

Modelo de seleção de sistemas de tratamento de esgoto sanitário descentralizados para municípios de pequeno porte

Model for selection of decentralized sanitary sewage treatment systems for small municipalities

Gabriele de Souza Batista^{*}, Elis Gean Rocha^{**}, Ayrton Flavio Nascimento de Souza^{***}, Ivens Lorrان Clemente de Lacerda^{****}, José Ailton da Costa Ferreira^{*****}, Lorena Rayssa Cunha França^{*****}, Millena Alves Carvalho^{*****}, Mateus Clemente de Lacerda^{*****}, Patricia Herminio Cunha^{*****}

^{*}Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, gabriele.souza@estudante.ufcg.edu.br

^{**}Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, elisgean1@gmail.com

^{***}Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, ayrtonflavions@gmail.com

^{****}Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, ivenslorran@hotmail.com

^{*****}Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, frreirailton@gmail.com

^{*****}Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, lorenarayssacf@hotmail.com

^{*****}Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, millenacarvalho.99@gmail.com

^{*****}Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, mateus.clemente@outlook.com

^{*****}Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, patricia.herminio@professor.ufcg.edu.br

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v61i1.94941>

Resumo

A precariedade dos serviços de esgotamento sanitário em municípios brasileiros de pequeno porte acentua-se pela limitação técnica e financeira, sendo fundamental que as tecnologias de tratamento sejam simples, sustentáveis, economicamente viáveis e socialmente acessíveis. Desse modo, este trabalho tem por objetivo propor um modelo de seleção de tecnologias de tratamento de esgoto sanitário descentralizado para municípios de pequeno porte. Utilizou-se o método multicritério PROMETHEE II para o ranqueamento das tecnologias e o auxílio de agentes de decisão para a priorização de critérios técnicos, ambientais, econômicos e sociais, a partir das características das bacias de esgotamento. Por meio da validação do método para as bacias de esgotamento de quatro municípios paraibanos, os resultados mostraram que a tecnologia de *wetlands* construídos ocupa a melhor colocação em 88,9% das bacias. Essa tecnologia se destaca pelas taxas de eficiência de remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos, além de não gerar lodo e possuir bom desempenho em relação aos critérios sociais (produção de odores e vetores). As alternativas de tanque séptico e tanque séptico + filtro anaeróbio obtiveram pior colocação no *ranking* das bacias estudadas. A robustez do método e a atribuição de preferência aos critérios para bacias com diferentes classificações, indicam que o modelo é replicável para municípios de pequeno porte. Portanto, o estudo contribui para a otimização da tomada de decisão de sistemas de tratamento de esgoto, propiciando melhor uso dos recursos, redução de vulnerabilidades, bem como o desenvolvimento municipal.

Palavras-chave:

Saneamento ambiental, Modelo multicriterial, PROMETHEE II.

Abstract

The precariousness of sanitation services in small Brazilian municipalities is exacerbated by technical and financial limitations, making it essential that treatment technologies be simple, sustainable, economically viable, and socially accessible. Therefore, this work aims to propose a model for selecting decentralized sewage treatment technologies for small municipalities. The PROMETHEE II multi-criteria method was used to rank the technologies, with decision-makers prioritizing technical, environmental, economic, and social criteria based on the characteristics of sewage catchment areas. By validating the method in the sewage catchment areas of four municipalities in Paraíba, the results showed that constructed wetlands technology occupied the best position in 88.9% of the catchment areas. This technology stands out for its high efficiency in removing organic matter and suspended solids, in addition to not generating sludge and performing well in terms of social criteria (odor production and vectors). The septic tank and septic tank + anaerobic filter alternatives ranked lower in the catchment areas studied. The robustness of the method and the assignment of preferences to criteria for catchment areas with different classifications indicate that the model is replicable for small municipalities. Thus, the study contributes to optimizing decision-making for sewage treatment systems, allowing for better resource use, reduced vulnerabilities, and municipal development.

Keywords:

Environmental sanitation, Multicriterial model, PROMETHEE II.

I. INTRODUÇÃO

A complexidade da dinâmica da sociedade atual, através dos elementos socioeconômicos e culturais, resulta em diversas formas de relações dos seres humanos com o meio natural, intensificando, por muitas vezes, os impactos ambientais. A ocupação humana em ambientes predominantemente rurais ou em áreas de expansão urbana, com crescimento inadequado e irregular, traz consigo questões relacionadas à precariedade da infraestrutura de saneamento básico, refletindo em limitações na promoção da saúde e na qualidade de vida da população (SENNÁ et al., 2023).

Alcançar o acesso universal e equitativo ao saneamento e higiene adequados, bem como melhorar a qualidade da água, até o ano de 2030, estão entre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU). No Brasil, em 2022, estima-se que apenas 52,2% do volume de esgoto gerado é tratado (BRASIL, 2023). Em 2019, o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) estimou que cerca de R\$ 214.999 milhões de reais seriam necessários para universalizar os serviços

de esgotamento sanitário no Brasil, sendo R\$ 44.369 milhões de reais (20,64%) destinados para expansão/reposição dos sistemas de tratamento.

Em municípios de pequeno porte, áreas rurais e em áreas de povos e comunidades tradicionais, a vulnerabilidade aos efeitos da ausência de um sistema de esgotamento sanitário que garanta a coleta e o tratamento eficaz do esgoto são mais significativos (CRUZ et al., 2019). O aumento da incidência de Doenças Relacionadas ao Saneamento Ambiental Inadequado (DRSAI), redução no desempenho escolar de crianças e diminuição do desempenho dos trabalhadores são algumas das consequências, gerando prejuízos nos âmbitos econômico, de meio ambiente e de saúde pública (ROSSONI et al., 2020).

Nesses locais, há uma reduzida densidade populacional, baixa capacidade de pagamento dos usuários e disposição desordenada do efluente produzido, geralmente próximo aos locais de captação da água para o consumo (MORETI et al., 2021). Esses fatores corroboram para a busca por alternativas de esgotamento sanitário descentralizado, que propiciam maior sustentabilidade econômica e social do serviço, a partir do uso de tecnologias com baixo custo de operação e manutenção, simplicidade operacional, satisfatórios índices de remoção de poluentes e que utilizam materiais disponíveis na região ao qual serão implementadas (MESQUITA et al., 2021; PERONDI et al., 2020; FIGUEIREDO et al., 2019).

Entretanto, existe uma gama de processos e tecnologias de tratamento de esgoto, tornando a tomada de decisão um processo complexo e dispendioso. A seleção do tratamento mais adequado em cada situação deve considerar fatores sociais, condições locais, a eficiência desejada, e a relação custo/benefício, incluindo-se as despesas operacionais. Em pequenos municípios, a baixa capacidade técnica, a estrutura orçamentária reduzida e a sobreposição de atividades dos funcionários impendem um planejamento e gestão eficaz, sendo necessária a adoção de metodologias que facilitem o processo de tomada de decisão (MORETTI et al., 2021; NETO, 2021)

Nos últimos anos, métodos multicritérios têm sido utilizados na resolução de problemas complexos. Frente a isso, o método multicritério *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE), destaca-se pela facilidade de compreensão dos conceitos e parâmetros relacionados a seleção, simplificando o processo de modelagem de preferências e, conseqüentemente, aumentando a efetividade de sua aplicação. Sua utilização é preferível quando os pesos dos critérios são definidos e a ordenação de desempenho das alternativas é requerida (CARVALHO, 2022; ĐURDEVIC et al., 2022; GICHAMO et al., 2020; MAKAN et al., 2021).

Lima et al. (2014) aponta que o método é robusto e propicia uma análise compreensível sobre as potencialidades das alternativas, estruturando o processo de decisão no saneamento. Goffi (2022), que utilizou o método para a seleção de tecnologias de tratamento de efluentes para pequenas comunidades e centros urbanos concluiu que o PROMETHEE demonstrou elevado potencial para a redução da subjetividade na determinação dos processos de tratamento de esgotos.

Diversos estudos que envolvem processos de tomada de decisão quanto a tecnologias de tratamento de esgotos já utilizaram a família de métodos PROMETHE. Dentre esses, destacam-se os de Gichamo et al. (2020), Goffi (2022), Munasinghe-Arachchige et al. (2020) e Yahya et al. (2020). No entanto, a maioria destas pesquisas estão direcionadas a sistemas centralizados e urbanos, tornando-se fundamental a busca por soluções alternativas descentralizadas em pequenas comunidades e municípios de pequeno porte, onde tem-se diversidade étnica e cultural, conflitos de terra e economia diversificada.

