



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ELIANDRO LIMA DE AMORIM

**UMA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO PARA A CONSTRUÇÃO DE ÍNDICES
GLOBAIS DE DESEMPENHO COMO SUBSÍDIO À REGULAÇÃO DOS SERVIÇOS
HÍDRICOS DE IRRIGAÇÃO**

FORTALEZA

2026

ELIANDRO LIMA DE AMORIM

UMA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO PARA A CONSTRUÇÃO DE ÍNDICES
GLOBAIS DE DESEMPENHO COMO SUBSÍDIO À REGULAÇÃO DOS SERVIÇOS
HÍDRICOS DE IRRIGAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof.^a Dra. Samíria Maria Oliveira da Silva.

FORTALEZA

2026

ELIANDRO LIMA DE AMORIM

UMA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO PARA A CONSTRUÇÃO DE ÍNDICES
GLOBAIS DE DESEMPENHO COMO SUBSÍDIO À REGULAÇÃO DOS SERVIÇOS
HÍDRICOS DE IRRIGAÇÃO

Dissertação apresentada ao Mestrado Acadêmico em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Avaliação de políticas públicas.

Orientadora: Prof.^a Dra. Samíria Maria Oliveira as Silva

Aprovada em 29 de maio de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Samíria Maria Oliveira da Silva (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Gabriela de Azevedo Reis
Instituto Nacional do Semiárido (INSA)

Prof. Dr. Larissa Zaira Rafael Rolim
Universidade de Brasília (UnB)

Dedico este trabalho à minha família, base e sentido de tudo. Em especial, à minha esposa, mulher valorosa e virtuosa, que diariamente torna minha vida melhor com seu amor, apoio e companheirismo. Aos meus pais, por me proporcionarem uma educação sólida e por serem exemplo de dedicação. Aos meus filhos, minha maior motivação e a razão de nunca desistir.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, por ser tudo em minha vida, por me conceder força nos momentos difíceis, fé e perseverança para nunca desistir, além da esperança de um mundo melhor e a convicção de que um dia O verei face a face.

À minha família, base de tudo. Aos meus avôs, Francisco das Chagas Lima, que me ensinou a força de viver em união, e Vicente Pompeu da Silva, que, mesmo perseguido e torturado, nunca desistiu, sendo o primeiro presidente do sindicato dos trabalhadores rurais do estado do Ceará.

Aos meus amigos de infância, Júlio Cesar e Kleber, e aos novos amigos que fiz no DEHA. À minha prima querida, Janeide, que é como uma irmã para mim, e à minha grande colega de trabalho, Prof.^a Dr.^a Rayane Ribeiro.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Samíria Maria de Oliveira da Silva, pela competência, dedicação, seriedade, elevado nível intelectual e paciência, além da condução deste trabalho com excelência. Agradeço também aos demais professores do programa, bem como à Shirley e Neusa, da secretaria do curso, profissionais de excelência.

À Tereza, pelo apoio técnico essencial na elaboração deste trabalho, não medindo esforços para auxiliar no processamento das informações por meio do programa RStudio.

Aos meus pais, Elias e Lindalva, aos meus irmãos, Elivando e Elinalva, à minha esposa, Elizângela Amorim, e aos meus filhos, Guilherme, Emily e Layla. Sem vocês, nada disso seria possível. Muito obrigado por tudo.

Agradeço à Universidade Federal do Ceará (UFC) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA).

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

RESUMO

A irrigação responde por cerca de 70% do consumo mundial de água doce e, no Brasil, por aproximadamente 52% do uso total, com os Projetos Públicos de Irrigação (PPIs) gerenciados pela CODEVASF e pelo DNOCS exercendo papel estratégico no desenvolvimento regional do Nordeste e do Vale do São Francisco. Menos da metade desses empreendimentos alcança eficiência técnica satisfatória, e a ausência de instrumentos sintéticos de avaliação restringe o benchmarking e a regulação por desempenho. Este estudo propõe uma metodologia para construção de índices globais de desempenho dos serviços hídricos de irrigação, apoiada em métodos de Análise Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA). De natureza quantitativa, exploratória e descritiva, a pesquisa analisou 26 PPIs, sendo 20 sob gestão da CODEVASF e 6 do DNOCS, distribuídos em sete estados brasileiros, a partir de dados extraídos dos relatórios institucionais de 2020. Sete indicadores compuseram a base analítica: Rentabilidade da Água (RA), Eficiência Operacional da Água (EOA), Índice de Insuficiência Financeira (ISF), Inadimplência (IAD), Índice de Uso do Solo (IUS), Rentabilidade da Área (RAR) e Geração de Empregos (GE). Foram integrados três métodos multicritério: PROMETHEE II e TOPSIS com simulação de Monte Carlo (1.000 iterações) e TOPSIS com ponderação por entropia. Os projetos revelaram heterogeneidade expressiva tanto nas dimensões econômicas quanto operacionais, atestando a pertinência da abordagem multicritério adotada. A convergência entre os métodos mostrou-se consistente: Sen. Nilo Coelho, Maniçoba, Brumado e Curaçá destacaram-se como projetos de excelência, enquanto Cotinguiba/Pindoba, Boacica e Estreito ocuparam sistematicamente as posições mais críticas. A correlação de Pearson $r = 0,851$ entre o TOPSIS-MC e o TOPSIS-Entropia, aliada à estabilidade dos rankings nas simulações, comprovou a robustez dos índices construídos. Os resultados demonstram que a integração metodológica proposta converte a complexidade da gestão hídrica em métricas objetivas e comparáveis, fornecendo suporte técnico concreto à atuação regulatória da ANA e ao avanço da Política Nacional de Irrigação.

Palavras-chave: irrigação; análise multicritério; indicadores de desempenho; regulação; gestão hídrica.

ABSTRACT

Irrigation accounts for approximately 70% of global freshwater consumption and, in Brazil, for approximately 52% of total use, with Public Irrigation Projects (PPIs) managed by CODEVASF and DNOCS playing a strategic role in the regional development of the Northeast and the São Francisco Valley. Less than half of these projects achieve satisfactory technical efficiency, and the absence of synthetic evaluation instruments restricts benchmarking and performance-based regulation. This study proposes a methodology for constructing global performance indices for irrigation water services, supported by Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) methods. This quantitative, exploratory, and descriptive research analyzed 26 Public-Private Partnerships (PPIs), 20 managed by CODEVASF and 6 by DNOCS, distributed across seven Brazilian states, using data extracted from institutional reports from 2020. Seven indicators comprised the analytical basis: Water Profitability (RA), Water Operational Efficiency (EOA), Financial Insufficiency Index (ISF), Default Rate (IAD), Land Use Index (IUS), Area Profitability (RAR), and Job Creation (GE). Three multi-criteria methods were integrated: PROMETHEE II and TOPSIS with Monte Carlo simulation (1,000 iterations) and TOPSIS with entropy weighting. The projects revealed significant heterogeneity in both economic and operational dimensions, confirming the relevance of the adopted multi-criteria approach. The convergence between the methods proved to be consistent: Sen. Nilo Coelho, Maniçoba, Brumado, and Curaçá stood out as projects of excellence, while Cotinguiba/Pindoba, Boacica, and Estreito systematically occupied the most critical positions. The Pearson correlation $r = 0.851$ between TOPSIS-MC and TOPSIS-Entropy, combined with the stability of the rankings in the simulations, proved the robustness of the constructed indices. The results demonstrate that the proposed methodological integration converts the complexity of water management into objective and comparable metrics, providing concrete technical support to the regulatory action of ANA and to the advancement of the National Irrigation Policy.

Keywords: irrigation; multicriteria analysis; performance indicators; regulation; water management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Indicadores para avaliação global do desempenho dos PPIs.....	34
Figura 2 - Distribuição dos indicadores de desempenho dos Projetos Públicos de Irrigação analisados.....	46
Figura 3 - Comparação das matrizes de correlação pelos três métodos (Pearson, Spearman e Kendall).....	48
Figura 4 - Distribuição das posições no ranking obtidas pelos 26 projetos nas 1.000 simulações de Monte Carlo. Os boxplots em vermelho representam o método PROMETHEE II e os em ciano representam o método TOPSIS.....	50
Figura 5 - Ranking médio conjunto dos 26 PPIs, consolidando os resultados do PROMETHEE II e TOPSIS com Monte Carlo.	52
Figura 6 - Índices de desempenho (Coeficientes de Proximidade) calculados pelo método TOPSIS-Entropia.....	57
Figura 7 - Comparação entre os Coeficientes de Proximidade obtidos pelo TOPSIS com Monte Carlo e pelo TOPSIS-Entropia ($r = 0,851$).....	59
Figura 8 - Heatmap comparativo das posições obtidas pelos 26 projetos nos três métodos. A escala de cores varia de verde (melhores posições) a vermelho (piores posições)...	62
Figura 9 - Diagrama de Venn mostrando a interseção dos projetos que aparecem no top 5 de cada método.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índices de desempenho e rankings médios dos 26 PPIs pelos métodos PROMETHEE II e TOPSIS com Monte Carlo.	53
Tabela 2 - Comparação entre pesos médios de Monte Carlo e pesos calculados por entropia.	55
Tabela 3 - Comparação dos rankings obtidos pelos três métodos de análise multicritério.	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Indicadores para avaliação global do desempenho dos PPIs.	36
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Adimplência da Tarifa K ₂
AHP	Analytic Hierarchy Process (Processo Analítico Hierárquico)
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
C*	Coefficiente de Proximidade (TOPSIS)
CODEVAS	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
FAO	Food and Agriculture Organization
CV	Coefficiente de Variação
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
EOA	Eficiência Operacional da Água
GE	Geração de Empregos
ISF	Índice de Insuficiência Financeira
ICC	Interstate Commerce Commission
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IEG	Índice de Eficiência da Gestão
IGD	Índice Global de Desempenho
IPTRID	International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage
IUS	Índice de Uso do Solo
IWMI	International Water Management Institute
MC	Monte Carlo (Simulação de Monte Carlo)
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis (Análise de Decisão Multicritério)
MIDR	Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PPI	Programa de Parcerias de Investimentos / Projetos Públicos de Irrigação
PPIs	Projetos Públicos de Irrigação

PROMETH Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation

EE

Q1 Primeiro Quartil

Q3 Terceiro Quartil

RA Rentabilidade da Água

RAR Rentabilidade da Área

TOPSIS Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

VBP Valor Bruto de Produção

Φ Fluxo Líquido (PROMETHEE II)

Φ^+ Fluxo Positivo (PROMETHEE II)

Φ^- Fluxo Negativo (PROMETHEE II)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo Geral.....	17
2.2	Objetivos Específicos	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	Regulação dos Serviços Públicos de Irrigação	18
3.2	Gestão de Recursos Hídricos e Irrigação no Brasil	21
3.3	Indicadores de Desempenho em Sistemas de Irrigação	23
3.4	Índices Globais de Desempenho	26
3.5	Análise Multicritério para Tomada de Decisão	27
3.5.1	<i>Método PROMETHEE.....</i>	27
3.5.2	<i>Método TOPSIS.....</i>	28
3.5.3	<i>Método da Entropia para Ponderação Objetiva</i>	30
3.5.4	<i>Integração TOPSIS-Entropia e Aplicações em Recursos Hídricos.....</i>	30
3.6	Simulação de Monte Carlo em Análise Multicritério.....	32
4	METODOLOGIA.....	33
4.1	Caracterização do Estudo	33
4.2	Universo de Análise e Seleção da Amostra.....	34
4.3	Coleta e Tratamento dos Dados.....	35
4.4	Análise Estatística Descritiva.....	37
4.5	Construção dos Índices Globais de Desempenho.....	38
4.5.1	<i>Normalização dos Dados</i>	38
4.5.2	<i>Método PROMETHEE II com Simulação de Monte Carlo</i>	39
4.5.3	<i>Método TOPSIS com Simulação de Monte Carlo.....</i>	40
4.5.4	<i>Método TOPSIS-Entropia</i>	41
4.5.5	<i>Atribuição de Pesos por Simulação de Monte Carlo.....</i>	42
4.6	Análise de Sensibilidade e Robustez	43
4.7	Softwares e Pacotes Utilizados.....	43
5	RESULTADOS	45
5.1	Caracterização dos Projetos Públicos de Irrigação Analisados	45
5.2	Análise Estatística dos Indicadores de Desempenho	45
5.3	Análise de Correlação entre Indicadores	47

5.4	Desempenho Global pelos Métodos PROMETHEE II e TOPSIS Integrados à Simulação de Monte Carlo.....	49
5.4.1	<i>Distribuição dos Rankings por Simulação</i>	50
5.4.2	<i>Rankings Médios Consolidados</i>	51
5.4.3	<i>Índices de Desempenho por Método</i>	53
5.5	Desempenho Global pelo Método TOPSIS-Entropia.....	55
5.5.1	<i>Pesos Calculados pelo Método da Entropia</i>	55
5.5.2	<i>Índices de Desempenho TOPSIS-Entropia</i>	56
5.5.3	<i>Comparação entre TOPSIS com Monte Carlo e TOPSIS-Entropia</i>	58
5.6	Comparação Integrada entre os Três Métodos.....	60
5.6.1	<i>Rankings Consolidados</i>	60
5.6.2	<i>Análise de Interseção: Projetos no Top 5</i>	64
6	DISCUSSÃO	66
6.1	Contextualização e lacuna de pesquisa abordada.....	66
6.2	Síntese dos principais achados.....	67
6.3	Interpretação dos resultados e comparação com a literatura	68
6.3.1	<i>Convergência metodológica e o comportamento dos projetos extremos</i>	68
6.3.2	<i>Divergências em posições intermediárias: o caso Gorutuba</i>	68
6.3.3	<i>Pesos calculados pela entropia: discriminação informacional e implicações gerenciais</i>	69
6.3.4	<i>Geração de Empregos como dimensão diferenciadora do desempenho</i>	70
6.3.5	<i>Benchmarks identificados: alinhamento com a literatura internacional</i>	71
6.3.6	<i>Implicações para a regulação dos serviços públicos de irrigação</i>	72
6.4	Limitações do estudo	73
6.5	Perspectivas para pesquisas futuras	74
7	CONCLUSÃO.....	76
	REFERENCIAS	77
	APÊNDICE A – Valores dos indicadores de desempenho dos 26 Projetos Públicos de Irrigação analisados.....	90

1 INTRODUÇÃO

A irrigação constitui o maior consumidor de água doce em escala global, representando aproximadamente 70% de toda a água captada no mundo, podendo ultrapassar 90% em regiões áridas e semiáridas (Molden *et al.*, 2007; FAO, 2020). Segundo o Banco Mundial (World Bank, 2020), a agricultura irrigada é responsável por cerca de 40% da produção mundial de alimentos em apenas 20% das terras cultivadas, evidenciando sua importância estratégica para a segurança alimentar global. No contexto de mudanças climáticas e crescente escassez hídrica, a demanda por água para irrigação tende a aumentar significativamente, pressionando recursos hídricos já limitados em diversas bacias hidrográficas (Chartzoulakis e Bertaki, 2015; Gruère e Shigemitsu, 2021).

No Brasil, a irrigação responde por aproximadamente 52% do consumo total de água, com área irrigada de cerca de 8,2 milhões de hectares segundo o Atlas Irrigação da ANA (ANA, 2021). Os Projetos Públicos de Irrigação (PPIs), implantados principalmente nas regiões Nordeste e Norte pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) e pela Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF), desempenham papel estratégico no desenvolvimento regional, combinando objetivos de produção agrícola, geração de emprego e renda, e fixação do homem no campo (Brasil, 2013). Atualmente, existem 79 projetos públicos de irrigação no Brasil (Ferreira e Vieira Filho, 2020), dos quais 39 são administrados pela CODEVASF e 37 pelo DNOCS, distribuídos majoritariamente no semiárido nordestino e no Vale do São Francisco, o que reforça a centralidade dessas instituições na política nacional de irrigação (Brasil, 2023). Contudo, estudos recentes indicam que menos da metade dos projetos públicos brasileiros atinge níveis satisfatórios de eficiência técnica, evidenciando a necessidade de instrumentos objetivos de avaliação e monitoramento (Fragoso e Pizaia, 2023).

Nesse contexto, a gestão eficiente dos serviços hídricos de irrigação depende crescentemente da capacidade de avaliar, comparar e acompanhar o desempenho dos projetos de forma transparente, integrada e orientada a resultados, superando análises fragmentadas e pontuais. A avaliação de desempenho baseada em indicadores tem avançado significativamente nas últimas décadas, apoiada por frameworks consolidados na literatura internacional. As abordagens propostas pelo International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage (IPTRID) e pelo International Water Management Institute (IWMI) constituem referências centrais para a estruturação de indicadores, contemplando dimensões operacionais, financeiras, produtivas e ambientais (Malano e Burton, 2001; Molden *et al.*, 1998).

Estudos recentes têm ampliado essas abordagens por meio da aplicação de técnicas multivariadas, como análise de agrupamentos, Análise Envoltória de Dados (DEA), Análise de Componentes Principais (PCA) e regressão múltipla, com o objetivo de comparar sistemas de irrigação e identificar fatores determinantes do desempenho (Còrcoles et al., 2010; Zema et al., 2020; Muema et al., 2018). Em diferentes contextos internacionais, incluindo Uganda, Etiópia, Turquia e Quênia, a literatura aponta desafios recorrentes, como baixa eficiência de campo, deficiências no controle de vazão, manutenção inadequada da infraestrutura e limitada autossuficiência financeira dos sistemas (Reta et al., 2024; Kirmikil, 2025; Wanyama et al., 2024; Nuru et al., 2024).

Apesar desses avanços, a análise isolada de indicadores operacionais, financeiros ou produtivos mostra-se insuficiente para subsidiar decisões regulatórias, contratuais e de alocação de recursos em contextos complexos como os serviços públicos de irrigação. Torna-se, portanto, fundamental dispor de índices globais de desempenho capazes de integrar múltiplas dimensões da gestão, sintetizando informações heterogêneas em métricas comparáveis, interpretáveis e operacionalizáveis para a tomada de decisão.

No Brasil, as instituições gestoras dos projetos públicos de irrigação já utilizem conjuntos consistentes de indicadores, como eficiência operacional da água, rentabilidade da água e da área, inadimplência, uso do solo e geração de empregos, mas observa-se uma lacuna metodológica na integração desses indicadores em índices sintéticos capazes de apoiar o benchmarking entre projetos e a regulação por desempenho. A ausência de índices globais limita a capacidade do Estado de identificar projetos críticos, reconhecer boas práticas, estabelecer metas contratuais, estruturar incentivos e fundamentar decisões de fiscalização e priorização de investimentos.

Os métodos de Análise Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA) oferecem uma base metodológica robusta para enfrentar essa problemática, ao permitir a integração sistemática de indicadores heterogêneos, frequentemente conflitantes, em avaliações globais de desempenho.

O método PROMETHEE, pertencente à família de métodos de outranking, tem sido utilizado para planejamento de bacias, alocação de água entre propriedades agrícolas e priorização de fontes de irrigação (Zardari *et al.*, 2015; Safari *et al.*, 2020; Karleuša *et al.*, 2019). O método TOPSIS, por sua vez, destaca-se na avaliação de qualidade da água, estratégias de irrigação e alocação de recursos entre setores (Behzadian *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2018; Biswas *et al.*, 2024). A integração do TOPSIS com ponderação por entropia tem demonstrado resultados promissores ao eliminar subjetividade na atribuição de pesos, sendo aplicada em avaliação de qualidade da água, capacidade de suporte hídrico e gestão agrícola (Li *et al.*, 2019;

Bezdan *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2024). Contudo, a aplicação desses métodos para construção de índices globais de desempenho em projetos públicos de irrigação permanece pouco explorada.

Diante desse contexto, emerge a seguinte questão de pesquisa: como estruturar índices globais de desempenho que permitam avaliar, de forma integrada e comparável, a eficiência da gestão dos serviços hídricos de irrigação em Projetos Públicos de Irrigação brasileiros, utilizando indicadores já consolidados pelas instituições gestoras? Este estudo responde a essa questão ao propor e aplicar índices globais de desempenho baseados em métodos multicritério, contribuindo para o fortalecimento da gestão, da regulação e do planejamento dos serviços públicos de irrigação no Brasil.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho de Projetos Públicos de Irrigação por meio da integração de indicadores, de forma a subsidiar análises comparativas e apoiar a regulação dos serviços de irrigação.

2.2 Objetivos Específicos

- Selecionar e estruturar um conjunto de indicadores relevantes para a caracterização do desempenho dos projetos públicos de irrigação;
- Desenvolver uma metodologia de construção de índices globais de desempenho, integrando múltiplos indicadores por meio de métodos de análise multicritério;
- Aplicar diferentes métodos multicritério (PROMETHEE II, TOPSIS com simulação de Monte Carlo e TOPSIS com ponderação por entropia) na construção dos índices globais de desempenho;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Regulação dos Serviços Públicos de Irrigação

A regulação pode ser entendida como o estabelecimento e a implementação de um conjunto de regras específicas, necessárias ao funcionamento equilibrado de um determinado setor, em função do interesse público. Segundo Majone (1999), a regulação consiste na intervenção estatal destinada a corrigir falhas de mercado e garantir a prestação eficiente de serviços essenciais à coletividade. Para Posner (1974), a regulação econômica visa controlar preços, condições de entrada e saída, e padrões de qualidade em setores onde a competição é limitada ou inexistente.

A necessidade de regulação dos serviços públicos decorre fundamentalmente da existência de falhas de mercado que impedem a alocação eficiente de recursos pelo mecanismo de preços. Entre as principais falhas destacam-se: (i) externalidades, quando os custos ou benefícios de uma atividade afetam terceiros que não participam da transação, como a poluição de recursos hídricos por atividades agrícolas; (ii) bens públicos, caracterizados pela não rivalidade e não exclusividade no consumo, como a infraestrutura de distribuição de água; (iii) assimetria de informação, quando uma das partes detém informações que a outra não possui, dificultando a fiscalização e o controle; e (iv) monopólios naturais, situação em que os custos médios de produção decrescem continuamente com a escala, tornando ineficiente a existência de múltiplos prestadores, como é o caso típico de redes de distribuição de água (Stiglitz, 2000; Viscusi *et al.*, 2005).

A origem da regulação moderna remonta ao século XIX nos Estados Unidos, quando surgiu a necessidade de controlar as tarifas ferroviárias interestaduais. Para atender a essa finalidade, foi instituída, em 1887, a primeira agência reguladora federal do país: a Interstate Commerce Commission (ICC), responsável pela supervisão do setor ferroviário privatizado. A criação da ICC consolidou-se como um marco institucional e é amplamente reconhecida como precursora do modelo contemporâneo de agências reguladoras (Carvalho, 2012).

Regulação é o estabelecimento e a implementação de um conjunto de regras específicas, necessárias ao funcionamento equilibrado de um determinado setor, em função do interesse público.

De acordo com Ogus (2022), a eficácia dos sistemas regulatórios está condicionada à presença de uma instituição encarregada de implementar e fiscalizar as normas, a qual, por delegação do legislativo, costuma igualmente desempenhar a função de detalhamento

regulatório. O autor ressalta ainda que um dos dilemas centrais da regulação diz respeito ao nível de independência que tais instituições devem manter em relação ao governo.

A experiência regulatória brasileira remonta ao período imperial, quando foram editadas normas para disciplinar setores estratégicos, como as ferrovias (1835), a iluminação pública (1852) e a instalação de cabos submarinos de telégrafo (1874). No século XX, o foco da regulação voltou-se para áreas como energia elétrica, a partir da década de 1940, e para os recursos hídricos, com a promulgação do Código de Águas em 1934.

Entre as décadas de 1930 e 1980, o Estado assumiu uma atuação mais direta na economia, associando a regulação ao fortalecimento de empresas estatais e ao controle governamental. Nesse período, foram criados órgãos e instituições centrais, como o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), responsável pela infraestrutura rodoviária; o Conselho Nacional do Petróleo (CNP), que antecedeu a Petrobras; e o Banco Central do Brasil (1964), incumbido de regular o sistema financeiro.

