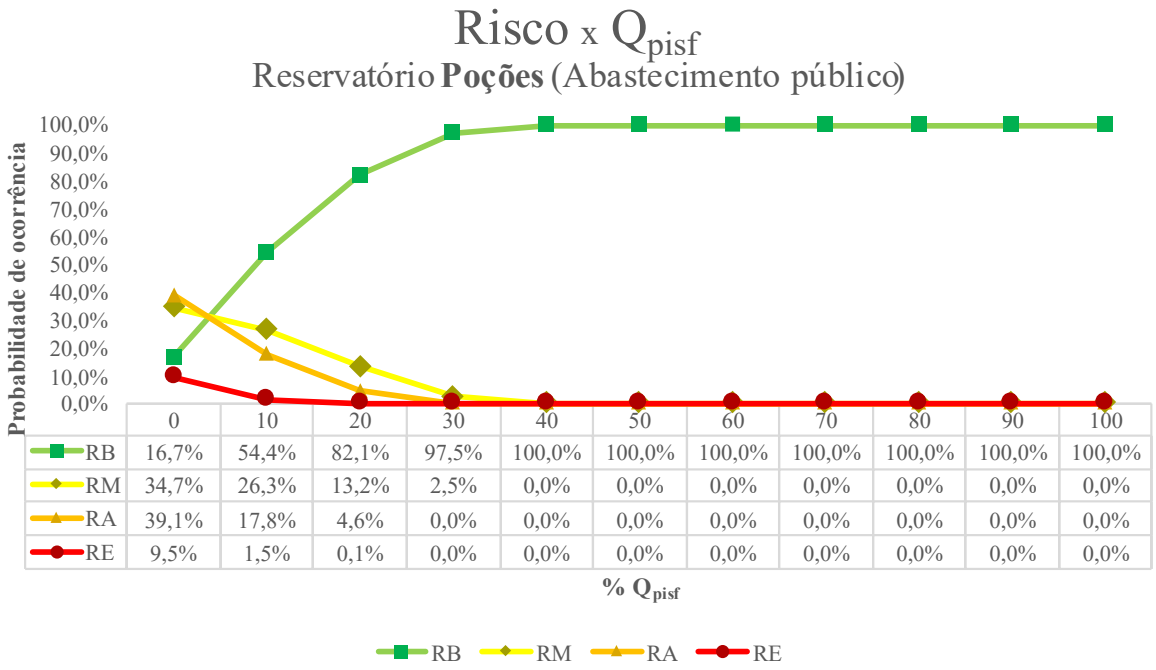
Fonte: Autoria própria (2026).

6.1.1 – RESERVATÓRIO POÇÕES

Abastecimento urbano

A Figura 20 a seguir apresenta a variação das probabilidades de ocorrência das classes de risco baixo (RB), médio (RM), alto (RA) e extremo (RE) para o atendimento da demanda de abastecimento urbano associada ao reservatório Poções, em função do incremento percentual da vazão exógena proveniente do PISF.

Figura 20. Análise de riscos para o abastecimento público do reservatório Poções.



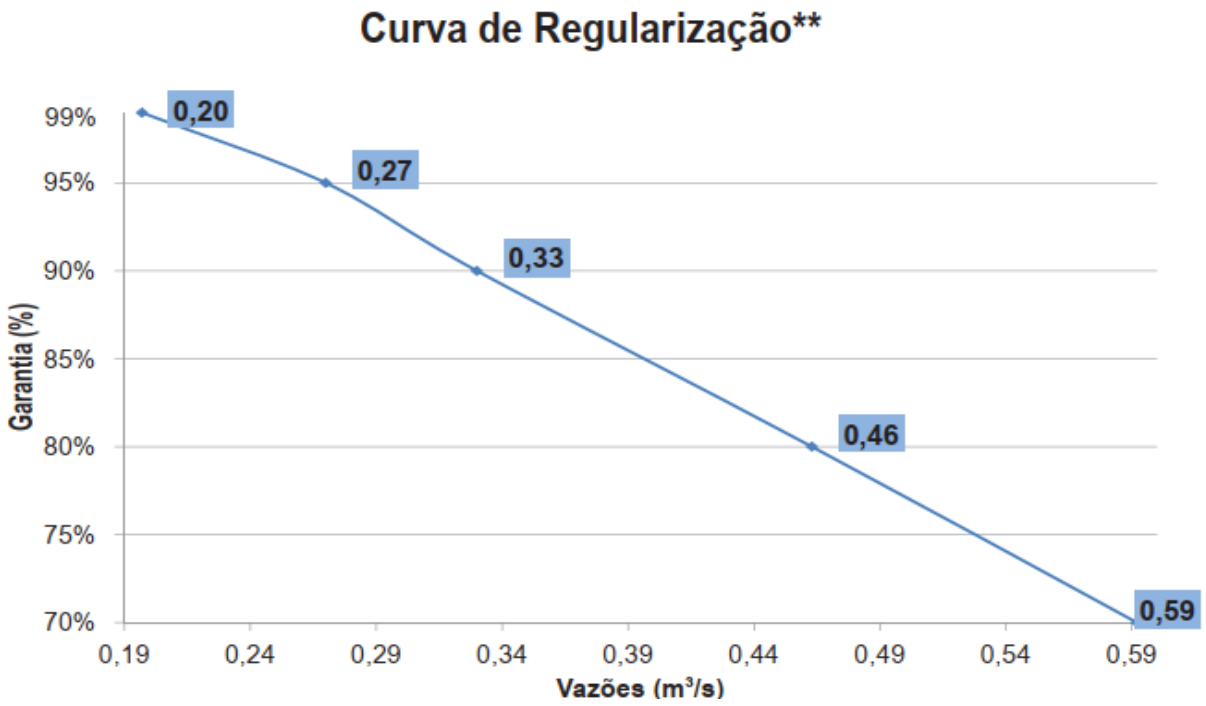
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
RB	16,7%	54,4%	82,1%	97,5%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
RM	34,7%	26,3%	13,2%	2,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RA	39,1%	17,8%	4,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RE	9,5%	1,5%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Autoria própria (2026).

Nela, observa-se que, na ausência de aporte hídrico exógeno, o sistema apresenta predominância das classes de risco médio e alto, com probabilidades de 34,7% e 39,1%, respectivamente, enquanto o risco baixo representa apenas 16,7% das ocorrências simuladas e o risco extremo alcança 9,5%. Esse comportamento indica que, sob condições exclusivamente dependentes da contribuição hidrológica local, o reservatório apresenta elevada exposição a situações de comprometimento do atendimento, possivelmente em razão da combinação entre demanda hídrica significativa e limitada capacidade de regularização da bacia de contribuição.

Essa hipótese é extremamente coerente com a curva de regularização do reservatório Poções (Figura 21) apresentada por ANA (2017), uma vez que a demanda total considerada nesta pesquisa, de 0,473 m³/s, situa-se ligeiramente acima da vazão regularizável com 80% de garantia – da ordem de 0,460 m³/s. Isto indica que, na ausência de aporte exógeno, o reservatório opera em uma faixa de retirada associada a uma probabilidade relevante de não atendimento, justificando a predominância inicial das classes de risco médio e alto.

Figura 21. Curva de regularização do reservatório Poções.



Fonte: ANA (2017).

Todavia, à medida que a vazão exógena aumenta (Figura 20), verifica-se rápida elevação da probabilidade de risco baixo, que passa de 16,7%, no cenário sem transposição, para 54,4% com 10% de Qpisf, 82,1% com 20% de Qpisf e 97,5% com 30% de Qpisf, atingindo 100% a partir de 40% da vazão transposta considerada. Por outro lado, observa-se a redução acelerada das classes de maior criticidade com o incremento da vazão exógena. O risco extremo, inicialmente igual a 9,5%, reduz-se para 1,5% com apenas 10% de Qpisf, tornando-se praticamente residual com 20% de Qpisf, atingindo 0,1%, e desaparece a partir de 30% de Qpisf. O risco alto também apresenta queda expressiva, passando de 39,1% para 17,8% com 10% de Qpisf, 4,6% com 20% de Qpisf e 0,0% a partir de 30% de Qpisf. O risco médio, por sua vez, reduz-se gradualmente de 34,7% para 26,3%, 13,2% e 2,5% nos cenários de 10%, 20% e 30% de Qpisf, respectivamente, sendo eliminado a partir de 40% da vazão exógena.

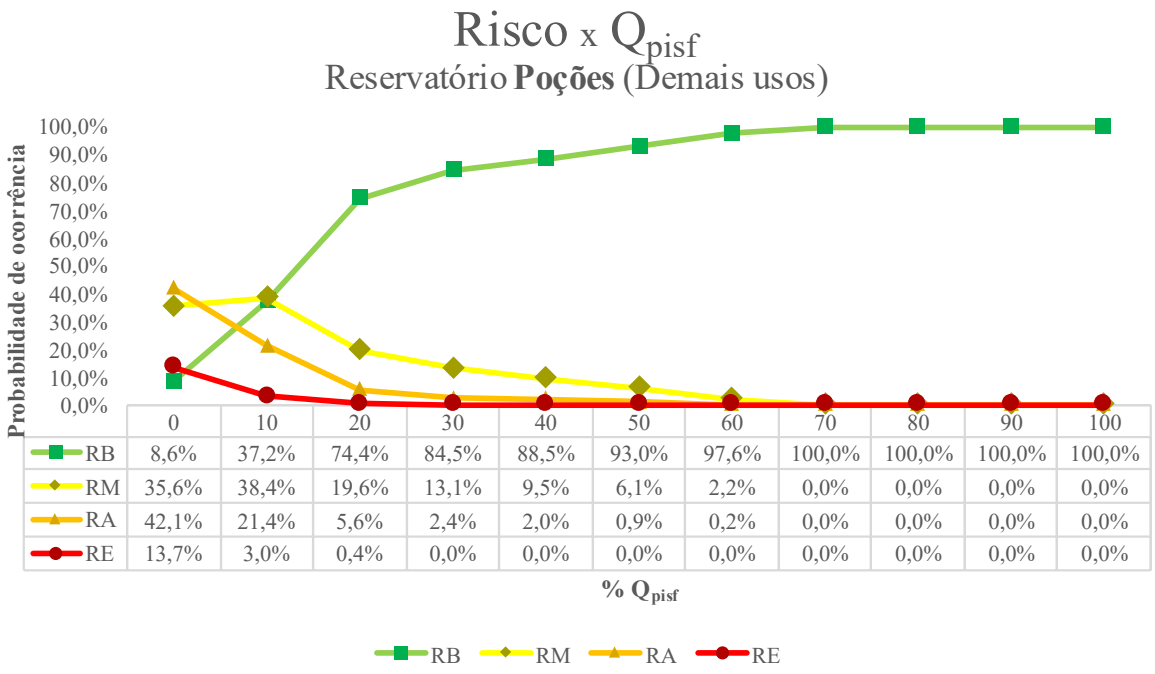
Esse padrão evidencia forte sensibilidade do atendimento ao abastecimento público em relação ao aporte externo, com rápida convergência para a condição de risco baixo e simultânea eliminação das classes de risco alto e extremo. Esse comportamento pode ser explicado, em parte, pela prioridade máxima atribuída ao abastecimento urbano no modelo de simulação, o que favorece a recuperação do desempenho dessa demanda em comparação com usos de menor prioridade.

Ainda assim, os resultados revelam que, sem o aporte exógeno, a contribuição hidrológica local não é suficiente para assegurar, de forma consistente e sustentável, o atendimento frente às demandas consideradas, reforçando a dependência operacional do sistema em relação à vazão transposta.

Demais usos

A Figura 22 apresenta a evolução das probabilidades de ocorrência das classes de risco baixo (RB), médio (RM), alto (RA) e extremo (RE) para os demais usos associados ao reservatório Poções, em função do incremento percentual da vazão exógena proveniente do PISF.

Figura 22. Análise de riscos para os demais usos associados ao reservatório Poções.



	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
RB	8,6%	37,2%	74,4%	84,5%	88,5%	93,0%	97,6%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
RM	35,6%	38,4%	19,6%	13,1%	9,5%	6,1%	2,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RA	42,1%	21,4%	5,6%	2,4%	2,0%	0,9%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RE	13,7%	3,0%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Autoria própria (2026).

Na ausência de aporte hídrico externo, observa-se predominância das classes de maior criticidade, com 42,1% de probabilidade de risco alto, 35,6% de risco médio e 13,7% de risco extremo, enquanto o risco baixo representa apenas 8,6% das ocorrências simuladas. Esse comportamento indica que, sem contribuição exógena, o atendimento aos demais usos apresenta elevada vulnerabilidade operacional, possivelmente em razão da combinação entre

demanda hídrica significativa, limitada capacidade de recarga local da bacia de contribuição e prioridade secundária atribuída a esse tipo de uso no modelo de simulação.