Assim, esta pesquisa visa propor um modelo de seleção de sistemas de tratamento de esgoto sanitário descentralizados para municípios de pequeno porte, a partir da análise multicriterial, sob a base de critérios técnicos, ambientais, econômicos e sociais. O modelo leva em conta as peculiaridades das bacias de esgotamento, possibilitando a replicação em diferentes cenários e locais. O sistema proposto permitirá a melhoria na qualidade dos processos de tratamento através da otimização da tomada de decisão por parte dos gestores e profissionais diretamente ou indiretamente envolvidos nas etapas de planejamento do sistema de tratamento de esgoto para um município, propiciando melhor uso dos recursos e ampliando a capacidade de investimentos.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir ao objetivo proposto, os procedimentos metodológicos se basearam em quatro etapas apresentadas no fluxograma da Figura 1 e detalhadas posteriormente.

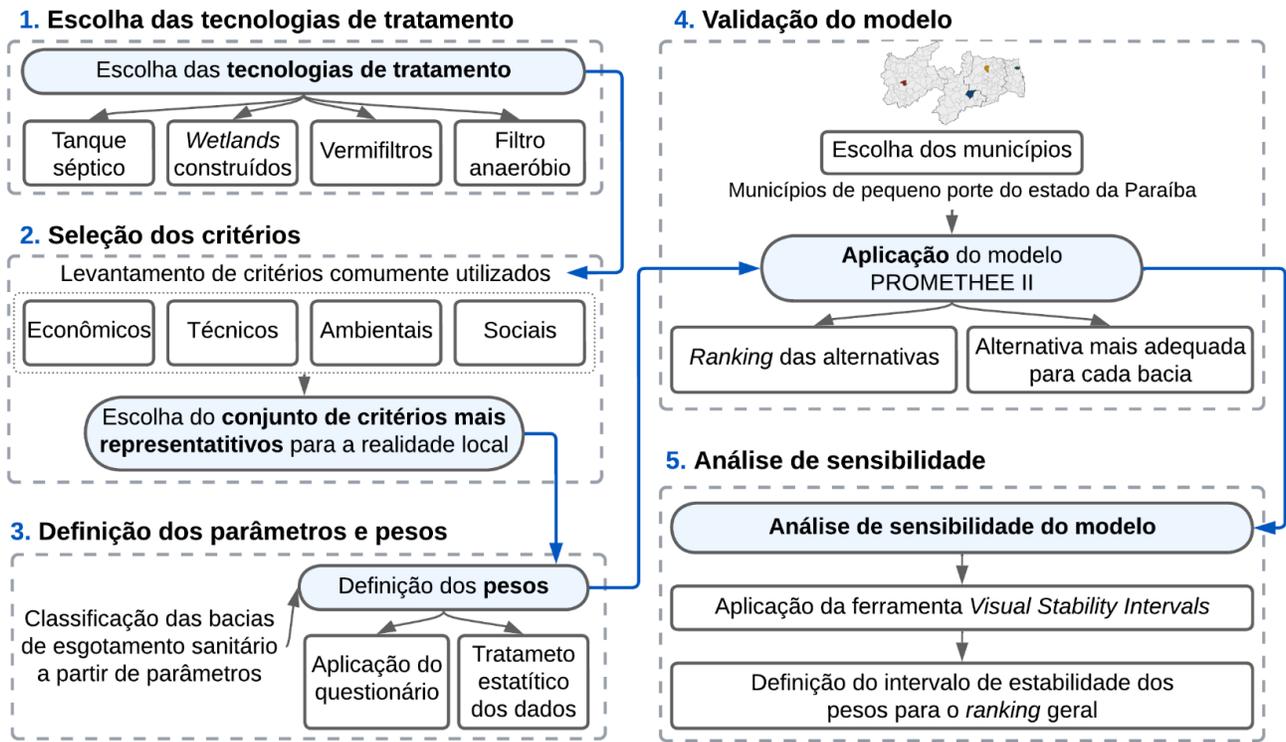


Figura 1 – Fluxograma síntese das etapas dos procedimentos metodológicos. Fonte: Os autores (2024).

Escolha das tecnologias de tratamento

A partir dos estudos de Cruz et al. (2019), Tonetti et al. (2021) e Tres et al. (2022), além dos tanques sépticos (fossões), que correspondem a um tratamento comumente utilizado em áreas isoladas e rurais, destacam-se quatro soluções com estudos e implantação em âmbito nacional e internacional: wetlands construídos, vermifiltros e filtro anaeróbio com material filtrante alternativo. O Quadro 1 apresenta as alternativas de sistemas de tratamento semicoletivos/coletivos consideradas no estudo.

Quadro 1 – Alternativas de sistemas de tratamento de efluentes consideradas

Alternativas	Sistema de tratamento	Descrição do sistema
A1	Tanque séptico (fossão)	O tanque séptico condominial (fossão) são estruturas impermeáveis que promovem o tratamento primário de esgoto, separando a parte sólida da líquida. Os sólidos sedimentáveis seguem para o fundo do tanque onde sofrem digestão anaeróbia enquanto o líquido clarificado é direcionado para outro tratamento e/ou posterior disposição. Possui um baixo custo associado, mas apresenta geração de lodo e baixa eficiência de remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos (ANDRADE et al., 2022).
A2	Tanque séptico + Filtro anaeróbio com material filtrante alternativo	O filtro anaeróbio é um reator biológico de fluxo ascendente, que possui uma câmara inferior varia e uma superior preenchida por um material suporte filtrante submerso no qual a biomassa adere-se ou fica retida, formando um biofilme responsável pela degradação do esgoto. Com o recheio alternativo, como os anéis de bambu e a casca de coco verde (<i>Cocos nucifera</i>), é possível reduzir os custos associados. Esta tecnologia deve ser associada a um tratamento primário, como o tanque séptico. As limitações do sistema estão relacionadas a geração de lodo e baixa confiabilidade (TONETTI et al., 2021; TRES et al., 2022).

Quadro 1 – Alternativas de sistemas de tratamento de efluentes consideradas (continuação)

Alternativas	Sistema de tratamento	Descrição do sistema
A3	Vermifiltro	O vermifiltro é um tipo de filtro biológico aeróbio de fluxo descendente e intermitente, composto, geralmente, por três camadas: uma camada superior de substrato orgânico onde se desenvolvem os microrganismos e minhocas de espécies detritívoras; a segunda camada, formada de cascalho e a terceira, por brita, servem de apoio e aeração ao sistema, permitindo a drenagem do líquido clarificado até a tubulação de saída localizada no fundo do reator. Destaca-se por não produzir lodo, por sua versatilidade e baixa área requerida. No entanto, tem maiores custos associados (MADRID et al., 2019; SINHA et al., 2008).
A4	<i>Wetlands</i> construídos	Constitui um sistema alagado construído especificamente para o tratamento de águas residuais, simulando e acelerando os processos naturais, através da relação água, substrato, plantas, animais invertebrados e microrganismos. Apesar de requererem espaços muito grandes, apresentam vantagens como o baixo custo de implantação e a facilidade de construção e operação (PERONDI et al., 2020).

Fonte: Os autores (2024).

Seleção dos critérios

Pautando-se em pequenas comunidades e municípios de pequeno porte, foram elencados os critérios e pesos definidos em estudos voltados para essas localidades, apresentados no Quadro 2, considerando a adequação em quatro eixos: econômico, técnico, ambiental e social. Nota-se que a maior parte das tecnologias consideradas pelos trabalhos mais antigos são convencionais. O sistema de *wetlands* construídos, que corresponde a um modelo de tratamento alternativo, é previsto em todos os estudos verificados. Conforme a literatura, a realidade dos pequenos municípios e a simplicidade de mensuração, foi escolhido um conjunto equilibrado de critérios que permitiu realizar uma avaliação holística em relação às tecnologias de tratamento de efluentes especificadas.

Com os indicadores definidos, foram obtidos os valores de referência a partir da análise de trabalhos específicos para as tecnologias de tratamento escolhidas. Tomou-se como bases os estudos de Cruz et al. (2019), Madrid et al. (2019), Sinha et al., (2008) e Von Sperling (2007) que trabalham no contexto de pequenos municípios e descentralização do tratamento.

Para os critérios econômicos, que possuem como base diferentes anos. Utilizou-se o INCC (Índice Nacional de Custos da Construção), que corresponde as inflações anuais dos produtos da construção civil, a fim de padronizar os valores de custo para o ano-base de 2023. Os valores do INCC anuais foram obtidos a partir da Fundação Getúlio Vargas (FGV). Já para os critérios que não possuem uma escala quantitativa, fez-se necessária a conversão da qualidade associada a uma pontuação quantitativa. Assim, as qualidades classificadas em baixo (+), médio (++/+++/++++) e alto (+++++) foram convertidas, respectivamente, na escala de pontuação de 1 a 5 pontos.