A consolidação do modelo regulatório nacional ocorreu principalmente a partir da década de 1990, em um contexto de reformas estruturais inspiradas em experiências internacionais, notadamente dos Estados Unidos e da Europa. Esse processo foi impulsionado pelo governo de Fernando Henrique Cardoso, que promoveu a reorganização do papel do Estado e a abertura de setores estratégicos à iniciativa privada.

Conforme observa Ramalho (2009), esse período foi marcado pela criação das agências reguladoras autônomas, marco da chamada *agencificação*. Esse movimento representou uma mudança significativa na intervenção estatal, introduzindo uma forma de regulação mais técnica, institucionalizada e voltada à previsibilidade das regras, em resposta às privatizações e à necessidade de fortalecer a infraestrutura.

O marco legal desse novo arranjo consolidou-se com a Lei de Concessões (Lei nº 8.987/1995), que definiu parâmetros para a transferência da execução dos serviços públicos à iniciativa privada. No mesmo ano, a Emenda Constitucional nº 8/1995 alterou o artigo 21, inciso XI, da Constituição Federal, autorizando a criação de órgãos reguladores para disciplinar os serviços prestados sob regime de concessão ou permissão.

A partir desse movimento, foram instituídas as agências reguladoras independentes, destinadas a assegurar a continuidade, a qualidade e a estabilidade dos serviços públicos. Entre as principais, destacam-se: a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 1996), a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL, 1997), a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 1999) e a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2001). Atualmente, o país conta com 11 agências reguladoras federais.

A regulação dos serviços públicos de irrigação no Brasil tem seu marco com a Lei nº 9.984/2000 que atribui a ANA a competência da regulação e fiscalização da prestação dos serviços públicos de irrigação destacam-se o inciso XIX e §8º do art. 4º, a saber:

XIX - regular e fiscalizar, quando envolverem corpos d'água de domínio da União, a prestação dos serviços públicos de irrigação, se em regime de concessão, e adução de água bruta, cabendo-lhe, inclusive, a disciplina, em caráter normativo, da prestação desses serviços, bem como a fixação de padrões de eficiência e o estabelecimento de tarifa, quando cabíveis, e a gestão e auditoria de todos os aspectos dos respectivos contratos de concessão, quando existentes.

...
 §8º No exercício das competências referidas no inciso XIX deste artigo, a ANA zelarà pela prestação do serviço adequado ao pleno atendimento dos usuários, em observância aos princípios da regularidade, continuidade, eficiência, segurança, atualidade, generalidade, cortesia, modicidade tarifária e utilização racional dos recursos hídricos.

Esse dispositivo confere à ANA um papel regulatório abrangente, que extrapola a simples fiscalização e alcança a normatização da prestação dos serviços, a definição de padrões de eficiência, a atuação tarifária, quando aplicável, e o acompanhamento integral dos contratos de concessão. Trata-se, portanto, de uma competência que combina funções normativas, regulatórias e de controle, posicionando a Agência como ator central na governança dos serviços públicos de irrigação associados a corpos hídricos de domínio da União.

No Brasil, a experiência de concessão de Projetos Públicos de Irrigação à iniciativa privada teve como marco o Projeto Público de Irrigação do Baixio de Irecê, localizado no Médio São Francisco, no estado da Bahia. O projeto foi estruturado pelo Governo Federal, por meio da CODEVASF, no âmbito do Programa de Parcerias de Investimentos (PPI), e teve seu leilão de concessão realizado em 2022. O certame foi vencido pela empresa Germina Brasil, responsável pela implantação e operação das áreas concedidas mediante contrato de longo prazo. A concessão envolve a outorga do Direito Real de Uso (CDRU) de parcelas do projeto irrigado, mantendo-se a titularidade pública da infraestrutura hídrica. Trata-se do primeiro e, até o momento, único Projeto Público de Irrigação concedido no Brasil, configurando uma experiência pioneira no setor. Entretanto, a singularidade desse caso e o estágio ainda inicial de sua implementação limitam análises empíricas comparativas de desempenho sob diferentes arranjos contratuais, o que reforça a pertinência do uso de projetos públicos ainda não concedidos como base empírica para o desenvolvimento e a validação de metodologias de avaliação.

Neste contexto regulatório, a disponibilidade de instrumentos objetivos de avaliação de desempenho torna-se fundamental para o exercício efetivo das competências atribuídas à ANA.

A regulação adequada dos serviços públicos de irrigação, seja em regime de concessão ou gestão direta, requer mecanismos que permitam: (i) monitorar a qualidade da prestação do serviço; (ii) estabelecer metas de desempenho em contratos de concessão; (iii) fundamentar processos de fiscalização; (iv) identificar projetos críticos que necessitam intervenção; (v) reconhecer boas práticas para disseminação; e (vi) orientar a alocação de recursos públicos para investimentos em infraestrutura. Índices globais de desempenho, construídos mediante integração sistemática de múltiplos indicadores operacionais, financeiros e socioeconômicos, constituem ferramentas essenciais para operacionalizar esses objetivos regulatórios, fornecendo base técnica objetiva para comparação entre projetos e para tomada de decisões fundamentadas. A ausência de tais instrumentos dificulta a implementação de uma regulação baseada em desempenho e incentivos, limitando a capacidade do Estado de promover melhorias continuadas na gestão dos serviços hídricos de irrigação.

Diante desse contexto, marcado pela elevada pressão da irrigação sobre os recursos hídricos, pela heterogeneidade de desempenho dos Projetos Públicos de Irrigação e pela ampliação de instrumentos regulatórios e contratuais no setor, torna-se imprescindível dispor de mecanismos analíticos capazes de traduzir a complexidade da gestão da água em métricas objetivas e comparáveis. A transição de um paradigma centrado exclusivamente na provisão de água para outro orientado por eficiência, desempenho e sustentabilidade exige instrumentos que permitam monitorar resultados, identificar gargalos e apoiar decisões técnicas e institucionais. É nesse cenário que os indicadores de desempenho assumem papel central, constituindo a base empírica a partir da qual se estruturam análises comparativas, processos de benchmarking e, de forma mais ampla, metodologias de avaliação do serviço hídrico de irrigação.

3.2 Gestão de Recursos Hídricos e Irrigação no Brasil

A gestão sustentável dos recursos hídricos constitui um dos grandes desafios do século XXI, particularmente em contextos onde a agricultura irrigada exerce pressão significativa sobre os mananciais disponíveis. A irrigação representa aproximadamente 70% do consumo global de água doce, configurando-se como o maior usuário de recursos hídricos em escala planetária (Molden *et al.*, 2007). Em escala nacional, a irrigação também se destaca como o principal uso consuntivo, respondendo por cerca de 50% do volume de água retirada no Brasil, à frente do abastecimento urbano e da indústria (ANA, 2025). No Brasil, este cenário se reproduz com características próprias, dado o papel estratégico da agricultura irrigada para a

segurança alimentar e o desenvolvimento econômico regional, especialmente no Semiárido nordestino.

Os Projetos Públicos de Irrigação (PPIs) foram concebidos nas décadas de 1960 e 1970 como instrumentos de política pública voltados ao desenvolvimento regional, combinando objetivos de produção agrícola, geração de emprego e fixação do homem no campo. Estudos recentes demonstram que projetos públicos e sistemas de irrigação gerenciados pelo governo têm migrado de um paradigma focado em fornecer água para um modelo centrado na mensuração de desempenho, incluindo eficiências hídricas, produtividade da água e viabilidade econômica, ajustando a gestão para sustentabilidade (Reta *et al.*, 2024; Harman e Çakmak, 2025; Kirmikil, 2025).

O marco regulatório brasileiro para o setor de irrigação foi estabelecido pela Lei nº 12.787/2013, que institui a Política Nacional de Irrigação, definindo princípios, objetivos e instrumentos para o desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada. Esta legislação prevê mecanismos de parceria entre os setores público e privado, possibilitando a transferência da gestão de perímetros irrigados para a iniciativa privada mediante contratos de concessão. A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), conforme a Lei nº 9.984/2000 (Brasil, 2000), detém competência para regular e fiscalizar a prestação dos serviços públicos de irrigação quando realizados sob regime de concessão envolvendo corpos hídricos de domínio da União (BRASIL, 2000).

A avaliação de projetos públicos de irrigação no Brasil, utilizando métodos como Análise Envoltória de Dados (DEA), revela que menos da metade dos projetos atinge eficiência técnica, sendo que fatores estruturais, de gestão e escala explicam as diferenças de desempenho entre projetos (Fragoso e Pizaia, 2023). Este diagnóstico reforça a necessidade de instrumentos sistemáticos de avaliação que permitam identificar gargalos operacionais e orientar intervenções corretivas de forma objetiva e comparável.

Em contextos internacionais similares, como Uganda, Etiópia e Turquia, baixos rendimentos agrícolas, controle de vazão deficiente, manutenção precária e baixa autossuficiência financeira têm sido identificados como fatores que reduzem o desempenho global dos sistemas de irrigação (Wanyama *et al.*, 2024; Nuru *et al.*, 2024; Ashine *et al.*, 2025; Tiruye *et al.*, 2023). A digitalização, automação e monitoramento remoto surgem como ferramentas-chave para enfrentar estes desafios, especialmente em contextos com dados escassos.

3.3 Indicadores de Desempenho em Sistemas de Irrigação

Indicadores são parâmetros, ou valores derivados de parâmetros, que fornecem informações sobre um fenômeno, ambiente ou área, com um significado que estende seu valor além daquele diretamente associado às propriedades do parâmetro (Gruère e Shigemitsu, 2021).

A avaliação de desempenho em sistemas de irrigação tem evoluído significativamente nas últimas décadas, passando de abordagens fragmentadas para frameworks integrados que contemplam múltiplas dimensões. Os principais indicadores utilizados em esquemas públicos e associações de usuários de água incluem eficiências internas (condução, aplicação, armazenamento, perdas por percolação e uniformidade de distribuição) e indicadores externos (razão de oferta de água, água distribuída por área, capacidade de entrega, custos de operação e manutenção por metro cúbico, e produtividade econômica por metro cúbico e por hectare) (Reta *et al.*, 2024; Harman e Çakmak, 2025; Kirmikil, 2025; Nuru *et al.*, 2024).

De acordo com Bos (1997), os indicadores operacionais buscam medir a eficiência na captação, distribuição e aplicação da água, enquanto os indicadores financeiros avaliam a sustentabilidade econômica do sistema, incluindo autossuficiência e custos por unidade fornecida. Já os indicadores econômicos estão relacionados ao valor gerado pela irrigação, como a produtividade da terra e da água, e a rentabilidade dos cultivos. Por sua vez, os indicadores sociais consideram os efeitos sobre a geração de empregos, a equidade na distribuição dos benefícios e a melhoria das condições de vida. Finalmente, os indicadores ambientais observam os impactos sobre a qualidade da água, a salinização do solo e o uso de insumos agrícolas.

Diversos sistemas foram desenvolvidos para avaliar os serviços hídricos de irrigação com base nesses indicadores. O International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage (IPTRID) formulou diretrizes para benchmarking do setor por meio do documento *Guidelines for Benchmarking Performance in the Irrigation and Drainage Sector*, que agrupa indicadores de sistema, financeiros, de produtividade agrícola e ambientais (MALANO e BURTON, 2001). Complementarmente, o International Water Management Institute (IWMI) propôs um conjunto mínimo de indicadores de desempenho, voltado para a produtividade da água, autossuficiência financeira, equidade na distribuição de água e sustentabilidade ambiental (MOLDEN *et al.*, 1998).

Complementarmente, o International Water Management Institute (IWMI) propôs um conjunto mínimo de indicadores focados em produtividade da água, autossuficiência financeira, equidade na distribuição e sustentabilidade ambiental (Molden *et al.*, 1998). Estudos

comparativos demonstram que ambos os frameworks são amplamente adotados em esquemas públicos, WUAs e avaliações regionais, estruturando indicadores de produtividade, serviço de água e finanças (Còrcoles *et al.*, 2010; Wanyama *et al.*, 2024; Ahmad *et al.*, 2024).

A aplicação de indicadores de desempenho em sistemas de irrigação tem sido objeto de extensa investigação empírica. Còrcoles *et al.* (2010) avaliaram sete Associações de Usuários de Água (WUAs) na Espanha, comparando sistemas de gotejamento e aspersão mediante indicadores IPTRID complementados por métricas de energia e produção. O estudo identificou diferenças significativas no uso de água e na margem bruta entre os sistemas, demonstrando a utilidade do benchmarking para orientar modernizações tecnológicas.

Zema *et al.* (2020) analisaram WUAs na Itália utilizando análise multivariada, integrando DEA e regressão múltipla. Os autores demonstraram que maior área irrigada e número de usuários associados correlacionam-se positivamente com autossuficiência financeira e economias de escala, recomendando fusões de associações pequenas como estratégia de melhoria.

Muema *et al.* (2018) aplicaram benchmarking e Análise de Componentes Principais a esquemas públicos de irrigação no Quênia, utilizando indicadores IPTRID de produtividade, água e finanças. Os resultados evidenciaram baixa recuperação de custos, subutilização da área irrigável e produtividade aquém do potencial, sugerindo necessidade de capacitação gerencial e investimentos em manutenção.

Wanyama *et al.* (2024) conduziram avaliação comparativa de esquemas piloto de irrigação em Uganda empregando indicadores IWMI. O estudo identificou gargalos críticos no manejo de água e baixa eficiência operacional, atribuídos a deficiências na infraestrutura de controle e monitoramento.

Fragoso e Pizaia (2023) avaliaram a eficiência técnica de projetos federais de irrigação no Brasil mediante Análise Envoltória de Dados. Os resultados indicaram que menos da metade dos projetos atinge a fronteira de eficiência, com fatores estruturais, de gestão e escala explicando as diferenças de desempenho entre as unidades analisadas.

Kirmikil (2025) investigou o desempenho da Associação de Usuários de Água de Karacabey, Turquia, ao longo de 18 anos (2006-2023), utilizando indicadores IPTRID. O estudo documentou melhorias progressivas na eficiência de uso da água associadas à modernização para sistemas pressurizados e à implementação de tarifação volumétrica.

A produtividade da água, expressa tanto em termos físicos (kg/m^3) quanto econômicos ($\text{US}\$/\text{m}^3$), emerge como indicador central para vincular irrigação à segurança hídrica e alimentar (Reta *et al.*, 2024; Kirmikil, 2025; He, Wang e Cui, 2020; Perelli *et al.*, 2024). Estudos

em esquemas públicos revelam que produtividades muito baixas ocorrem quando a eficiência de campo situa-se entre 25% e 30% e a razão de oferta de água excede valores de 2 a 3, indicando desperdício significativo.

O benchmarking em irrigação tem evoluído para incorporar métodos multivariados sofisticados, incluindo análise de cluster, DEA, PCA, PERMANOVA e regressão para agrupar WUAs semelhantes, reduzir o número de indicadores e construir índices sintéticos de desempenho (Córcoles *et al.*, 2010; Zema *et al.*, 2020; Muema *et al.*, 2018; Rodríguez-Díaz *et al.*, 2008). Estas abordagens permitem comparações mais robustas entre sistemas heterogêneos e identificação de boas práticas transferíveis.

No Brasil, instituições como a CODEVASF e o DNOCS empregam sistemas próprios de indicadores em seus relatórios de gestão. A CODEVASF utiliza, por exemplo, indicadores como Rentabilidade da Água, Eficiência Operacional da Água, Autossuficiência Financeira, Adimplência, Índice de Uso do Solo, Rentabilidade da Área e Geração de Empregos (TCU, 2021). O DNOCS adota indicadores similares (DNOCS, 2023), o que permite comparações entre projetos sob a gestão de ambas as instituições

Apesar da relevância desses sistemas, a literatura aponta algumas limitações. Córcoles *et al.* (2010) destacam que há predominância de indicadores técnicos e financeiros, enquanto aspectos sociais e ambientais recebem menos atenção. Além disso, muitos indicadores são baseados em médias anuais, o que pode ocultar variações sazonais críticas para a gestão adequada da irrigação. Outro desafio refere-se à dificuldade de integrar múltiplos indicadores em uma avaliação sintética que forneça uma visão abrangente da eficiência da gestão.

Nesse contexto, surgem os índices globais, que integram diversas dimensões do desempenho em uma única medida agregada. Tais índices facilitam a comparação entre sistemas, promovem uma comunicação mais clara com os diversos públicos interessados e ajudam na identificação de áreas prioritárias para intervenção. Conforme Zhou *et al.* (2010), esses índices são especialmente relevantes em contextos complexos e multifuncionais, como os serviços de irrigação. Eles permitem uma visão holística da performance, auxiliam no benchmarking entre diferentes projetos e regiões, orientam a alocação de recursos e facilitam a definição de metas de desempenho. Contudo, sua construção envolve desafios metodológicos importantes, como a seleção e ponderação de indicadores, a normalização de variáveis com diferentes unidades e a agregação de variáveis potencialmente correlacionadas (NARDO *et al.*, 2008).

3.4 Índices Globais de Desempenho

Índices globais de desempenho são índices compostos utilizados para medir o desempenho operacional e técnico da gestão de área irrigada. Eles representam uma abordagem metodológica que sintetiza múltiplos indicadores em uma única medida agregada, facilitando a comunicação de resultados complexos e a comparação entre unidades de análise. No contexto de recursos hídricos, índices compostos sintetizam indicadores de quantidade, qualidade, gestão e riscos em um número ou classe para apoiar diagnóstico, comparação e comunicação em gestão hídrica (Jarzebski *et al.*, 2024; Juwana *et al.*, 2012; Ievoli *et al.*, 2024).

A construção de índices compostos segue um processo sistemático que envolve etapas bem definidas: seleção de componentes e indicadores, normalização dos dados, cálculo de sub-índices, atribuição de pesos, agregação e análise de robustez. A literatura converge em um pipeline relativamente padronizado para índices compostos em recursos hídricos, embora demonstre que resultados e rankings são altamente sensíveis à normalização, pesos e, sobretudo, à função de agregação utilizada (Srivastava e Parmar, 2022; Milewski *et al.*, 2020; Uddin *et al.*, 2022).

A normalização dos indicadores constitui etapa crítica, uma vez que permite comparar variáveis com diferentes unidades de medida e ordens de grandeza. O método min-max, amplamente utilizado, transforma os valores para o intervalo $[0,1]$, preservando as relações proporcionais entre os valores originais (Nardo *et al.*, 2008). Escalas lineares 0-1, uso de referências únicas e funções baseadas em guias normativos são as principais abordagens de normalização adotadas na literatura (Ievoli *et al.*, 2024; AlShamaen *et al.*, 2024; Carstensen *et al.*, 2023).

A atribuição de pesos aos indicadores pode seguir abordagens subjetivas, baseadas em consulta a especialistas ou stakeholders, ou objetivas, derivadas das propriedades estatísticas dos próprios dados. As principais opções incluem consulta a stakeholders via AHP, aprendizado de máquina, modelos de teoria dos jogos e análise de importância real dos indicadores via correlação não linear (Juwana *et al.*, 2012; Pramono *et al.*, 2025; Becker *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2024). A escolha do método de ponderação impacta significativamente os rankings finais, especialmente para alternativas intermediárias.

A função de agregação determina como os indicadores ponderados são combinados no índice final. As principais opções incluem média aritmética, geométrica, multiplicativa, harmônica e híbrida (adição dentro de grupos mais média geométrica entre grupos), sendo que estudos demonstram forte sensibilidade à regra de agregação, com problemas de eclipsing e

ambiguidade como questões centrais (Srivastava e Parmar, 2022; Milewski *et al.*, 2020; Dobbie e Dail, 2013). A média aritmética permite compensação total entre indicadores, enquanto a geométrica penaliza desempenhos muito baixos em qualquer dimensão.

3.5 Análise Multicritério para Tomada de Decisão

A análise multicritério para tomada de decisão (MCDM - Multi-Criteria Decision Making) compreende um conjunto de métodos matemáticos desenvolvidos para apoiar decisões complexas que envolvem múltiplos critérios, frequentemente conflitantes. Estes métodos têm sido amplamente aplicados em problemas de gestão de recursos hídricos, onde trade-offs entre eficiência econômica, sustentabilidade ambiental e equidade social são inerentes ao processo decisório.

3.5.1 Método PROMETHEE

O método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation), desenvolvido por Brans e Vincke (1985), pertence à família de métodos de sobreclassificação (outranking), que comparam pares de alternativas com base em suas diferenças de desempenho em cada critério. O PROMETHEE utiliza funções de preferência por critério, pesos e fluxos positivos/negativos para obter um ranking parcial (PROMETHEE I) ou completo (PROMETHEE II) de alternativas (Brans e Vincke, 1985; Taherdoost, 2023; Wu e Abdul-Nour, 2020).

O PROMETHEE é amplamente utilizado em recursos hídricos para apoiar decisões complexas com múltiplos critérios, especialmente em planejamento de bacias, alocação de água e priorização de projetos de irrigação (Vulević e Dragović, 2017; Safari *et al.*, 2020; Karleuša *et al.*, 2019). A família PROMETHEE inclui versões para intervalos (III), casos contínuos (IV), problemas com restrições (V), representação gráfica via GAIA, e extensões para decisão em grupo e informação incerta.

O método também é aplicado para alocação de água de irrigação entre propriedades (Zardari *et al.*, 2015) e para comparar sistemas agrícolas quanto à sustentabilidade, incluindo dimensões de produtividade, eficiência e equidade (Talukder e Hipel, 2018; Zobeidi *et al.*, 2024). Desenvolvimentos recentes incluem versões híbridas para incerteza e decisão em grupo, como PROMETHEE fuzzy, com números cinza e integrações com AHP/DEMATEL para obtenção de pesos.

A aplicação do método PROMETHEE em recursos hídricos é documentada em diversos contextos. Abu-Taleb e Mareschal (1995) utilizaram PROMETHEE V para seleção de opções de desenvolvimento hídrico na Jordânia, integrando critérios de investimento, risco, qualidade da água, oferta e impacto ambiental. O estudo demonstrou a capacidade do método para lidar com restrições orçamentárias e múltiplos objetivos conflitantes.

Vulević e Dragović (2017) aplicaram PROMETHEE II ao ranqueamento de sub-bacias quanto à vulnerabilidade à erosão na Sérvia, utilizando critérios de uso do solo, precipitação, erodibilidade e topografia. A integração com GAIA permitiu visualização gráfica das preferências e identificação de trade-offs entre critérios.

Zardari *et al.* (2015) empregaram PROMETHEE combinado com análise GAIA para priorização de propriedades agrícolas na alocação de água de irrigação no Paquistão. O método permitiu ordenar 47 propriedades considerando critérios de eficiência, equidade e sustentabilidade, subsidiando a gestão de recursos escassos.

Safari *et al.* (2020) integraram AHP e PROMETHEE para seleção e priorização de fontes de irrigação para áreas verdes urbanas no Irã, considerando critérios ambientais, hídricos, sociais e econômicos. A abordagem híbrida permitiu capturar tanto preferências dos decisores quanto características objetivas das alternativas.

Zobeidi *et al.* (2024) utilizaram PROMETHEE-GAIA para avaliação de opções de adaptação às mudanças climáticas no setor agrícola iraniano, demonstrando a aplicabilidade do método para comparação de estratégias que envolvem dimensões de produtividade, eficiência e equidade.

3.5.2 Método TOPSIS

O método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), proposto por Hwang e Yoon (1981), classifica alternativas com base em sua proximidade a uma solução ideal e distância de uma solução anti-ideal. O princípio fundamental estabelece que a melhor alternativa deve estar mais próxima do ideal (que maximiza benefícios e minimiza custos) e mais distante do anti-ideal (que minimiza benefícios e maximiza custos).

O TOPSIS é amplamente usado em gestão hídrica para lidar com múltiplos critérios conflitantes, aproximando cada alternativa de uma solução ideal, e tem aplicações em qualidade da água, estratégias de irrigação, uso eficiente de água e avaliação de impactos ambientais (Jozaghi *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018; Uzun *et al.*, 2021).