Com o incremento da vazão transposta, verifica-se aumento progressivo da classe de risco baixo, que passa para 37,2% com 10% de Qpisf, 74,4% com 20%, 84,5% com 30%, 88,5% com 40%, 93,0% com 50% e 97,6% com 60%, atingindo 100% somente a partir de 70% da vazão exógena considerada. De modo complementar, as classes de maior criticidade apresentam redução gradual à medida que a disponibilidade hídrica exógena aumenta, embora com convergência mais lenta quando comparada ao atendimento prioritário de abastecimento público.

O risco extremo, inicialmente igual a 13,7%, reduz-se para 3,0% com 10% de Qpisf, 0,4% com 20% e é eliminado a partir de 30%. O risco alto também sofre queda expressiva, passando de 42,1% para 21,4% com 10% de Qpisf, 5,6% com 20%, 2,4% com 30%, 2,0% com 40%, 0,9% com 50% e 0,2% com 60%, desaparecendo apenas a partir de 70% da vazão transposta. O risco médio, por sua vez, mantém participação relevante até cenários intermediários, variando de 35,6% no cenário sem transposição para 38,4% com 10% de Qpisf, antes de reduzir para 19,6%, 13,1%, 9,5%, 6,1% e 2,2% entre 20% e 60% de Qpisf.

Isto significa que, embora o aporte exógeno contribua de forma decisiva para a redução dos riscos, os demais usos demandam maior percentual da vazão transposta para alcançar condição integralmente segura. Resultado bastante semelhante é apresentado também por ANA (2017), quando distingue demandas prioritárias e não prioritárias, endossando a leitura de que a hierarquia operacional preserva o abastecimento urbano e expõe mais acentuadamente as demandas secundárias. Esse resultado, portanto, se mostra coerente com a estrutura de prioridades adotada no modelo, na qual o abastecimento urbano é atendido preferencialmente, fazendo com que os usos secundários dependam da disponibilidade remanescente após o atendimento das demandas prioritárias, das regras de operação e das limitações hidrológicas próprias da bacia de contribuição do reservatório Poções.

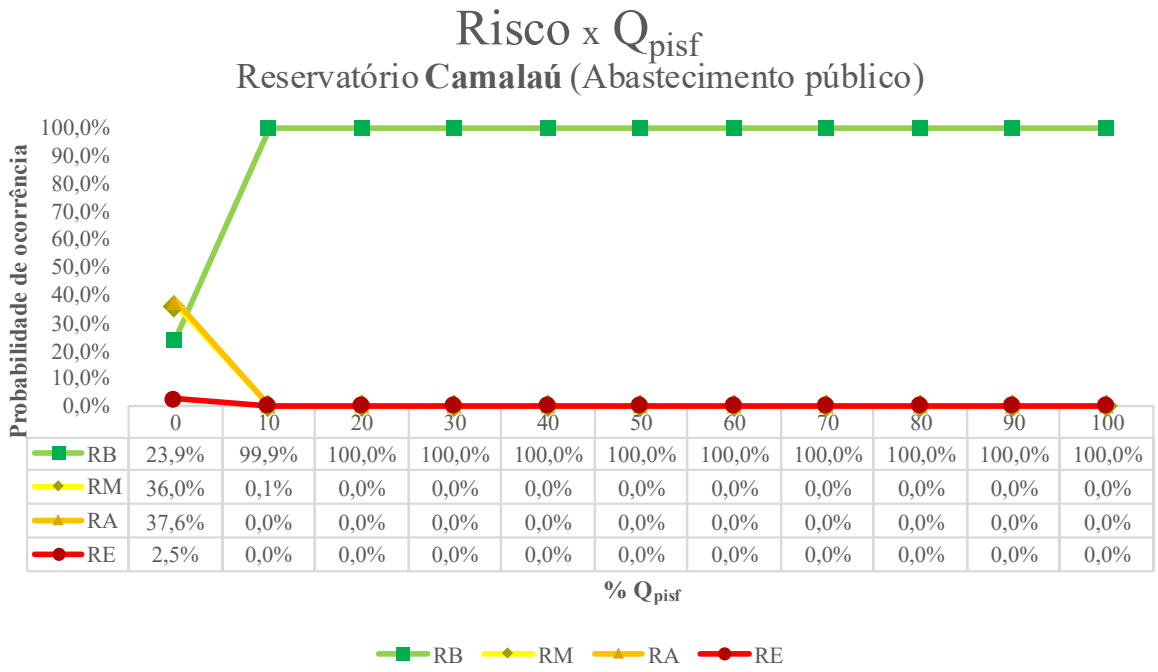
6.1.2 – RESERVATÓRIO CAMALAÚ

Abastecimento urbano

A Figura 23 apresenta a evolução das probabilidades de ocorrência das classes de risco baixo (RB), médio (RM), alto (RA) e extremo (RE) para o atendimento da demanda de

abastecimento público associada ao reservatório Camalaú, em função do incremento percentual da vazão exógena proveniente do PISF.

Figura 23. Análise de riscos do abastecimento público do reservatório Camalaú.

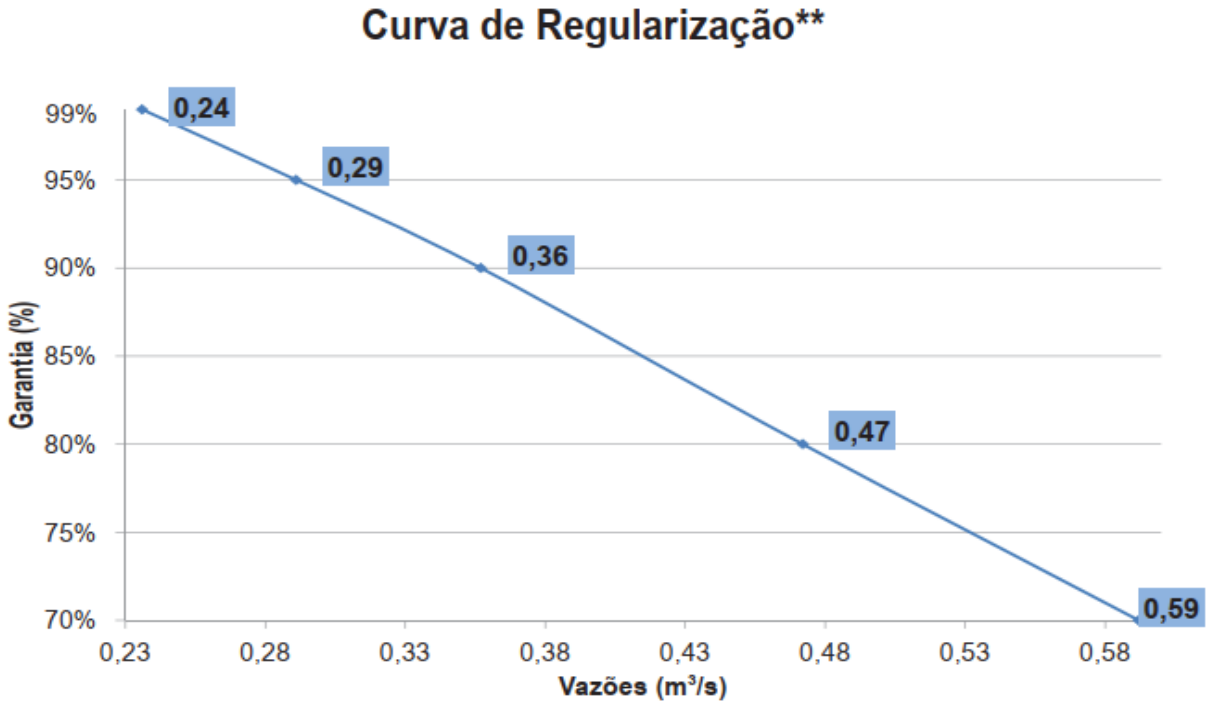


	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
RB	23,9%	99,9%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
RM	36,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RA	37,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RE	2,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Autoria própria (2026).

Na ausência de aporte externo, observa-se uma distribuição relativamente concentrada entre as classes de risco médio e alto, com probabilidades de 36,0% e 37,6%, respectivamente, enquanto o risco baixo corresponde a 23,9% das ocorrências simuladas e o risco extremo representa 2,5%. Esse resultado indica que, sob condição exclusivamente dependente da disponibilidade hídrica local, o atendimento ao abastecimento público ainda apresenta exposição relevante a situações de comprometimento, sobretudo nas faixas de risco médio e alto, situação bastante coerente com o que apresenta ANA (2017) sobre o reservatório Camalaú na sua curva de regularização (Figura 24). A vazão total demandada considerada no presente estudo (0,862 m³/s) supera até a vazão regularizável com 70% de garantia (0,590 m³/s), justificando a ocorrência das classes de risco mais elevadas e evidenciando a maior pressão sobre a capacidade de atendimento com 0% de Qpisf.

Figura 24. Curva de regularização do reservatório Camalaú.



Fonte: ANA (2017).

Entretanto, diferente de outros casos de maior persistência das classes críticas, o sistema apresenta resposta extremamente sensível ao aporte exógeno, uma vez que, com apenas 10% de Qpisf, a probabilidade de risco baixo atinge 99,9%, permanecendo em 100,0% a partir de 20% da vazão transposta considerada. Complementarmente, verifica-se que as classes de maior criticidade são praticamente eliminadas já no primeiro incremento de vazão exógena. O risco extremo, inicialmente igual a 2,5%, desaparece com 10% de Qpisf, enquanto o risco alto, que no cenário sem transposição corresponde a 37,6%, também é reduzido a 0,0% nesse mesmo cenário. O risco médio, por sua vez, passa de 36,0% para apenas 0,1% com 10% de Qpisf e é completamente eliminado a partir de 20%.

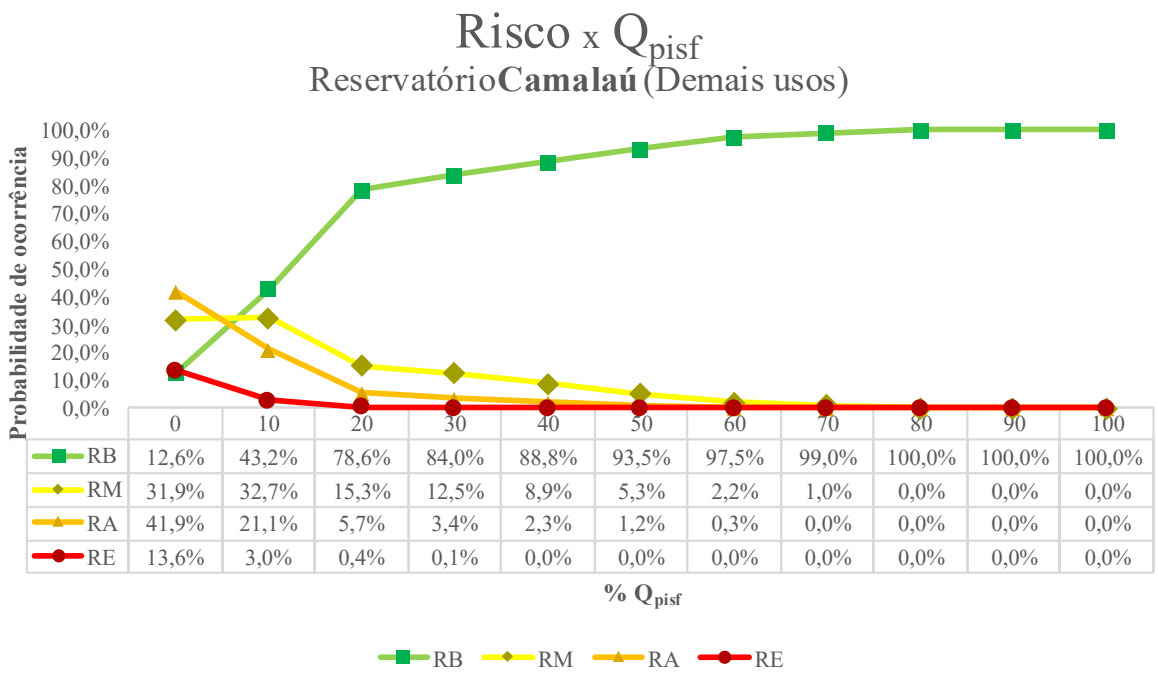
Isto mostra uma convergência quase imediata para a condição de risco baixo no atendimento ao abastecimento público de Camalaú, sugerindo que pequenos incrementos de vazão exógena são suficientes para estabilizar o desempenho dessa demanda no modelo de simulação. Tal resultado pode ser explicado, em parte, pela prioridade máxima atribuída ao abastecimento urbano, que direciona preferencialmente a disponibilidade hídrica para esse uso, bem como pela sua relativa alta capacidade de armazenamento (46 hm³), que lhe proporciona razoável poder de amortecimento hidrológico.

Assim, embora o sistema apresente risco relevante sem o aporte do PISF, sua resposta operacional demonstra elevada eficiência na redução dos riscos quando submetido mesmo a baixos percentuais de vazão transposta.

Demais usos

A Figura 25 apresenta a evolução das probabilidades de ocorrência das classes de risco baixo (RB), médio (RM), alto (RA) e extremo (RE) para os demais usos associados ao reservatório Camalaú, em função do incremento percentual da vazão exógena proveniente do PISF.