Quadro 2 – Critérios, com base em estudos, para seleção de sistemas de tratamento avaliados

Critério/Autores		Margarid o et al. (2012) ¹	Kalbar et al. (2012; 2013) ²	Molinos- Senante et al. (2014) ³	Molinos- Senante et al. (2015) ⁴	Goffi (2022) ⁵	Tres et al. (2022) ⁶
ECONÔMICO	Custo de implementação	x		x	x	x	x
	Custo de operação e manutenção	x		x	x	x	x
	Custo do ciclo de vida		x			x	
	Necessidade de mão de obra		x				
	Área do terreno necessária	x	x	x		x	x
TÉCNICO	Confiabilidade	x	x	x	x	x	
	Durabilidade		x			x	
	Replicabilidade		x				
	Flexibilidade		x			x	
	Resistência a variações do afluente e a cargas de choque	x					
	Dependência de variáveis climáticas	x					
	Solo	x					
	Simplicidade de operação e manutenção	x				x	x
AMBIENTAL	Complexidade da construção e operação						
	Eficiência de remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos				x	x	
	Eficiência de remoção de matéria orgânica	x		x		x	x
	Eficiência de remoção de sólidos suspensos	x		x			x
	Eficiência de remoção de fósforo			x	x	x	x
	Eficiência de remoção de nitrogênio	x		x	x	x	x
	Eficiência de remoção de coliformes totais	x				x	x
	Consumo de energia	x		x		x	
	<i>Carbon footprint</i>				x		
	Eutrofização		x			x	
	Aquecimento global		x				
	Comportamentos sustentáveis		x				
	Produção de lodo	x		x	x	x	
	Potencial de reúso			x	x	x	
Potencial de reciclagem de produto			x	x	x		
SOCIAL	Odores	x		x	x	x	x
	Ruído	x		x	x	x	
	Impacto visual			x	x	x	
	Aerossóis	x					
	Insetos e vermes	x				x	x
	Aceitação pública		x	x	x		
	Participação social		x			x	

Tecnologias de tratamento consideradas pelos estudos: ¹ Lagoas, disposição no solo, reatores anaeróbios, lodos ativados, filtros biológicos; ² Lodos ativados, reator UASB seguido por lagoa aerada facultativa, reator em batelada sequencial, *wetlands* construídos; ³ *Wetlands* construídos, lagoas, aeração prolongada, biorreator de membrana, contator biológico rotativo, filtro de gotejamento, reator em batelada sequencial; ⁴ *Wetlands* construídos, aeração prolongada, biorreator de membrana,

lagoas, contator biológico rotativo, reator de batelada sequencial, filtro biológico; ⁵ 41 tecnologias, dentre elas: lagoas, *wetlands* construídos, tanque séptico, tanque séptico com filtro anaeróbio; ⁶ 11 tecnologias, dentre elas: tanque séptico com filtro anaeróbio e *wetlands* construídos. Fonte: Os autores (2024).

Definição dos parâmetros e pesos

As características das bacias de esgotamento foram consideradas para o desenvolvimento do modelo, a partir do uso de parâmetros associados. Conforme a CETESB (1988), escolheu-se quatro parâmetros considerados relevantes na caracterização das bacias de pequenos municípios: área disponível para implantação da ETE, urbanização, classificação do corpo receptor e uso da água do corpo receptor. Para caracterizar as bacias de esgotamento sanitário conforme os parâmetros selecionados, utilizou-se as metodologias apresentadas pelo Quadro 3.

Quadro 3 – Metodologias de classificação das bacias de esgotamento conforme parâmetros selecionados

Parâmetro		Metodologia	Classificação
P1	Área disponível para implantação da ETE	Com o auxílio do <i>software</i> QGIS e das imagens de satélite do Google Earth, determinou-se a área disponível para locação da Estação de Tratamento de Esgotos nos principais fundos de vale de cada bacia de esgotamento. A área disponível é classificada como alta quando é superior a área do tratamento com maiores requisitos de espaço na bacia; e, é dita baixa, quando a área é maior ou igual a do tratamento com menores requisito de espaço e menor que a área do tratamento com o segundo menor requisito de espaço.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Baixa ▪ Alta
P2	Urbanização	Com base na metodologia de classificação de áreas urbanas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a partir do <i>software</i> QGIS e das imagens de satélite do Google Earth, identificou-se a forma de ocupação do território, sendo as bacias classificadas como de alta urbanização, aquelas que possuem maior número de edificações e tendência de expansão urbana, e de baixa urbanização, aquelas que possuem menor quantidade de residências, maior distância entre os lotes e grandes áreas verdes desabitadas.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Baixa ▪ Alta
P3	Uso da água do corpo receptor	Com o auxílio do <i>software</i> QGIS, utilizou-se a shape de disponibilidade hídrica superficial da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA) sobreposta a imagens de satélite do Google Earth, a fim de identificar o nome do rio e os seus usos.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Uso humano ▪ Uso agrícola
P4	Classificação do corpo receptor quanto a duração do fluxo	Com o auxílio das imagens históricas de satélite do Google Earth, foi possível verificar se os corpos hídricos presentes nos fundos de cada bacia de esgotamento apresentavam espelho d'água em seu curso, classificando o rio como perene; ou apenas em determinadas épocas, classificando o rio como intermitente.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Perene ▪ Intermitente

Fonte: Os autores (2024).

Por meio de um questionário, os agentes de decisão foram capazes de fornecer pesos representativos para cada uma das classificações dos parâmetros das bacias de esgotamento. Optou-se pela utilização de agentes de decisão que compõem a equipe de elaboração do Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB) de 49 municípios de pequeno porte do estado da Paraíba, Termo de Execução Descentralizada nº 003/2019 parceria Fundação Nacional de Saúde (Funasa) e Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), englobando os técnicos municipais e membros da equipe técnica da UFCG com formação nas áreas de Engenharia Civil e Ambiental.

Os agentes atribuíram pesos aos critérios selecionados, numa escala de 0 a 4, em função do julgamento do nível de importância do critério para cada classificação dos parâmetros das bacias. Assim, o valor “0” foi atribuído para critérios sem importância; “1” para critérios com baixa importância; “2” para critérios com média importância; “3” para critérios com alta importância; e “4” para critérios com altíssima importância.

Para garantir a consistência da ponderação dos critérios, realizou-se o tratamento estatístico dos julgamentos por meio do coeficiente de correlação por posto de Kendall, no qual os pesos com nível de significância (p) inferior a 0,05, foram eliminados (HATEFI, 2023; GUO et al., 2023). O peso final dos critérios para cada bacia de esgotamento é dado pela soma dos pesos atribuídos aos critérios em cada uma das classificações dos parâmetros relativos à bacia estudado.

Validação do modelo

Para aplicação do método, optou-se por trabalhar com a zona urbana do Distrito Sede de quatro municípios de pequeno porte do estado da Paraíba (Brasil) participantes do TED nº 03/2019, em que não existiam sistemas convencionais de tratamento de efluentes, com ou sem rede de coleta de esgoto, pois a aplicação de sistemas de tratamento alternativos poderia tornar o sistema atual obsoleto.

O mapa da Figura 2 apresenta os municípios Marcação, Casserengue, Cabaceiras e Igaracy selecionados para o estudo. A fim de avaliar áreas com características naturais e culturais diferentes, considerou-se municípios alocados em mesorregiões distintas, conforme a configuração regional proposta pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Salienta-se que em Marcação 88,10% da população é indígena.