Uma revisão abrangente de 266 artigos científicos classificou as aplicações do TOPSIS em nove áreas principais, incluindo gestão de recursos hídricos, demonstrando sua versatilidade e ampla aceitação na comunidade científica (Behzadian *et al.*, 2012). As vantagens do método incluem simplicidade computacional, interpretação direta do índice de proximidade relativa e capacidade de integrar critérios físicos, econômicos, sociais e ambientais sem convertê-los a um único valor monetário.

Em irrigação, o TOPSIS permite integrar rendimento, qualidade do produto, eficiência do uso de água e fertilizante e impacto ambiental em uma métrica única para escolher combinações ótimas de lâmina e adubação (Xu *et al.*, 2025; Hao *et al.*, 2022; Biswas *et al.*, 2024). Extensões incluem Interval-TOPSIS para dados em intervalo, versões ponderadas com entropia ou CRITIC para tratar correlação entre indicadores, e integrações com lógica fuzzy e AHP.

O método TOPSIS tem sido extensivamente aplicado em gestão de recursos hídricos e agricultura. Li *et al.* (2018) desenvolveram o método TIWR (TOPSIS-based Informative Weighting and Ranking), integrando ponderação por entropia para avaliação de qualidade da água em reservatórios na China. A abordagem reduziu a subjetividade na atribuição de pesos, melhorando a robustez das classificações.

Dandapat *et al.* (2024) combinaram índice de qualidade da água (WQI) com TOPSIS ponderado por entropia para classificação de aquíferos quanto à adequação para irrigação na Índia. O estudo classificou as fontes em faixas de qualidade (ruim, média, boa), subsidiando decisões de manejo.

Hao *et al.* (2022) aplicaram TOPSIS aprimorado para avaliação integrada de rendimento, qualidade e eficiência do uso de água e nitrogênio em cultivo de maçã no Planalto de Loess, China. A metodologia permitiu identificar combinações ótimas de lâmina de irrigação e adubação.

Biswas *et al.* (2024) utilizaram métodos multicritério incluindo TOPSIS para avaliação de práticas de manejo em sistemas arroz-trigo sob agricultura de conservação na Índia. Os autores demonstraram a capacidade do método para integrar critérios de produtividade, sustentabilidade e viabilidade econômica.

Radmehr *et al.* (2022) integraram Fuzzy AHP-TOPSIS para priorização de zonas de manejo em grandes perímetros de irrigação no Irã, combinando planejamento estratégico com análise multicritério. A abordagem permitiu considerar incertezas nas avaliações dos especialistas.

Han *et al.* (2024) compararam estratégias de gestão sustentável da água (captação de chuva, reúso e dessalinização) utilizando TOPSIS e Fuzzy TOPSIS, demonstrando a aplicabilidade do método para avaliação de alternativas tecnológicas sob múltiplos critérios.

3.5.3 Método da Entropia para Ponderação Objetiva

O método da entropia, fundamentado na teoria da informação de Shannon (1948), constitui uma abordagem objetiva para determinação de pesos em análise multicritério. A entropia mede a incerteza ou dispersão dos valores de cada critério na matriz de decisão, sendo que maior dispersão implica mais informação e, conseqüentemente, maior peso atribuído ao critério (Zhu *et al.*, 2021; Babaei *et al.*, 2025; Mukhametzyanov, 2021; He, Chu e Chen, 2016).

O procedimento típico envolve normalização dos dados (benefício/custo), cálculo das probabilidades relativas, entropia de cada critério e peso proporcional ao grau de diferenciação (1-entropia). Esta abordagem elimina a subjetividade na atribuição de pesos, sendo particularmente útil quando não há consenso entre especialistas ou quando se deseja uma ponderação puramente baseada em dados.

Em recursos hídricos, o método da entropia tem sido aplicado para avaliação de qualidade da água, capacidade de suporte de recursos hídricos, gestão agrícola e risco de alagamento (Feng *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2019; Bezdán *et al.*, 2025). Vários modelos combinam entropia com TOPSIS, análise cinza, set pair analysis e modelos de nuvem para avaliar riscos e sustentabilidade.

Análises críticas demonstram que o peso de entropia aprimora a função dos atributos com maior diversidade de dados (DAD) na tomada de decisão, mas pode enfraquecer a função de atributos com baixo DAD, potencialmente levando a resultados não razoáveis (Chen, 2021). Para mitigar estes efeitos, tem sido proposto o TOPSIS baseado em entropia com coeficiente de peso ajustável, além de esquemas híbridos que combinam entropia com métodos como AHP, IQR e métodos cinza.

3.5.4 Integração TOPSIS-Entropia e Aplicações em Recursos Hídricos

A integração do método TOPSIS com ponderação por entropia (TOPSIS-Entropia) representa uma abordagem metodológica que combina as vantagens do ranking por proximidade à solução ideal com a objetividade da ponderação baseada na teoria da informação. O método TOPSIS baseado em coeficiente de peso por entropia foi aplicado para classificação

de recursos hídricos, demonstrando resultados similares aos obtidos por redes neurais artificiais (Wang e Men, 2007).

A metodologia integrada Entropia-TOPSIS foi aplicada para avaliar fontes de energia verde para planejamento sustentável, identificando a energia solar-fotovoltaica como fonte ótima, com a análise de sensibilidade demonstrando a robustez da metodologia de seleção (Bhowmik *et al.*, 2020). Em gestão de recursos hídricos, o modelo TOPSIS baseado em pesos de entropia foi aplicado para otimização de esquemas de abastecimento de água urbana, fornecendo base científica para tomada de decisão objetiva e confiável.

No contexto de avaliação de projetos hidrelétricos, AHP, TOPSIS e VIKOR foram utilizados de forma integrada para determinar o melhor projeto com base em critérios como capacidade instalada, capacidade do reservatório, altura, comprimento, número de unidades e custo da barragem (Manoj *et al.*, 2022). A abordagem multicritério permite incorporar fatores técnicos, sociais, econômicos e ambientais no planejamento energético.

No nexo água-energia, a análise de decisão multicritério (MCDA) foi aplicada para priorizar estratégias de gestão de recursos hídricos considerando critérios econômicos e ambientais, identificando o controle de bombeamento de águas subterrâneas e a conservação de água residencial como ações de alta prioridade (Lee *et al.*, 2018). A viabilidade econômica foi considerada o fator mais importante na implementação de práticas de gestão.

A integração TOPSIS-Entropia tem demonstrado resultados promissores em diversas aplicações hídricas. Li *et al.* (2019) aplicaram TOPSIS com ponderação por entropia máxima para gestão de recursos hídricos agrícolas na China, comparando esquemas de alocação sob múltiplos objetivos econômicos, sociais e ambientais. Os autores demonstraram que a ponderação objetiva elimina viés do decisor, aumentando a aceitabilidade das recomendações.

Bezdan *et al.* (2025) combinaram entropia com machine learning para avaliação objetiva de risco de alagamento em áreas agrícolas na Sérvia. A metodologia atribuiu pesos aos fatores de vulnerabilidade baseados exclusivamente na dispersão dos dados, gerando mapas de risco validados por sensoriamento remoto.

Zhang *et al.* (2024) desenvolveram modelo integrado combinando PCA, entropia e coeficiente de variação para avaliação de qualidade de águas subterrâneas. A abordagem híbrida permitiu reduzir dimensionalidade, otimizar pesos e evitar distorções comuns ao método de entropia puro em casos de baixa diferenciação entre amostras.

Bhowmik *et al.* (2020) aplicaram Entropia-TOPSIS para avaliação de fontes de energia renovável, identificando energia solar fotovoltaica como alternativa ótima. A análise de

sensibilidade confirmou robustez dos rankings frente a variações nos pesos, demonstrando confiabilidade do método.

3.6 Simulação de Monte Carlo em Análise Multicritério

A simulação de Monte Carlo constitui uma técnica computacional que utiliza amostragem aleatória repetida para obter resultados numéricos, sendo particularmente útil para avaliar a robustez de rankings multicritério frente a incertezas na atribuição de pesos. Em contextos onde não há consenso sobre a importância relativa dos critérios, a geração aleatória de vetores de pesos permite caracterizar a distribuição de posições de cada alternativa sob diferentes cenários de ponderação.

Técnicas de MCDM, como AHP, TOPSIS e modelos híbridos, têm sido aplicadas extensivamente em sistemas de energia renovável, eficiência energética, gestão de redes e planejamento de políticas, com revisões sistemáticas identificando tendências, lacunas e desafios, incluindo o tratamento de incerteza e a integração de dados em tempo real (Sahoo *et al.*, 2025). A simulação de Monte Carlo oferece uma abordagem sistemática para quantificar estas incertezas.

A análise de sensibilidade resultante permite identificar alternativas robustas, cujo ranking permanece estável independentemente da ponderação, e alternativas sensíveis, cujo desempenho depende fortemente de quais dimensões são priorizadas. Esta distinção tem implicações importantes para a tomada de decisão, uma vez que recomendações baseadas em alternativas robustas tendem a ser mais confiáveis e menos sujeitas a contestações metodológicas.

4 METODOLOGIA

Esta pesquisa propõe um framework analítico quantitativo para a construção de indicadores globais de desempenho relativo entre Projetos Públicos de Irrigação (PPIs) brasileiros, baseado em métodos de análise multicritério (MCDM). A avaliação é conduzida em termos comparativos, de modo que o desempenho de cada projeto é definido em relação aos demais, a partir de um conjunto comum de indicadores.

Indicadores operacionais, financeiros e socioeconômicos são integrados por meio de diferentes métodos multicritério, resultando em medidas sintéticas expressas por rankings comparativos. Essa abordagem permite explorar distintas lógicas de agregação e ponderação, bem como analisar a convergência dos resultados e a sensibilidade dos rankings às escolhas metodológicas adotadas.

O processo metodológico deste estudo é estruturado em três etapas principais, implementadas no ambiente de programação R:

- (i) preparação, organização e análise preliminar dos dados, envolvendo seleção, tratamento, normalização e caracterização exploratória dos indicadores de desempenho;
- (ii) construção dos indicadores globais de desempenho relativo por meio de métodos de Análise Multicritério (PROMETHEE II e TOPSIS), utilizando estratégias alternativas de ponderação baseadas em simulação de Monte Carlo e ponderação objetiva por entropia; e
- (iii) avaliação comparativa, análise de robustez e sensibilidade dos resultados, com o objetivo de examinar a convergência entre métodos e a estabilidade dos rankings frente a diferentes estruturas de ponderação.

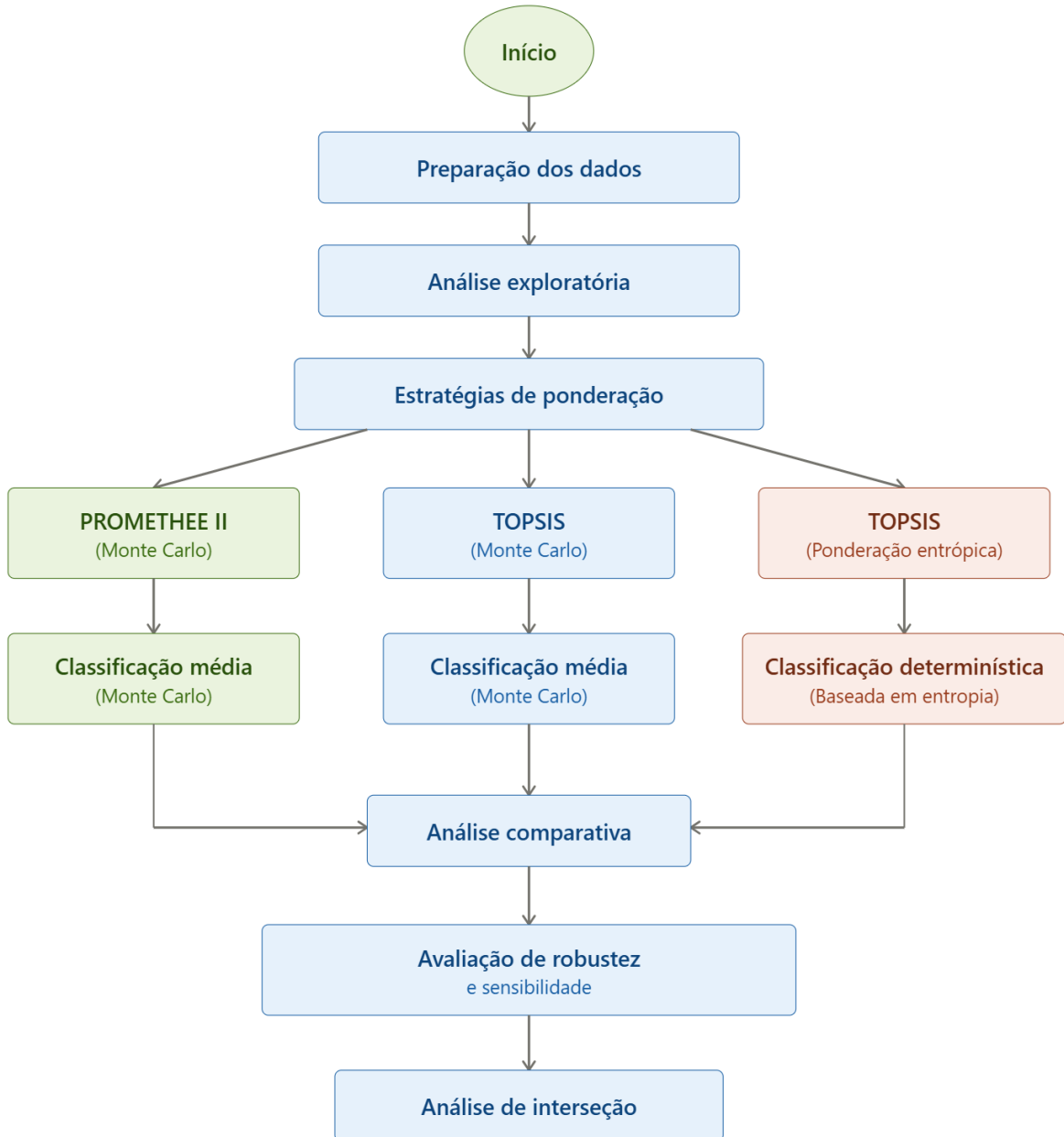
O fluxo metodológico adotado é apresentado na Figura 1.

4.1 Caracterização do Estudo

Esta pesquisa caracteriza-se como um estudo quantitativo, exploratório e descritivo. A abordagem quantitativa justifica-se pela utilização de indicadores numéricos e métodos matemáticos de agregação multicritério para avaliar o desempenho dos projetos. O caráter exploratório deve-se à aplicação inédita, no contexto brasileiro, de múltiplos métodos de análise multicritério de forma integrada e comparativa para avaliação de projetos públicos de irrigação.

O aspecto descritivo manifesta-se na caracterização sistemática do desempenho dos projetos em suas múltiplas dimensões operacionais, financeiras e socioeconômicas.

Figura 1 - Indicadores para avaliação global do desempenho dos PPIs.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

4.2 Universo de Análise e Seleção da Amostra

No Brasil, o processo de concessão de Projetos Públicos de Irrigação à iniciativa privada ainda se encontra em estágio incipiente. Atualmente, apenas um Projeto Público de Irrigação

foi efetivamente concedido, o Projeto Baixio de Irecê, no estado da Bahia, o que limita a disponibilidade de experiências consolidadas de prestação de serviço hídricos de irrigação capazes de permitir avaliações empíricas comparativas do desempenho desses empreendimentos sob diferentes arranjos contratuais. Diante desse contexto, torna-se metodologicamente necessário utilizar projetos ainda não concedidos como base empírica para a construção e aplicação de índices globais de desempenho. Esses projetos concentram a maior parte das informações operacionais, financeiras e produtivas atualmente disponíveis e constituem o universo mais representativo para o desenvolvimento, teste e validação de uma metodologia comparativa, passível de aplicação futura tanto em projetos concedidos quanto em novos processos de concessão.

Dessa forma, o universo da pesquisa compreende todos os Projetos Públicos de Irrigação (PPIs) administrados pela Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF) e pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) no Brasil. Para a composição da amostra, foram selecionados projetos que atendiam ao critério de disponibilidade completa de dados para todos os sete indicadores analisados, utilizando como base os relatórios de gestão das instituições referentes ao ano de 2020.

A amostra final é composta por 26 Projetos Públicos de Irrigação, sendo 20 administrados pela CODEVASF e 6 pelo DNOCS. Estes projetos estão distribuídos em sete estados brasileiros: Minas Gerais (5 projetos), Bahia (8 projetos), Pernambuco (4 projetos), Sergipe (2 projetos), Alagoas (1 projeto), Ceará (4 projetos) e Piauí (2 projetos), abrangendo as bacias hidrográficas do São Francisco (sub-bacias do Alto, Médio e Baixo São Francisco) e do Nordeste Setentrional.

A área irrigável total dos projetos analisados soma aproximadamente 160 mil hectares, com significativa heterogeneidade em termos de porte, variando de 445 hectares (Mandacaru) a 48.000 hectares (Baixio de Irecê). A diversidade da amostra em termos de tamanho, localização geográfica, culturas predominantes, sistemas de irrigação, modelos de gestão e estrutura fundiária (lotes familiares, empresariais ou mistos) permite uma análise representativa do universo dos PPIs brasileiros e possibilita a identificação de padrões de desempenho em diferentes contextos.

4.3 Coleta e Tratamento dos Dados

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos de fontes secundárias, especificamente dos relatórios de gestão publicados pela CODEVASF (2021) e pelo DNOCS (2023),

disponíveis publicamente nos sítios eletrônicos das instituições. Estes relatórios consolidam informações operacionais, financeiras e produtivas dos projetos, coletadas rotineiramente pelos sistemas de gestão das entidades.

Os sete indicadores de desempenho utilizados (Tabela 1) foram selecionados por atenderem aos seguintes critérios: (i) disponibilidade de dados para todos os projetos da amostra; (ii) relevância para a avaliação da eficiência da gestão dos serviços hídricos; (iii) alinhamento com frameworks internacionais de avaliação de desempenho em irrigação, como os propostos por IPTRID (MALANO; BURTON, 2001) e IWMI (MOLDEN et al., 1998); e (iv) utilização sistemática pelas instituições gestoras brasileiras, permitindo replicabilidade futura.

Quadro 1 - Indicadores para avaliação global do desempenho dos PPIs.

Indicador	Sigla	Fórmula de Cálculo	Unidade	Interpretação
Rentabilidade da Água	RA	Valor Bruto de Produção / Volume de Água Fornecido	R\$/m ³	Quanto maior, melhor
Eficiência Operacional da Água	EOA	(Volume de água fornecido / Volume de água captado) × 100	%	Quanto maior, melhor
Índice de Insuficiência Financeira	ISF	ISF = 100 – IAF, onde IAF = (Receitas anuais geradas pelo distrito / Orçamento Operativo Anual) × 100	%	Quanto menor, melhor
Inadimplência da Tarifa K ₂	IAD	IAD = 100 – AD, onde AD = (Total de tarifa K ₂ recebida / Total de tarifa K ₂ emitida) × 100	%	Quanto menor, melhor
Índice de Uso do Solo	IUS	(Área cultivada / Área irrigável) × 100	%	Quanto maior, melhor
Rentabilidade da Área	RAR	Valor Bruto de Produção / Área Irrigável	R\$/ha	Quanto maior, melhor
Geração de Empregos	GE	Número de Empregos Gerados / Área Irrigável	Empregos/ha	Quanto maior, melhor

Fonte: Adaptado de CODEVASF (2021) e DNOCS (2023).

Para o cálculo do indicador Geração de Empregos (GE), foi adotada a metodologia utilizada pela CODEVASF, que considera, para cada hectare irrigado cultivado, os seguintes multiplicadores: 1 emprego direto (trabalhador diretamente envolvido na produção agrícola), 1,5 empregos indiretos (trabalhadores em atividades de apoio como fornecimento de insumos, transporte, armazenamento e comercialização) e 0,34 empregos induzidos (gerados pelo efeito multiplicador da renda na economia local). Assim, cada hectare cultivado gera 2,84 empregos totais.

Todos os indicadores foram estruturados de forma que valores mais altos representem melhor desempenho, facilitando a aplicação dos métodos de análise multicritério. Os dados foram organizados em uma matriz de decisão de dimensão 26×7 (26 projetos × 7 indicadores), constituindo a base para as análises subsequentes.

4.4 Análise Estatística Descritiva

A análise estatística descritiva foi realizada para caracterizar a distribuição dos indicadores e identificar padrões na amostra. Foram calculadas as seguintes medidas para cada indicador:

- Medidas de tendência central: média aritmética e mediana
- Medidas de dispersão: desvio padrão, valores mínimo e máximo, amplitude
- Medidas de variabilidade relativa: coeficiente de variação (CV = desvio padrão / média)

A visualização da distribuição dos indicadores foi realizada por meio de boxplots (diagramas de caixa), que permitem identificar a mediana, os quartis (Q1 e Q3), a amplitude interquartilica, valores extremos e outliers (TUKEY, 1977). Outliers foram definidos como valores que excedem 1,5 vezes a amplitude interquartilica acima do terceiro quartil ou abaixo do primeiro quartil.

Para avaliar as relações entre os indicadores, foram calculadas matrizes de correlação utilizando três coeficientes distintos:

Correlação de Pearson (r): Mede a associação linear entre duas variáveis contínuas, calculada pela equação:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

onde:

- x_i e y_i são os valores observados das variáveis X e Y para o projeto i

- \bar{x} e \bar{y} são as médias das variáveis X e Y
- n é o número de observações

O coeficiente varia de -1 (correlação negativa perfeita) a +1 (correlação positiva perfeita), com valores próximos a zero indicando ausência de correlação linear.

Correlação de Spearman (ρ): Coeficiente não-paramétrico baseado nos postos (rankings) dos dados, mais robusto a outliers e adequado para relações monotônicas não necessariamente lineares.

Correlação de Kendall (τ): Outro coeficiente não-paramétrico baseado na concordância entre pares ordenados, particularmente adequado para amostras pequenas.

A interpretação da magnitude das correlações seguiu a classificação proposta por Cohen et al. (2013): fraca (0,10 a 0,29), moderada (0,30 a 0,49) e forte ($\geq 0,50$).

Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R Studio (versão 4.1.0), com os pacotes base, stats e corrplot.

4.5 Construção dos Índices Globais de Desempenho

Para a construção dos índices globais de desempenho, foram aplicados três métodos de análise multicritério: (i) PROMETHEE II integrado à simulação de Monte Carlo, (ii) TOPSIS integrado à simulação de Monte Carlo, e (iii) TOPSIS com pesos calculados pelo método da entropia. A utilização de múltiplos métodos permite avaliar a robustez dos resultados e identificar sensibilidades relacionadas às diferentes formas de agregação das informações.

4.5.1 Normalização dos Dados

Previamente à aplicação dos métodos multicritério, os indicadores foram normalizados para eliminar diferenças de escala e permitir comparabilidade. Foi utilizado o método de normalização min-max, que transforma os valores para o intervalo [0, 1], preservando as relações proporcionais entre os valores originais (NARDO et al., 2008):

$$X_{ij}^{norm} = \frac{X_{ij} - \min_i(X_{ij})}{\max_i(X_{ij}) - \min_i(X_{ij})}$$

onde:

- X_{ij} representa o valor original do indicador j para o projeto i
- $\min_i(X_{ij})$ é o valor mínimo do indicador j entre todos os projetos

- $\max_i(X_{ij})$ é o valor máximo do indicador j entre todos os projetos
- X_{ij}^{norm} é o valor normalizado resultante (entre 0 e 1)

Após a normalização, valores próximos a 1 indicam desempenho próximo ao melhor observado na amostra, enquanto valores próximos a 0 indicam desempenho próximo ao pior observado.

Dos sete indicadores utilizados, cinco são critérios de benefício (RA, EOA, IUS, RAR e GE), onde valores maiores indicam melhor desempenho. Os indicadores ISF (Insuficiência Financeira) e IAD (Inadimplência) são critérios de custo, onde valores menores indicam melhor desempenho. Na aplicação dos métodos PROMETHEE e TOPSIS, esta distinção foi considerada na determinação das soluções ideais e anti-ideais.