Figura 25. Análise de riscos para os demais usos associados ao reservatório Camalaú.



	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
RB	12,6%	43,2%	78,6%	84,0%	88,8%	93,5%	97,5%	99,0%	100,0%	100,0%	100,0%
RM	31,9%	32,7%	15,3%	12,5%	8,9%	5,3%	2,2%	1,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RA	41,9%	21,1%	5,7%	3,4%	2,3%	1,2%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RE	13,6%	3,0%	0,4%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Autoria própria (2026).

Na ausência de aporte hídrico externo, observa-se predominância das classes de maior criticidade, com 41,9% de probabilidade de risco alto, 31,9% de risco médio e 13,6% de risco extremo, enquanto o risco baixo representa apenas 12,6% das ocorrências simuladas. Esse comportamento evidencia que, sob condição exclusivamente dependente da disponibilidade hídrica local, o atendimento aos demais usos apresenta expressiva vulnerabilidade, o que pode estar relacionado à combinação entre demandas hídricas relevantes (principalmente de

perenização à jusante), limitada capacidade de atendimento sustentado apenas pela contribuição natural da bacia (pequena extensão superficial da sua bacia exclusiva de contribuição) e prioridade operacional secundária atribuída a esses usos no modelo de simulação.

Com o aumento da vazão exógena, verifica-se elevação progressiva da probabilidade de risco baixo, que passa de 12,6% para 43,2% com 10% de Qpisf, 78,6% com 20%, 84,0% com 30%, 88,8% com 40%, 93,5% com 50%, 97,5% com 60% e 99,0% com 70%, atingindo 100,0% somente a partir de 80% da vazão transposta considerada. Por sua vez, as classes de risco mais elevadas apresentam redução gradual e consistente à medida que a disponibilidade hídrica exógena aumenta, embora essa convergência seja sensivelmente mais lenta do que a observada para o abastecimento público do mesmo reservatório.

O risco extremo, inicialmente igual a 13,6%, reduz-se para 3,0% com 10% de Qpisf, 0,4% com 20% e 0,1% com 30%, sendo eliminado a partir de 40%. O risco alto, por sua vez, decresce de 41,9% no cenário sem transposição para 21,1% com 10% de Qpisf, 5,7% com 20%, 3,4% com 30%, 2,3% com 40%, 1,2% com 50% e 0,3% com 60%, desaparecendo a partir de 70%. O risco médio mantém participação relevante nos cenários iniciais e intermediários, passando de 31,9% para 32,7% com 10% de Qpisf, antes de reduzir progressivamente para 15,3%, 12,5%, 8,9%, 5,3%, 2,2% e 1,0% entre 20% e 70% de Qpisf, sendo eliminado apenas a partir de 80%.

Esse padrão mostra que, embora o aporte do PISF promova melhoria substancial do desempenho dos demais usos, esses usos requerem percentuais mais elevados de vazão exógena para atingir condição integralmente segura. Isto é coerente com a prioridade inferior que lhes é atribuída no modelo, já que o atendimento urbano é realizado preferencialmente.

A leitura do trabalho de ANA (2017) permite inferir importante correlação entre Camalaú (46,4 hm^3) e o reservatório São Gonçalo I (44,6 hm^3), no sertão do estado. Embora pertençam a sistemas diferentes, a semelhança da capacidade de armazenamento e a presença de retiradas expressivas para usos secundários ajudam a explicar o comportamento de Camalaú: o abastecimento público se recupera rapidamente, ao passo que os demais usos permanecem vulneráveis, necessitando de maiores percentuais de vazão exógena. Nesse caso, o autor observou que mesmo uma transferência de 530 l/s de Engenheiro Ávidos (reservatório a montante) para São Gonçalo I, embora tenha melhorado sua condição, não foi suficiente para lhe garantir confiabilidade plena. Disso, pode-se concluir que aportes externos podem produzir

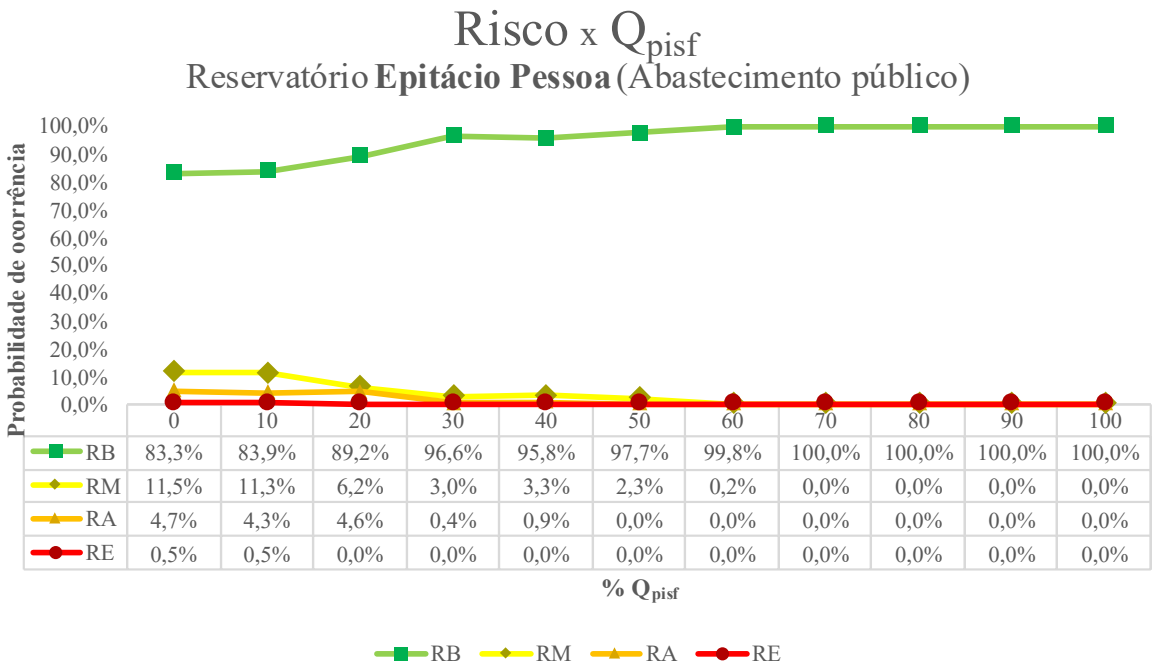
benefícios significativos, mas não necessariamente eliminam as fragilidades associadas a elevadas demandas não prioritárias.

6.1.3 – RESERVATÓRIO EPITÁCIO PESSOA

Abastecimento urbano

A Figura 26 apresenta a evolução das probabilidades de ocorrência das classes de risco baixo (RB), médio (RM), alto (RA) e extremo (RE) para o atendimento da demanda de abastecimento público associada ao reservatório Epitácio Pessoa, em função do incremento percentual da vazão exógena proveniente do PISF.

Figura 26. Análise de riscos do abastecimento público do reservatório Epitácio Pessoa.



	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
RB	83,3%	83,9%	89,2%	96,6%	95,8%	97,7%	99,8%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
RM	11,5%	11,3%	6,2%	3,0%	3,3%	2,3%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RA	4,7%	4,3%	4,6%	0,4%	0,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RE	0,5%	0,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

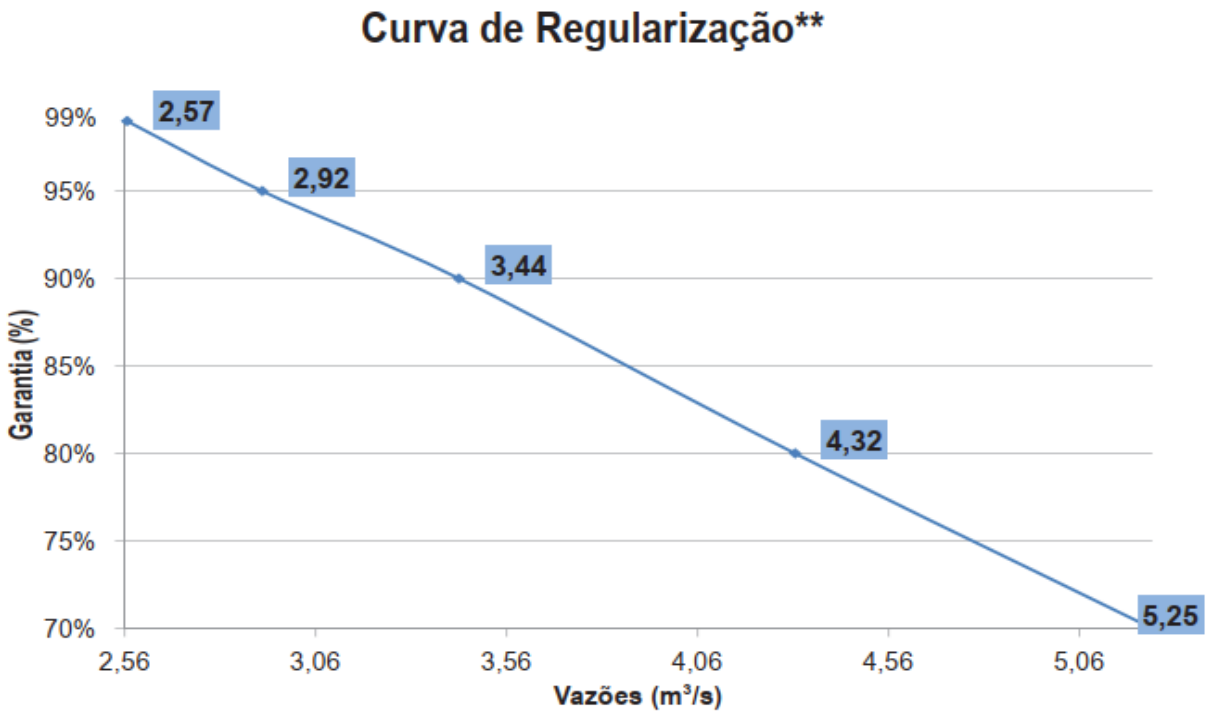
Fonte: Autoria própria (2026).

Na ausência de aporte hídrico externo, observa-se (Figura 26) predominância expressiva da classe de risco baixo, com probabilidade de 83,3%, enquanto as classes de risco médio, alto e extremo apresentam probabilidades de 11,5%, 4,7% e 0,5%, respectivamente. Esse comportamento indica que, mesmo sob condição exclusivamente dependente da disponibilidade hídrica local e das regras operacionais consideradas, o atendimento ao abastecimento público associado ao reservatório Epitácio Pessoa apresenta desempenho

relativamente favorável quando comparado aos demais reservatórios analisados. Tal resultado pode estar relacionado à maior capacidade de armazenamento do reservatório (>400 hm³), à maior área de contribuição de sua bacia hidrográfica (7550 km²), à integração com toda a rede de montante e à prioridade máxima atribuída ao abastecimento urbano no modelo de simulação, fatores que contribuem para reduzir a exposição dessa demanda a situações de maior criticidade.

Com base na Figura 27, ANA (2017) informa que a vazão regularizável com 95% de confiabilidade (2,92 m³/s) é praticamente igual a toda a demanda considerada na presente pesquisa (2,911 m³/s). Esse fato provavelmente explica a predominância de risco baixo.

Figura 27. Curva de regularização do reservatório Epitácio Pessoa.



Fonte: ANA (2017).

Com o incremento da vazão exógena (Figura 26), verifica-se a consolidação progressiva da condição de risco baixo, que passa de 83,3% no cenário sem transposição para 83,9% com 10% de Qpisf, 89,2% com 20%, 96,6% com 30%, 95,8% com 40%, 97,7% com 50% e 99,8% com 60%, atingindo 100,0% a partir de 70% da vazão transposta considerada. De outro lado, observa-se redução gradual das classes de maior criticidade, com eliminação do risco extremo já a partir de 20% de Qpisf e desaparecimento do risco alto a partir de 50%. O risco médio, por sua vez, reduz-se de 11,5% no cenário sem aporte externo para 11,3% com 10% de Qpisf, 6,2%

com 20%, 3,0% com 30%, 3,3% com 40%, 2,3% com 50% e 0,2% com 60%, sendo eliminado a partir de 70%.