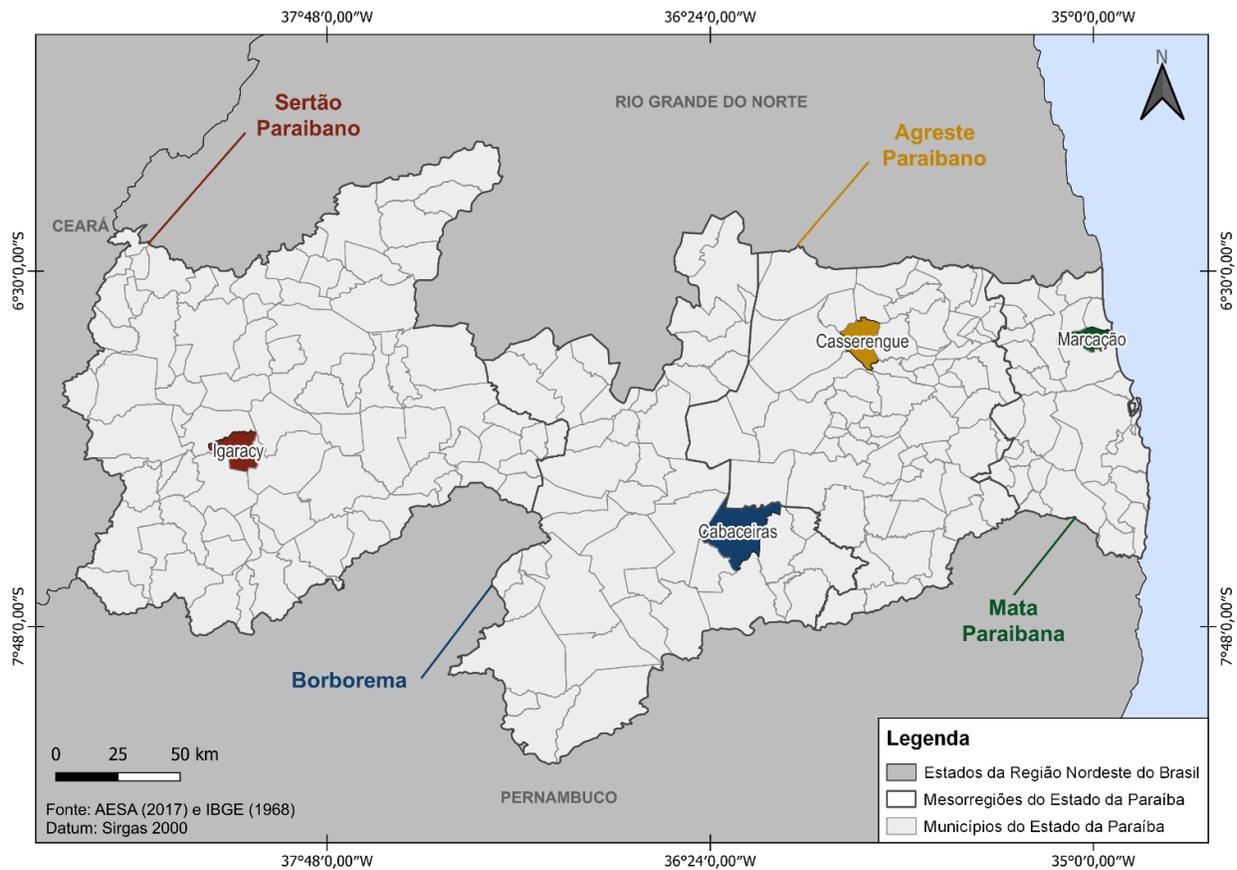


Figura 2 – Localização dos municípios em estudo no estado da Paraíba (Brasil). Fonte: Os autores (2024).

Conforme o diagnóstico técnico-participativo do PMSB, realizado no ano de 2022, o atendimento por sistema coletivo de rede de coleta e transporte de esgotos na zona urbana desses municípios era de 11% para Marcação, 18% para Casserengue e 43% para Cabaceiras e Igaracy. O esgoto coletado era encaminhado para fossões ou lançados *in natura*. Nas áreas onde não existiam rede coletora, os domicílios encaminhavam seus esgotos para fossas rudimentares com despejo de águas cinzas a céu aberto.

Para identificar a alternativa descentralizada com melhor desempenho para as diferentes bacias de esgotamento de cada município, utilizou-se o método PROMETHEE II, a partir da metodologia expressa por Brans, Vincke e Mareschal (1986). Utilizando-se a delimitação das bacias de esgotamento e dos fundos de vale, disponíveis no Produto D – Prognóstico do Saneamento Básico do PMSB dos municípios, definiu-se os pesos e aplicou-se o método com o auxílio do *software* Visual PROMETHEE 1.4 - *Academic Version*. Considerou-se a função de preferência do tipo “usual” (Goffi, 2022). A classificação final das alternativas baseou-se no cálculo do fluxo líquido $Q(a)$, sendo o melhor sistema de tratamento de esgoto para a bacia aquele que apresentou maior valor positivo de $Q(a)$.

Análise de sensibilidade

De acordo com Fagundes et al. (2021), os pesos resultam de um julgamento subjetivo dos agentes de decisão, sendo importante realizar análises de sensibilidade a fim de enxergar possíveis mudanças no ranqueamento, possibilitando ao tomador de decisão obter informações sobre a robustez de seu modelo.

Calculou-se os valores mínimos e máximos que os pesos de cada critério para cada bacia de esgotamento podem assumir, sem que haja mudanças no ranqueamento geral. Quanto maior o intervalo, mais robusto é o modelo. Analogamente ao estudo de Munasinghe-Arachchige et al. (2020), o cálculo do intervalo de sensibilidade dos pesos dos critérios, foi realizado a partir da ferramenta *Visual Stability Intervals* do *software* Visual PROMETHEE 1.4 - *Academic Version*.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Definição e ponderação dos critérios

A partir dos critérios de seleção de tecnologias de tratamento de efluentes apresentados pelo Quadro 2, escolheu-se dez critérios, considerados os mais relevantes pela literatura, apresentados na Tabela 1. Estabeleceu-se um número reduzido de critérios, pois, de acordo com Real et al. (2021), isso simplifica o modelo e evita o uso de diversos atributos redundantes, que dificulta a percepção das características mais significativas do problema.

Durante o período de 19 de abril a 03 de maio, o questionário foi enviado por *e-mail* para 31 Agentes de Decisão (AD) que compõem a equipe de elaboração dos Planos Municipais de Saneamento Básico de 50 municípios de pequeno porte do estado da Paraíba (TED nº 03/2019). Destes, 14 questionários foram respondidos, 45,2% do total, correspondendo a uma participação de 87,5% (7 AD) dos membros da equipe técnica da UFCG e 30,4% (7 AD) dos técnicos municipais selecionados para participar da pesquisa.

A partir da aplicação do teste de Kendall, eliminou-se as respostas com correlação fraca entre si e aquelas fortemente correlacionadas negativamente. Mais de 50% dos julgamentos de decisão para os critérios C1, C3, C6, C7, C8, C9 e C10 apresentaram correlação satisfatória ($p > 0,33$), com melhor desempenho observado para o indicador C10, onde 14 respostas (92,9%) foram consideradas consistentes. Já os critérios C2, C4 e C5 tiveram menos de 50% dos julgamentos com correlação significativa ($p > 0,33$), apresentando no mínimo 5 respostas consistentes.

Tabela 1 – Critérios selecionados no estudo

	Critérios	Descrição	Funções por alternativa de tratamento			
			A1	A2	A3*	A4
ECONÔMICOS	C1	Custo de implementação (R\$/hab.)	92,15	241,89	316,76	149,74
	C2	Custo de operação e manutenção (R\$/hab.ano)	4,32	18,43	28,80	7,49
	C3	Área do terreno necessária (m ² /hab.)	0,04	0,20	0,02	3,00
TÉCNICOS	C4	Confiabilidade	4,00	3,00	4,00	4,00
	C5	Simplicidade de operação e manutenção	3,00	4,00	3,00	5,00
AMBIENTAIS	C6	Eficiência de remoção da matéria orgânica (%)	32,50	82,50	90,00	85,00
	C7	Eficiência de remoção de sólidos suspensos (%)	60,00	85,00	92,50	90,00
	C8	Produção de lodo (m ³ /hab.ano)	0,24	0,60	0,00	0,00
SOCIAIS	C9	Odores	2,00	2,00	4,00	2,00
	C10	Vetores	3,00	4,00	2,00	2,00

*Considerou-se que os vermifiltros (A3) são um tipo de filtro biológico. Fonte: Adaptado de Von Sperling (2007), Sinha et al. (2008) e Madrid et al. (2019).