4.5.2 Método PROMETHEE II com Simulação de Monte Carlo

O método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) é uma técnica de sobreclassificação que compara pares de alternativas com base em suas diferenças de desempenho em cada critério (BRANS; VINCKE, 1985). A versão PROMETHEE II produz um ranking completo das alternativas.

Etapa 1: Cálculo das diferenças de desempenho

Para cada par de projetos (a, b) e cada indicador j, calcula-se a diferença:

$$d_j(a, b) = X_{aj}^{norm} - X_{bj}^{norm}$$

onde $d_j(a, b)$ é a diferença de desempenho entre os projetos a e b no indicador j.

Etapa 2: Aplicação da função de preferência

Foi utilizada a função de preferência tipo "usual" (critério verdadeiro), que atribui preferência total quando há qualquer diferença positiva:

$$P_j(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{se } d_j(a, b) > 0 \\ 0 & \text{se } d_j(a, b) \leq 0 \end{cases}$$

onde $P_j(a, b)$ indica preferência total (1) quando o projeto a supera o projeto b no indicador j.

Etapa 3: Cálculo do índice de preferência agregado

O índice de preferência global do projeto a sobre o projeto b é a média ponderada das preferências individuais:

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^7 w_j \cdot P_j(a, b)$$

onde:

- $\pi(a, b)$ é o índice de preferência global do projeto a sobre o projeto b
- w_j é o peso do indicador j, com $\sum_{j=1}^7 w_j = 1$

Etapa 4: Cálculo dos fluxos de preferência

Para cada projeto a, calculam-se:

Fluxo positivo (força do projeto):

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \neq a} \pi(a, b)$$

Fluxo negativo (fraqueza do projeto):

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \neq a} \pi(b, a)$$

Fluxo líquido (balanço geral):

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a)$$

onde n é o número de projetos (26).

Etapa 5: Ranking

Os projetos são ordenados em ordem decrescente de fluxo líquido Φ . Valores mais altos indicam melhor desempenho global.

4.5.3 Método TOPSIS com Simulação de Monte Carlo

O método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) classifica alternativas com base em sua proximidade a uma solução ideal e distância de uma solução anti-ideal (HWANG; YOON, 1981). O princípio fundamental é que a melhor alternativa deve estar mais próxima do ideal (que maximiza benefícios) e mais distante do anti-ideal (que minimiza benefícios).

Etapa 1: Construção da matriz de decisão normalizada ponderada

$$v_{ij} = w_j \times X_{ij}^{norm}$$

onde v_{ij} é o valor normalizado ponderado do indicador j para o projeto i.

Etapa 2: Determinação das soluções ideal e anti-ideal

Solução ideal positiva (A^+): $A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_7^+\}$

onde $v_j^+ = \max_i(v_{ij})$ (melhor valor do indicador j)

Solução ideal negativa (A^-): $A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_7^-\}$

onde $v_j^- = \min_i(v_{ij})$ (pior valor do indicador j)

Etapa 3: Cálculo das distâncias euclidianas

Distância à solução ideal positiva:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^7 (v_{ij} - v_j^+)^2}$$

Distância à solução ideal negativa:

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^7 (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

onde:

- S_i^+ é a distância do projeto i à solução ideal positiva
- S_i^- é a distância do projeto i à solução ideal negativa

Etapa 4: Cálculo do coeficiente de proximidade

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}$$

onde $0 \leq C_i \leq 1$. Valores mais próximos de 1 indicam melhor desempenho global.

Etapa 5: Ranking

Os projetos são ordenados em ordem decrescente de C_i . Valores mais próximos de 1 indicam melhor desempenho global (maior proximidade ao ideal e maior distância do anti-ideal).

4.5.4 Método TOPSIS-Entropia

O método TOPSIS-Entropia difere da aplicação anterior por utilizar pesos objetivos derivados da variabilidade estatística dos próprios dados, através do método da entropia (SHANNON, 1948; ZOU et al., 2006). Este método atribui maior peso aos indicadores com maior capacidade de discriminação entre os projetos (maior variância), reduzindo a subjetividade na ponderação.

Etapa 1: Cálculo da entropia de cada indicador

$$E_j = -k \times \sum_{i=1}^{26} p_{ij} \times \ln(p_{ij})$$

onde:

- $p_{ij} = \frac{x_{ij}^{norm}}{\sum_{i=1}^{26} x_{ij}^{norm}}$ (proporção do valor normalizado)
- $k = \frac{1}{\ln(26)}$ (constante de normalização, onde 26 é o número de projetos)
- E_j é a entropia do indicador j

Etapa 2: Cálculo do grau de diversidade

$$d_j = 1 - E_j$$

onde d_j representa o grau de diversidade (poder discriminatório) do indicador j. Quanto menor a entropia, maior a diversidade e maior o poder de discriminação.

Etapa 3: Determinação dos pesos

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^7 d_j}$$

onde w_j é o peso final atribuído ao indicador j, com $\sum_{j=1}^7 w_j = 1$.

Etapa 4: Aplicação do TOPSIS

Com os pesos calculados objetivamente, aplica-se o método TOPSIS conforme descrito na seção 3.5.3.

4.5.5 Atribuição de Pesos por Simulação de Monte Carlo

Nos métodos PROMETHEE II e TOPSIS com Monte Carlo, os pesos foram atribuídos aleatoriamente através de simulação, reconhecendo a ausência de consenso prévio sobre a importância relativa dos indicadores. Este procedimento permite avaliar a robustez dos rankings sob diferentes cenários de ponderação. Para cada uma das 1.000 simulações realizadas:

1. Foram gerados 7 números aleatórios de uma distribuição uniforme $U(0,1)$
2. Os números foram normalizados para que sua soma fosse igual a 1:

$$w_j^{(s)} = \frac{r_j^{(s)}}{\sum_{j=1}^7 r_j^{(s)}}$$

onde:

$r_j^{(s)}$ é o número aleatório gerado para o indicador j na simulação s

$w_j^{(s)}$ é o peso normalizado do indicador j na simulação s

3. Vetor de pesos:

$$\mathbf{w}^{(s)} = (w_1^{(s)}, w_2^{(s)}, \dots, w_7^{(s)})$$

Com este vetor de pesos, foram aplicados os métodos PROMETHEE II e TOPSIS, gerando rankings de 1 a 26 para cada projeto.

Ao final das 1.000 simulações, foram calculados para cada projeto:

- Posição média: média aritmética das posições obtidas nas 1.000 simulações
- Distribuição de posições: representada graficamente por boxplots
- Amplitude de variação: diferença entre a melhor e a pior posição obtida

A implementação da simulação de Monte Carlo foi realizada no software R Studio utilizando o pacote MCDA e funções customizadas.

4.6 Análise de Sensibilidade e Robustez

A análise de sensibilidade teve como objetivo avaliar a estabilidade dos rankings produzidos frente a variações nos pesos atribuídos aos indicadores. A simulação de Monte Carlo com 1.000 iterações permite caracterizar:

- Projetos robustos: Aqueles cuja classificação varia pouco independentemente dos pesos (amplitude interquartílica estreita nos boxplots)
- Projetos sensíveis: Aqueles cuja classificação é fortemente dependente da ponderação adotada (amplitude interquartílica ampla)
- Convergência entre métodos: Grau de concordância entre PROMETHEE e TOPSIS nas classificações médias
- Impacto da ponderação objetiva: Diferenças entre os rankings obtidos com Monte Carlo (pesos aleatórios) e entropia (pesos objetivos)

Para quantificar a convergência entre métodos, foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson entre os rankings médios produzidos pelo PROMETHEE-MC e TOPSIS-MC, e entre TOPSIS-MC e TOPSIS-Entropia.

4.7 Softwares e Pacotes Utilizados

Todas as análises foram realizadas no ambiente R Studio (versão 4.1.0), utilizando os seguintes pacotes:

- base e stats: análises estatísticas descritivas
- corrplot: visualização de matrizes de correlação
- ggplot2: produção de gráficos e visualizações

- MCDA: implementação de métodos multicritério
- tidyverse: manipulação e organização de dados
- VennDiagram: criação de diagramas de Venn para análise de interseção
- pheatmap: criação de heatmaps

Os scripts desenvolvidos estão documentados e disponíveis para garantir a replicabilidade das análises.

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização dos Projetos Públicos de Irrigação Analisados

A amostra analisada compreende 26 Projetos Públicos de Irrigação (PPIs), sendo 20 administrados pela CODEVASF e 6 pelo DNOCS. Estes projetos estão distribuídos em sete estados brasileiros: Minas Gerais (5 projetos), Bahia (8 projetos), Pernambuco (4 projetos), Sergipe (2 projetos), Alagoas (1 projeto), Ceará (4 projetos) e Piauí (2 projetos), abrangendo as regiões do Alto, Médio e Baixo São Francisco, além do Nordeste Setentrional.

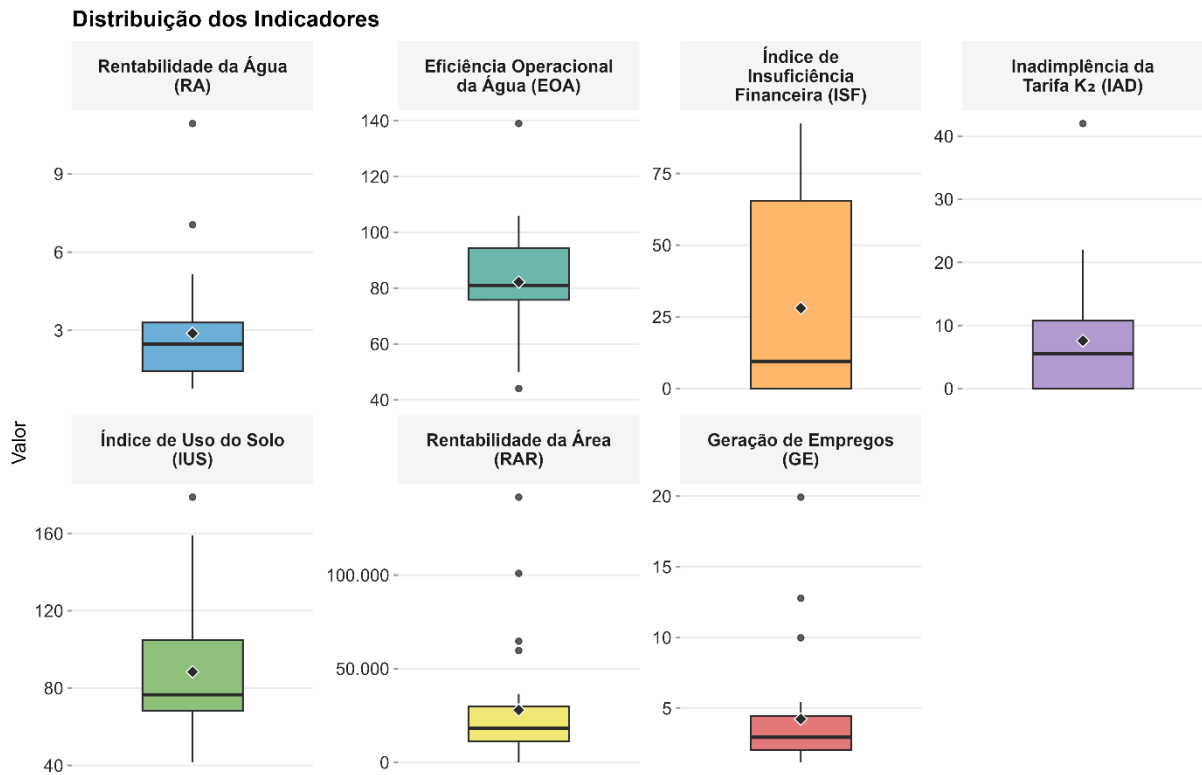
A área irrigável total dos projetos analisados soma aproximadamente 160 mil hectares, com projetos de diferentes portes, variando de 445 hectares (Mandacaru) a 48.000 hectares (Baixio de Irecê). A maioria dos projetos foi implantada entre as décadas de 1970 e 1990, representando investimentos públicos consolidados ao longo de mais de três décadas de operação (CODEVASF, 2021; DNOCS, 2023).

Quanto à estrutura fundiária, observa-se significativa heterogeneidade. Alguns projetos são compostos exclusivamente por lotes familiares (como Itiúba e Propriá), outros têm predominância de lotes empresariais (como Tourão e Lagoa Grande), enquanto a maioria apresenta estrutura mista, com proporções variáveis entre agricultura familiar e empresarial. A fruticultura destaca-se como atividade predominante em vários projetos, especialmente no Médio São Francisco, com culturas de manga, uva e banana. No Tourão, a cana-de-açúcar é a cultura principal, enquanto nos projetos do Baixo São Francisco predomina o cultivo de arroz irrigado (CODEVASF, 2021; DNOCS, 2023).

5.2 Análise Estatística dos Indicadores de Desempenho

A Figura 2 apresenta a distribuição dos sete indicadores de desempenho analisados para o conjunto dos 26 PPIs. A análise estatística descritiva completa, incluindo média, desvio padrão, valores máximos e mínimos de cada indicador por projeto, encontra-se no Apêndice A.

Figura 2 - Distribuição dos indicadores de desempenho dos Projetos Públicos de Irrigação analisados.



Unidades: RA (R\$/m³), EOA (%), ISF (%), IAD (%), IUS (%), RAR (R\$/ha) e GE (empregos/ha).
 Fonte: Elaboração própria com base em dados da CODEVASF (2021) e DNOCS (2023).

A análise dos dados expostos na Figura 2, evidencia, além das tendências centrais, aspectos importantes relacionados à mediana, à dispersão interquartílica e à presença de outliers, que ajudam a compreender melhor a heterogeneidade dos indicadores.

A Rentabilidade da Água (RA) apresenta mediana em torno de 3 (R\$/m³), com intervalo interquartílico relativamente estreito, indicando baixa variabilidade entre a maioria dos projetos. No entanto, a presença de outliers superiores revela que alguns casos isolados atingem níveis significativamente maiores de rentabilidade, destoando do padrão geral.

Na Eficiência Operacional da Água (EOA), observa-se que o primeiro quartil (Q1) e o terceiro quartil (Q3) estão relativamente próximos, formando um intervalo interquartílico concentrado em faixas elevadas de eficiência. A mediana posiciona-se acima de 80% e menor variabilidade em comparação a outros indicadores. Isso sugere que, operacionalmente, os projetos tendem a apresentar um desempenho relativamente homogêneo, apesar da presença de alguns valores discrepantes, tanto inferiores quanto superiores. O indicador RAR (Rentabilidade da Área) apresenta mediana aproximada de R\$15.000/ha, com o primeiro quartil (Q1) próximo de R\$ 10.000/ha e o terceiro quartil (Q3) em torno de R\$ 30.000/ha, evidenciando

que a maior parte dos projetos se concentra em faixas mais baixas de rentabilidade. O intervalo interquartilico relativamente estreito, quando comparado à amplitude total dos dados, reforça essa concentração. Entretanto, observam-se outliers expressivos acima de R\$ 50.000/ha, chegando a valores próximos ou superiores a R\$ 100.000/há, esse padrão indica que poucos projetos alcançam níveis muito elevados de rentabilidade por hectare, enquanto a maioria opera com retornos significativamente mais modestos.

O indicador ISF (Insuficiência Financeira) apresenta alta variabilidade, com mediana em torno de 10%, primeiro quartil de aproximadamente 3% e terceiro quartil de 65%, com valores extremos atingindo até 90%. Esta variabilidade indica que alguns projetos apresentam significativa insuficiência financeira, necessitando de aportes externos para cobrir custos operacionais, enquanto outros demonstram boa capacidade de autofinanciamento.

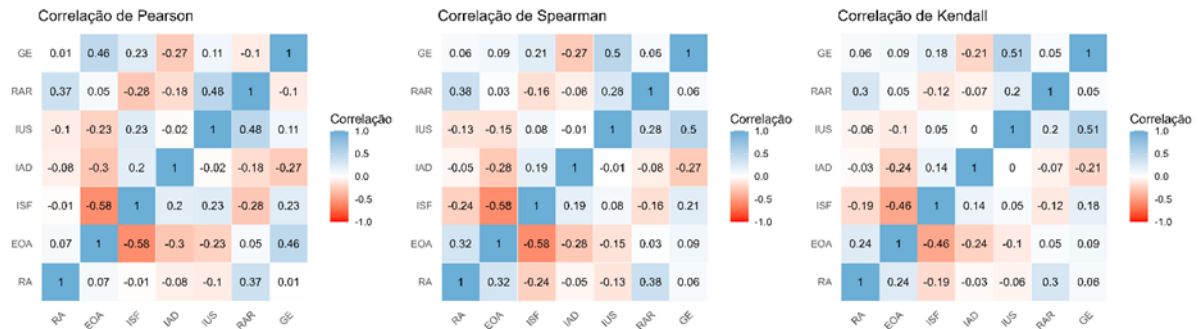
O indicador IAD (Inadimplência) apresenta mediana em torno de 7%, com primeiro quartil de aproximadamente 4% e terceiro quartil de 10%. Observa-se um outlier superior de cerca de 45%. A maioria dos projetos demonstra baixa inadimplência, indicando boa regularidade no pagamento das tarifas pelos irrigantes.

Os indicadores GE (Geração de Empregos) e IUS (Índice de Uso do Solo) demonstram distribuições relativamente mais concentradas, com medianas próximas a 2,5 empregos/ha e 80% de uso do solo, respectivamente.

5.3 Análise de Correlação entre Indicadores

A Figura 3 apresenta as matrizes de correlação entre os sete indicadores utilizando os coeficientes de Pearson, Spearman e Kendall, respectivamente e consolida os três métodos em um painel comparativo.

Figura 3 - Comparação das matrizes de correlação pelos três métodos (Pearson, Spearman e Kendall).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

A análise de correlação entre os sete indicadores, realizada pelos coeficientes de Pearson, Spearman e Kendall, revelou padrões estruturais consistentes ao longo dos três métodos, com intensidades variáveis conforme o grau de linearidade e a presença de outliers.

A correlação entre o Índice de Insuficiência Financeira (ISF) e o Índice de Uso do Solo (IUS) ($r = 0,23$) indica uma relação positiva de baixa magnitude, classificada como moderadamente fraca. Isso significa que há uma leve tendência de que projetos com maior uso do solo também apresentem maior insuficiência financeira, porém essa associação é pouco expressiva e deve ser interpretada com cautela.

O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,053$) reforça essa limitação explicativa, evidenciando que apenas 5,3% da variação da insuficiência financeira pode ser atribuída ao IUS. Em outras palavras, cerca de 94,7% do comportamento do ISF está relacionado a outros fatores não capturados por essa variável, como gestão financeira, estrutura de custos, eficiência de cobrança, políticas tarifárias ou mesmo características específicas de cada projeto.

A correlação entre IUS e RAR ($r = 0,48$ em Pearson) demonstra que projetos com maior intensidade de uso do solo tendem a apresentar maior rentabilidade por área, refletindo o aproveitamento efetivo da infraestrutura disponível. Similarmente, a correlação entre EOA e GE ($r = 0,46$ em Pearson) indica que projetos com maior eficiência operacional tendem a gerar mais empregos por área, no entanto, ao observar os métodos não paramétricos, essa relação se enfraquece consideravelmente: em Spearman ($\rho = 0,09$) e Kendall ($\tau = 0,09$), a correlação passa a ser praticamente nula.

Essa diferença é bastante relevante do ponto de vista analítico. O coeficiente de Pearson capta relações lineares e é sensível a valores extremos (outliers), enquanto Spearman e Kendall avaliam relações monotônicas e são mais robustos à presença desses valores. Assim, o fato de

a correlação ser moderada em Pearson, mas muito fraca nos demais métodos, indica que essa associação pode estar sendo influenciada por poucos casos específicos com valores elevados de EOA e GE, Portanto, a interpretação mais cautelosa é que a eficiência operacional não necessariamente implica maior geração de empregos, sendo essa relação dependente de contextos específicos ou influenciada por observações extremas.

A correlação entre RA e RAR ($r = 0,37$ em Pearson) sugere que projetos com maior rentabilidade da água tendem a apresentar maior rentabilidade por área, embora a correlação moderada indique que outros fatores também influenciam a rentabilidade por área. Adicionalmente, a correlação entre IAD e GE ($r = -0,27$ em Pearson) apresenta uma associação fraca negativa entre inadimplência e geração de empregos, que pode estar relacionada a características específicas de alguns projetos.

Um padrão emerge quando se comparam os métodos paramétricos e não-paramétricos. A correlação entre IUS e GE varia conforme o método: $r = 0,11$ em Pearson, $\rho = 0,50$ em Spearman e $\tau = 0,51$ em Kendall. Os coeficientes não-paramétricos indicam associação moderada positiva, consistente com a expectativa de que maior área cultivada gera mais oportunidades de trabalho. A diferença entre os métodos sugere a presença de relação monotônica que não é estritamente linear. A correlação entre EOA e IUS ($r = -0,23$ em Pearson) apresenta uma correlação negativa fraca, a qual o aumento do uso do solo, está associado a eficiência operacional da água. A ausência de correlações superiores $r = 0,90$ entre quaisquer dois indicadores confirma que cada variável captura uma dimensão distinta do desempenho dos PPIs, justificando sua manutenção conjunta na composição do índice global.

Esses resultados são parcialmente consistentes com as relações causais esperadas e corroboram achados da literatura internacional sobre desempenho de sistemas de irrigação (Molden et al., 1998; Malano e Burton, 2001).

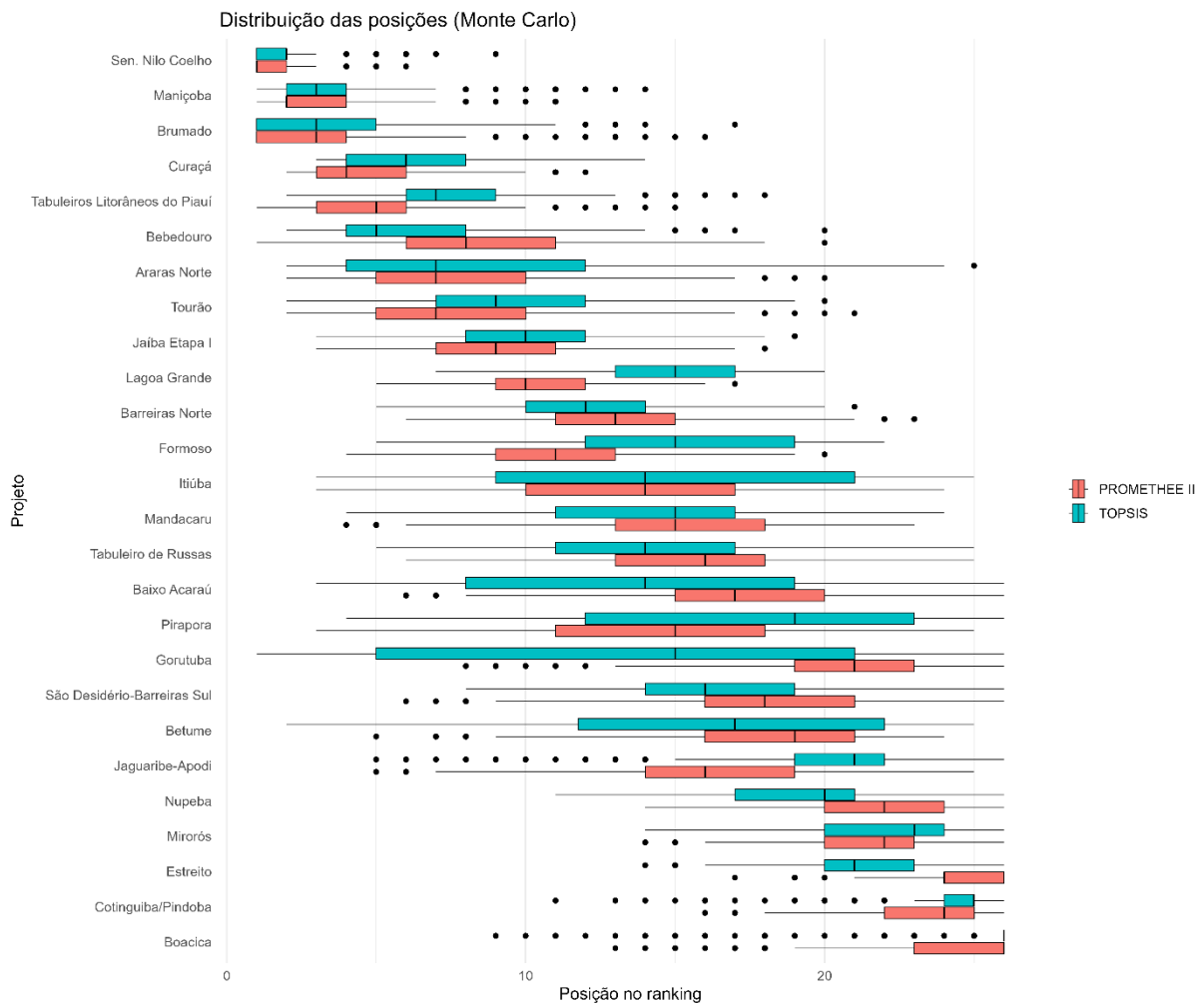
5.4 Desempenho Global pelos Métodos PROMETHEE II e TOPSIS Integrados à Simulação de Monte Carlo

A aplicação dos métodos PROMETHEE II e TOPSIS com simulação de Monte Carlo permitiu avaliar o desempenho global dos 26 PPIs considerando a incerteza na atribuição de pesos aos indicadores. Foram realizadas 1.000 simulações para cada método, gerando distribuições de rankings que refletem a robustez das classificações.