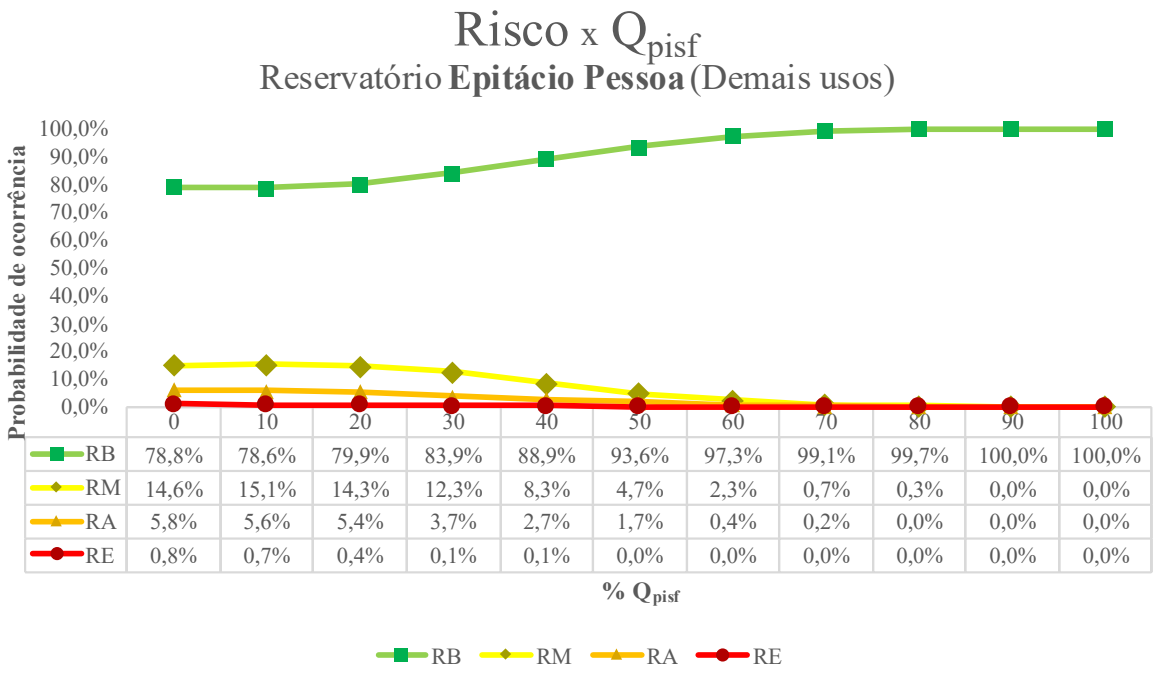
Esse panorama mostra que o aporte exógeno exerce papel importante na eliminação residual das classes de risco, contudo, neste caso particular, sua função principal é de reforço da segurança operacional do sistema, em vez de reversão de um quadro inicialmente crítico. Assim, a elevada probabilidade inicial de risco baixo sugere que, para o abastecimento público, o reservatório Epitácio Pessoa apresenta bastante robustez hidrológica e operacional, embora a presença do PISF seja determinante para conduzir o sistema à condição integralmente segura nos cenários de maior disponibilidade hídrica.

Demais usos

A

Figura 28 apresenta a evolução das probabilidades de ocorrência das classes de risco baixo (RB), médio (RM), alto (RA) e extremo (RE) para os demais usos associados ao reservatório Epitácio Pessoa, em função do incremento percentual da vazão exógena proveniente do PISF.

Figura 28. Análise de riscos para os demais usos associados ao reservatório Epitácio Pessoa.



	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
RB	78,8%	78,6%	79,9%	83,9%	88,9%	93,6%	97,3%	99,1%	99,7%	100,0%	100,0%
RM	14,6%	15,1%	14,3%	12,3%	8,3%	4,7%	2,3%	0,7%	0,3%	0,0%	0,0%
RA	5,8%	5,6%	5,4%	3,7%	2,7%	1,7%	0,4%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%
RE	0,8%	0,7%	0,4%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Autoria própria (2026).

Mesmo na ausência de aporte hídrico externo, verifica-se predominância expressiva da classe de risco baixo, com probabilidade de 78,8%, ao passo que os riscos médio, alto e extremo apresentam probabilidades de 14,6%, 5,8% e 0,8%, respectivamente. Esse comportamento indica que, ainda que os demais usos não detenham a prioridade máxima no modelo de simulação, o sistema já apresenta, em condição natural, desempenho operacional relativamente satisfatório. Tal resultado pode estar associado à maior capacidade de armazenamento do reservatório Epitácio Pessoa, bem como à maior área de contribuição de sua bacia hidrográfica, fatores que tendem a conferir maior robustez ao sistema diante das elevadas demandas hídricas existentes.

Com o aumento da vazão exógena, observa-se crescimento progressivo da probabilidade de risco baixo, que passa de 78,8% no cenário sem transposição para 78,6% com 10% de Qpisf, 79,9% com 20%, 83,9% com 30%, 88,9% com 40%, 93,6% com 50%, 97,3% com 60%, 99,1% com 70% e 99,7% com 80%, atingindo 100,0% apenas a partir de 90% da vazão transposta considerada. De forma complementar, as classes de maior criticidade reduzem-se gradualmente com o incremento da disponibilidade hídrica exógena, embora essa redução ocorra de maneira menos abrupta do que nos casos em que o aporte do PISF promove reversões rápidas de cenários críticos.

O risco extremo, inicialmente igual a 0,8%, decresce para 0,7% com 10% de Qpisf, 0,4% com 20% e 0,1% com 30% e 40%, sendo eliminado a partir de 50%. O risco alto também apresenta queda contínua, passando de 5,8% no cenário sem aporte externo para 5,6%, 5,4%, 3,7%, 2,7%, 1,7%, 0,4% e 0,2% entre 10% e 70% de Qpisf, desaparecendo a partir de 80%. O risco médio, por sua vez, mantém-se como a principal classe residual de criticidade ao longo dos cenários intermediários, variando de 14,6% no cenário inicial para 15,1% com 10% de Qpisf, 14,3% com 20%, 12,3% com 30%, 8,3% com 40%, 4,7% com 50%, 2,3% com 60%, 0,7% com 70% e 0,3% com 80%, sendo eliminado somente a partir de 90%.

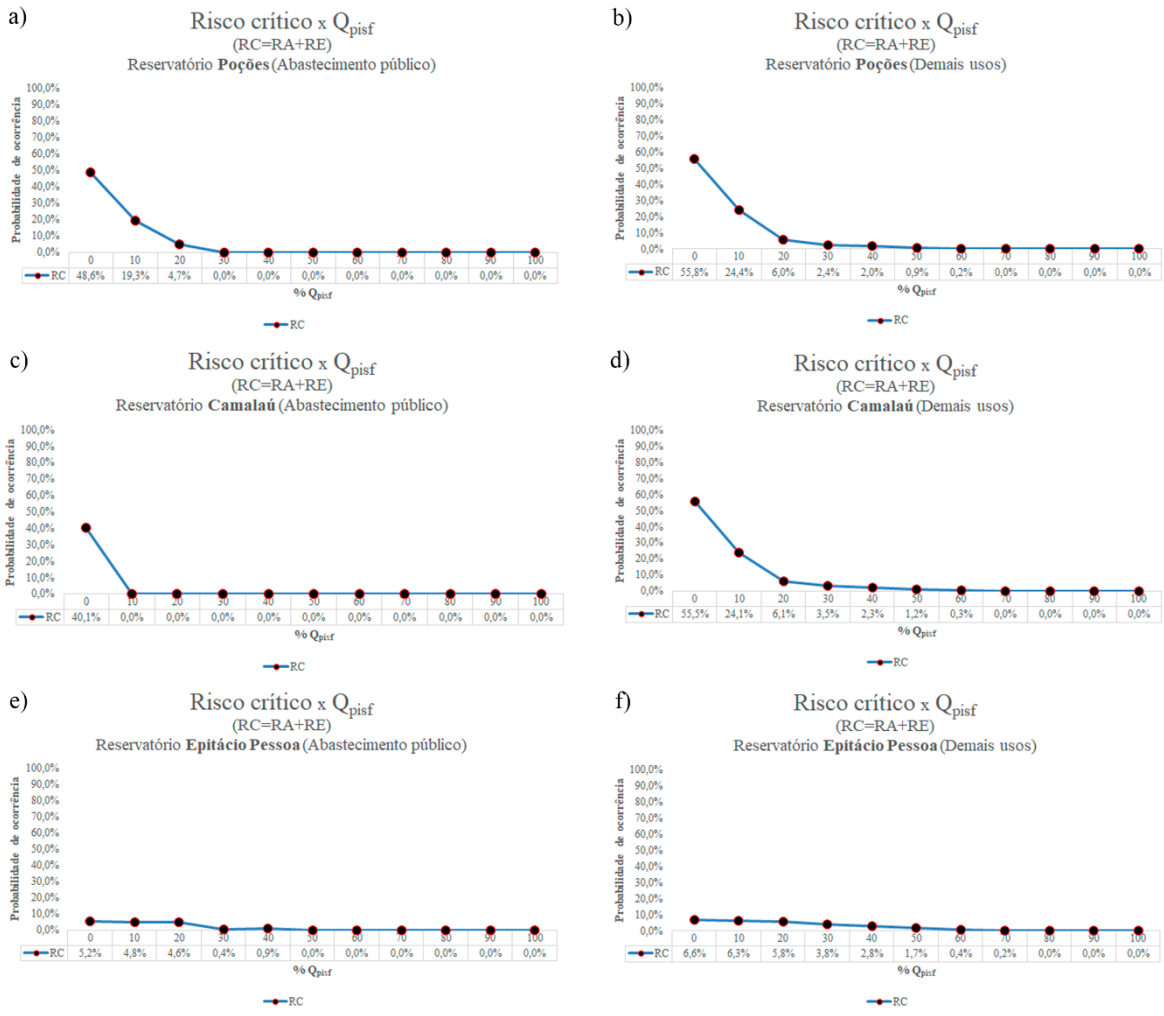
Esse padrão evidencia que, embora o sistema já apresente condição bastante favorável mesmo sem transposição, o aporte do PISF atua no sentido de consolidar progressivamente a segurança operacional também para os usos não prioritários. Em comparação com o abastecimento público do mesmo reservatório, nota-se comportamento semelhante quanto à predominância inicial do risco baixo, porém com convergência mais lenta para a condição integralmente segura, o que é coerente com a estrutura de prioridades adotada no modelo, em

que o atendimento urbano ocorre preferencialmente e os demais usos dependem, em maior medida, da disponibilidade hídrica remanescente.

6.1.4 – AGREGAÇÃO DAS CLASSES DE RISCO ELEVADO

De um modo geral, observa-se na Figura 29 que os maiores valores iniciais de RC ocorrem nas demandas classificadas como “demais usos” dos reservatórios Poções e Camalaú, com 55,8% e 55,5%, respectivamente, na ausência de aporte hídrico exógeno. Esses resultados corroboram a ideia apresentada anteriormente ao indicarem elevada exposição dessas demandas a condições críticas quando o sistema depende exclusivamente da disponibilidade hídrica local.

Figura 29. Evolução do risco crítico (RC=RA+RE) *versus* %Qpisf.



Fonte: Autoria própria (2026).

No caso do abastecimento público de Poções, o RC inicial também se mostra elevado, atingindo 48,6%, o que reforça a vulnerabilidade desse reservatório diante da combinação entre demanda significativa, limitada área de contribuição e baixa capacidade de recarga natural frente às retiradas consideradas. Em contrapartida, os menores valores iniciais de RC são observados no abastecimento público de Camalaú, com apenas 2,5%, e nas demandas associadas ao Epitácio Pessoa, cujos valores iniciais são de 5,2% para abastecimento público e 6,6% para demais usos, sugerindo maior robustez hidrológica e operacional desses casos em relação aos cenários mais críticos.

A sensibilidade das demandas ao incremento da vazão exógena também se mostra bastante distinta entre os reservatórios e tipos de uso. Para o abastecimento público de Poções, o RC reduz-se rapidamente de 48,6% para 19,3% com 10% de Qpisf e para 4,7% com 20%, sendo eliminado a partir de 30% da vazão transposta. Esse comportamento indica forte dependência inicial do aporte externo, mas também elevada capacidade de recuperação do desempenho quando pequenas frações da vazão exógena passam a ser disponibilizadas. Nos demais usos de Poções, embora também ocorra redução expressiva, a convergência é mais lenta: o RC passa de 55,8% para 24,4% com 10% de Qpisf, 6,0% com 20%, 2,4% com 30%, 2,0% com 40%, 0,9% com 50% e 0,2% com 60%, sendo eliminado apenas a partir de 70%. Essa diferença evidencia claramente o efeito da prioridade operacional, uma vez que o abastecimento público é atendido preferencialmente no modelo, enquanto os demais usos dependem da disponibilidade remanescente.

No reservatório Camalaú, o contraste entre abastecimento público e demais usos é ainda mais evidente. Para o abastecimento público, o RC inicial de 2,5% é eliminado já com 10% de Qpisf, demonstrando que a demanda urbana associada a esse reservatório apresenta baixa criticidade e resposta praticamente imediata ao aporte hídrico exógeno. Por outro lado, os demais usos de Camalaú apresentam o segundo maior valor inicial de RC entre todos os casos analisados, com 55,5% sem transposição. Embora esse valor seja reduzido para 24,1% com 10% de Qpisf e para 6,1% com 20%, a eliminação completa do risco crítico ocorre somente a partir de 70% da vazão exógena. Isto sugere que, mesmo em um sistema capaz de estabilizar rapidamente o abastecimento público, os usos secundários permanecem mais expostos às condições críticas, especialmente em razão da hierarquia de atendimento adotada nas regras operacionais. Vale salientar que, neste caso específico, a demanda de abastecimento é relativamente pequena frente à elevada demanda a cargo do reservatório Camalaú à jusante, na calha do rio Paraíba, antes da chegada ao domínio operacional do Epitácio Pessoa.