Além disso, a maior quantidade de respostas com correlação fraca ($p < 0,05$) foi observada nos questionários respondidos pelos técnicos municipais (35,7%). Isso pode estar associado a limitação financeira e a baixa capacidade institucional em municípios de pequeno porte, que trazem como consequências a falta de especialização técnica dos funcionários (MORETTI et al., 2021). Os pesos finais dos critérios para cada classificação dos parâmetros das bacias, obtidos após a exclusão de valores inconsistentes, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Pesos finais dos critérios para cada classificação de bacias de esgotamento

Critérios/Parâmetros	P1 - Área disponível		P2 - Urbanização		P3 - Uso da água		P4 - Classificação do rio quanto ao fluxo		
	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Humano	Agrícola	Perene	Intermitente	
C1	Custo de implementação	3,13	3,38	3,38	3,25	3,88	2,38	2,50	2,88
C2	Custo de operação e manutenção	3,40	4,00	3,80	3,40	3,80	2,20	2,40	3,20
C3	Área do terreno necessária	3,67	1,83	2,75	3,58	2,92	2,42	2,58	2,83
C4	Confiabilidade	3,17	3,33	3,17	3,50	4,00	2,67	3,67	4,00
C5	Simplicidade de operação e manutenção	3,60	3,20	3,60	3,20	3,40	2,20	2,40	3,20
C6	Eficiência de remoção da matéria orgânica	2,75	2,67	3,00	3,17	3,67	1,92	2,50	3,33
C7	Eficiência de remoção de sólidos suspensos	3,00	2,91	2,82	2,91	3,64	2,27	2,64	3,36
C8	Produção de lodo	3,40	3,00	3,10	3,40	3,70	2,50	2,80	3,40
C9	Odores	3,58	3,08	2,50	3,58	3,75	2,92	2,75	3,50
C10	Vetores	3,36	3,09	2,82	3,73	3,82	3,00	2,82	3,27

Fonte: Os autores (2024).

De maneira geral, as ponderações dos critérios indicaram uma maior importância para os critérios econômicos (C1 e C2), técnicos (C4 e C5) e sociais (C9 e C10), como observado por Munasinghe-Arachchige et al. (2020), Lisbôa et al. (2020) e Tres et al. (2022). Esses resultados corroboram com o estudo de Maciel et. al. (2023), que indica que em municípios de pequeno porte as soluções de tratamento devem possuir baixo custo, ter simplicidade técnica e garantir o bem-estar social da comunidade.

Entre os critérios ambientais, a produção de lodo (C8) possui alta importância na maioria das classificações das bacias, devido aos custos e complexidade do seu tratamento e disposição final ambientalmente adequada, conforme evidenciado por Goffi (2022). Em corpos receptores perenes e com uso agrícola, o critério possui importância média devido a possibilidade de reaproveitamento do lodo na agricultura.

Nas bacias com corpos receptores classificados com fluxo intermitente e uso humano, os critérios ambientais (C6, C7 e C8) e o critério C4 (Confiabilidade) apresentam importância alta a altíssima. Em rios com fluxo intermitente a capacidade de depuração da matéria orgânica é menor, de modo que uma baixa eficiência no tratamento dos efluentes afeta a qualidade dos recursos hídricos e possibilita o aumento de DRSAl (SOARES; SANTOS, 2021). Em corpos receptores com uso destinado ao consumo humano, a eficiência do tratamento é exigida, a fim de reduzir os riscos sanitários e os custos envolvidos no tratamento da água para consumo humano.

Para bacias com baixa área disponível o critério de área requerida (C3) foi considerado muito importante, com peso máximo atribuído, enquanto para uma bacia com alta área disponível o critério apresenta menor peso associado. Em bacias altamente urbanizadas, os critérios de confiabilidade (C4), de eficiência de tratamento (C6 e C7) e sociais (C9 e C10) têm alta a altíssima importância, tendo em vista que

nessas áreas o volume de esgoto gerado é maior e a produção de odores e vetores afeta significativamente a população (SALAMIRAD et al., 2021).

Classificação das bacias de esgotamento sanitário e determinação dos pesos associados

A Figura 3 exibe a delimitação das bacias de esgotamento estudadas e a Tabela 3 apresenta um resumo com a classificação destas de acordo com os quatro parâmetros de caracterização. Em todas as bacias, a área disponível (P1) foi avaliada como alta, devido à disponibilidade de espaço em comparação com a área requerida para a instalação da alternativa que requer uma maior extensão territorial (*wetlands* construídos).

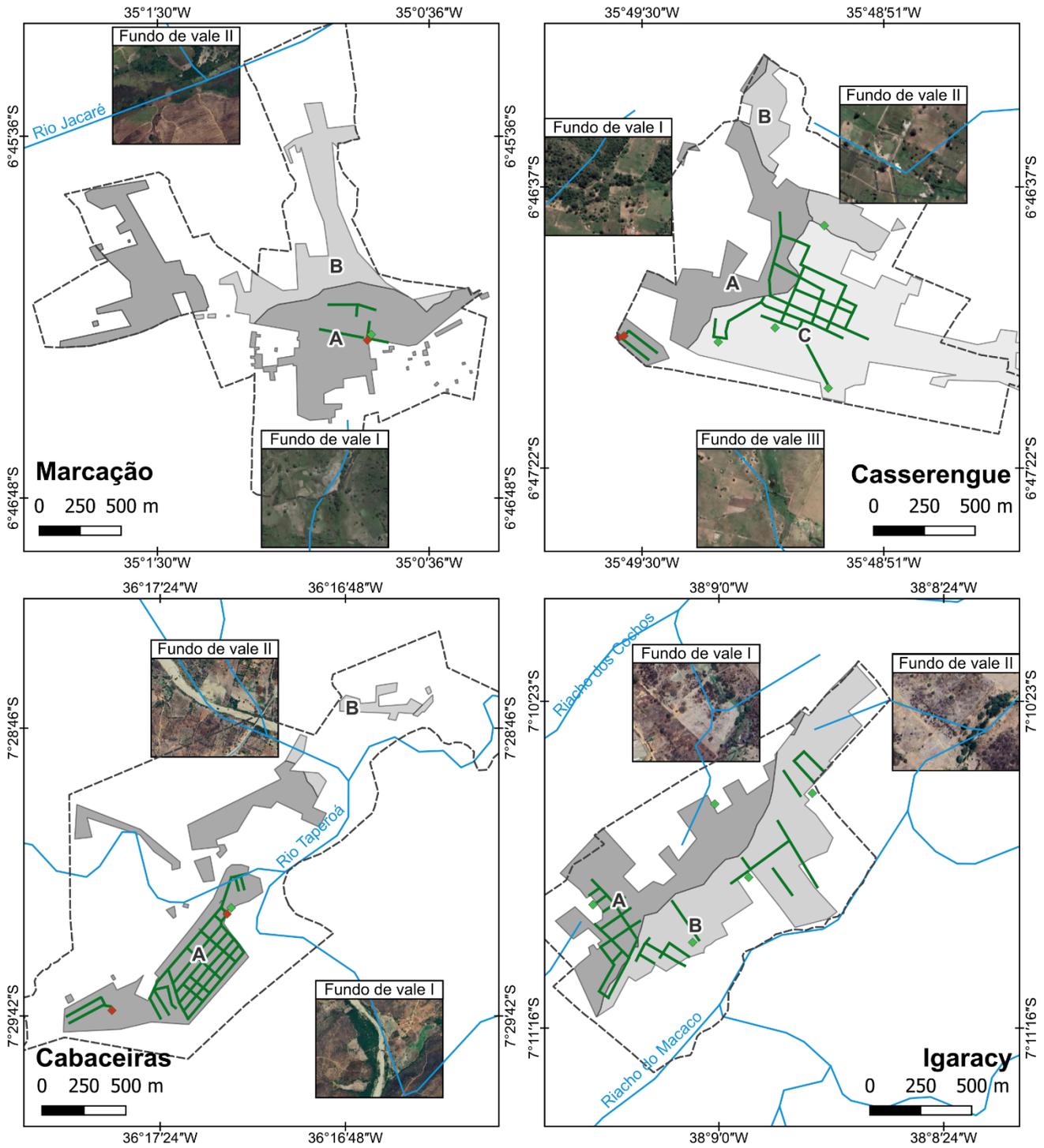
Tabela 3 – Classificação das bacias de esgotamento da zona urbana dos municípios estudados

Parâmetros	Bacias de esgotamento										
	Marcação		Casserengue			Cabaceiras		Igaracy			
	A	B	A	B	C	A	B	A	B		
P1	Área disponível		Alta		Alta			Alta			
P2	Urbanização		Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Alta
P3	Uso da água		Humano			Agrícola		Humano		Humano	
P4	Fluxo do rio		Perene			Intermitente		Intermitente		Intermitente	

Fonte: Os autores (2024).

A urbanização (P2) apresenta variação significativa entre as bacias, sendo a maioria classificada como alta (55,6%). Essa categoria é caracterizada pela presença de atividades comerciais e de prestação de serviços, distância reduzida entre os lotes das habitações e tendências de expansão. Nas bacias com baixa urbanização, notou-se uma maior distância entre os lotes das edificações, presença de áreas com atividades agrícolas, áreas verdes e áreas não habitadas, indicando um caráter de transição rural-urbano, conforme Gomes et al. (2020).