5.4.1 Distribuição dos Rankings por Simulação

A Figura 4 apresenta a distribuição das posições obtidas por cada projeto nas 1.000 simulações realizadas, comparando os resultados dos métodos PROMETHEE II e TOPSIS.

Figura 4 - Distribuição das posições no ranking obtidas pelos 26 projetos nas 1.000 simulações de Monte Carlo. Os boxplots em vermelho representam o método PROMETHEE II e os em ciano representam o método TOPSIS.



Fonte: O Autor (2025).

A análise dos boxplots revela diferenças importantes no comportamento dos dois métodos. Observa-se que alguns projetos apresentam classificações muito estáveis, com caixas estreitas, independentemente dos pesos atribuídos aos indicadores, enquanto outros mostram grande variabilidade, com caixas largas, indicando sensibilidade à ponderação dos critérios.

Entre os projetos com classificação estável e baixa variabilidade, Sen. Nilo Coelho, Maniçoba e Brumado mantêm-se consistentemente entre as primeiras posições em ambos os métodos, com amplitudes interquartílicas pequenas. Isto indica desempenho equilibrado em múltiplos indicadores, incluindo bom desempenho nos indicadores de custo (ISF e IAD). No extremo oposto, Cotinguiba/Pindoba e Boacica permanecem consistentemente nas últimas posições, sugerindo deficiências generalizadas em diversos aspectos da gestão.

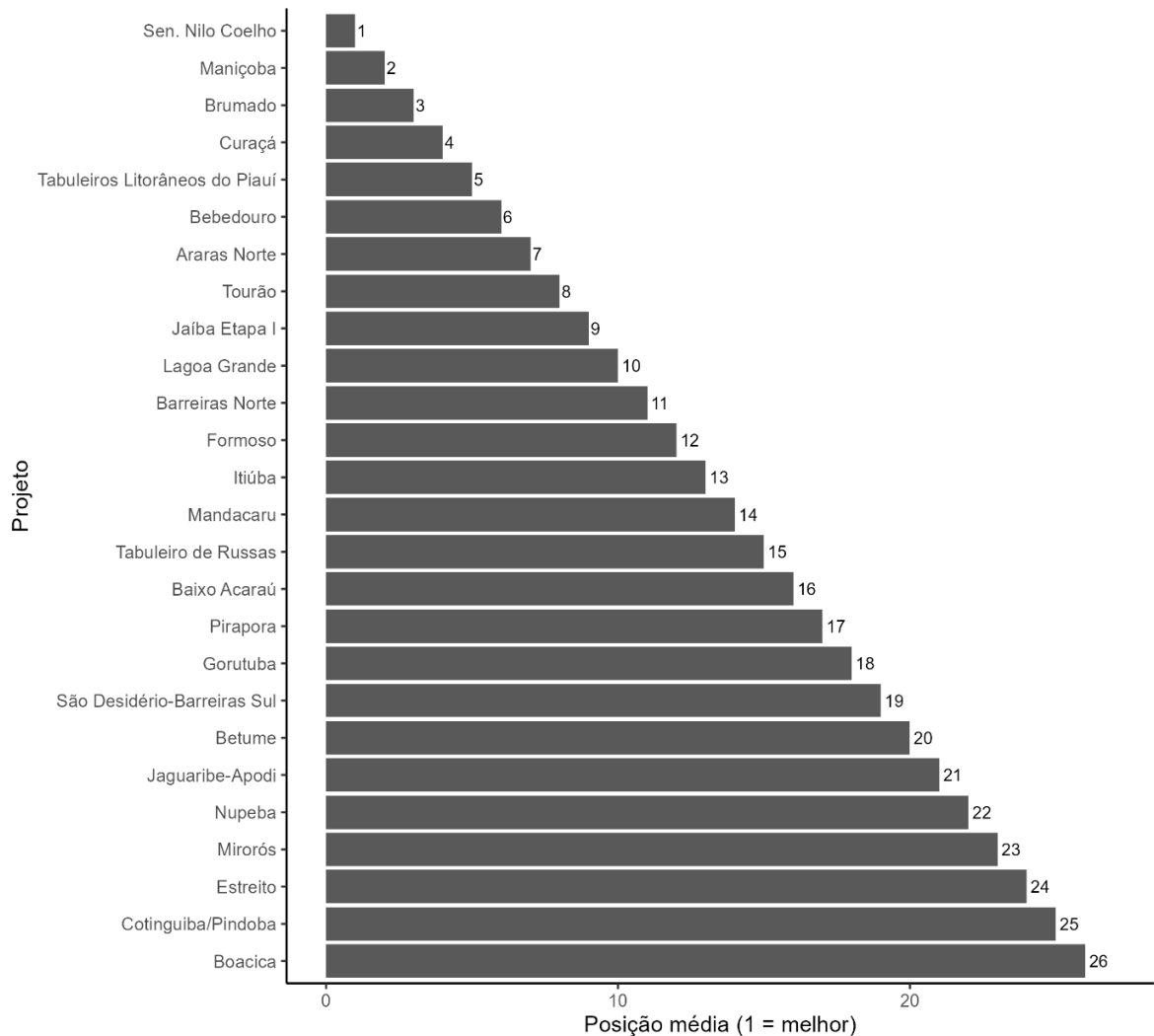
Por outro lado, projetos com classificação sensível apresentam alta variabilidade em seus rankings. Gorutuba (DP TOPSIS = 8,13), Baixo Acaraú (DP TOPSIS = 6,68) e Araras Norte (DP TOPSIS = 5,92) apresentam variações significativas de posição conforme mudam os pesos dos indicadores, indicando desempenho forte em alguns critérios específicos, mas não em todos. Esta sensibilidade é importante pois revela que a classificação destes projetos depende fortemente de quais dimensões são priorizadas na avaliação.

Quanto às diferenças entre os métodos aplicados, observa-se que o PROMETHEE II tende a produzir distribuições ligeiramente mais dispersas que o TOPSIS para alguns projetos, refletindo diferenças metodológicas na forma como cada método agrega as informações e lida com trade-offs entre critérios. Ambos os métodos, entretanto, convergem na identificação dos projetos de melhor e pior desempenho global.

5.4.2 *Rankings Médios Consolidados*

A Figura 5 apresenta o ranking médio conjunto, calculado pela média aritmética das posições médias obtidas nos métodos PROMETHEE II e TOPSIS nas 1.000 simulações.

Figura 5 - Ranking médio conjunto dos 26 PPIs, consolidando os resultados do PROMETHEE II e TOPSIS com Monte Carlo.



Fonte: O Autor (2025).

O ranking médio conjunto identifica Sen. Nilo Coelho (posição média 1,81) como o projeto de melhor desempenho global, seguido por Maniçoba (3,14) e Brumado (3,21). Estes três projetos destacam-se por apresentarem desempenho equilibrado em múltiplas dimensões: eficiência no uso da água, baixa insuficiência financeira, baixa inadimplência e geração de valor econômico.

No outro extremo, os projetos Boacica (24,94), Cotinguiba/Pindoba (23,91) e Estreito (22,84) apresentam os piores desempenhos médios, indicando necessidade de intervenções significativas em suas gestões.

É importante notar que Curaçá (5,45), Tabuleiros Litorâneos do Piauí (6,19) e Bebedouro (7,47) completam o grupo dos sete projetos com melhor desempenho médio, demonstrando práticas de gestão que podem servir de referência para os demais.

5.4.3 Índices de Desempenho por Método

A Tabela 1 apresenta os índices calculados pelos métodos PROMETHEE II e TOPSIS para cada projeto, juntamente com seus rankings médios.

Tabela 1 - Índices de desempenho e rankings médios dos 26 PPIs pelos métodos PROMETHEE II e TOPSIS com Monte Carlo.

Projeto	Fluxo Líquido Norm. (PROMETHEE II)	Rank Médio PROMETHEE- MC	Coef. Proximidade (TOPSIS)	Rank Médio TOPSIS- MC	Rank Médio Conjunto
Sen. Nilo Coelho	1,000	1,6	0,535	2,0	1,81
Maniçoba	0,957	2,8	0,443	3,5	3,14
Brumado	0,989	3,4	0,521	3,1	3,21
Curaçá	0,828	4,8	0,332	6,2	5,45
Tabuleiros Tab. Lit. Piauí	0,860	4,9	0,302	7,5	6,19
Bebedouro	0,634	8,5	0,326	6,4	7,47
Araras Norte	0,688	7,8	0,337	8,7	8,24
Tourão	0,667	8,1	0,220	9,7	8,94
Jaíba Etapa I	0,608	9,3	0,213	10,2	9,73
Lagoa Grande	0,559	10,4	0,207	14,7	12,58
Barreiras Norte	0,446	13,4	0,202	12,5	12,95

Projeto	Fluxo Líquido Norm. (PROMETHEE II)	Rank Médio PROMETHEE- MC	Coef. Proximidade (TOPSIS)	Rank Médio TOPSIS- MC	Rank Médio Conjunto
Formoso	0,559	11,2	0,231	15,2	13,22
Itiúba	0,516	13,4	0,216	14,7	14,06
Mandacaru	0,409	15,2	0,236	14,0	14,59
Tabuleiro de Russas	0,371	15,6	0,183	14,2	14,90
Baixo Acaráú	0,387	17,0	0,248	13,7	15,31
Pirapora	0,430	14,5	0,232	17,4	15,92
Gorutuba	0,210	20,4	0,360	13,2	16,76
São Desidério- Barreiras Sul	0,323	18,1	0,205	16,6	17,37
Betume	0,290	18,5	0,207	16,4	17,44
Jaguaribe- Apodi	0,376	16,0	0,215	19,7	17,82
Nupeba	0,129	22,1	0,177	19,1	20,59
Mirorós	0,151	21,4	0,176	21,8	21,63
Estreito	0,016	24,6	0,147	21,1	22,84
Cotinguiba/ Pindoba	0,038	23,6	0,115	24,2	23,91
Boacica	0,000	24,5	0,120	25,4	24,94

Nota: O Fluxo Líquido Normalizado (Φ) do PROMETHEE II varia de 0 a 1 nesta normalização (valores mais altos = melhor desempenho). O Coeficiente de Proximidade (C) do TOPSIS varia de 0 a 1 (valores mais próximos de 1 = melhor desempenho). Os rankings médios foram calculados a partir de 1.000 simulações de Monte Carlo com pesos aleatórios.

Fonte: O Autor (2025).

A interpretação dos índices calculados requer compreensão das especificidades de cada método. No método PROMETHEE II, o índice representa o fluxo líquido normalizado (Φ), que expressa a diferença entre o fluxo positivo (preferências do projeto sobre os demais) e o fluxo negativo (preferências dos demais sobre o projeto). Valores positivos e elevados indicam

dominância do projeto em relação aos demais. Já no método TOPSIS, o Coeficiente de Proximidade (C^*) representa a proximidade relativa à solução ideal positiva. Valores mais próximos de 1 indicam que o projeto está mais próximo do ideal (maximiza benefícios e minimiza custos, incluindo ISF e IAD) e mais distante do anti-ideal.

A convergência observada entre os dois métodos na identificação dos melhores e piores projetos reforça a robustez da avaliação. A correlação de Spearman entre os rankings dos dois métodos é de $\rho = 0,7778$, indicando forte concordância. As diferenças observadas em posições intermediárias refletem as particularidades metodológicas de cada abordagem, mas não comprometem a utilidade dos resultados para fins comparativos e de apoio à decisão.

5.5 Desempenho Global pelo Método TOPSIS-Entropia

O método TOPSIS-Entropia difere da aplicação com Monte Carlo por utilizar pesos objetivos derivados da variabilidade estatística dos próprios dados, eliminando a necessidade de atribuição subjetiva ou aleatória de pesos. Este método atribui maior importância aos indicadores com maior poder discriminatório (maior variância) entre os projetos.

5.5.1 Pesos Calculados pelo Método da Entropia

A Tabela 2 compara os pesos médios utilizados nas simulações de Monte Carlo com os pesos calculados objetivamente pelo método da entropia.

Tabela 2 - Comparação entre pesos médios de Monte Carlo e pesos calculados por entropia.

Indicador	Peso Médio	Peso	Interpretação
	Monte Carlo	Entropia	
RA - Rentabilidade da Água	0,1429	0,1839	Maior poder discriminatório
EOA - Eficiência Operacional	0,1429	0,0690	Menor variabilidade entre projetos
ISF - Insuficiência Financeira	0,1429	0,1020	Variabilidade moderada
IAD - Inadimplência	0,1429	0,0270	Comportamento homogêneo

Indicador	Peso Médio Monte Carlo	Peso Entropia	Interpretação
IUS - Índice de Uso do Solo	0,1429	0,1245	Variabilidade moderada
RAR - Rentabilidade da Área	0,1429	0,2222	Alto poder discriminatório
GE - Geração de Empregos	0,1429	0,2715	Maior variabilidade observada
TOTAL	1,00	1,00	-

Fonte: O Autor (2025).

A análise dos pesos revela diferenças importantes entre as duas abordagens. O indicador GE (Geração de Empregos) recebeu o maior peso pelo método da entropia (0,2715), em contraste com 0,1429 nas simulações de Monte Carlo. Isto indica que este indicador apresenta a maior variabilidade entre os projetos, tornando-se um critério altamente discriminatório. No extremo oposto, IAD (Inadimplência) recebeu o menor peso (0,0270) devido à sua relativa homogeneidade entre os projetos. A maioria dos projetos apresenta níveis de inadimplência similares e relativamente baixos, reduzindo o poder discriminatório deste indicador.

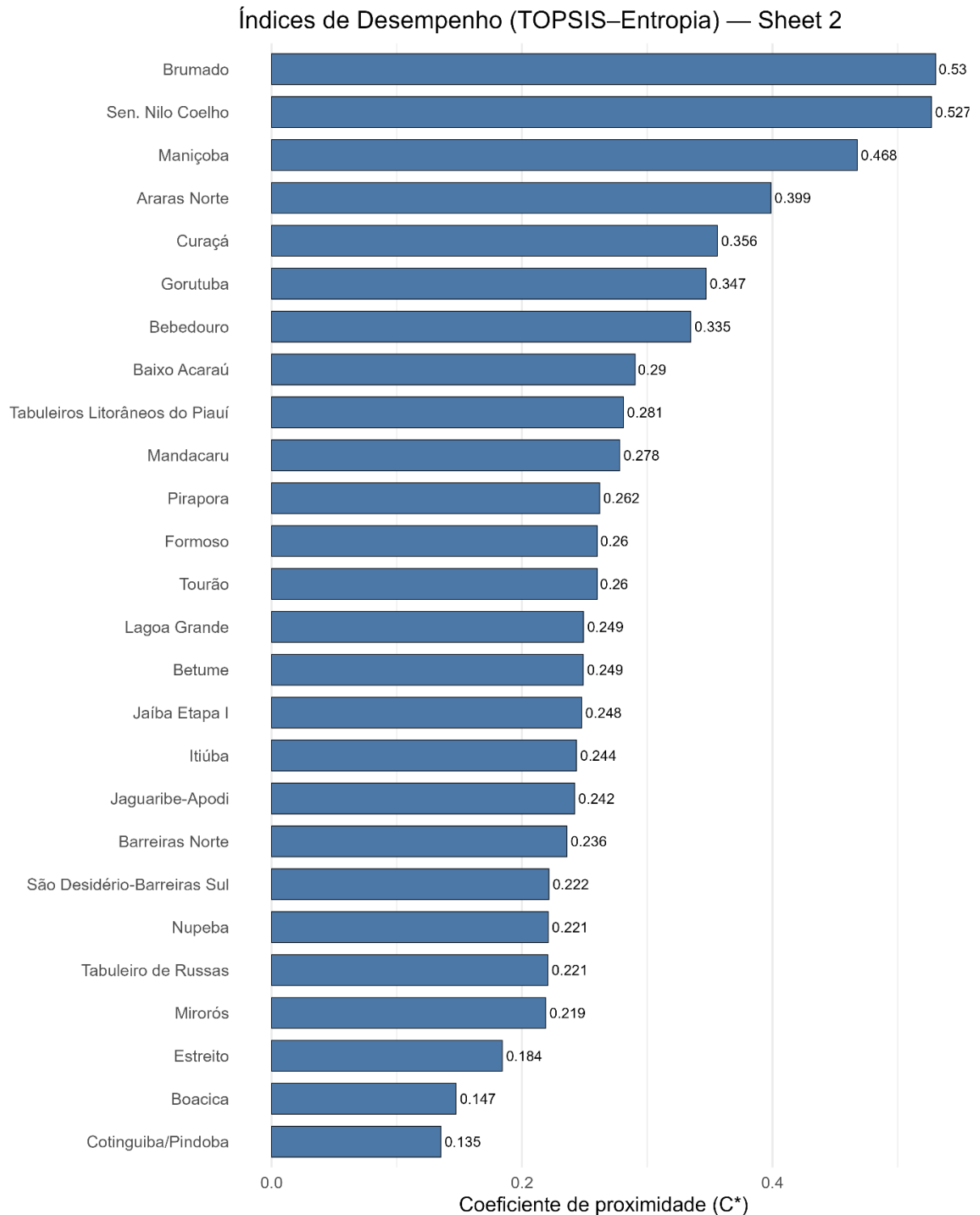
Os demais indicadores apresentam pesos intermediários com interpretações específicas. ISF (Insuficiência Financeira) recebeu peso de 0,1020, refletindo sua variabilidade moderada entre os projetos. Embora haja diferenças entre os projetos quanto à insuficiência financeira, esta variação é menor do que a observada em indicadores como GE e RAR. O indicador RAR (Rentabilidade da Área) mantém peso elevado em ambas as abordagens (0,2222 na entropia), refletindo tanto sua importância conceitual quanto sua alta variabilidade. Por sua vez, EOA (Eficiência Operacional) recebeu peso relativamente baixo (0,0690) pelo método da entropia, sugerindo que a maioria dos projetos apresenta desempenhos similares neste aspecto.

Esta diferença de pesos explica parcialmente as variações observadas nos rankings entre os métodos, especialmente para projetos que se destacam em indicadores específicos.

5.5.2 Índices de Desempenho TOPSIS-Entropia

A Figura 6 apresenta os Coeficientes de Proximidade calculados pelo método TOPSIS-Entropia para os 26 projetos.

Figura 6 - Índices de desempenho (Coeficientes de Proximidade) calculados pelo método TOPSIS-Entropia.



Fonte: O Autor (2025).

O ranking resultante do método TOPSIS-Entropia apresenta Brumado ($C^* = 0,530$) na primeira posição, seguido por Sen. Nilo Coelho ($C^* = 0,527$) e Maniçoba ($C^* = 0,468$). Esta

inversão nas duas primeiras posições em relação ao ranking conjunto PROMETHEE/TOPSIS-MC é significativa e merece análise detalhada.

Brumado ascende à primeira posição devido ao seu excelente desempenho nos indicadores que receberam maiores pesos pela entropia, particularmente GE (geração de empregos) e baixos valores de ISF (insuficiência financeira), indicando boa sustentabilidade econômica do projeto. O projeto demonstra um modelo de gestão equilibrado, combinando sustentabilidade financeira com impacto socioeconômico significativo.

Sen. Nilo Coelho mantém-se entre os dois primeiros em todos os métodos, confirmando a excelência e robustez de sua gestão. Seu desempenho excepcional em RA e RAR é ligeiramente contrabalançado pelo menor peso relativo destes indicadores no método da entropia.

Araras Norte apresenta melhora significativa, subindo da 8ª posição (ranking conjunto) para a 4ª posição no TOPSIS-Entropia ($C^* = 0,399$), beneficiando-se da nova ponderação.

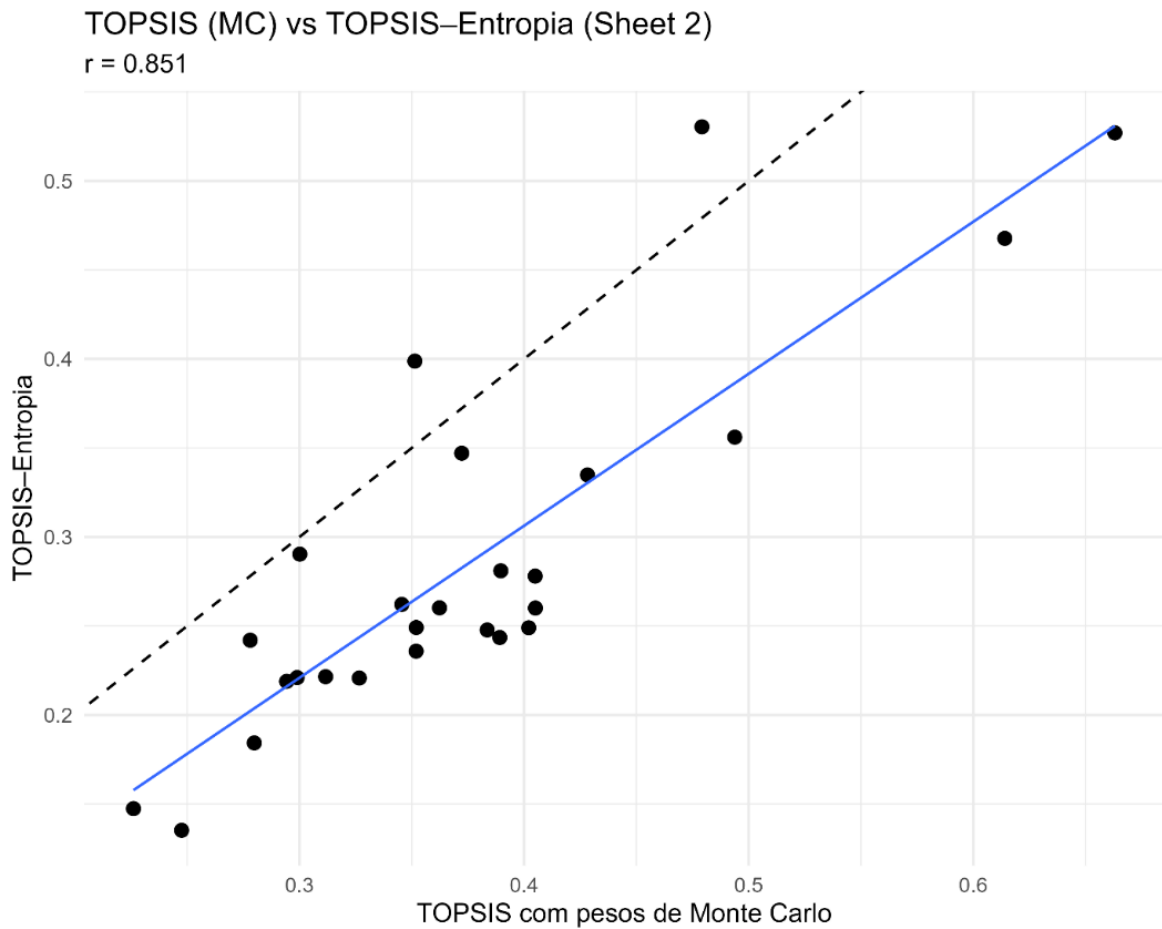
Por outro lado, Tabuleiros Litorâneos do Piauí cai da 5ª para a 9ª posição, indicando que o desempenho deste projeto é mais sensível à forma de ponderação dos critérios.