No caso do reservatório Epitácio Pessoa, os valores de RC são significativamente inferiores aos observados em Poções e nos demais usos de Camalaú. Para o abastecimento público, o RC varia de 5,2% no cenário sem transposição para 4,8% com 10% de Qpisf, 4,6% com 20%, 0,4% com 30% e 0,9% com 40%, sendo eliminado a partir de 50%. Para os demais usos, a redução ocorre de forma mais gradual, passando de 6,6% para 6,3%, 5,8%, 3,8%, 2,8%, 1,7%, 0,4% e 0,2% entre 10% e 70% de Qpisf, com eliminação completa a partir de 80%. Esse padrão indica que o Epitácio Pessoa apresenta maior estabilidade relativa frente aos cenários críticos, possivelmente em função de sua maior capacidade de armazenamento, maior área de contribuição e portanto maior relevância estratégica no sistema. Ainda assim, a persistência residual do RC nos demais usos até cenários elevados de vazão exógena reforça que a existência de maior capacidade hídrica não elimina, por si só, os efeitos da priorização operacional e da pressão exercida pelas elevadas demandas.

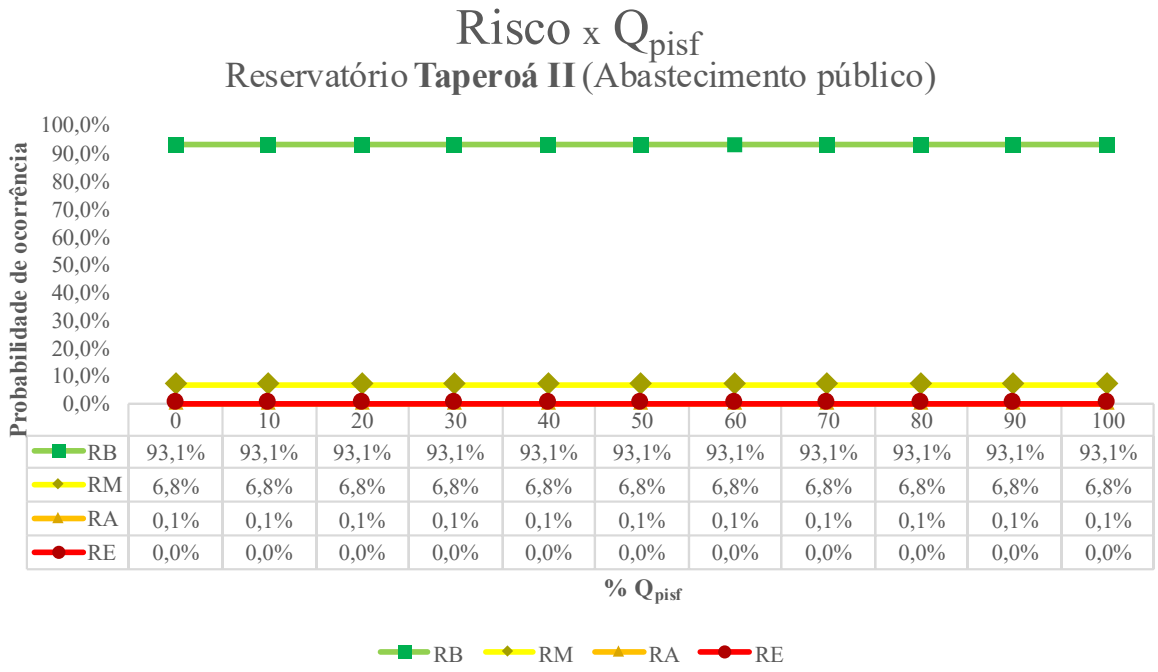
6.2 – RESERVATÓRIOS ESTRATÉGICOS

6.2.1 – RESERVATÓRIO TAPEROÁ II

Abastecimento urbano

A Figura 30 apresenta a distribuição das probabilidades de ocorrência das classes de risco baixo (RB), médio (RM), alto (RA) e extremo (RE) para o atendimento da demanda de abastecimento público associada ao reservatório Taperoá II, em função dos cenários de incremento percentual da vazão exógena proveniente do PISF.

Figura 30. Análise de riscos do abastecimento público do reservatório Taperoá II.



	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
RB	93,1%	93,1%	93,1%	93,1%	93,1%	93,1%	93,1%	93,1%	93,1%	93,1%	93,1%
RM	6,8%	6,8%	6,8%	6,8%	6,8%	6,8%	6,8%	6,8%	6,8%	6,8%	6,8%
RA	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
RE	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Autoria própria (2026).

Ao contrário dos reservatórios integrantes do eixo principal receptor das águas da transposição, observa-se que as probabilidades associadas às classes de risco permanecem constantes em todos os cenários avaliados, independentemente do aumento de Qpisf. Em todos os percentuais de vazão exógena considerados, o risco baixo mantém probabilidade de 93,1%, enquanto o risco médio permanece em 6,8%, o risco alto em 0,1% e o risco extremo em 0,0%.

Esse padrão mostra que o desempenho do reservatório Taperoá II não apresenta resposta direta ao aporte hídrico exógeno, uma vez que esse reservatório não recebe diretamente as águas da transposição em seu processo de recarga.

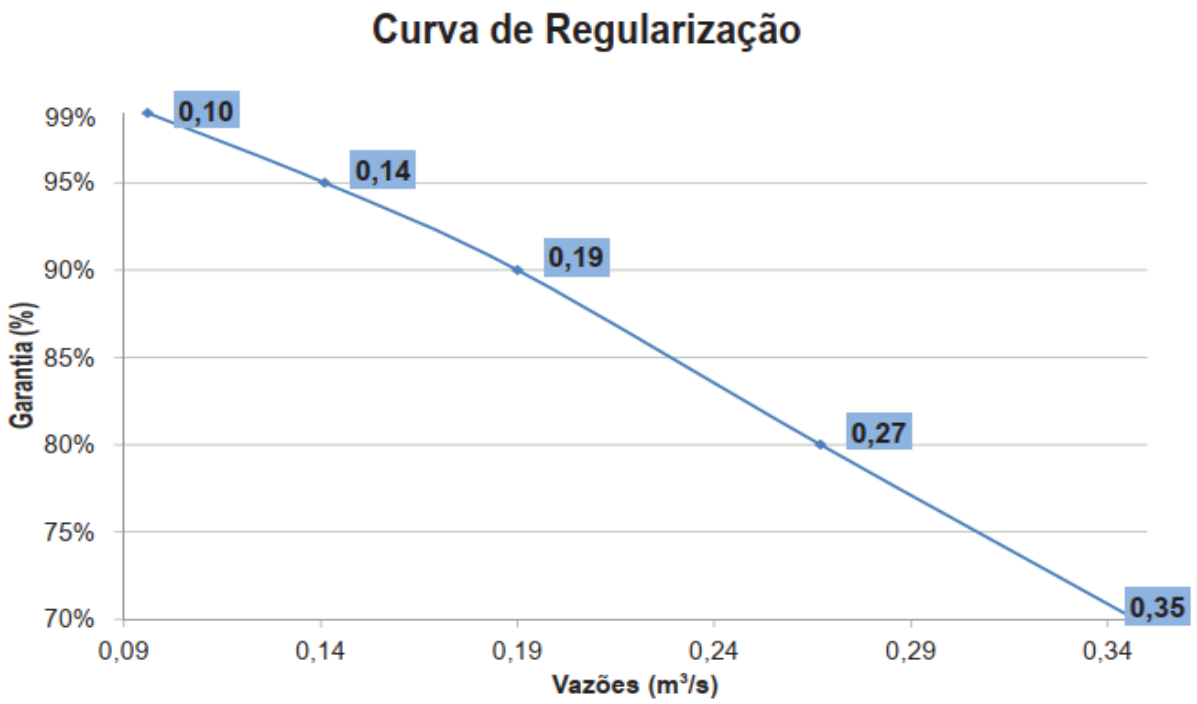
Do ponto de vista hidrológico e operacional, a estabilidade das curvas indica que a condição de risco do Taperoá II está essencialmente condicionada às características locais de sua bacia hidrográfica, tais como regime pluviométrico, área de contribuição, capacidade de armazenamento, perdas por evaporação e relação entre disponibilidade natural e demanda atendida.

A elevada predominância da classe de risco baixo sugere que, para o abastecimento público, o reservatório apresenta condição operacional relativamente favorável no conjunto das simulações realizadas, mesmo sem influência direta da vazão exógena. Ainda assim, a

permanência residual das classes de risco médio e alto indica que a segurança hídrica não é absoluta, havendo cenários hidrológicos em que o atendimento pode apresentar algum grau de comprometimento.

Um estudo da ANA (2017) sugere não ter identificado falhas no atendimento para o nível de demanda considerado nesta pesquisa (0,026 m³/s), como mostra a curva de regularização do reservatório Taperoá II na Figura 31. À medida que o presente trabalho encontrou 93,1% de chance de risco baixo, acredita-se não haver contradição, pois ambos os trabalhos indicam que o reservatório atende satisfatoriamente a demanda corrente, contudo demonstram não haver segurança absoluta ou margem confortável para expansão.

Figura 31. Curva de regularização do reservatório Taperoá II.



Fonte: ANA (2017).

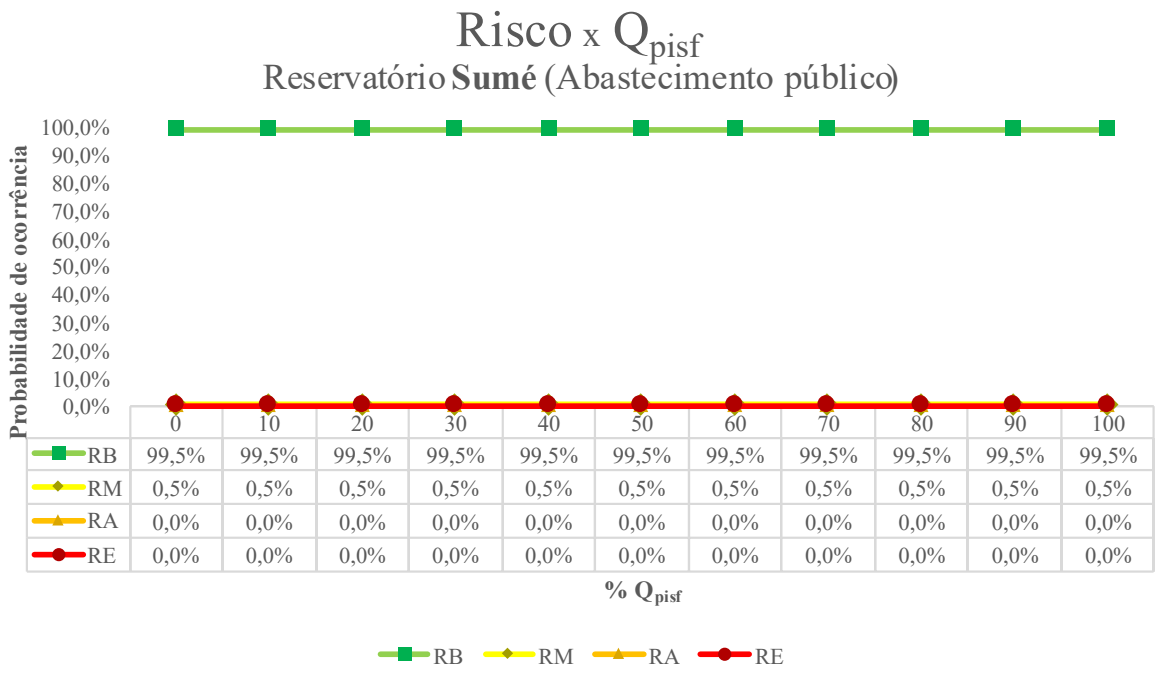
6.2.2 – RESERVATÓRIO SUMÉ

Abastecimento urbano

O mesmo praticamente ocorre com a distribuição das probabilidades de ocorrência das classes de risco baixo (RB), médio (RM), alto (RA) e extremo (RE) para o atendimento da demanda de abastecimento público do reservatório Sumé (Figura 32).

Assim como observado em outros reservatórios auxiliares que não integram diretamente o eixo receptor das águas da transposição, verifica-se que as probabilidades de ocorrência das classes de risco permanecem invariáveis em todos os cenários analisados, independentemente do valor assumido por Qpisf. Em toda a faixa de variação da vazão exógena, o risco baixo apresenta probabilidade constante de 99,5%, enquanto o risco médio permanece em 0,5%, e os riscos alto e extremo mantêm-se nulos, com 0,0% de ocorrência.

Figura 32. Análise de riscos do abastecimento público do reservatório Sumé.



	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
RB	99,5%	99,5%	99,5%	99,5%	99,5%	99,5%	99,5%	99,5%	99,5%	99,5%	99,5%
RM	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
RA	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RE	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Autoria própria (2026).