No que diz respeito ao uso da água (P3), observou-se que, com exceção do município de Casserengue, as bacias avaliadas têm os corpos receptores utilizados para o abastecimento de água para consumo humano. Em Casserengue, o uso agrícola foi identificado a partir de imagens de satélite (Figura 3), onde verificou-se a presença de práticas agropecuárias próximas às fontes de água. Para o parâmetro de classificação do fluxo do rio (P4), a avaliação das imagens de satélite da Figura 3 indicaram uma predominância de bacias com corpos receptores de fluxo intermitente, característicos do Semiárido Brasileiro. Especificamente em Marcação, os rios foram classificados como perenes devido às características geológicas e geomorfológicas litorâneas, alinhadas ao clima tropical chuvoso da região (FUNASA/UFCG, 2022).



Legenda

◆ Fossão	■ Bacias de esgotamento
◆ Descarga de esgoto a céu aberto	■ A
— Cursos d'água	■ B
— Rede coletora de esgotos	■ C
- - - Limite urbano (IBGE, 2021)	

N

Fonte: ANA (2013), IBGE (2021), Funasa/UFCG (2022)
Datum: Sirgas 2000

Figura 3 – Delimitação das bacias de esgotamento da zona urbana dos municípios estudados. Fonte: Os autores (2024).

A partir das classificações das bacias de esgotamento dos municípios (Tabela 3) e com base na Tabela 2, foram atribuídos os pesos dos critérios, exibidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Pesos finais dos critérios para as bacias de esgotamento da zona urbana do Distrito Sede dos municípios estudados

Critérios	Bacias de esgotamento										
	Marcação		Casserengue			Cabaceiras		Igaracy			
	A	B	A	B	C	A	B	A	B		
C1	Custo de implementação		3,20	3,13	3,04	2,97	3,04	3,34	3,27	3,27	3,34
C2	Custo de operação e manutenção		3,19	3,11	3,05	2,97	3,05	3,34	3,26	3,26	3,34
C3	Área do terreno necessária		3,16	3,06	3,03	2,93	3,03	3,31	3,21	3,21	3,31
C4	Confiabilidade		3,23	3,14	3,08	2,99	3,08	3,39	3,30	3,30	3,39
C5	Simplicidade de operação e manutenção		3,16	3,07	3,03	2,94	3,03	3,33	3,24	3,24	3,33
C6	Eficiência de remoção da matéria orgânica		3,18	3,05	3,05	2,92	3,05	3,35	3,22	3,22	3,35
C7	Eficiência de remoção de sólidos suspensos		3,23	3,08	3,12	2,97	3,12	3,38	3,24	3,24	3,38
C8	Produção de lodo		3,29	3,10	3,21	3,02	3,21	3,44	3,25	3,25	3,44
C9	Odores		3,33	3,08	3,27	3,02	3,27	3,48	3,23	3,23	3,48
C10	Vetores		3,36	3,14	3,27	3,05	3,27	3,48	3,25	3,25	3,48

Fonte: Os autores (2024).

Aplicação do PROMETHEE II

Para seleção dos sistemas de tratamento de esgoto, minimizou-se o valor dos critérios C1, C2, C3 e C8, pois a tecnologia será tanto melhor quanto menor for o valor destes, e maximizou-se os demais. O *ranking* das alternativas por bacia de esgotamento, juntamente com o fluxo líquido $Q(a)$ associado, é exposto na Tabela 5.

Tabela 5 – *Ranking* das alternativas por bacia de esgotamento

Ranking		Bacias de esgotamento									
		Marcação		Casserengue			Cabaceiras		Igaracy		
		A	B	A	B	C	A	B	A	B	
1º	Alternativa	A4	A3	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	
	$Q(a)$	0,1961	0,1616	0,1946	0,1982	0,1946	0,1976	0,2015	0,2015	0,1976	
2º	Alternativa	A3	A4	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	
	$Q(a)$	0,1015	0,1333	0,1049	0,0986	0,1049	0,1025	0,0970	0,0970	0,1025	
3º	Alternativa	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	
	$Q(a)$	-0,0335	-0,0285	-0,0364	0,0313	-0,0364	-0,0350	-0,0307	-0,0307	-0,0350	
4º	Alternativa	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	
	$Q(a)$	-0,2640	-0,2664	-0,2631	-0,2655	-0,2631	-0,2652	-0,2678	-0,2678	-0,2652	

Fonte: Os autores (2024).

A Tabela 5 indica que a alternativa A4 (*wetlands* construídos) apresentou a melhor colocação nas bacias estudadas, com exceção da bacia B do município de Marcação, onde a alternativa A3 (vermifiltro) alcançou a primeira colocação. Ambas as tecnologias se destacam pela ausência de produção de lodo e por suas eficiências na remoção da DBO e SS. De forma semelhante ao observado por Gichamo et al. (2020) e Tres et al. (2022), o bom desempenho das *wetlands* no ranking está associado ao seu baixo custo, simplicidade de operação e manutenção e bom desempenho em relação aos critérios sociais (produção de odores e vetores).

Apesar dessa solução ter o maior requerimento de área disponível para sua instalação, todas as bacias estudadas apresentaram alta área disponível para implementação da ETE.

Apesar da melhor colocação da alternativa A3 (vemifiltros) na bacia de esgotamento B de Marcação, nota-se que o valor do fluxo líquido associado as alternativas A3 e A4 é muito próximo, o que indica na verdade uma boa colocação de ambas as soluções no *ranking*. A alternativa A3 apresenta melhores eficiências no tratamento, importante para corpos receptores utilizados para o abastecimento humano, e menor possibilidade de geração de odores. Entretanto, a utilização do tratamento por vermifiltração requer maiores investimentos associados a implementação, operação e manutenção do sistema.

A Resolução nº 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) determina que a remoção mínima de DBO e sólidos suspensos (SS) é igual a, no mínimo, 60% e 20%, respectivamente, o que indica que as tecnologias A3 e A4 atendem à legislação. Conforme a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 2012), os efluentes tratados por ambas as alternativas, após desinfecção, poderiam ser utilizados para a irrigação de: culturas alimentícias processadas comercialmente, pomares, culturas não alimentícias, pastagens para rebanhos de leite, cereais, fibras e grãos. O reuso dos efluentes, em áreas agrícolas próximas as bacias estudadas, garante o aumento da oferta hídrica para outras atividades e a reciclagem dos nutrientes, além de garantir benefícios socioeconômicos para a comunidade.

O tanque séptico (A1), conhecido popularmente como fossão, ocupa o terceiro lugar do *ranking* de todas as bacias. De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2010), 33,3% dos municípios paraibanos que possuem tratamento de esgoto utilizam fossão, sendo a solução mais adotada no estado. Embora essa alternativa apresente os menores custos, ela gera mais odores e propicia uma menor eficiência de tratamento do efluente. Por possuir dificuldade em satisfazer os padrões de lançamento de efluentes (GOFFI, 2022), os fossões não possuem bom desempenho para a maior parte das bacias, onde observa-se uma predominância de corpos receptores de fluxo intermitente e uso da água para consumo humano.

Na bacia de esgotamento A da zona urbana de Marcação, Casserengue e Cabaceiras, existem fossões instalados. Nesses locais o tratamento dos efluentes pode ser complementado a partir da associação da tecnologia com a primeira colocada no *ranking* (*wetlands* contruídos), propiciando uma melhoria na eficiência de remoção dos poluentes.

O pior desempenho foi apresentado pela alternativa A2 (tanque séptico + filtro anaeróbio). A alta produção de lodo, maior possibilidade de geração de odores e a menor confiabilidade em comparação com as demais tecnologias, são fatores que implicaram em sua baixa colocação no *ranking*. A reduzida confiabilidade

está associada ao risco de entupimento do meio de suporte (CRUZ et al., 2019). Além disso, por conta da necessidade de remoção do lodo, a tecnologia tem custos adicionais de transporte e tratamento associados, que se torna um problema em município de pequeno porte onde há limitação financeira e baixa capacidade de pagamento por parte dos usuários (MORETTI et al., 2021).

Análise de sensibilidade

As faixas de estabilidade por critério e bacia de esgotamento encontram-se na Tabela 6. Em geral, os intervalos tiveram amplitude geral entre 0 e 33,84 (0,00 a 100,00% do somatório dos pesos dos critérios) e uma amplitude média de 0,50 a 11,92 (1,58 a 37,26%). No estudo de Makan et al. (2022), os intervalos foram considerados suficientemente amplos, com percentual dos pesos acima de 18,84%. Para Munasinghe-Arachchige et al. (2020), a maior variação observada foi de 0,00% a 34,90%. Assim, os resultados obtidos neste estudo indicam a robustez do modelo.