Os piores desempenhos continuam sendo Cotinguiba/Pindoba ($C^* = 0,135$), Boacica ($C^* = 0,147$) e Estreito ($C^* = 0,184$), confirmando a consistência do diagnóstico de deficiências graves nestes projetos, independentemente do método utilizado.

5.5.3 Comparação entre TOPSIS com Monte Carlo e TOPSIS-Entropia

A Figura 7 apresenta o gráfico de dispersão comparando os Coeficientes de Proximidade obtidos pelo TOPSIS com Monte Carlo (média das 1.000 simulações) e pelo TOPSIS-Entropia.

Figura 7 - Comparação entre os Coeficientes de Proximidade obtidos pelo TOPSIS com Monte Carlo e pelo TOPSIS-Entropia ($r = 0,851$).



Fonte: O Autor (2025).

A correlação de Pearson de $r = 0,851$ entre os dois métodos indica forte concordância geral nos resultados, apesar das diferenças metodológicas. A linha de tendência (regressão linear) apresenta inclinação positiva e passa próxima à diagonal de identidade, evidenciando que projetos bem classificados por um método tendem a ser bem classificados pelo outro.

Alguns projetos, entretanto, afastam-se da linha de identidade. Brumado e Araras Norte posicionam-se acima da linha de identidade (TOPSIS-Entropia > TOPSIS-MC), com ganhos nos coeficientes de proximidade de 0,479 para 0,530 e de 0,351 para 0,399, respectivamente, indicando que os pesos da entropia favorecem seu desempenho. Gorutuba, Baixo Acaraú e Tourão posicionam-se abaixo da linha, com coeficientes levemente menores na Entropia, embora Gorutuba e Baixo Acaraú tenham melhorado expressivamente suas posições no ranking (Gorutuba: 12^a → 6^a; Baixo Acaraú: 20^a → 8^a), reflexo de quedas proporcionalmente maiores

nos demais projetos Tabuleiros Litorâneos do Piauí manteve exatamente a mesma posição nos dois métodos (9^a), evidenciando estabilidade relativa frente à mudança de ponderação.

5.6 Comparação Integrada entre os Três Métodos

A comparação sistemática entre os três métodos aplicados (PROMETHEE II-MC, TOPSIS-MC e TOPSIS-Entropia) permitiu avaliar a convergência dos resultados e identificar os projetos cujo desempenho é reconhecido consistentemente, independentemente da abordagem metodológica.

5.6.1 Rankings Consolidados

A Tabela 3 apresenta os rankings obtidos pelos três métodos para cada um dos 26 PPIs, permitindo comparação direta entre as posições médias do PROMETHEE II-MC, do TOPSIS-MC e da posição determinística do TOPSIS-Entropia, bem como a amplitude máxima de variação entre os métodos.

Tabela 3 - Comparação dos rankings obtidos pelos três métodos de análise multicritério.

Projeto	Rank PROMETHEE- MC	Rank TOPSIS- MC	Rank TOPSIS- Entropia	Variação Máxima
Sen. Nilo Coelho	1,6	2,0	2	0,4
Maniçoba	2,8	3,5	3	0,7
Brumado	3,4	3,1	1	2,4
Curaçá	4,8	6,2	5	1,4
Tabuleiros Litorâneos do Piauí	4,9	7,5	9	4,1
Araras Norte	7,8	8,7	4	4,7
Bebedouro	8,5	6,4	7	2,1
Tourão	8,1	9,7	13	4,9
Jaíba Etapa I	9,3	10,2	16	6,7
Lagoa Grande	10,4	14,7	14	4,3
Formoso	11,2	15,2	12	4,0

Projeto	Rank PROMETHEE- MC	Rank TOPSIS- MC	Rank TOPSIS- Entropia	Varição Máxima
Barreiras Norte	13,4	12,5	19	6,5
Itiúba	13,4	14,7	17	3,6
Pirapora	14,5	17,4	11	6,4
Mandacaru	15,2	14,0	10	5,2
Tabuleiro de Russas	15,6	14,2	22	7,8
Jaguaribe-Apodi	16,0	19,7	18	3,7
Baixo Acaraú	17,0	13,7	8	9,0
São Desidério- Barreiras Sul	18,1	16,6	20	3,4
Betume	18,5	16,4	15	3,5
Gorutuba	20,4	13,2	6	14,4
Mirrorós	21,4	21,8	23	1,6
Nupeba	22,1	19,1	21	3,0
Cotinguiba/Pindoba	23,6	24,2	26	2,4
Boacica	24,5	25,4	25	0,9
Estreito	24,6	21,1	24	3,5

Nota: Rank PROMETHEE-MC e Rank TOPSIS-MC representam as posições médias obtidas em 1.000 simulações de Monte Carlo. Rank TOPSIS-Entropia representa a posição obtida com pesos calculados objetivamente pelo método da entropia. A Varição Máxima indica a amplitude entre a melhor e a pior posição obtida pelos três métodos.

Fonte: O Autor (2025).

A Figura 8 apresenta o heatmap comparativo das posições obtidas pelos 26 projetos nos três métodos, permitindo identificação visual imediata dos padrões de convergência e divergência entre as abordagens. A escala de cores varia de verde (melhores posições) a vermelho (piores posições).

Figura 8 - Heatmap comparativo das posições obtidas pelos 26 projetos nos três métodos. A escala de cores varia de verde (melhores posições) a vermelho (piores posições).



Fonte: O Autor (2025).

A análise do heatmap permite identificar visualmente três grupos distintos de projetos segundo a consistência de seu desempenho ao longo dos três métodos aplicados.

O primeiro grupo, representado pelas tonalidades verdes, reúne os projetos de desempenho consistentemente superior: Sen. Nilo Coelho, Maniçoba, Brumado e Curaçá mantêm-se entre as primeiras posições em todos os três métodos, com variações máximas inferiores a 3 posições entre as abordagens. Essa estabilidade indica que o bom desempenho desses projetos independe da forma de ponderação dos critérios, configurando-os como benchmarks de excelência na gestão de serviços hídricos de irrigação e referências prioritárias para estudos de boas práticas replicáveis.

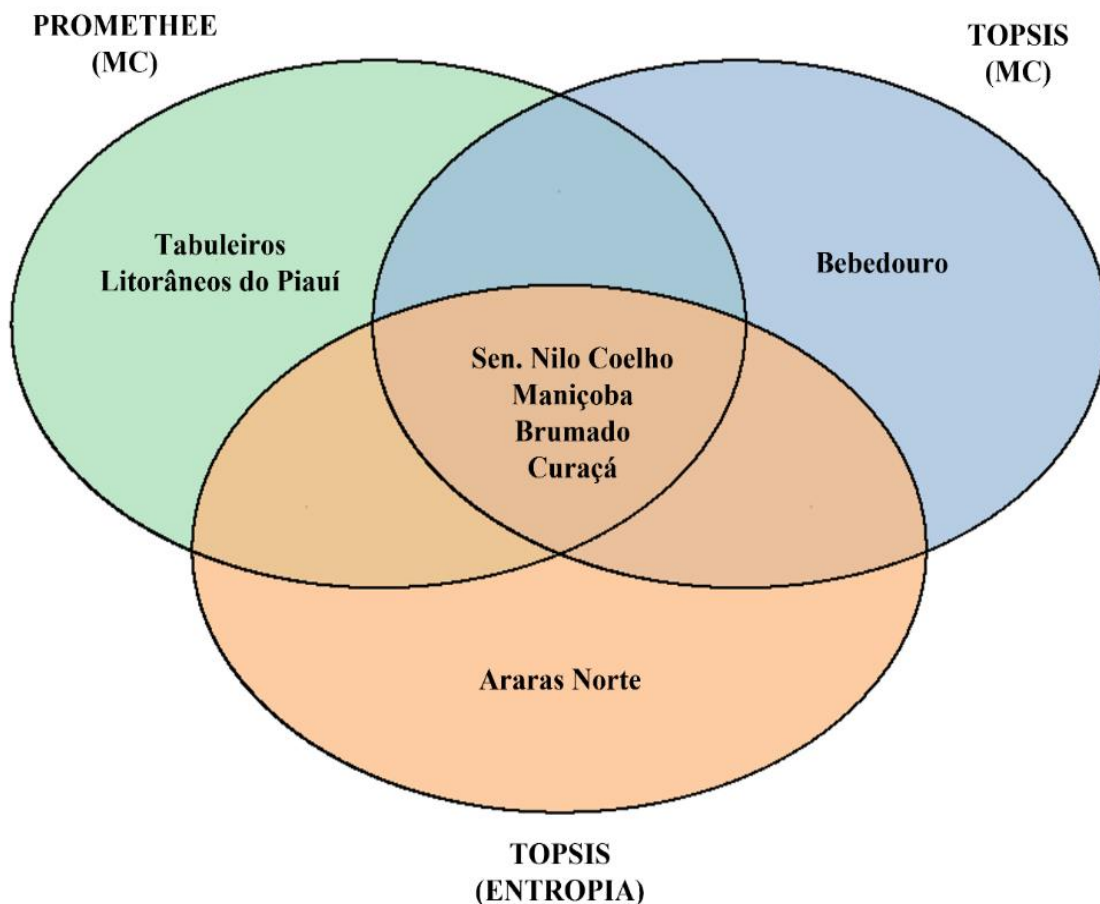
O segundo grupo, identificado pelas tonalidades amarelas e alaranjadas, compreende projetos de desempenho intermediário com variabilidade metodológica mais pronunciada. Araras Norte, Gorutuba, Bebedouro, Tourão e Jaíba Etapa I apresentam classificações intermediárias com oscilações mais expressivas entre os métodos, evidenciando que seu posicionamento relativo é sensível à forma como os critérios são ponderados. Os casos de maior discordância são Gorutuba, com amplitude de 14,4 posições entre o PROMETHEE II-MC (20,4^a) e o TOPSIS-Entropia (6^a); Baixo Acaraú, com diferença de 9,0 posições (17^a no PROMETHEE II-MC e 8^a no TOPSIS-Entropia); e Tabuleiro de Russas, com amplitude de 7,8 posições (15,6^a no PROMETHEE II-MC e 22^a no TOPSIS-Entropia). Esses resultados indicam que tais projetos apresentam desempenho destacado em alguns indicadores específicos, mas não de forma equilibrada ao longo de todos os critérios avaliados.

O terceiro grupo, representado pelas tonalidades vermelhas, reúne os projetos de desempenho consistentemente inferior. Cotinguiba/Pindoba, Boacica, Estreito e Mirorós mantêm-se entre as últimas posições em todos os métodos, o que indica a presença de deficiências estruturais que transcendem as escolhas metodológicas e apontam para necessidades de intervenção independentemente da abordagem de avaliação utilizada.

5.6.2 Análise de Interseção: Projetos no Top 5

A Figura 9 apresenta o diagrama de Venn mostrando quais projetos aparecem no top 5 de cada método e as interseções entre eles.

Figura 9 - Diagrama de Venn mostrando a interseção dos projetos que aparecem no top 5 de cada método.



Fonte: O Autor (2025).

A análise de interseção revela que quatro projetos (Sen. Nilo Coelho, Maniçoba, Brumado e Curaçá) aparecem simultaneamente no top 5 dos três métodos, constituindo um núcleo de consenso robusto cujo desempenho superior se confirma independentemente da metodologia de avaliação ou da forma de ponderação dos critérios. Esse núcleo representa os projetos de excelência indiscutível da amostra e deve ser objeto prioritário de estudos de caso

aprofundados para identificação de melhores práticas replicáveis no âmbito dos serviços hídricos de irrigação.

Além desse núcleo comum, cada método identificou um projeto exclusivo em seu top 5, refletindo as particularidades de cada abordagem. O PROMETHEE II-MC destacou Tabuleiros Litorâneos do Piauí, que alcançou a 5ª posição média (rank médio = 4,9), projeto cujo desempenho é bem capturado pela lógica de sobreclassificação par a par característica desse método. O TOPSIS-MC, por sua vez, posicionou Bebedouro em 5º lugar (rank médio = 6,40), refletindo seu bom desempenho nos indicadores de rentabilidade e uso do solo, dimensões bem capturadas pela ponderação uniforme utilizada nas simulações de Monte Carlo, mas que não se traduz em posicionamento equivalente nos demais métodos. Já o TOPSIS-Entropia destacou Araras Norte na 4ª posição, projeto que se beneficia da maior peso atribuído pela entropia aos indicadores de maior variabilidade, nos quais seu desempenho é comparativamente superior.

Em conjunto, essa análise demonstra que, embora exista um núcleo de consenso forte formado pelos quatro projetos de excelência reconhecidos por todos os métodos, as abordagens divergem na classificação de projetos de desempenho intermediário-superior, o que reflete diferenças estruturais na forma como cada método lida com os trade-offs entre critérios e incorpora as informações disponíveis sobre os projetos avaliados.

6 DISCUSSÃO

6.1 Contextualização e lacuna de pesquisa abordada

A gestão eficiente dos serviços hídricos de irrigação exige instrumentos capazes de integrar, de forma sistemática e comparável, as múltiplas dimensões do desempenho operacional, financeiro e socioeconômico dos projetos. Nesse contexto, a avaliação de Projetos Públicos de Irrigação (PPIs) no Brasil tem avançado na aplicação de indicadores individuais como eficiência operacional da água, rentabilidade e inadimplência, porém permanecia ausente uma metodologia que integrasse esses indicadores em índices globais capazes de subsidiar o benchmarking entre projetos e a regulação por desempenho. Esse hiato metodológico, amplamente reconhecido na literatura nacional (Fragoso e Pizaia, 2023) e internacional (Higginbottom et al., 2021; Ahmad et al., 2024), constituiu a motivação central do presente estudo.

A relevância regulatória dessa lacuna é reforçada pelo arcabouço normativo vigente. A Lei nº 12.787/2013, que institui a Política Nacional de Irrigação, determina que os PPIs sejam avaliados e classificados segundo seus resultados sociais e econômicos, inclusive para fins de emancipação (Brasil, 2013, art. 10, II). De forma complementar, a Lei nº 9.984/2000 atribui à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) a competência para regular e fiscalizar a prestação dos serviços públicos de irrigação em regime de concessão, incluindo a fixação de padrões de eficiência e a gestão dos contratos (Brasil, 2000, art. 4º, XIX). A Resolução ANA nº 231/2024 consolidou esse mandato ao estabelecer que a avaliação dos serviços de irrigação concedidos deve apoiar-se em "indicadores regulamentados pela ANA", tipificando como infração qualquer prejuízo a essa avaliação (ANA, 2024b). Diante desse cenário normativo, a construção de índices globais de desempenho para PPIs não é apenas uma contribuição acadêmica, mas uma necessidade técnica para a operacionalização plena dos comandos legais existentes.

O presente estudo respondeu a essa demanda ao propor e validar uma metodologia de construção de índices globais de desempenho mediante análise multicritério, aplicada a 26 PPIs administrados pela CODEVASF e pelo DNOCS, utilizando sete indicadores já coletados rotineiramente pelas instituições gestoras. A seguir, os resultados obtidos são interpretados à luz da literatura pertinente, com ênfase nos padrões de convergência entre métodos, nas implicações dos pesos calculados pela entropia, na correlação contraintuitiva entre eficiência

operacional e sustentabilidade financeira, e nas potencialidades regulatórias dos índices propostos.

6.2 Síntese dos principais achados

O achado central do presente estudo é a demonstração de que métodos de análise multicritério, como PROMETHEE II, TOPSIS com simulação de Monte Carlo e TOPSIS-Entropia, convergem de forma robusta na identificação dos PPIs de melhor e pior desempenho global, mesmo sob diferentes abordagens de ponderação. Sen. Nilo Coelho, Maniçoba, Brumado e Curaçá ocuparam consistentemente as primeiras posições nos três métodos, configurando um núcleo de consenso cujo desempenho superior se confirma independentemente da metodologia aplicada. No polo oposto, Cotinguiba/Pindoba, Boacica e Estreito sistematicamente apresentaram os piores desempenhos, evidenciando deficiências estruturais que transcendem as escolhas metodológicas.

A correlação de Pearson de $r = 0,851$ entre os métodos TOPSIS com Monte Carlo e TOPSIS-Entropia indicou elevada concordância geral, ainda que projetos em posições intermediárias tenham demonstrado sensibilidade à forma de ponderação dos critérios. O projeto Gorutuba exemplificou de forma mais marcante essa variabilidade, oscilando da 20ª posição pelo PROMETHEE-MC até a 6ª posição no TOPSIS-Entropia, amplitude de 14,4 posições que revelou desempenho desbalanceado entre critérios. A análise dos pesos calculados pelo método da entropia revelou que o indicador Geração de Empregos (GE) recebeu o maior peso (0,2715), em razão da alta variabilidade entre projetos nessa dimensão, enquanto Inadimplência (IAD) recebeu o menor peso (0,0270), reflexo da relativa homogeneidade da amostra nessa variável. Ademais, a simulação de Monte Carlo com 1.000 iterações demonstrou que a maioria dos projetos apresenta classificações estáveis, com amplitudes interquartílicas estreitas para os melhores e piores projetos, contrastando com variações mais expressivas em posições intermediárias.

6.3 Interpretação dos resultados e comparação com a literatura

6.3.1 *Convergência metodológica e o comportamento dos projetos extremos*

A convergência dos três métodos na identificação dos projetos de excelência e dos projetos críticos é consistente com a literatura internacional sobre análise multicritério em sistemas de recursos hídricos. Behzadian et al. (2012), em revisão abrangente de 266 aplicações do TOPSIS, documentaram que o método demonstra boa capacidade de identificar as melhores e piores alternativas de forma coerente com outros métodos de apoio à decisão. De modo análogo, Vargas et al. (2023), em estudo sobre gestão integrada de água e meio ambiente, reportaram correlações de Pearson entre AHP e TOPSIS de 0,951 e entre AHP e PROMETHEE de 0,910, indicando alta convergência nos padrões globais de preferência. Esses achados sustentam a interpretação de que o núcleo de consenso identificado na presente pesquisa (Sen. Nilo Coelho, Maniçoba, Brumado e Curaçá) reflete uma superioridade de desempenho robusta e metodologicamente sólida, e não um artefato de escolhas algorítmicas específicas.

A estabilidade classificatória observada para os projetos extremos encontra respaldo direto nos estudos de robustez via simulação de Monte Carlo em MCDM. Vinogradova et al. (2021) e Abuabara et al. (2025) demonstraram que alternativas claramente superiores ou inferiores mantêm suas posições em grande parte das simulações, mesmo sob variação aleatória nos pesos, ao passo que alternativas em posições intermediárias exibem alta variabilidade. É importante destacar, conforme Campello et al. (2024), que a leitura adequada dos resultados de Monte Carlo deve ser probabilística: alternativas com amplitudes interquartílicas estreitas justificam decisões firmes, enquanto aquelas com rankings dispersos devem ser tratadas como grupos de desempenho equivalente ou analisadas por cenários adicionais. Aplicando essa perspectiva ao presente estudo, os projetos Sen. Nilo Coelho e Maniçoba, com amplitudes interquartílicas estreitas em ambos os métodos, constituem referências indiscutíveis de excelência para o setor, configurando fronteiras de benchmark replicáveis no âmbito dos serviços públicos de irrigação no Brasil.

6.3.2 *Divergências em posições intermediárias: o caso Gorutuba*

A divergência metodológica observada para projetos em posições intermediárias, com destaque para Gorutuba (amplitude de 14,4 posições), é fenômeno amplamente documentado na literatura e decorre de diferenças estruturais entre TOPSIS e PROMETHEE. Şahin e Özkaya

(2023), em aplicações a modelos de roteamento de cheias, atribuíram essas diferenças aos distintos tratamentos das relações entre critérios e às estratégias de agregação de cada método: enquanto o TOPSIS é um método de distância ao ideal e pode supervalorizar desempenhos elevados em poucos critérios na presença de valores extremos na matriz de decisão, o PROMETHEE opera por comparações par a par e mostra maior sensibilidade a mudanças nos parâmetros das funções de preferência (Gülmez, 2025; Podoplelova, 2023). Em estudo de ranqueamento de usinas hidrelétricas por sustentabilidade, Shaktawat e Vadhera (2021) reportaram que TOPSIS, PROMETHEE II e ELECTRE III convergem nas alternativas extremas, mas divergem em várias posições intermediárias, atribuindo essa divergência precisamente às diferenças nas técnicas de cálculo e nos tratamentos dos trade-offs entre critérios.

Aplicando essa perspectiva ao presente estudo, a alta sensibilidade de Gorutuba revela um sistema com desempenho forte em dimensões específicas, notadamente Rentabilidade da Água (RA) e Rentabilidade da Área (RAR), onde se destaca como outlier superior, mas sem equilíbrio em critérios como Eficiência Operacional da Água (EOA) e Insuficiência Financeira (ISF). Essa assimetria de desempenho entre critérios é justamente o tipo de situação em que TOPSIS e PROMETHEE tendem a divergir (Şahin e Özkaya, 2023). Diante disso, recomenda-se que a interpretação de projetos com rankings dispersos seja conduzida por análise qualitativa complementar dos critérios específicos onde o desempenho é mais instável, em vez de se apoiar em uma posição ordinal única. Do ponto de vista regulatório, esses casos recomendam análise caso a caso antes da adoção de decisões importantes (Lima et al., 2021; Seyoum et al., 2025).

6.3.3 Pesos calculados pela entropia: discriminação informacional e implicações gerenciais

A análise dos pesos calculados pelo método da entropia merece interpretação cuidadosa, pois pesos de entropia refletem a capacidade de discriminação informacional de cada indicador, ou seja, sua variabilidade relativa na amostra, e não necessariamente sua prioridade gerencial ou regulatória (Chen, 2021). Conforme demonstrado por Zhu et al. (2021), o método atribui maior peso a indicadores com maior dispersão entre as unidades avaliadas, pois esses carregam mais informação para distinguir alternativas; indicadores quase constantes, mesmo que estrategicamente relevantes, tendem a pesos próximos de zero.

No presente estudo, o indicador Geração de Empregos (GE) recebeu o maior peso pela entropia (0,2715), resultado coerente com sua alta variabilidade entre projetos, amplitude de

1,18 a 19,93 empregos/ha. Esse padrão é análogo ao reportado por Kedir et al. (2022), que, em estudo sobre o nexo água-energia-cultivo em sistema de cana-de-açúcar na Etiópia, identificaram indicadores de produtividade econômica como os de maior peso por entropia, por concentrarem quase 50% da variação total do sistema. Em contraste, o baixo peso de Inadimplência (IAD = 0,0270) reflete a homogeneidade da maioria dos projetos nessa variável, com mediana de 5,5% e $Q1 = 0\%$, indicando que esse indicador possui baixo poder discriminatório entre os PPIs analisados, não que sua importância gerencial seja irrelevante.

Essa distinção entre discriminação informacional e prioridade gerencial tem implicações diretas para o uso regulatório dos índices. Conforme apontado por Qian et al. (2025) e Wu et al. (2022), para evitar que indicadores conceitualmente críticos, como inadimplência, diretamente associada à sustentabilidade tarifária, sejam subestimados pela entropia pura, a literatura recomenda a combinação com pesos subjetivos derivados de especialistas ou de frameworks normativos. Nesse sentido, o presente estudo adotou corretamente uma abordagem multimétodo, complementando a ponderação objetiva da entropia com a análise de sensibilidade via Monte Carlo com distribuição uniforme, o que permitiu identificar tanto as contribuições quanto as limitações de cada esquema de ponderação. Essa complementaridade metodológica representa um avanço em relação a estudos anteriores que utilizaram apenas um critério de ponderação (Fragoso e Pizaia, 2023; Muema et al., 2018).