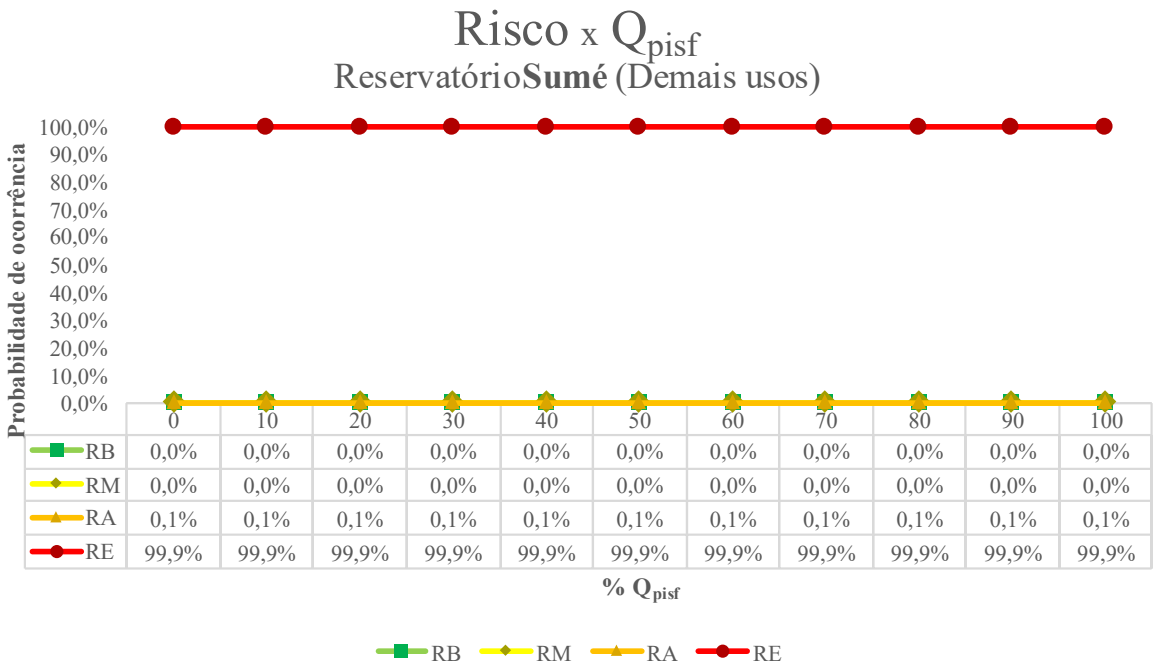
Esse comportamento demonstra que o desempenho do reservatório Sumé, no atendimento ao abastecimento público, independe do incremento da vazão transposta, uma vez que esse reservatório não é reabastecido de forma direta pelas águas do PISF.

Sob a ótica hidrológica e operacional, a estabilidade das curvas indica que a condição de risco do reservatório Sumé depende essencialmente das características naturais e das condições de operação de sua própria bacia de contribuição. A predominância quase integral da classe de risco baixo revela uma condição operacional bastante favorável para o abastecimento público, sugerindo elevada segurança hídrica no conjunto de simulações realizadas. A presença residual de risco médio, ainda que muito pequena, indica a possibilidade de ocorrência pontual de cenários com leve comprometimento do desempenho, sem que isso evolua para situações de maior criticidade.

Demais usos

A Figura 33 apresenta a distribuição das probabilidades de ocorrência das classes de risco baixo (RB), médio (RM), alto (RA) e extremo (RE) para os demais usos associados ao reservatório Sumé. Observa-se que, em todos os cenários avaliados, as probabilidades de ocorrência das classes de risco permanecem invariáveis, evidenciando, como esperado, a ausência de resposta direta do reservatório ao aumento de Qpisf.

Figura 33. Análise de riscos para os demais usos associados ao reservatório Sumé.



	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
RB	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RM	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RA	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
RE	99,9%	99,9%	99,9%	99,9%	99,9%	99,9%	99,9%	99,9%	99,9%	99,9%	99,9%

Fonte: Autoria própria (2026).

Em toda a faixa de variação da vazão exógena considerada, o risco extremo mantém probabilidade de 99,9%, enquanto o risco alto permanece em apenas 0,1%, e as classes de risco médio e baixo apresentam ocorrência nula. Esse comportamento indica uma condição de criticidade praticamente absoluta para os demais usos, demonstrando que o incremento da vazão transposta não altera o desempenho dessa demanda, uma vez que o reservatório Sumé não integra diretamente o eixo receptor das águas do PISF e, portanto, não é recarregado por esse aporte externo.

Sob a perspectiva hidrológica e operacional, a permanência quase integral da classe de risco extremo sugere que a demanda associada aos demais usos, especialmente a irrigação,

apresenta magnitude incompatível com a disponibilidade hídrica efetivamente regularizável pelo reservatório em suas condições locais de operação.

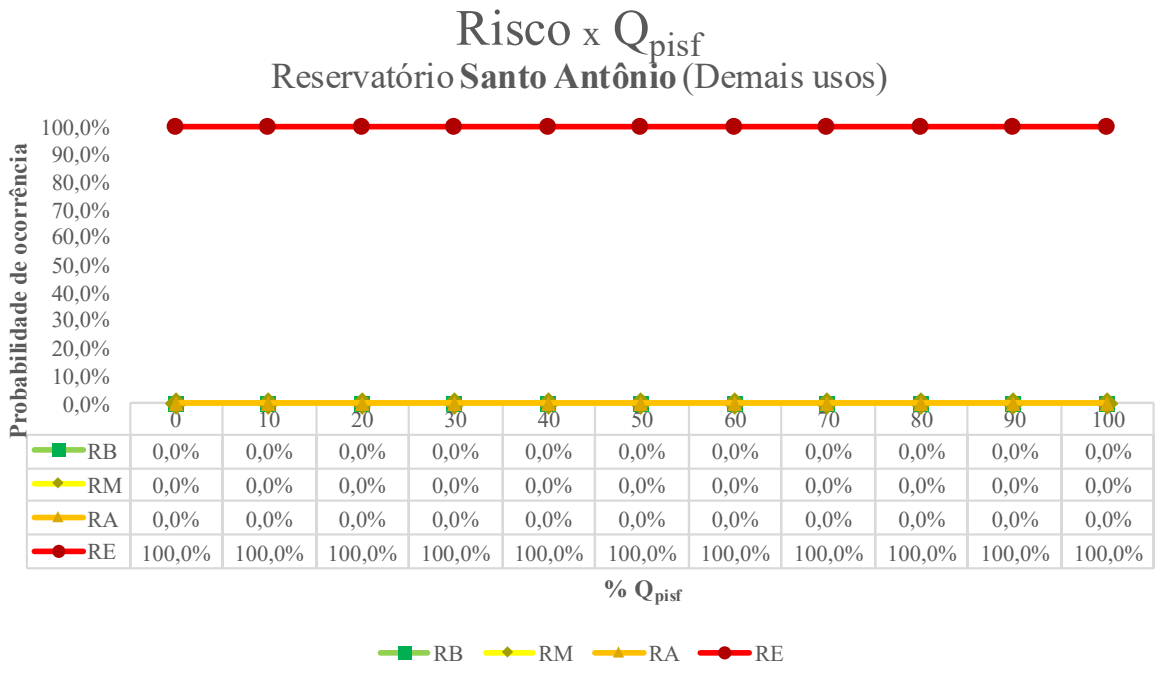
Esse resultado pode ser explicado pela combinação entre alta demanda hídrica, prioridade secundária atribuída a esse uso no modelo de simulação e dependência exclusiva das condições hidrológicas próprias da bacia de contribuição, naturalmente sujeita às limitações típicas do semiárido. Diferente do abastecimento público, que tem demanda relativamente baixa e tende a ser preservado pela hierarquia de atendimento do modelo, os demais usos ficam condicionados à disponibilidade remanescente, o que amplia sua exposição a falhas severas.

6.2.3 – RESERVATÓRIO SANTO ANTÔNIO

Demais usos

O mesmo raciocínio usado para descrever a situação do reservatório Sumé pode ser usado para o caso do açude Santo Antônio, à medida que se observa as probabilidades permanecem integralmente invariáveis ao longo de toda a faixa de variação de Qpisf (Figura 34). Todavia, em todos os cenários analisados, a classe de risco extremo apresenta probabilidade de 100,0%, enquanto as classes de risco baixo, médio e alto permanecem nulas.

Figura 34. Análise de riscos para os demais usos associados ao reservatório Santo Antônio



	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
RB	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RM	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RA	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RE	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Fonte: Autoria própria (2026).

Esse comportamento demonstra uma condição de criticidade absoluta para os demais usos vinculados ao reservatório, indicando que a disponibilidade hídrica local e as regras operacionais consideradas não são suficientes para assegurar o atendimento dessa demanda em nenhum dos cenários simulados.

Do ponto de vista hidrológico e operacional, esse resultado sugere que os demais usos associados ao reservatório Santo Antônio apresentam demanda incompatível com a capacidade de suporte do sistema, especialmente por se tratar de um reservatório auxiliar que não recebe diretamente as águas da transposição.

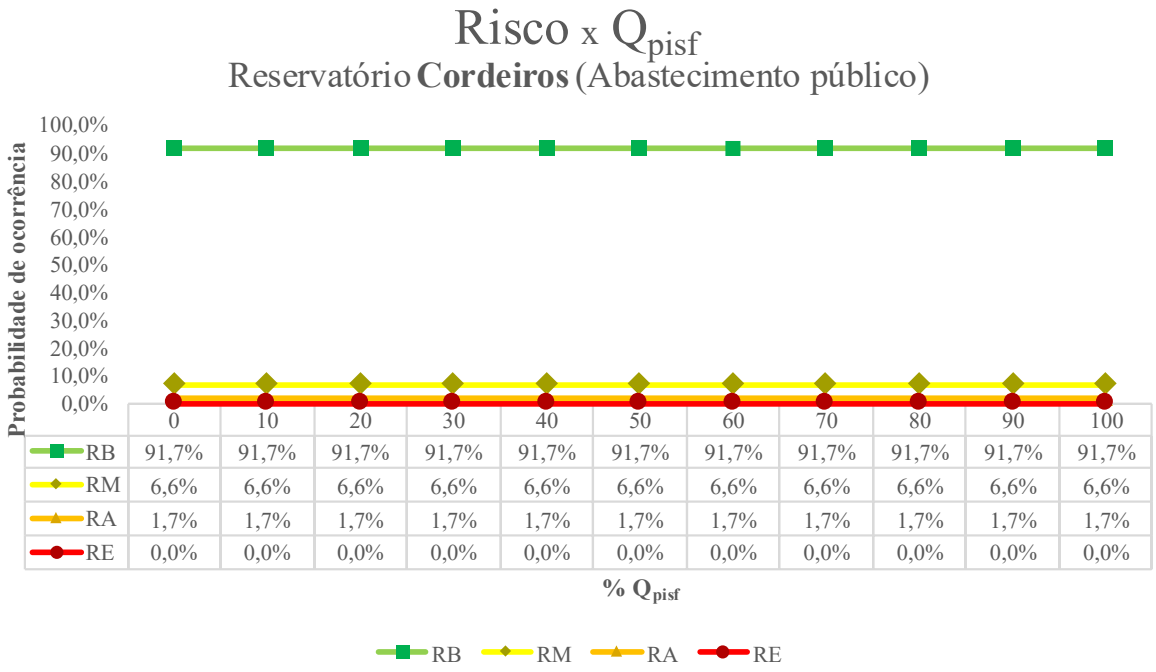
Assim como observado no reservatório Sumé, a condição de risco extremo persistente pode ser explicada pela combinação entre prioridade secundária no modelo de simulação e dependência exclusiva das condições hidrológicas locais, naturalmente frágeis em razão da inserção em uma região semiárida.

6.2.4 – RESERVATÓRIO CORDEIROS

Abastecimento urbano

A Figura 35 apresenta a distribuição das probabilidades de ocorrência das classes de risco baixo (RB), médio (RM), alto (RA) e extremo (RE) para o atendimento da demanda de abastecimento público associada ao reservatório Cordeiros. Nota-se, conforme esperado, que as probabilidades das classes de risco permanecem constantes em todos os cenários avaliados, independentemente do aumento de Qpisf.

Figura 35. Análise de riscos do abastecimento público do reservatório Cordeiros.



	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
RB	91,7%	91,7%	91,7%	91,7%	91,7%	91,7%	91,7%	91,7%	91,7%	91,7%	91,7%
RM	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%	6,6%
RA	1,7%	1,7%	1,7%	1,7%	1,7%	1,7%	1,7%	1,7%	1,7%	1,7%	1,7%
RE	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Autoria própria (2026).