Tabela 6 – Intervalos de estabilidade das ponderações dos critérios

Critério	Intervalos de estabilidade, por bacia de esgotamento, para o ranking geral								
	Marcação		Casserengue			Cabaceiras		Igaracy	
	A	B	A	B	C	A	B	A	B
C1	0,97-5,04	0,00-3,71	1,01-4,89	0,80-4,61	1,01-4,89	1,00-5,30	0,79-5,02	0,79-5,02	1,00-5,30
C2	0,96-5,03	0,00-3,69	1,02-4,90	0,80-4,61	1,02-4,90	1,00-5,30	0,78-5,01	0,78-5,01	1,00-5,30
C3	0,00-4,48	2,66-6,08	0,00-4,24	0,00-4,20	0,00-4,24	0,00-4,69	0,00-4,66	0,00-4,66	0,00-4,69
C4	0,00-32,33	0,00-30,96	0,00-31,15	0,00-29,78	0,00-31,15	0,00-33,84	0,00-32,47	0,00-32,47	0,00-33,84
C5	1,40-8,63	0,07-3,54	1,43-8,23	1,23-8,03	1,43-8,23	1,49-9,04	1,29-8,84	1,29-8,84	1,49-9,04
C6	1,07-6,81	1,81-10,39	0,92-6,39	1,05-6,41	0,92-6,39	1,10-7,15	1,22-7,18	1,22-7,18	1,10-7,15
C7	0,00-10,71	1,84-10,41	0,00-10,23	0,07-9,94	0,00-10,23	0,00-11,20	0,14-10,91	0,14-10,91	0,00-11,20
C8	0,00-32,33	0,00-30,96	0,00-31,15	0,00-29,78	0,00-31,15	0,00-33,84	0,00-32,47	0,00-32,47	0,00-33,84
C9	0,06-5,25	2,47-30,96	0,00-5,03	1,31-4,88	0,00-5,03	0,00-5,50	0,13-5,35	0,13-5,35	0,00-5,50
C10	0,00-6,81	0,00-7,02	0,00-6,72	0,00-6,12	0,00-6,72	0,00-7,15	0,00-6,56	0,00-6,56	0,00-7,15

Fonte: Os autores (2024).

Os critérios C4 (Confiabilidade) e C8 (Produção de lodo) tem o maior intervalo de estabilidade (0,00 a 100,00%), o que indica que podem ser alterados sem que haja mudanças no ranking geral. Os demais critérios são mais sensíveis à alteração dos seus pesos, com destaque para os critérios econômicos C1 (Custo de implementação), C2 (Custo de operação e manutenção) e C3 (Área do terreno necessária), que possuem maior importância, conforme a ponderação realizada pelos agentes de decisão. Apenas na bacia B do município de

Marcação o critério C9 (Odores) assume um intervalo amplo, variando de 2,47 a 30,96 (7,99% a 100,00%), devido sua importância na classificação das alternativas dessa bacia.

Na aplicação do modelo, os *wetlands* construídos lideram os *rankings* para a maioria dos critérios. Entretanto, fora dos intervalos de estabilidade das ponderações dos critérios, essa alternativa se mantém como primeira colocada apenas para os critérios C5 (Simplicidade de operação e manutenção) e C7 (Eficiência de remoção de sólidos suspensos) para os quais os *wetlands* apresentam ótimo desempenho em relação aos demais tratamentos (Tabela 1). A tecnologia de fossão lidera o ranqueamento para os critérios C1 e C2, tendo em vista o menor custo associado a esse tratamento, enquanto que a alternativa A4 (tanque séptico + filtro anaeróbio) assume melhores colocações para o critério C10 (Vetores). Por fim, a alternativa A3 (vermifiltro) é primeira colocada para os critérios C3 e C9, devido à menor área requerida e a reduzida emissão de odores.

IV. CONCLUSÕES

A partir dos critérios econômicos, técnicos, ambientais e sociais selecionados e ponderados conforme as características das bacias de esgotamento dos municípios, determinou-se que a tecnologia de *wetlands* construídos (A4) apresentou o melhor desempenho global. Os critérios de custos, simplicidade de operação e manutenção e minimização de odores e vetores contribuíram significativamente para o resultado. As alternativas A1 (Tanque séptico) e A2 (Tanque séptico + filtro anaeróbio) detiveram as piores colocações devido às altas taxas de geração de lodo e menores eficiências de tratamento. Tendo em vista a existência de fossões na zona urbana de Marcação, Casserengue e Cabaceiras, pode-se considerar a associação de tecnologias, como forma de promover a melhoria da eficiência do tratamento.

O trabalho desenvolvido demonstrou-se possível de ser replicado em quaisquer bacias de esgotamento de municípios de pequeno porte, tendo em vista a diferenciação de ponderação conforme as classificações dos parâmetros de caracterização das bacias. Além disso, o modelo desenvolvido é robusto, como indicado pela análise de sensibilidade realizada.

Com a aplicação deste modelo de seleção pode-se promover a otimização da tomada de decisão por parte dos gestores, propiciando melhor uso dos recursos, ampliando a capacidade de investimentos, de forma a contribuir para redução da pobreza e melhoria da saúde e qualidade do meio ambiente. Seu aprimoramento pode ser feito por meio da adição de outras tecnologias de tratamento de esgoto aplicáveis aos municípios de pequeno porte e pela inclusão de outros critérios sociais e ambientais recorrentes, como a aceitação pública, a possibilidade de reuso do efluente tratado e os ganhos financeiros com a produção de biogás.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro da Superintendência Estadual da Fundação Nacional de Saúde (Funasa) da Paraíba, a partir do Termo de Execução Descentralizada nº 03/2021, parceria entre a Funasa e a Universidade Federal de Campina Grande, intitulado “Capacitação técnica e elaboração da minuta dos Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB) de 50 municípios selecionados no estado da Paraíba”.

V. REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E. C. L.; KRAVETZ, M. C.; CORRÊA, H. D. G. Gestão ambiental na utilização de tanque séptico com pneu inservível: uma alternativa para o aproveitamento dos pneus descartados e o tratamento do esgoto doméstico em Santarém – Pará. *Opens Science Research IV*, v. 4, 2022.
- BRANS, J. P; VINCKE, P.; MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*, v. 24, p. 228-238, 1986.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico Temático dos Serviços de Água e Esgotos – Visão Geral ano de referência 2022. Brasília: SNS/MDR, 2023.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. PLANSAB – Plano Nacional de Saneamento Básico. Brasília: SNS/MDR, 2019.
- CARVALHO, W. S. Uso do método de apoio a decisão PROMETHEE ii para evidenciação de assimetrias urbanas em uma cidade brasileira. *Revista Produção e Desenvolvimento*, v. 8, n. 625, p. 1-14, jan./dez. 2022.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Tecnologias para tratamento de esgotos sanitários. São Paulo: CETESB, 1988.
- CRUZ, L. M. O.; GOMES, B. G. L. A.; TONETTI, A. L.; FIGUEIREDO, I. C. S. Using coconut husks in a full-scale decentralized wastewater treatment system: The influence of an anaerobic filter on maintenance and operational conditions of a sand filter. *Ecological Engineering*, v. 127, p. 454-459, fev. 2019.
- ĐURĐEVIĆ, D.; ŽIKOVIĆ, S.; BLEČIĆ, P. Sustainable Sewage Sludge Management Technologies Selection Based on Techno-Economic-Environmental Criteria: Case Study of Croatia. *Energies*, v. 15, p. 1-23, mai. 2022.
- FAGUNDES, M. V. C.; KELER, Á. C.; TELES, E. O.; MELO, S. A. B. V.; FREIRES, F. G. M. Multicriteria Decision-Making System for Supplier Selection Considering Risk: A Computational Fuzzy AHP-Based Approach. *IEEE Latin America Transactions*, v. 19, n. 9, jun. 2021.
- FIGUEIREDO, I. C. S.; COASACA, R. L.; DUARTE, N. C.; MIYAZAKI, C. K.; LEONEL, L. P.; SCHNEIDER, J.; TONETTI, A. L. Fossa Séptica Biodigestora: avaliação crítica da eficiência da tecnologia, da necessidade da adição de esterco e dos potenciais riscos à saúde pública. *Revista DAE*, v. 67, n. 220, p. 100-114, 2019.
- FUNASA. Fundação Nacional de Saúde. UFCG. Universidade Federal de Campina Grande. Produto C – Diagnóstico Técnico-Participativo. Campina Grande: UFCG, 2022. Disponível em: <<https://sims.ufcg.edu.br/documentos>>. Acesso em: 01 mar. 2023.