6.3.4 Geração de Empregos como dimensão diferenciadora do desempenho

O indicador Geração de Empregos (GE) exerceu papel determinante na diferenciação dos projetos, apresentando a maior heterogeneidade da amostra: amplitude de 1,18 empregos/ha (Nupeba) a 19,93 empregos/ha (Brumado), média de 4,23 empregos/ha e coeficiente de variação de aproximadamente 97%. Essa variabilidade explica por que o peso de GE saltou de 0,10 nas simulações de Monte Carlo para 0,2715 no método da entropia, tornando-se o critério mais influente na composição do índice TOPSIS-Entropia. Como consequência direta, Brumado ascendeu da 4ª posição no TOPSIS-MC para a 1ª no TOPSIS-Entropia, e Araras Norte (GE = 12,78 empregos/ha) subiu da 16ª para a 4ª posição, ao passo que projetos com GE reduzida, como Tourão (2,86 empregos/ha), recuaram da 6ª para a 13ª posição.

Do ponto de vista conceitual, GE captura de forma mais direta a missão social dos PPIs, concebidos para promover desenvolvimento regional, geração de emprego e renda e fixação do homem no campo (Brasil, 2013). A correlação entre IUS e GE, fraca em Pearson ($r = 0,11$) mas moderada em Spearman ($\rho = 0,50$) e Kendall ($\tau = 0,51$), confirma que maior intensidade de uso

do solo está associada a maior geração de empregos por relação monotônica, coerente com a dependência direta entre área cultivada e número de postos de trabalho. Já a correlação entre EOA e GE ($r = 0,46$ em Pearson, mas $\rho = 0,09$ em Spearman) indica que a aparente associação é mediada por observações extremas, não constituindo padrão generalizado. Esses resultados convergem com Morais et al. (2021), que demonstraram ganhos de eficiência técnica associados à irrigação especialmente em pequenas propriedades, e com Guedes et al. (2023), que documentaram impactos de inclusão social no Projeto Sen. Nilo Coelho, reforçando que GE captura externalidades positivas além da produtividade econômica direta.

A constatação de que GE varia quase dezessete vezes entre os projetos extremos sinaliza que a dimensão social dos PPIs apresenta desigualdades tão expressivas quanto as dimensões financeira e operacional. Projetos como Nupeba (1,18 empregos/ha), Estreito (1,48 empregos/ha) e Mirorós (1,68 empregos/ha), todos no terço inferior dos três rankings, combinam baixa geração de empregos com deficiências em outros indicadores, configurando vulnerabilidade multidimensional que demanda intervenção prioritária.

6.3.5 Benchmarks identificados: alinhamento com a literatura internacional

Os quatro projetos de excelência identificados pelo presente estudo (Sen. Nilo Coelho, Maniçoba, Brumado e Curaçá) situam-se no grupo de esquemas irrigados de alto desempenho amplamente documentados na literatura comparativa internacional, caracterizando-se por combinarem eficiência técnica com sustentabilidade financeira e impacto socioeconômico expressivo. Fragoso e Pizaia (2023), em avaliação da eficiência técnica de projetos federais de irrigação no Brasil mediante Análise Envoltória de Dados, demonstraram que menos da metade dos projetos atinge a fronteira de eficiência, com fatores estruturais, de gestão e de escala explicando as diferenças de desempenho, contexto que torna ainda mais relevante a identificação dos projetos na fronteira de excelência.

Em perspectiva internacional, Higginbottom et al. (2021), em estudo de 79 projetos de grande escala na África Subsaariana, reportaram que a mediana da área efetivamente irrigada era de apenas 16% da área planejada, com 20% dos esquemas inativos. Os projetos críticos identificados no presente estudo (Cotinguiba/Pindoba, Boacica e Estreito) apresentam indicadores de insuficiência financeira elevada e baixo uso do solo, padrão convergente com esse diagnóstico de subutilização e fragilidade financeira recorrentemente descrito para esquemas públicos em países em desenvolvimento (Wanyama et al., 2024; Nuru et al., 2024; Ashine et al., 2025). Em associações de usuários de água na Turquia, Kirmikil (2025) e Harman

e Çakmak (2025) documentaram melhorias progressivas de eficiência associadas à modernização para sistemas pressurizados e à implementação de tarifação volumétrica, elementos possivelmente presentes nos projetos de excelência brasileiros e ausentes nos projetos críticos, embora a validação empírica desse mecanismo demande estudos de caso aprofundados.

No contexto socioeconômico, Guedes et al. (2023) documentaram no Projeto Sen. Nilo Coelho a diversificação de atividades produtivas e o potencial de geração de renda com impactos expressivos de inclusão social, em especial para mulheres irrigantes. Morais et al. (2021), por sua vez, demonstraram que a irrigação aumenta em média a eficiência técnica das fazendas brasileiras em 2,51 pontos percentuais, com ganho especialmente relevante para pequenas propriedades. Esses achados reforçam que projetos de excelência como Sen. Nilo Coelho e Maniçoba não são apenas eficientes em termos hídricos e financeiros, mas também produzem externalidades socioeconômicas positivas que justificam sua adoção como referências de boas práticas (Malano et al., 2004; Burt e Styles, 2004).

6.3.6 Implicações para a regulação dos serviços públicos de irrigação

Os resultados consolidados do presente estudo possuem implicações diretas para o desenvolvimento do marco regulatório dos serviços públicos de irrigação no Brasil. A convergência dos três métodos na identificação dos projetos de excelência e dos projetos críticos fornece base técnica robusta para ações de reconhecimento de boas práticas e de intervenção corretiva, conferindo objetividade e transparência ao diagnóstico regulatório. Como apontam Van e Pham (2025), contratos de concessão em serviços de irrigação eficazes dependem da definição precisa de níveis de serviço e indicadores contratuais mensuráveis, exatamente o que os índices propostos permitem operacionalizar.

No contexto das concessões previstas pela Política Nacional de Irrigação (Brasil, 2013), os índices propostos podem fundamentar o estabelecimento de metas contratuais objetivas e sistemas de regulação por incentivos. Lima et al. (2021), em revisão de PPPs no setor de água, enfatizaram que a clareza na alocação de riscos e a previsibilidade das regras tarifárias são condições necessárias para atrair investidores privados; adicionalmente, Njagi et al. (2025) recomendam que metas contratuais sejam realistas, tecnicamente fundamentadas e passíveis de monitoramento independente. Os índices globais de desempenho desenvolvidos neste estudo atendem a esses requisitos ao se basearem em indicadores já coletados rotineiramente pelas

instituições gestoras, o que viabiliza sua implementação sem necessidade de novos sistemas de coleta de dados.

A experiência recente da ANA na regulação do saneamento básico, em particular a Norma de Referência nº 9/2024, que padroniza indicadores operacionais para serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário com exigência de reporte anual e ampla divulgação (ANA, 2024a), constitui precedente institucional relevante. A expansão dessa lógica regulatória baseada em indicadores para os serviços de irrigação, ainda carente de uma matriz específica de indicadores mínimos e metas para PPIs, conforme constatado neste estudo, representaria avanço significativo na capacidade regulatória da ANA no setor, em consonância com os princípios de regularidade, eficiência, modicidade tarifária e utilização racional dos recursos hídricos estabelecidos no §8º do art. 4º da Lei nº 9.984/2000 (Brasil, 2000). Os índices propostos podem, portanto, ser apresentados como contribuição metodológica que antecipa e detalha os critérios implícitos no marco legal vigente, especialmente no que se refere à avaliação e classificação de PPIs por resultados sociais e econômicos prevista no art. 10, II, da Lei nº 12.787/2013 (Brasil, 2013).

6.4 Limitações do estudo

O presente estudo apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação e generalização dos resultados. Em primeiro lugar, a análise baseou-se em dados de um único período (ano-base 2020), não capturando variações temporais no desempenho dos projetos. O corte transversal, embora adequado aos objetivos exploratórios e descritivos da pesquisa, impede a verificação de tendências ao longo do tempo, a identificação de ciclos de desempenho e a avaliação do impacto de intervenções específicas sobre a evolução dos índices. Essa limitação é reconhecida na literatura sobre avaliação de sistemas de irrigação, que enfatiza a necessidade de análises longitudinais para distinguir variações sazonais de tendências estruturais de desempenho (Ahmad et al., 2024; Zhu et al., 2021).

Em segundo lugar, o conjunto de indicadores foi restrito àqueles disponíveis nos relatórios de gestão institucionais, privilegiando dimensões técnicas, financeiras e socioeconômicas diretas em detrimento de aspectos ambientais e sociais mais abrangentes. A literatura recente enfatiza a necessidade de ampliar o escopo de indicadores para incluir dimensões como qualidade da água, salinização do solo, pegada hídrica e equidade na distribuição dos benefícios, especialmente em um contexto de mudanças climáticas e crescente escassez hídrica (Ahmad et al., 2024; Chartzoulakis e Bertaki, 2015). A ausência de indicadores

ambientais pode subestimar riscos associados ao uso intensivo da água em alguns projetos de alto ranking econômico.

A terceira limitação refere-se à utilização exclusiva de dados reportados pelas próprias instituições gestoras, sem validação de campo independente. Embora os relatórios da CODEVASF e do DNOCS representem fontes primárias oficiais e sistematizadas, a possibilidade de viés de autorrelato, inerente a sistemas de monitoramento autoadministrados, não pode ser descartada (Fragoso e Pizaia, 2023). Ademais, a simulação de Monte Carlo utilizou distribuição uniforme para a geração de vetores de pesos, assumindo equiprobabilidade entre todas as configurações de ponderação. Abordagens alternativas poderiam incorporar restrições baseadas em conhecimento especialista ou em análises de importância relativa derivadas de consultas a stakeholders, como AHP, DEMATEL ou análise participativa, potencialmente produzindo intervalos de ranking mais informativos para fins regulatórios (Qian et al., 2025; Seyoum et al., 2025).

Finalmente, a amostra foi composta exclusivamente por projetos ainda não concedidos à iniciativa privada, dada a singularidade do único PPI concedido até o momento (Baixio de Irecê) e o estágio inicial de sua implementação. Essa limitação restringe a comparação direta entre projetos sob diferentes arranjos contratuais, embora não comprometa os objetivos metodológicos do estudo, que visou desenvolver e validar a metodologia a partir do universo mais representativo de PPIs disponível. À medida que novos projetos sejam concedidos, a metodologia proposta poderá ser aplicada em contextos pós-concessão para avaliações comparativas entre diferentes modelos de gestão.

6.5 Perspectivas para pesquisas futuras

Os resultados e as limitações identificadas no presente estudo apontam para agendas de pesquisa específicas que podem ampliar e aprofundar as contribuições aqui apresentadas. Em primeiro lugar, a realização de análises longitudinais é fundamental para capturar trajetórias de desempenho ao longo do tempo, distinguir variações sazonais de tendências estruturais e avaliar o impacto de intervenções de modernização ou mudanças de gestão sobre os índices globais. Séries temporais de pelo menos cinco anos, incorporando dados de safras distintas, permitiriam identificar projetos em trajetória ascendente ou de declínio, informando decisões de alocação de recursos e fiscalização regulatória de forma dinâmica, funcionalidade especialmente relevante para contratos de concessão com metas evolutivas de desempenho (Tiruye et al., 2023; Gao et al., 2024).

Em segundo lugar, estudos futuros devem investir na ampliação do conjunto de indicadores para incluir dimensões ambientais e sociais mais abrangentes. Indicadores como qualidade da água drenada, índice de salinização do solo, pegada hídrica por tonelada produzida, equidade na distribuição dos benefícios entre irrigantes familiares e empresariais, e índice de adoção de boas práticas ambientais são apontados pela literatura recente como essenciais para uma avaliação integral da sustentabilidade dos sistemas de irrigação (Ahmad et al., 2024; Khatete et al., 2023). A integração de dados de sensoriamento remoto e plataformas digitais de monitoramento, preconizada por Gao et al. (2024) e Tiruye et al. (2023), pode contribuir para superar limitações de disponibilidade e qualidade de dados, especialmente em contextos onde o monitoramento de campo é deficiente.

Por fim, a validação da metodologia em contextos pós-concessão, incluindo o Projeto Baixio de Irecê após período operacional consolidado, e sua aplicação comparativa em diferentes países e regiões com características hidrológicas, institucionais e climáticas distintas representam extensões naturais do presente estudo. A aplicação em esquemas irrigados na África Subsaariana, onde Higginbottom et al. (2021) documentaram heterogeneidade expressiva de desempenho, ou em associações de usuários na Europa e Ásia (Còrcoles et al., 2010; Kirmikil, 2025), poderia testar a generalização da metodologia e contribuir para o estabelecimento de benchmarks internacionais comparáveis.

7 CONCLUSÃO

O presente estudo partiu da questão central sobre como estruturar índices globais de desempenho capazes de avaliar, de forma integrada e comparável, a eficiência da gestão dos serviços hídricos de irrigação em Projetos Públicos de Irrigação brasileiros. Os resultados obtidos demonstraram que a aplicação integrada de três métodos de análise multicritério, PROMETHEE II, TOPSIS com simulação de Monte Carlo e TOPSIS-Entropia, é metodologicamente viável, robusta e tecnicamente adequada a essa finalidade, respondendo à questão de pesquisa proposta.

A forte convergência entre os métodos na identificação dos projetos de excelência (Sen. Nilo Coelho, Maniçoba, Brumado e Curaçá) e dos projetos críticos (Cotinguiba/Pindoba, Boacica e Estreito) valida a consistência dos diagnósticos e fornece base sólida para ações de benchmarking, reconhecimento de boas práticas e intervenção regulatória corretiva. A análise de sensibilidade com 1.000 simulações de Monte Carlo demonstrou que a maioria dos projetos apresenta classificações estáveis, reforçando a aplicabilidade dos índices em contextos regulatórios que exigem objetividade e previsibilidade. A correlação $r = 0,851$ entre os métodos TOPSIS-MC e TOPSIS-Entropia, combinada com a análise do heatmap comparativo, confirmou que as diferenças observadas são metodologicamente esperadas e interpretáveis, sem comprometer a utilidade dos resultados para fins de gestão e regulação.

Em síntese, o presente estudo contribui para o campo da gestão e regulação dos serviços hídricos de irrigação ao demonstrar que métodos multicritério bem estabelecidos, aplicados de forma integrada e com análise de sensibilidade rigorosa, são capazes de traduzir a complexidade da gestão da água em métricas objetivas, comparáveis e operacionalizáveis. Os índices propostos dialogam diretamente com o mandato regulatório da ANA (Brasil, 2000; ANA, 2024b) e com os objetivos da Política Nacional de Irrigação (Brasil, 2013), posicionando-se como instrumento técnico para a operacionalização dos comandos legais de avaliação por desempenho ainda carentes de sistematização metodológica. O caminho para uma gestão mais eficiente, sustentável e transparente dos serviços hídricos de irrigação no Brasil passa necessariamente pela adoção de instrumentos objetivos de avaliação como os propostos neste trabalho.

REFERENCIAS

ABUABARA, R.; ROBLES, C.; CAMARGO, L. A multicriteria model for prioritizing 5G network deployment with Monte Carlo stability analysis: a case study in Magdalena, Colombia. **PLOS One**, [s. l.], v. 20, e0334781, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0334781>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0334781>. Acesso em: 24 set. 2025.

ABU-TALEB, M.; MARESCHAL, B. Water resources planning in the Middle East: application of the PROMETHEE V multicriteria method. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 81, n. 3, p. 500-511, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00007-y](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00007-y). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/037722179400007Y>. Acesso em: 12 jun. 2026.

AHMAD, M. D. *et al.* Performance indicators for sustainable irrigation management: a systematic review. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 303, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108962>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377424003809>. Acesso em: 12 jun. 2026.

ALSHAMAEN, M. *et al.* Climate change vulnerability assessment using composite indicators. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 632, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132536>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169424016123>. Acesso em: 12 jun. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Resolução nº 211, de 23 de setembro de 2024. Aprova a Norma de Referência nº 9/2024, que dispõe sobre indicadores operacionais da prestação dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 set. 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-aprova-norma-de-referencia-sobre-indicadores-operacionais>. Acesso em: 9 mar. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Resolução nº 231, de 19 de dezembro de 2024. Estabelece procedimentos acerca das atividades de fiscalização do uso de recursos hídricos; da segurança de barragens; e da prestação dos serviços públicos de irrigação, se em regime de concessão, e de adução de água bruta, em corpos d'água de domínio da União. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 20 dez. 2024b. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2024/231>. Acesso em: 9 mar. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Atlas Irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília: ANA, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2025: relatório digital**. Brasília, DF: ANA, 2025. Disponível em: <https://conjuntura-2025.webflow.io/>. Acesso em: 5 fev. 2026.

ASHINE, N. *et al.* Performance assessment of small-scale irrigation schemes using internal and external indicators in Eastern Ethiopia. **Heliyon**, [s. l.], v. 11, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e38123>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844025043543>. Acesso em: 12 jun. 2026.

BABAEI, H.; MOHAMMADI, S.; GHANEAI, H. A new decision-making method based on Shannon entropy analysis. **Iranian Journal of Operations Research**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 1-19, 2026. Disponível em: <https://iors.ir/journal/article-1-877-en.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2026.

BECKER, W. *et al.* Weights and importance in composite indicators: closing the gap. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 80, p. 12-22, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.056>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X17301954>. Acesso em: 12 jun. 2026.

BEHZADIAN, M. *et al.* A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. **Expert Systems with Applications**, [s. l.], v. 39, n. 17, p. 13051-13069, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417412006781>. Acesso em: 12 jun. 2026.

BEZDAN, A. *et al.* An objective methodology for waterlogging risk assessment based on the entropy weighting method and machine learning. **CATENA**, [s. l.], v. 244, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108618>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816224007458>. Acesso em: 12 jun. 2026.

BHOWMIK, C. *et al.* An integrated entropy-TOPSIS methodology for evaluating green energy sources. **International Journal of Business Analytics**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 44-70, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4018/IJBAN.2020070104>. Disponível em: <https://www.igi-global.com/article/an-integrated-entropy-topsis-methodology/256167>. Acesso em: 12 jun. 2026.

BISWAS, T. *et al.* Evaluation of management practices in rice-wheat cropping system using multicriteria decision-making methods in conservation agriculture. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58022-w>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-58022-w>. Acesso em: 12 jun. 2026.

BRANS, J. P.; VINCKE, P. A preference ranking organisation method: the PROMETHEE method for multiple criteria decision-making. **Management Science**, [s. l.], v. 31, n. 6, p. 647-656, 1985. DOI: <https://doi.org/10.1287/mnsc.31.6.647>. Disponível em: <https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.31.6.647>. Acesso em: 12 jun. 2026.

BRASIL. **Lei nº 12.787**, de 11 de janeiro de 2013. Dispõe sobre a Política Nacional de Irrigação. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 14 jan. 2013. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/112787.htm. Acesso em: 12 jun. 2026.

BRASIL. **Lei nº 9.984**, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), [...] para a regulação dos serviços públicos de

saneamento básico. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 jul. 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9984.htm. Acesso em: 19 mar. 2026.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. **Irrigação**. Brasília, DF: Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/acao-a-informacao/perguntas-frequentes/seguranca-hidrica/irrigacao>. Acesso em: 5 fev. 2026.

BURT, C. M.; STYLES, S. W. Conceptualizing irrigation project modernization through benchmarking and the rapid appraisal process. **Irrigation and Drainage**, [s. l.], v. 53, n. 2, p. 145-154, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1002/ird.127>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ird.127>. Acesso em: 12 jun. 2026.

CAMPELLO, B.; PELEGRINA, G.; PELISSARI, R.; SUYAMA, R.; DUARTE, L. Mitigating subjectivity and bias in AI development indices: a robust approach to redefining country rankings. **ArXiv**, [s. l.], abs/2402.10122, 2024. Preprint. DOI: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2402.10122>. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2402.10122>. Acesso em: 12 jun. 2026.

CARSTENSEN, J. *et al.* A novel cross-system assessment framework for eutrophication status. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 881, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163461>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969723021691>. Acesso em: 12 jun. 2026.

CHARTZOULAKIS, K.; BERTAKI, M. Sustainable water management in agriculture under climate change. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, [s. l.], v. 4, p. 88-98, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210784315000510>. Acesso em: 12 jun. 2026.

CHEN, P. Effects of the entropy weight on TOPSIS. **Expert Systems with Applications**, [s. l.], v. 168, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114186>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417420308745>. Acesso em: 12 jun. 2026.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA (CODEVASF). **Relatório da Administração 2020**. Brasília: CODEVASF, 2021. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/acao-a-informacao/governanca/relatorios-da-administracao>. Acesso em: 19 mar. 2026.

CÔRCOLES, J. I. *et al.* Management evaluation of water users associations using benchmarking techniques. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 98, n. 1, p. 1-11, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377410002490>. Acesso em: 12 jun. 2026.

DANDAPAT, A. *et al.* Integrated assessment of groundwater quality for sustainable irrigation in drought-prone central districts of Odisha, India. **Discover Sustainability**, [s. l.], v. 5, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00443-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43621-024-00443-8>. Acesso em: 12 jun. 2026.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS (DNOCS). **Relatório de gestão**: ano 2023. Fortaleza: DNOCS, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/dnocs/pt-br/aceso-a-informacao/t-pc/copy_of_Relatorio_de_Gestao_DNOCS_2023___Versao_Final.pdf. Acesso em: 19 mar. 2026.

DOBBIE, M. J.; DAIL, D. Robustness and sensitivity of weighting and aggregation in constructing composite indices. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 29, p. 270-277, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.12.025>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X12004487>. Acesso em: 12 jun. 2026.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **The State of Food and Agriculture 2020: overcoming water challenges in agriculture**. Rome: FAO, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb1447en>. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb1447en>. Acesso em: 12 jun. 2026.

FENG, Y.; FANGHUI, Y.; LI, C. Improved entropy weighting model in water quality evaluation. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 33, p. 2049-2056, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02227-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-019-02227-6>. Acesso em: 12 jun. 2026.

FERREIRA, Z. R.; VIEIRA FILHO, J. E. R. Projetos públicos de irrigação: presença institucional, fruticultura e impactos produtivos. *In*: VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro; GASQUES, José Garcia (org.). **Uma jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos do censo agropecuário**. Brasília: Ipea, 2020. cap. 16, p. 229-242. DOI: <https://doi.org/10.38116/978-65-5635-011-0/cap16>. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/10389>. Acesso em: 12 jun. 2026.

FRAGOSO, R. M.; PIZAIA, M. G. Eficiência técnica dos projetos públicos de irrigação no Brasil: uma análise por envoltória de dados. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, [s. l.], v. 61, n. 2, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.245279>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/QsY8nCG8JXdJTDqQVsHhfPg/>. Acesso em: 12 jun. 2026.

GAO, Z. *et al.* An integrated approach for multi-year irrigation benchmarking using satellites, surveys and on-farm measured data. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 299, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108962>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377424003809>. Acesso em: 12 jun. 2026.

GUEDES, A.; NETO, E.; DE MELO, R. Entrepreneurial possibilities for women residing in the Senador Nilo Coelho Irrigation Project. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, [s. l.], v. 18, n. 3, e016, 2023. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n3-016>. Disponível em: <https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/6073>. Acesso em: 12 jun. 2026.

GRUÈRE, G.; SHIGEMITSU, M. **Measuring progress in agricultural water management: challenges and practical options**. Paris: OECD Publishing, 2021. (OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers, n. 162). DOI: <https://doi.org/10.1787/52b4db7e-en>. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/measuring-progress-in-agricultural-water-management_52b4db7e-en.html. Acesso em: 12 jun. 2026.

GÜLMEZ, B. A novel hybrid MCDM framework combining TOPSIS, PROMETHEE II, and VIKOR for peach drying method selection. **Current Research in Food Science**, [s. l.], v. 10, 101034, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.101034>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665927125000905>. Acesso em: 12 jun. 2026.