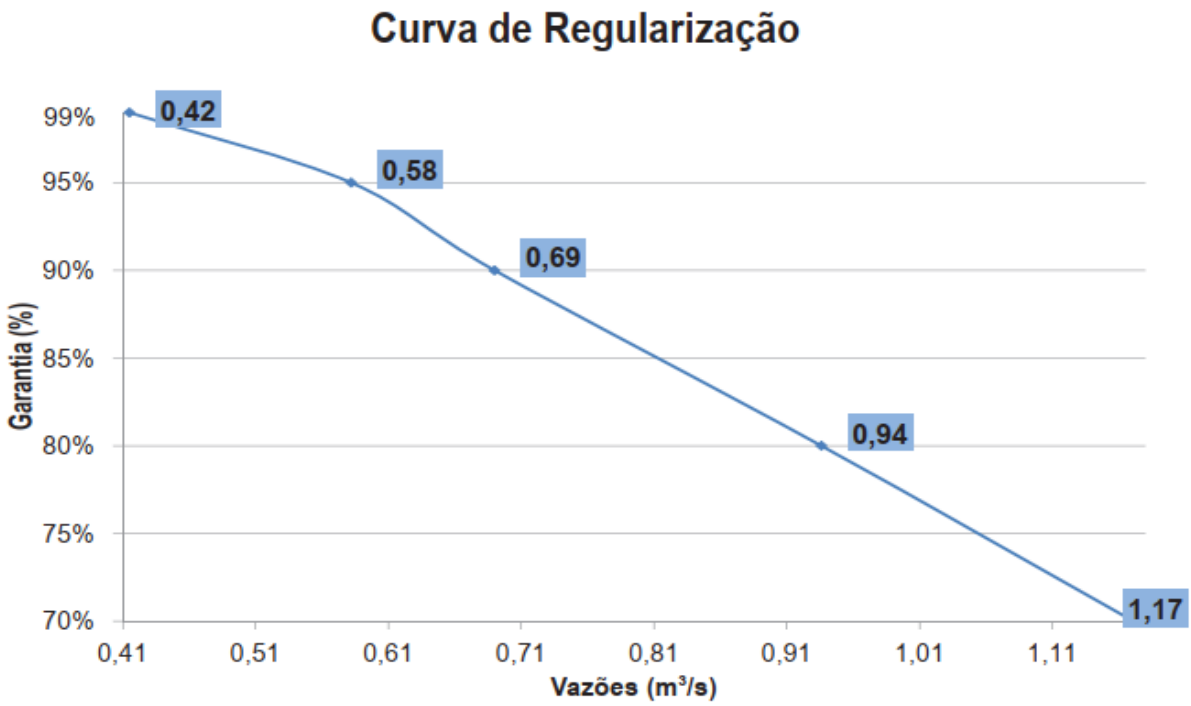
Em toda a faixa de variação da vazão exógena considerada, o risco baixo mantém probabilidade de 91,7%, enquanto o risco médio permanece em 6,6%, o risco alto em 1,7% e o risco extremo em 0,0%. Esse padrão evidencia que o desempenho do reservatório Cordeiros, no atendimento ao abastecimento público, não apresenta resposta direta ao aporte hídrico exógeno, uma vez que o reservatório não integra o eixo principal receptor das águas da transposição e, portanto, permanece condicionado às suas próprias condições hidrológicas e operacionais.

Do ponto de vista hidrológico, a elevada predominância da classe de risco baixo indica que o reservatório Cordeiros apresenta condição relativamente favorável para o atendimento da demanda de abastecimento público no conjunto das simulações realizadas. Ainda assim, a presença persistente das classes de risco médio e alto, mesmo que em proporções reduzidas, revela que o sistema não está completamente livre de situações de comprometimento do atendimento.

Essa condição pode estar relacionada à sua grande área de contribuição (> 1300 km²), além de sua relativa alta capacidade de armazenamento, condição natural que privilegia a capacidade de regularização do reservatório, permitindo-o equilibrar razoavelmente bem a relação entre disponibilidade hídrica local e demanda atendida. Por outro lado, o desempenho

favorável de Cordeiros é confirmado por um estudo de ANA (2017), onde a vazão máxima regularizável do reservatório é de 0,420 m³/s com 99% de garantia (Figura 36), valor que está bem acima da demanda total considerada no presente estudo (0,265 m³/s). Esse fato é coerente com a predominância da ocorrência das classes de risco baixo (91,7%) constatada no grupo de simulações realizadas.

Figura 36. Curva de regularização do reservatório Cordeiros.

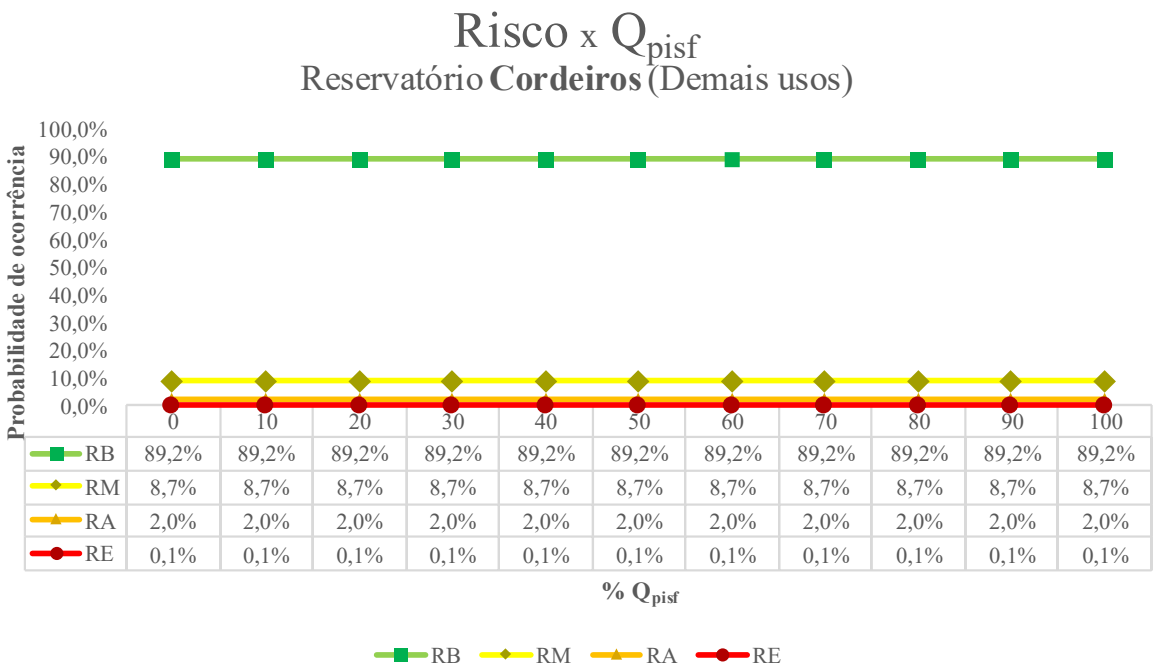


Fonte: ANA (2017).

Demais usos

A distribuição das probabilidades de ocorrência das classes de risco baixo (RB), médio (RM), alto (RA) e extremo (RE) para os demais usos associados ao reservatório Cordeiros é apresentada na Figura 37.

Figura 37. Análise de riscos para os demais usos associados ao reservatório Cordeiros.



	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
RB	89,2%	89,2%	89,2%	89,2%	89,2%	89,2%	89,2%	89,2%	89,2%	89,2%	89,2%
RM	8,7%	8,7%	8,7%	8,7%	8,7%	8,7%	8,7%	8,7%	8,7%	8,7%	8,7%
RA	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
RE	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%

Fonte: Autoria própria (2026).

Assim como observado para outros reservatórios auxiliares não receptores diretos das águas da transposição, verifica-se que as probabilidades das classes de risco permanecem invariáveis em todos os cenários analisados, independentemente do valor de Qpisf.

Em toda a faixa de variação considerada, o risco baixo mantém probabilidade de 89,2%, enquanto os riscos médio, alto e extremo permanecem constantes em 8,7%, 2,0% e 0,1%, respectivamente. Esse comportamento evidencia que o desempenho dos demais usos no reservatório Cordeiros não responde diretamente ao aumento da vazão exógena, uma vez que o reservatório não é reabastecido pelas águas do PISF, permanecendo sujeito exclusivamente às condições hidrológicas e operacionais de sua própria bacia de contribuição.

Sob a ótica hidrológica e operacional, a predominância expressiva da classe de risco baixo mesmo para usos de prioridade secundária constitui um resultado relevante, sobretudo quando comparado a outros reservatórios auxiliares em que os demais usos apresentaram níveis acentuados de criticidade. Tal desempenho pode ser associado, em grande medida, à ampla área de contribuição do reservatório Cordeiros, superior a 1.300 km², condição natural que favorece a geração de deflúvios e amplia sua capacidade de regularização hídrica, aliada à alta capacidade de armazenamento e à informação confirmada por ANA (2017) de que a vazão

regularizável com 99% de garantia (Figura 36) supera a demanda total considerada nesta pesquisa, inclusive para usos de prioridade secundária.

Em termos práticos, essa característica tende a reduzir a dependência do reservatório em relação à hierarquia de prioridades adotada no modelo de simulação, uma vez que a disponibilidade hídrica local se mostra suficientemente robusta para sustentar, com elevado grau de segurança, também os usos não prioritários. Ainda assim, a permanência residual das classes de risco médio, alto e extremo indica que essa segurança não é absoluta, refletindo a influência da variabilidade pluviométrica, das perdas evaporativas e das oscilações naturais do regime hidrológico semiárido.

O Quadro 1 a seguir apresenta um resumo dos principais resultados obtidos do desenvolvimento deste estudo.

Quadro 1. Síntese dos principais resultados.

OE nº	Eixo conclusivo	Evidências numéricas	Síntese
1	Identificação de estruturas e demandas	1. Mapeados 10 reservatórios com capacidade superior a 10 hm³: a. 7 deles tiveram demandas avaliadas: i. Abastecimento urbano (6 pontos); ii. Demais usos (6 pontos); iii. Total: 12 pontos no AcquaNet. 2. Simulados 11 cenários (0-100% Qpisf, equivalentes a 0-4,2 m³/s): a. 1000 séries sintéticas; i. 11000 simulações. 3. Desempenho classificado em: RB, RM, RA e RE.	1. Foram identificadas as diferentes estruturas, suas respectivas demandas hídricas, bem como os níveis de risco associados em cada cenário de disponibilidade hídrica exógena.
2	Sensibilidade ao aporte do PISF	1. Primeiros incrementos (0%, 10%, 20%): a. RC caiu fortemente: i. Poções (AP): 48,6%, 19,3% e 4,7%; ii. Poções (DU): 55,8%, 24,4% e 6,0%; e iii. Camalaú (DU), 55,5%, 24,1% e 6,1%, para 0%, 10% e 20% de Qpisf, respectivamente. iv. Em Camalaú (AP), o RC caiu de 40,1% para 0,0% já com 10%. v. Epitácio Pessoa partiu de RC bem menor: 5,2% (AP) e 6,6% (DU).	2. A sensibilidade do sistema à variação da vazão exógena foi evidenciada pela redução progressiva dos riscos com o aumento do aporte do PISF.
3	Pontos de inflexão operacional	1. Q_{pisf} necessário para eliminar o RC: a. Camalaú (AP) = 10%; b. Poções (AP) = 30%; c. Epitácio Pessoa (AP) = 50%; d. Poções (DU) = 70%; e. Camalaú (DU) = 70%; f. Epitácio Pessoa (DU) = 80%.	3. Os pontos de inflexão foram estabelecidos quando da identificação dos "%.Qpisf" necessários à eliminação ou redução substancial dos níveis de risco.
4	Indicação de componentes mais vulneráveis e dependentes do aporte exógeno do PISF	1. Maiores fragilidades: a. Eixo principal: i. Poções (DU) (RC=55,8%); ii. Camalaú(DU) (RC=55,5%); e iii. Poções (AP) (RC=48,6%). b. Auxiliares: i. Sumé (DU) (RE=99,9%); e ii. Santo Antônio (DU) (RE= 100,0%); iii. Invariáveis nos 11 cenários. c. Situações favoráveis: i. Epitácio Pessoa com RB inicial de 83,3% (AP) e 78,8% (DU); ii. Taperoá II (AP): 93,1%; iii. Sumé (AP): 99,5%; iv. Cordeiros (AP): 91,7%; e v. Cordeiros-DU: 89,2%.	4. Foi possível o reconhecimento de componentes com maior fragilidade, além de indicação de condições de maior segurança ou maior propensão ao colapso operacional

Fonte: Autoria própria (2026).

7 – CONCLUSÃO

7.1 – SÍNTESE DOS PRINCIPAIS ACHADOS

A identificação de infraestruturas e demandas possibilitou a determinação dos níveis de probabilidade de falha e impacto, quantificando para cada ponto de demanda e para cada cenário de vazão exógena, as probabilidades de desempenho do sistema, identificando a ocorrência de falhas e associando-as a diferentes magnitudes de impacto, dando-lhes maior consistência e robustez em comparação com avaliações baseadas apenas em valores médios ou cenários determinísticos isolados.

A sensibilidade do sistema hídrico à variação de diferentes níveis de vazão exógena evidenciou uma resposta do sistema não homogênea entre os reservatórios e demandas analisadas. Nos reservatórios do eixo principal receptor direto das águas do PISF (Poções, Camalaú e Epitácio Pessoa), verificou-se que o incremento da vazão exógena tende a reduzir progressivamente as probabilidades associadas às classes de maior risco, embora com velocidades distintas de convergência para a condição de risco baixo.