GICHAMO, T.; GÖKÇEKUŞA, H.; OZSAHIN, D. U.; GELETE, G.; UZUN, B. Evaluation of different natural wastewater treatment alternatives by fuzzy PROMETHEE method. *Desalination and Water Treatment*, v. 177, p. 400-407, fev. 2020.

GOFFI, A. S. Modelo para definição do uso de sistemas adequados para tratamento de esgoto urbano em pequenas e médias localidades. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção. Ponta Grossa: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022.

GOMES, N.; MATOS, R.; LOBO, C. Classificação demográfica e caracterização geográfica dos municípios de pequeno porte do sudeste brasileiro. *Revista da ANPEGE*, v. 16, n. 30, p. 5574, 2020

GUO, F.; MEN, H.; CHEN, W. Waste-to-energy incineration site selection framework based on heterogeneous fuzzy regret-PROMETHEE model considering life-cycle carbon emissions. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 31, p. 3722-3744, 2023.

HATEFI, M. A. An Improved Rank Order Centroid Method (IROC) for Criteria Weight Estimation: An Application in the Engine/Vehicle Selection Problem. *Informatica*, v. 34, n. 2, p. 249-270, 2023.

KALBAR, P. P.; KARMAKAR, S.; ASOLEKAR, S. R. Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach. *Journal of Environmental Management*, v. 113, p. 158-169, dez. 2012.

KALBAR, P. P.; KARMAKAR, S.; ASOLEKAR, S. R. The influence of expert opinions on the selection of wastewater treatment alternatives: A group decision-making approach. *Journal of Environmental Management*, v. 128, p. 844–851, out. 2013.

LIMA, M. T. A.; OLIVEIRA, E. C. B.; ALENCAR, L. H. Modelo de apoio à decisão para priorização de projetos em uma empresa de saneamento. *Production*, v. 24, n. 2, p. 351-363, abr./jun. 2014.

LISBÔA, E. G.; LISBÔ, É. G.; LOBO, M. A. A.; TOURINHO, H. L. Z.; BLOO, L. A. L.; BORGES, F. Q. Aplicação de um modelo Multicriterial para auxiliar a seleção de tecnologias de tratamento de águas residuais em zonas urbanas. / Application of a Multicriteria model to assist in the selection of wastewater treatment technologies in urban areas. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 4, p. 20739–20768, 2020.

MACIEL, J. L. V. S.; FEITOSA, P. H. C.; ARAÚJO, M. M. C.; ROCHA, E. G.; BATISTA, G. S.; FONSECA, R. F.; FEITOSA, F. C.; LEITE, L. L. Avaliação dos sistemas de tratamento de esgoto em municípios de pequeno porte na Paraíba. *Revista Observatio de la Economia Latinoamericana*, v. 21, n. 10, p. 17344-17362, 2023.

MADRID, F. J. P. L.; SCHNEIDER, J.; MARQUES, M. M. S.; PARIZOTTO, M. C.; FIGUEIREDO, I. C. S.; TONETTI, A. L. Vermifiltração: o uso de minhocas como uma nova alternativa para o tratamento de esgoto. *Revista DAE*, v. 67, n. 220, São Paulo, ago. 2019.

MAKAN, A.; GOURAIZIM, M.; FADILI, A. Sustainability assessment of wastewater treatment systems using cardinal weights and PROMETHEE method: case study of Morocco. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, p. 19803-19815, out. 2021.

MARGARIDO, N. T.; NAVEGA, P. P. B.; PHILIPPON, V. J. Estudo de concepção de sistema de esgoto sanitário para o município de Gavião Peixoto e proposta de alternativas para gestão dos subprodutos. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Hidráulica e Ambiental. São Paulo: Escola Politécnica de Universidade de São Paulo, 2012.

- MESQUITA, T. C. R.; ROSA, A. P.; GOMES, U. A. F.; BORGES, A. C. Gestão descentralizada de soluções de esgotamento sanitário no Brasil: aspectos conceituais, normativos e alternativas tecnológicas. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 56, p. 46-66, jan./jun. 2021.
- MOLINOS-SENANTE, M.; GÓMEZ, T.; CABALLERO, R.; HERNÁNDEZ-SANCHO, F.; SALA-GARRIDO, R. Assessment of wastewater treatment alternatives for small communities: An analytic network process approach. *Science of The Total Environment*, v. 532, p. 676–687, nov. 2015.
- MOLINOS-SENANTE, M.; GÓMEZ, T.; GARRIDO, B. M.; CABALLERO, R.; SALAGARRIDO, R. Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: a composite indicator approach. *Science of The Total Environment*, v. 497-498, p. 607–17, nov. 2014.
- MORETTI, R. S.; CUNHA, P. E. V.; JUNIOR, G. T. M.; FILHO, A. F. T. Aspectos específicos do planejamento e da política pública de saneamento nos pequenos municípios. *Projectare*, v. 1, n. 11, p. 101- 116, 2021.
- MUNASINGHE-ARACHCHIGE, S. P.; ABEYSIRIWARDANA-ARACHCHIGEHIMALI, I. S.; DELANKA-PEDIGE, H. M. K.; NIRMALAKHANDAN, N. Sewage treatment process refinement and intensification using multi-criteria decision-making approach: A case study. *Journal of Water Process Engineering*, v. 37, p. 1-9, out. 2020.
- NETO, J. M. R. O desafio do federalismo brasileiro no saneamento básico. *Interações*, v. 23, n. 2, p. 441-456, abr./jun. 2022.
- PERONDI, T.; WOLFF, D. B.; DECEZARO, S. T.; ARAÚJO, R. K. Wetlands construídos para o tratamento de esgoto doméstico: uma análise comparativa do custo do ciclo de vida. *Ambiente Construído*, v. 20, n. 2, p. 175-189, abr./jun. 2020.
- REAL, H.; SOARES, S.; FERREIRA, C.; MARQUES, L.; GONÇALVES, T. F. Referencial de critérios para checklist de avaliação da sustentabilidade em restaurantes. *ACTA Portuguesa de Nutrição*, v. 26, p. 18-30, 2021.
- ROSSONI, H. A. V.; FARIA, M. T. S.; SILVA, A. C.; HELLER, L. Aspectos socioeconômicos e de desenvolvimento humano municipal determinantes na ausência de prestadores de serviços de esgotamento sanitário no Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, n. 21, p. 393-402, mar./abr. 2020.
- SALAMIRAD, A.; KHEYBARI, S.; ISHIZAKA, A.; FARAZMAND, H. Wastewater treatment technology selection using a hybrid multicriteria decision-making method. *International Transactions in Operational Research*, v. 30, p. 1-26, 2021.
- SENNA, D. A.; PEREIRA, L. P.; REZENDE, S. Desafios para a expansão do saneamento em áreas rurais: caracterização de ruralidade por meio de algoritmos de aprendizado de máquina. *Revista de Administração, Contabilidade e Economia da Fundace*, v. 14, n. 4, p. 59-76, 2023.
- SINHA, R. K.; BHARAMBE, G.; CHAUDHARI, U. Sewage treatment by vermifiltration with synchronous treatment of sludge by earthworms: a low-cost sustainable technology over conventional systems with potential for decentralization. *The Environmentalist*, v. 28, p. 409-420, abr. 2008.
- SOARES, S. R. A.; SANTOS, A. S. P. Priorização da água de reuso em bacias hidrográficas com base no planejamento de recursos hídricos: proposta metodológica e exemplos das bacias do Rio Grande e do Piancó-Piranhas-Açu. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, v. 9, n. 2, p. 111-125, 2021.
- TONETTI, A. L.; FIGUEIREDO, I. C. S.; MADRID, F. J. P. L.; MAGALHÃES, T. M.; MIYAZAKI, C. K. Cost confrontation study for decentralized wastewater treatment: When to adopt a cluster or onsite system? *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 19, p. 3529-3539, abr. 2021.

TRES, V.; AZEVEDO, J. C. R.; KNAPIK, H. G. Application of the Analytic Hierarchy Process for selection of alternative solutions for domestic wastewater treatment. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 57, n. 4, dez. 2022.

USEPA. United States Environment Protection Agency. *Guidelines for Water Reuse*. Washington: USEPA, 2012.

VON SPERLING, M. *Wastewater characteristics treatment and disposal*. 1. ed. v. 1. Lodon: IWA Publishing, 2007.

YAHYA, M. N.; GÖKÇEKUŞ, H.; OZSAHIN, D. U. Comparative Analysis of Wastewater Treatment Technologies. *Journal Kejuruteraan*, v. 32, n. 2, p. 221-230, mai. 2020.