HAN, F.; ALKHAWAJI, R.; SHAFIEEZADEH, M. Evaluating sustainable water management strategies using TOPSIS and fuzzy TOPSIS methods. **Applied Water Science**, [s. l.], v. 15, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02336-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-024-02336-7>. Acesso em: 12 jun. 2026.

HAO, K. *et al.* Comprehensive evaluation on the yield, quality, and water-nitrogen use efficiency of mountain apple under surge-root irrigation in the Loess Plateau based on the improved TOPSIS method. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.853546>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.853546/full>. Acesso em: 12 jun. 2026.

HARMAN, E.; ÇAKMAK, B. Evaluation of irrigation efficiency and economic performance: a case study of the Eskişehir Water User Association. **Irrigation and Drainage**, [s. l.], 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/ird.70008>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ird.70008>. Acesso em: 12 jun. 2026.

HE, D.; XU, J.; CHEN, X. Information-theoretic-entropy based weight aggregation method in multiple-attribute group decision-making. **Entropy**, [s. l.], v. 18, n. 6, p. 171, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/e18060171>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1099-4300/18/6/171>. Acesso em: 12 jun. 2026.

HE, G.; WANG, Z.; CUI, Z. Managing irrigation water for sustainable rice production in China. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 245, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118928>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619338028>. Acesso em: 12 jun. 2026.

HIGGINBOTTOM, T.; ADHIKARI, R.; DIMOVA, R.; REDICKER, S.; FOSTER, T. Performance of large-scale irrigation projects in sub-Saharan Africa. **Nature Sustainability**, [s. l.], v. 4, p. 501-508, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00670-7>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41893-020-00670-7>. Acesso em: 12 jun. 2026.

HWANG, C.-L.; YOON, K. **Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey**. Berlin: Springer, 1981. 269 p. (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, v. 186). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-48318-9>. Acesso em: 12 jun. 2026.

IEVOLI, R.; VINCIGUERRA, R.; BRUNO, A. Investigating water sustainability towards indicators: an empirical illustration using country-level data. **Socio-Economic Planning Sciences**, [s. l.], v. 95, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2024.102102>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003801212400278X>. Acesso em: 12 jun. 2026.

JARZEBSKI, M. *et al.* Comparative analysis of water sustainability indices: a systematic review. **Water**, [s. l.], v. 16, n. 7, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/w16070961>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/7/961>. Acesso em: 12 jun. 2026.

JOZAGHI, A. *et al.* A comparative study of the AHP and TOPSIS techniques for dam site selection using GIS: a case study of Sistan and Baluchestan Province, Iran. **Geosciences**, [s. l.], v. 8, n. 12, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences8120494>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3263/8/12/494>. Acesso em: 12 jun. 2026.

JUWANA, I.; MUTTIL, N.; PERERA, B. J. C. Indicator-based water sustainability assessment: a review. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 438, p. 357-371, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.093>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969712012521>. Acesso em: 12 jun. 2026.

KARLEUŠA, B.; HAJDINGER, A.; TADIĆ, L. The application of multi-criteria analysis methods for the determination of priorities in the implementation of irrigation plans. **Water**, [s. l.], v. 11, n. 3, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11030501>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/3/501>. Acesso em: 12 jun. 2026.

KEDIR, Y.; BERHANU, B.; ALAMIREW, T. Analysis of water–energy–crop nexus indicators in irrigated sugarcane of Awash Basin, Ethiopia. **Environmental Systems Research**, [s. l.], v. 11, p. 1-19, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40068-022-00263-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40068-022-00263-7>. Acesso em: 12 jun. 2026.

KHATETE, M.; RAUDE, J.; HOME, P. Evaluating the technical, managerial, socio-economic and environmental performance of Kenya's Ahero irrigation scheme using the analytical hierarchy process (AHP) model. **Journal of Agriculture, Science and Technology**, [s. l.], v. 22, n. 3, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4314/jagst.v22i3.2>. Disponível em: <https://www.ajol.info/index.php/jagst/article/view/247684>. Acesso em: 12 jun. 2026.

KIRMIKIL, M. Irrigation performance evaluation for sustainable water management: a study of Karacabey Water Users Association, Türkiye (2006-2023). **Sustainability**, [s. l.], v. 17, n. 9, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17094059>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/9/4059>. Acesso em: 12 jun. 2026.

LEE, M. *et al.* Water-energy nexus for multi-criteria decision making in water resource management: a case study of Choshui River Basin in Taiwan. **Water**, [s. l.], v. 10, n. 12, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10121740>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/12/1740>. Acesso em: 12 jun. 2026.

LI, M. *et al.* Agricultural water resources management using maximum entropy and entropy-weight-based TOPSIS methods. **Entropy**, [s. l.], v. 21, n. 4, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/e21040364>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1099-4300/21/4/364>. Acesso em: 12 jun. 2026.

LI, Z. *et al.* An improved approach for water quality evaluation: TOPSIS-based informative weighting and ranking (TIWR) approach. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 89, p. 356-364, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.014>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X18301079>. Acesso em: 12 jun. 2026.

LIMA, S.; BROCHADO, A.; MARQUES, R. C. Public-private partnerships in the water sector: a review. **Utilities Policy**, [s. l.], v. 69, p. 101182, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101182>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957178721000217>. Acesso em: 12 jun. 2026.

MAJONE, G. The regulatory state and its legitimacy problems. **West European Politics**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 1-24, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1080/01402389908425284>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01402389908425284>. Acesso em: 12 jun. 2026.

MALANO, H.; BURTON, M. **Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector**. Rome: IPTRID Secretariat, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2001.

MALANO, H.; BURTON, M.; MAKIN, I. Benchmarking performance in the irrigation and drainage sector: a tool for change. **Irrigation and Drainage**, [s. l.], v. 53, n. 2, p. 119-133, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1002/ird.126>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ird.126>. Acesso em: 12 jun. 2026.

MANOJ, V. *et al.* Performance evaluation of hydro power projects in India using multi criteria decision making methods. **Ecological Engineering & Environmental Technology**, [s. l.], v. 23, n. 5, p. 205-217, 2022. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/152130>. Disponível em: <https://www.ecoet.com/Performance-evaluation-of-hydro-power-projects-in-India-using-multi-criteria-decision,152130,0,2.html>. Acesso em: 12 jun. 2026.

MILEWSKI, A.; LEZZAIK, K.; ROTZ, R. Sensitivity analysis of the Groundwater Risk Index in the Middle East and North Africa Region. **Environmental Processes**, [s. l.], v. 7, p. 53-71, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40710-019-00421-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40710-019-00421-7>. Acesso em: 12 jun. 2026.

MOLDEN, D. J.; BURTON, M. A.; BOS, M. G. Performance assessment, irrigation service delivery and poverty reduction: benefits of improved system management. **Irrigation and Drainage**, [s. l.], v. 56, n. 2-3, p. 307-320, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/ird.313>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ird.313>. Acesso em: 12 jun. 2026.

MOLDEN, D. J.; SAKTHIVADIVEL, R.; PERRY, C. J.; DE FRAITURE, C.; KLOEZEN, W. H. **Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems**. Colombo: International Water Management Institute, 1998. (Research Report, 20). DOI: <https://doi.org/10.3910/2009.020>. Disponível em: <https://www.iwmi.cgiar.org/publications/iwmi-research-reports/iwmi-research-report-20/>. Acesso em: 12 jun. 2026.

MORAIS, G.; SILVA, F.; FREITAS, C.; BRAGA, M. Irrigation, technical efficiency, and farm size: the case of Brazil. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 1132, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13031132>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/3/1132>. Acesso em: 12 jun. 2026.

MUEMA, F.; HOME, P.; RAUDE, J. Application of benchmarking and principal component analysis in measuring performance of public irrigation schemes in Kenya. **Agriculture**, [s. l.], v. 8, n. 10, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture8100162>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/8/10/162>. Acesso em: 12 jun. 2026.

MUKHAMETZIANOV, I. Specific character of objective methods for determining weights of criteria in MCDM problems: entropy, CRITIC and SD. **Decision Making: Applications in Management and Engineering**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 76-105, 2021. DOI: <https://doi.org/10.31181/dmame210402076i>. Disponível em: <https://dmame.rabek.org/index.php/dmame/article/view/76>. Acesso em: 12 jun. 2026.

NARDO, M.; SAISANA, M.; SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; HOFFMAN, A.; GIOVANNINI, E. **Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide**. Paris: OECD Publishing, 2008. (OECD Statistics Working Papers, 2008/02). DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264043466-en>. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/handbook-on-constructing-composite-indicators-methodology-and-user-guide_9789264043466-en.html. Acesso em: 12 jun. 2026.

NJAGI, P.; AJWANG, P.; KABUBO, C. Critical success factors for private-public partnerships in irrigation development: case study of Galana Kulalu Irrigation Project. **Open Journal of Civil Engineering**, [s. l.], 2025. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojce.2025.153020>. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=142152>. Acesso em: 12 jun. 2026.

NURU, N. *et al.* Overall performance assessment of selected small-scale irrigation schemes using internal and external performance indicators in West Hararghe Zone, Eastern Ethiopia. **Heliyon**, [s. l.], v. 10, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38123>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024141543>. Acesso em: 12 jun. 2026.

PERELLI, C.; BRANCA, G.; CORBARI, C.; MANCINI, M. Physical and economic water productivity in agriculture between traditional and water-saving irrigation systems: a case study in Southern Italy. **Sustainability**, [s. l.], v. 16, n. 12, p. 4971, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16124971>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/12/4971>. Acesso em: 12 jun. 2026.

PODOPLELOVA, E. Selection of multi-criteria analysis methods on the example of the problem of ranking. **Izvestiya SFedU. Engineering Sciences**, [s. l.], n. 3, p. 118-125, 2023. DOI: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-3-118-125>. Disponível em: <https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv-tn/article/view/1230>. Acesso em: 12 jun. 2026.

POSNER, R. A. Theories of economic regulation. **The Bell Journal of Economics and Management Science**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 335-358, 1974. DOI: <https://doi.org/10.2307/3003113>. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/3003113>. Acesso em: 12 jun. 2026.

PRAMONO, I. *et al.* Development of a simplified watershed health assessment framework: a case study in the Upper Citarum Watershed, Indonesia. **Journal of Southwest Jiaotong University**, [s. l.], v. 59, n. 6, 2025. DOI: <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.59.6.21>. Disponível em: <https://jsju.org/index.php/journal/article/view/1640>. Acesso em: 12 jun. 2026.

QIAN, Y.; ZHAO, Y.; QIAN, H.; XIANG, J.; CHEN, C.; SU, L.; CAI, C. Evaluation of industrial water use efficiency on an enterprise scale based on analytic hierarchy process, entropy weight method and self-organizing map: a case study in Zhejiang, China. **Water**, [s. l.], v. 17, n. 6, p. 901, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17060901>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/6/901>. Acesso em: 12 jun. 2026.

RADMEHR, A.; BOZORG-HADDAD, O.; LOÁICIGA, H. Integrated strategic planning and multi-criteria decision-making framework with its application to agricultural water management. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12194-5>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-12194-5>. Acesso em: 12 jun. 2026.

RETA, B.; HATIYE, S.; FINSA, M. Assessment of irrigation water management performance indicators and mitigation measure in Arba Minch Irrigation Scheme, Ethiopia. **Advances in Agriculture**, [s. l.], 2024. DOI: <https://doi.org/10.1155/2024/5596514>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2024/5596514>. Acesso em: 12 jun. 2026.

RODRÍGUEZ-DÍAZ, J. A. *et al.* Benchmarking and multivariate data analysis techniques for improving the efficiency of irrigation districts: an application in Spain. **Agricultural Systems**, [s. l.], v. 96, n. 1-3, p. 250-259, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.07.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308521X07000856>. Acesso em: 12 jun. 2026.

SAFARI, A.; ABBASPOUR, M.; JAVID, A. H. The application of multi-criteria (AHP-PROMETHEE) decision-making methods in selecting and prioritizing the green area irrigation resources. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 18, p. 1135-1146, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02875-x>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-020-02875-x>. Acesso em: 12 jun. 2026.

ŞAHİN, A.; ÖZKAYA, A. Multi-criteria decision analyses for the selection of hydrological flood routing models. **Water**, [s. l.], v. 15, n. 14, p. 2588, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15142588>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/14/2588>. Acesso em: 12 jun. 2026.

SAHOO, S. K.; PAMUCAR, D.; GOSWAMI, S. S. A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems from 2010-2025: current state and future research. **Spectrum of Decision Making and Applications**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 219-241, 2025. DOI: <https://doi.org/10.31181/sdmap21202525>. Disponível em: <https://dmame.rabek.org/index.php/sdmap/article/view/25>. Acesso em: 12 jun. 2026.

SEYOUM, A.; ADAMSEGED, M. E.; HAILESLASSIE, A.; IRES, I.; JACOBS-MATA, I. **Needs assessment to enhance public-private partnerships in smallholder irrigation development and management in Ethiopia**. Colombo: International Water Management Institute, 2025. 50 p. DOI: <https://doi.org/10.5337/2025.221>. Disponível em: <https://www.iwmi.cgiar.org/publications/iwmi-research-reports/>. Acesso em: 12 jun. 2026.

SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. **Bell System Technical Journal**, [s. l.], v. 27, n. 3, p. 379-423, 1948. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538->

7305.1948.tb01338.x. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>. Acesso em: 12 jun. 2026.

SHAKTAWAT, A.; VADHERA, S. Ranking of hydropower projects based on sustainability criteria in India using multicriteria decision making methods. **Croatian Operational Research Review**, [s. l.], v. 12, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17535/crorr.2021.0007>. Disponível em: <https://hrcak.srce.hr/261280>. Acesso em: 12 jun. 2026.

SRIVASTAVA, A.; PARMAR, D. Development of water utility performance index using hybrid aggregation technique for water supply systems in India. **Environment, Development and Sustainability**, [s. l.], v. 25, p. 15183-15204, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02616-9>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-022-02616-9>. Acesso em: 12 jun. 2026.

STIGLITZ, J. E. **Economics of the public sector**. 3. ed. New York: W.W. Norton, 2000.

SUN, Y. *et al.* Game theory-based variable weights for composite water quality indicators. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 634, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132536>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169424016123>. Acesso em: 12 jun. 2026.

TAHERDOOST, H. Using PROMETHEE method for multi-criteria decision making: applications and procedures. **Iris Journal of Economics & Business Management**, [s. l.], v. 1, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.33552/ijebm.2023.01.000502>. Disponível em: <https://irispublishers.com/ijebm/fulltext/using-promethee-method-for-multi-criteria-decision-making.ID.000502.php>. Acesso em: 12 jun. 2026.

TALUKDER, B.; HIPEL, K. W. The PROMETHEE framework for comparing the sustainability of agricultural systems. **Resources**, [s. l.], v. 7, n. 4, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources7040074>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9276/7/4/74>. Acesso em: 12 jun. 2026.

TIRUYE, A. *et al.* Assessing water consumption pattern and delivery irrigation performance indicators using the WaPOR portal under data-limited conditions, Ethiopia. **Engineered Science**, [s. l.], 2023. DOI: <https://doi.org/10.30919/es1046>. Disponível em: <https://www.espublisher.com/journals/articledetail/1046>. Acesso em: 12 jun. 2026.

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO (TCU). **Levantamento de governança e gestão públicas 2021**: relatório individual da CODEVASF (Acórdão 2164/2021-Plenário). Brasília: TCU, 2021. Disponível em: <https://www.tcu.gov.br/igg2021/iGG2021%20-%20528%20-%20CODEVASF.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2026.

UDDIN, M. G. *et al.* Assessing optimization techniques for improving water quality model. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 365, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132594>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622024519>. Acesso em: 12 jun. 2026.

UZUN, B. *et al.* The technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS). In: **Application of Multi-Criteria Decision Analysis in Environmental and Civil Engineering**. Cham: Springer, 2021. p. 25-30. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030->

64765-0_4. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-64765-0_4. Acesso em: 12 jun. 2026.

VAN, D.; PHAM, D. Development of computer model for specification of irrigation service: a case study of irrigation system in northern Vietnam. **Journal of Environmental & Earth Sciences**, [s. l.], v. 7, n. 4, 2025. DOI: <https://doi.org/10.30564/jees.v7i4.8489>. Disponível em: <https://ojs.bilpublishing.com/index.php/jees/article/view/8489>. Acesso em: 12 jun. 2026.

VARGAS, F.; NAVA, L.; REYES, E.; OLEA-OLEA, S.; SERNA, C.; SOLÍS, S.; MEZA-RODRÍGUEZ, D. Water and environmental resources: a multi-criteria assessment of management approaches. **Water**, [s. l.], v. 15, n. 16, p. 2991, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15162991>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/16/2991>. Acesso em: 12 jun. 2026.

VINOGRADOVA, I.; PODVEZKO, V.; ZAVADSKAS, E. Comparative assessment of the stability of AHP and FAHP methods. **Symmetry**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 479, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym13030479>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-8994/13/3/479>. Acesso em: 12 jun. 2026.

VISCUSI, W. K.; HARRINGTON JR., J. E.; VERNON, J. M. **Economics of regulation and antitrust**. 4. ed. Cambridge: MIT Press, 2005.

VULEVIĆ, T.; DRAGOVIĆ, N. Multi-criteria decision analysis for sub-watersheds ranking via the PROMETHEE method. **International Soil and Water Conservation Research**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 50-55, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.01.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095633916301149>. Acesso em: 12 jun. 2026.

WANG, L.; MEN, B. Application of TOPSIS method based on variation coefficient weight on water resource classification. **Water Resources and Hydropower Engineering**, [s. l.], v. 38, n. 5, 2007. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-1683.2007.05.013>. Disponível em: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&filename=SWSD200705013>. Acesso em: 12 jun. 2026.

WANYAMA, J.; BWAMBALE, E.; NAKAWUKA, P. Comparative performance assessment of pilot irrigation schemes in Uganda. **Heliyon**, [s. l.], v. 10, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31600>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024076318>. Acesso em: 12 jun. 2026.

WORLD BANK. **Water in Agriculture**. Washington: World Bank, 2020. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/topic/water-in-agriculture>. Acesso em: 26 dez. 2025.

WU, R.; ZHANG, Z.; YAN, W.; FAN, J.; GOU, J.; LIU, B. *et al.* A comparative analysis of the principal component analysis and entropy weight methods to establish the indexing measurement. **PLOS ONE**, [s. l.], v. 17, e0262261, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262261>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0262261>. Acesso em: 12 jun. 2026.

WU, Z.; ABDUL-NOUR, G. Comparison of multi-criteria group decision-making methods for urban sewer network plan selection. **CivilEng**, [s. l.], v. 1, n. 1, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.3390/civileng1010003>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-4109/1/1/3>. Acesso em: 12 jun. 2026.

XU, J. *et al.* Comprehensive growth evaluation of subsurface drip-irrigated walnuts based on the TOPSIS-GRA coupled model. **Horticulturae**, [s. l.], v. 11, n. 11, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11111301>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-7524/11/11/1301>. Acesso em: 12 jun. 2026.

ZARDARI, N. H. *et al.* Prioritization of farmlands in a multicriteria irrigation water allocation: PROMETHEE and GAIA applications. **Transactions of the ASABE**, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 73-82, 2015. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.58.10682>. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=45042>. Acesso em: 12 jun. 2026.

ZEMA, D. A. *et al.* Analyzing the performances of water user associations to increase the irrigation sustainability: an application of multivariate statistics to a case study in Italy. **Sustainability**, [s. l.], v. 12, n. 16, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12166327>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/16/6327>. Acesso em: 12 jun. 2026.

ZHANG, B. *et al.* A groundwater quality assessment model for water quality index: combining principal component analysis, entropy weight method, and coefficient of variation method for dimensionality reduction and weight optimization, and its application. **Water Environment Research**, [s. l.], v. 96, n. 9, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.11155>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wer.11155>. Acesso em: 12 jun. 2026.

ZHOU, P.; ANG, B. W.; ZHOU, D. Q. Weighting and aggregation in composite indicator construction: a multiplicative optimization approach. **Social Indicators Research**, [s. l.], v. 96, p. 169-181, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11205-009-9472-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11205-009-9472-3>. Acesso em: 12 jun. 2026.

ZHU, L.; XING, X.; YAN, F. The abnormal phenomena of entropy weighting method in the dynamic evaluation of agricultural water conservation. **Mathematical Problems in Engineering**, [s. l.], v. 2021, p. 7732970, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/7732970>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2021/7732970>. Acesso em: 12 jun. 2026.

ZHU, Y.; TIAN, D.; YAN, F. Effectiveness of entropy weight method in decision-making. **Mathematical Problems in Engineering**, [s. l.], 2020. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/3564835>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2020/3564835>. Acesso em: 12 jun. 2026.

ZOBEIDI, T. *et al.* Evaluating climate change adaptation options in the agriculture sector: a PROMETHEE-GAIA analysis. **Environmental and Sustainability Indicators**, [s. l.], v. 22, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100395>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665972724000412>. Acesso em: 12 jun. 2026.

ZOU, Z. H.; YUN, Y.; SUN, J. N. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment. **Journal of Environmental Sciences**, [s. l.], v. 18, n. 5, p. 1020-1023, 2006. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(06\)60032-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(06)60032-6). Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1001074206600326>. Acesso em: 12 jun. 2026.

APÊNDICE A – Valores dos indicadores de desempenho dos 26 Projetos Públicos de Irrigação analisados

Projeto	RA	EOA	IAF	AD	IUS	RAR	GE
Araras Norte	3,58	82	8	98,32	79	28208,36	12,78
Baixo Acaraú	2,26	79,75	7,59	114,83	76,39	16,17	9,98
Barreiras Norte	2,65	85	91	101	67,26	22177,74	1,91
Bebedouro	5,16	79	96	102	71,64	59683,33	2,03
Betume	1,25	65	13	94	158,92	10962,43	4,51
Boacica	1,1	54	19	58	106,31	7858,64	3,02
Brumado	3,37	139	268	106,38	87	2584,69	19,93
Cotinguiba/Pindoba	0,77	65	27	84	92,38	10205,93	2,62
Curaçá	3,5	85	87	94	123,81	64678,7	3,52
Estreito	1,6	80	79	91	51,95	11823,83	1,48
Formoso	3,09	92	90	86	76,74	33057,15	2,18
Gorutuba	10,93	59	24	91	69,02	15126,27	1,96
Itiúba	1,3	44	14	121	148,89	22914,96	4,23
Jaguaribe-Apodi	2,85	75	57	84,76	59	30248,75	5,42
Jaíba Etapa I	2,22	103	96	102	74,53	20477,38	2,12
Lagoa Grande	2,5	84	102	92	77,19	20084,3	2,19
Mandacaru	1,26	78	85	89	120,29	36478,82	3,42
Maniçoba	2,84	80	106	95	178,77	100948,9	5,08
Mirorós	2,14	83	93	81	59,05	17143,05	1,68
Nupeba	2,46	80	99	90	41,65	11869,47	1,18
Pirapora	4,47	97	103	78	74,75	18,81	2,12
Sen. Nilo Coelho	7,05	95	100	97	122,31	141655,2	3,47
São Desidério-Barreiras Sul	1,39	50	132	106	69,29	11928,65	1,97
Tabuleiro de Russas	1,69	97	86	101,79	43	8942,29	3,68
Tabuleiros Litorâneos do Piauí	2,59	106	171	106,04	68	19015,15	4,66
Tourão	1,02	100	105	104	100,76	16876,49	2,86
Média	2,89	82,18	83,02	94,93	88,38	27884,06	4,23
Desvio Padrão	2,16	19,78	56,44	12,62	35,08	32078,28	4,12
Máximo	10,93	139	268	121	178,77	141655,2	19,93
Mínimo	0,77	44	7,59	58	41,65	16,17	1,18

Nota: RA = Rentabilidade Agrícola (R\$/m³); EOA = Eficiência de Ocupação da Área (%); IAF = Índice de Autossuficiência Financeira (%); AD = Adimplência (%); IUS = Índice de Uso Sustentável (%); RAR = Receita Agrícola por Regante (R\$/ha); GE = Geração de Emprego (Empregos/ha). Fonte: Elaborado pelo autor (2025).