A determinação dos pontos de inflexão em termos dos níveis de vazão exógena nos quais o sistema colapsa ou muda de regime foi possível graças à identificação dos percentuais de Qpisf associados à eliminação ou redução substancial das classes de risco alto e extremo. Em alguns casos, como no abastecimento público de Camalaú, pequenas frações da vazão exógena já foram suficientes para promover uma mudança abrupta de regime, com rápida convergência para risco baixo. Em Poções, a transição também foi expressiva, mas exigiu percentuais intermediários de Qpisf, sobretudo para os demais usos. Já em Epitácio Pessoa, o sistema partiu de condições iniciais mais favoráveis, de modo que o aporte exógeno atuou menos como fator de reversão de colapso e mais como elemento de consolidação da segurança hídrica.

O apontamento de componentes do sistema com maior fragilidade e propensão a eventos de falhas recorrentes e seu grau de dependência do PISF foi possível pela visualização das maiores fragilidades se concentrando nos usos não prioritários, especialmente quando associados a reservatórios com menor capacidade de regularização, menor afluência hidrológica local ou elevada demanda.

Por fim, vale destacar que os resultados também sugerem que o PISF não deve ser tratado apenas como uma fonte adicional de disponibilidade hídrica, mas como um elemento

estratégico cuja efetividade depende da forma como sua vazão é distribuída, priorizada e operacionalizada no sistema. Pode-se, com isso, afirmar que a segurança hídrica da área de estudo não depende exclusivamente da existência da transposição, mas da compatibilidade entre disponibilidade, demandas, regras operacionais, prioridades de atendimento e características hidrológicas locais.

7.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise de riscos considerando:
    - Perdas hídricas em trânsito ao longo da calha do rio;
    - Variações nas demandas hídricas;
    - Outras regiões da bacia, como as do Médio e Baixo cursos do rio Paraíba.

8 – REFERÊNCIAS

AESA. **Meteorologia: chuvas**. Disponível em: http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas/. Acesso em: 8 jul. 2025.

AHMADI, Mohsen; HADDAD, Omid Bozorg; LOÁICIGA, Hugo A. Adaptive reservoir operation rules under climatic change. **Water Resources Management**, v. 29, n. 4, p. 1247-1266, 1 mar. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Reservatórios do Semiárido Brasileiro: hidrologia, balanço hídrico e operação: Anexo A – Apodi, Curimataú e Paraíba**. Brasília, DF: ANA, 2017. 103 p.

ARCHFIELD, S. A. et al. Accelerating advances in continental domain hydrologic modeling. **Water Resources Research**, v. 51, n. 12, p. 10078–10091, 2015.

AREFINIA ALI AND BOZORG-HADDAD, O. AND K. A. A. Risk, Uncertainty, and Reliability in Water Resources Management. Em: BOZORG-HADDAD, O. (Ed.). Essential Tools for Water Resources Analysis, Planning, and Management. Singapore: Springer Singapore, 2021. p. 323-343.

AZEVEDO, Samara Calçado de et al. Analysis of the 2012-2016 drought in the northeast Brazil and its impacts on the Sobradinho water reservoir. **Remote Sensing Letters**, v. 9, n. 5, p. 438-446, 4 maio 2018.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. **Manual de gestão de riscos do TCU**. Brasília: TCU, Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão, 2020. 48 p.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. **Manual de gestão de riscos do TCU**. 2. ed. Brasília: TCU, Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão (Seplan), 2020. 48 p.

BRITO, Virgínia da Costa. **Processo de concessão de outorgas em sistemas hídricos superficiais controlados por reservatórios**. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2024.

CELESTE, A. B.; CURI, W. F.; CURI, R. C. Análise de métodos para geração sintética de vazões em rios intermitentes. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo. **Anais [...]**. Porto Alegre: ABRH, 2007.

CHENG, W. M. et al. Risk analysis of reservoir operations considering short-term flood control and long-term water supply: A case study for the Da-Han Creek basin in Taiwan. **Water (Switzerland)**, v. 9, n. 6, 12 jun. 2017.

CHESNUTT, T. W. et al. Probability Management for Water Finance and Resource Managers. Journal of the American Water Works Association, v. 113, n. 1, p. 68–76, jan. 2021.

DASH, Sonam Sandeep; SAHOO, Bhabagrahi; RAGHUWANSHI, Narendra Singh. **An integrated reservoir operation framework for enhanced water resources planning**. Scientific Reports, v. 13, n. 1, p. 21720, 2023.

DAUS, M. et al. Interdisciplinary Reservoir Management – A Tool for Sustainable Water Resources Management. Sustainability, v. 13, n. 8, 2021.

DURÁN-SÁNCHEZ, A.; ÁLVAREZ-GARCÍA, J.; DEL RÍO-RAMA, M. D. LA C. Sustainable Water Resources Management: A Bibliometric Overview. Water, v. 10, n. 9, 2018.

FARIAS, E. E. V. DE; CURI, W. F.; DINIZ, L. DA S. São Francisco river Integration Project, Eastern Axis: losses analysis and performance indicators. Rbrh, v. 22, n. 0, 2017.

FELLER, William. **An introduction to probability theory and its applications**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1968. v. 1.

FERNÁNDEZ-ARROYO, J.; RODRÍGUEZ-MARÍN, F. Los procesos de enseñanza-aprendizaje relacionados con el agua en el marco de las hipótesis de transición. Revista Eureka, v. 14, n. 1, p. 227–243, 2017.

FERREIRA, J. G. A transposição das águas do Rio São Francisco na resposta à seca do Nordeste brasileiro. Cronologia da transformação da ideia em obra. **Revista Latino-Americana de Relações Internacionais**, v. 1, n. 2, p. 53–72, 2019.

GARROTE, Luis et al. Effectiveness of Adaptive Operating Rules for Reservoirs. **Water Resources Management**, v. 37, n. 6, p. 2527–2542, 2023.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GIL, F. V. Los conflictos sobre el trasvase del Ebro y del Tajo. M+A. Revista Electrónica de Medioambiente, v. 2, n. 1, p. 56–72, 2006.

GONG, Yu et al. An analytical two-stage risk analysis model in the real-time reservoir operation. **Journal of Hydrology**, v. 645, p. 132256, 2024.

GUEMOURIA, A. et al. System Dynamics Approach for Water Resources Management: A Case Study from the Souss-Massa Basin. **Water**, v. 15, n. 8, 2023.

GUYASA, A. K.; GUAN, Y.; ZHANG, D. Impact of Climate Change on the Water Balance of the Akaki Catchment. **Water**, v. 16, n. 1, 2024.

HANAK, E. et al. **Managing California's Water**. p. 482, 2011.

HARIRI-ARDEBILI, Mohammad Amin. Risk, reliability, resilience (R3) and beyond in dam engineering: a state-of-the-art review. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 31, p. 806-831, 1 out. 2018.

HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. **Water Resources Research**, v. 18, n. 1, p. 14–20, 1982.

KOMBO MPINDOU, G. O. M.; ESCUDER BUENO, I.; CHORDÀ RAMÓN, E. Risk analysis methods of water supply systems: comprehensive review from source to tap. Applied Water Science Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022.

LABSID – LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE SUPORTE A DECISÕES. **LabSid AcquaNet 2013: manual do usuário**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013. Disponível em: https://labsid.poli.usp.br/softwares/labsid-acquanet-2013/. Acesso em: 4 abr. 2018.

LI, Y. P.; HUANG, G. H. Risk analysis and management for water resources systems. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 27, n. 3, p. 593–597, 2013.

LIMA, J. R.; MAGALHÃES, A. R. Secas no Nordeste: registros históricos das catástrofes econômicas e humanas do século 16 ao século 21. **Parcerias Estratégicas**, v. 23, n. 46, p. 191-212, 2018.

LIU, Dong et al. Newsboy theory for real-time multi-source risk operation of reservoir group: A case study of Pearl River Basin. **Journal of Hydrology**, v. 637, p. 131359, 2024.

LIU, Pan et al. Optimal design of seasonal flood limited water levels and its application for the Three Gorges Reservoir. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 1045-1053, 2015.

LOUCKS, D. P. Quantifying trends in system sustainability. **Hydrological Sciences Journal**, v. 42, n. 4, p. 513–530, 1997.

LOUCKS, D. P.; VAN BEEK, E. **Water Resource Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications**. 1. ed., Springer Cham, 2017.

LUCENA, D. P. M. M. **Simulações da implantação de ações de gestão no açude Epitácio Pessoa e seus impactos na crise hídrica em Campina Grande – PB e região**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

METROPOLIS, N. et al. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. **The Journal of Chemical Physics**, v. 21, n. 6, p. 1087–1092, 1 jun. 1953.

MOGHADAM, A. B. et al. Reliability-based Operation of Reservoirs Using Combined Monte Carlo Simulation Model and a Novel Nature-inspired Algorithm. **Water Resources Management**, v. 36, n. 12, p. 4447–4468, 1 set. 2022.

MORANTE-CARBALLO, F. et al. What Do We Know about Water Scarcity in Semi-Arid Zones? A Global Analysis and Research Trends. **Water**, v. 14, n. 17, 2022.

MORIASI, D. *et al.* Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

NOURANI, Vahid et al. An integrated simulation-optimization framework to optimize the reservoir operation adapted to climate change scenarios. **Journal of Hydrology**, v. 587, 1 ago. 2020.

PARAÍBA. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba**. Disponível em: http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/documentos/. Acesso em: 22 jul. 2024.

PEREIRA, Adriana Soares et al. **Metodologia da pesquisa científica: recurso eletrônico**. 1. ed. Santa Maria, RS: UFSM, NTE, 2018. 1 e-book. ISBN 978-85-8341-204-5.

POLLARD, S. J. T. et al. Risk analysis and management in the water utility sector a review of drivers, tools and techniques. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 82, n. 6 B, p. 453–462, 2004.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Python. Versão 2023.2.3. [S. l.]: Python Software Foundation, 2023. Programa de computador. Disponível em: https://www.python.org/. Acesso em: 12 out. 2023.

R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Versão 4.3.1. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Programa de computador. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 16 jun. 2023.

RODRIGUES, L. C. O **Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF): uma estratégia piloto de Inteligência Territorial para o PSH**. Confins [Online], n. 60, 2023.

SANDOVAL-SOLIS, S.; MCKINNEY, D. C.; LOUCKS, D. P. Sustainability index for water resources planning and management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 137, n. 5, p. 381-390, 2011.

SANTANA, Cícero Fellipe Diniz de. **Árvores de decisão e simulação estocástica para análise de riscos em sistemas de reservatórios superficiais**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

SHIAU, Jenq-Tzong. Risk-aversion optimal hedging scenarios during droughts. **Applied Water Science**, v. 13, n. 1, p. 27, 2022.

SILVA, Wilton Pereira da; SILVA, Cleide M. D. P. S. e; CAVALCANTI, Cláudio G. B.; SILVA, Diogo D. P. S. e; SOARES, Ivomar B.; OLIVEIRA, João A. S.; SILVA, Cleiton D. P. S. e. "LAB Fit ajuste de curvas": um software em português para tratamento de dados experimentais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 4, p. 419–427, 2004. DOI: 10.1590/S1806-11172004000400018.

SUN, Yimeng et al. Risk analysis for reservoir real-time optimal operation using the scenario tree-based stochastic optimization method. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 5, 6 maio 2018.

TANG, Rong; WANG, Yuntao. Risk-Informed Multiobjective Optimization of Reservoir Operation. **Water**, v. 17, n. 16, 2025.

THIESSEN, Alfred H. Precipitation averages for large areas. **Monthly Weather Review**, v. 39, n. 7, p. 1082-1084, 1911.

VIEIRA, A. S. **Modelo de simulação quali-quantitativo multiobjetivo para o planejamento integrado dos sistemas de recursos hídricos**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais)—Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2011.

VIEIRA, V. P. P. B. Recursos hídricos e o desenvolvimento sustentável do Semiárido Nordestino. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1, n. 1, p. 91-107, 1996.

WANG, M.; LI, C. An institutional analysis of China's South-to-North water diversion. **Thesis Eleven**, v. 150, n. 1, p. 68–80, 2019.

WANG, X.; LIU, L. The Impacts of Climate Change on the Hydrological Cycle and Water Resource Management. **Water**, v. 15, n. 13, 2023.

YANG, S. et al. Real-time reservoir operation using recurrent neural networks and inflow forecast from a distributed hydrological model. **Journal of Hydrology**, v. 579, p. 124229, 2019.

YANG, Zhe et al. Multi-objective operation-decision-making-risk propagation analysis for cascade reservoirs affected by future streamflow process variations. **Journal of Hydrology**, v. 620, p. 129518, 2023.

YASSIN, F. et al. Representation and improved parameterization of reservoir operation in hydrological and land-surface models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 9, p. 3735–3764, 2019.

ZHAO, M.; BOLL, J. Adaptation of water resources management under climate change. Frontiers in Water, v. 4, 2022.