UTILIZAÇÃO DE PYTHON E GEOPROCESSAMENTO EM REALIZAÇÃO DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA OBTENÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS DE INTERVENÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NO DISTRITO FEDERAL

Felipe Albuquerque Carvalho[(1)]
Graduando em Engenharia Ambiental e Ciências Ambientais pela Universidade de Brasília (UnB) e atua como Técnico em Edificações pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB). Possui experiência em geoprocessamento, sensoriamento remoto e modelagem aplicada ao saneamento, com foco na automação de rotinas e análise espacial utilizando linguagem de programação Python. Participa de projetos de pesquisa e extensão nas áreas de recursos hídricos, saneamento e geotecnologias.
Bruno Araújo Albuquerque[(2)]
Engenheiro Civil pela Universidade do Distrito Federal (UDF), com especialização em Saneamento Ambiental e Ciência de Dados. Possui 10 anos de experiência no setor de saneamento básico. Tem experiência em análises geoespaciais com QGIS, ArcGIS e ferramentas de BI. Atualmente integra a equipe de planejamento dos sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário da CAESB. Atua na otimização da infraestrutura e da operação dos sistemas por meio de análises e gestão de projetos.
Diogo Correia Marques dos Santos[(3)]
Engenheiro Ambiental pela Universidade de Brasília (UnB). Atua como Técnico em Edificações na Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), desenvolvendo projetos de redes de água e esgoto, análises e modelagem hidráulica. Possui proficiência em geoprocessamento (QGIS e ArcGIS Pro) e na criação de dashboards em Power BI para monitoramento de indicadores operacionais, suporte à otimização e operação de sistemas de saneamento.
Bruno Cabral Neves[(4)]
Engenheiro Florestal pela Universidade de Brasília (UnB) e pós-graduado com especialização em Gestão Ambiental pela Universidade Paulista (UNIP). Atua no setor de saneamento ambiental na elaboração de projetos de redes de água e esgoto além de análises de modelagem hidráulica, com ampla vivência em QGIS, ArcGIS e Power BI na produção de mapas, georreferenciamento e dashboards. Atualmente atua como Técnico em Edificações Pleno pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB).
Iuri Cesar de Oliveira Campos[(5)]
Engenheiro Civil pela Universidade do Distrito Federal (UDF), com especialização em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos. Possui 20 anos de experiência no setor de saneamento básico e atua como Superintendente do Departamento de Operação e Manutenção de Redes de Água e Esgoto da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB).

Endereço[(1)]**:** SIND QI 1 - Pte. Alta Norte (Gama) - Brasília - DF - CEP: 72445-010 - Brasil
Tel: +55 (61) 99993-5599 - e-mail: felipe.a.carvalho97@gmail.com

RESUMO

O planejamento da manutenção de redes de abastecimento de água requer ferramentas capazes de integrar diferentes variáveis operacionais e estruturais em um diagnóstico coerente. Este trabalho apresenta uma aplicação de análise multicritério espacial para priorização de áreas de intervenção em um sistema de distribuição de água, utilizando ambiente SIG e rotina automatizada em Python com ArcGis Pro. A metodologia foi estruturada a partir da criação de grids (malha regular de 100 m × 100 m) sobre à área de estudo, seguida da integração de informações cadastrais e operacionais de rede (idade, material e diâmetro), ordens de serviço de vazamento, pressão estática, volume micromedido e quantidade de válvulas de manobra e conexões. Cada critério foi transformado em uma nota de 1 a 5 por meio de classificação estatística ou qualitativa, e posteriormente combinado por soma ponderada, conforme pesos previamente definidos. O resultado final foi interpolado por IDW a partir dos centroides dos grids, gerando superfícies contínuas de priorização e mapas temáticos para 15 Regiões Administrativas e 2 regiões. Os produtos cartográficos permitiram identificar áreas com maior criticidade operacional, demonstrando o potencial da abordagem como ferramenta de apoio ao planejamento de manutenção e à priorização de intervenções na infraestrutura de distribuição.

PALAVRAS-CHAVE: Análise Multi Critério; Python e Geoprocessamento; Distribuição de Água

INTRODUÇÃO

A infraestrutura dos sistemas de abastecimento de água (SAA) é submetida continuamente a processos de envelhecimento, desgaste e acúmulo de ocorrências ao longo do tempo (Rajani et al, 2001). Em redes urbanas extensas, como é o caso do Distrito Federal (DF), a identificação de áreas prioritárias para intervenção não pode depender apenas de inspeções pontuais ou da experiência das equipes de campo, sendo necessário utilizar abordagens capazes de transformar grandes volumes de dados em informações úteis para a tomada de decisão (Aldrees et al, 2023). Variáveis como pressão, diâmetro, idade da tubulação, material, volume micromedido, frequência de ordens de serviço (OSs) de vazamentos e quantidade de componentes da rede podem fornecer informações relevantes sobre o desempenho da infraestrutura e auxiliar na identificação de áreas mais suscetíveis a falhas, perdas ou necessidade de intervenção (Kettler et al, 1985 e Rajani et al, 2001.

Nesse contexto, para direcionar recursos técnicos e financeiros às regiões com maior potencial de ganho para o sistema, o emprego de ferramentas de geoprocessamento e automação computacional permitem integrar dados cadastrais, operacionais e espaciais em processos de análise e apoio à decisão (Aldrees, 2023). Entre essas abordagens, a análise de decisão multicritério (MCDA) permite a avaliação conjunta de diferentes fatores associados à condição e ao desempenho da infraestrutura (Aldrees, 2023). Quando associada a rotinas automatizadas, essa metodologia favorece a atualização periódica dos diagnósticos, reduz o tempo de processamento e contribui para a construção de análises replicáveis ao longo do tempo (Aldrees, 2023).

Além da seleção dos critérios de análise, a definição da unidade espacial utilizada para agregação dos dados representa um desafio importante em estudos de geoprocessamento (Openshaw, 1984). Embora limites urbanísticos e setores operacionais sejam frequentemente utilizados como referência, essas divisões nem sempre representam adequadamente a dinâmica dos sistemas (Openshaw, 1984). No caso de SAA, uma mesma área urbanística pode ser atendida por diferentes setores de distribuição, enquanto limites hidráulicos e cadastrais estão sujeitos a atualizações constantes e eventuais inconsistências. Portanto, a utilização de malhas regulares surge como uma alternativa capaz de reduzir parte dessas limitações, proporcionando unidades espaciais homogêneas e favorecendo a comparação entre diferentes áreas do sistema.

Após a definição da unidade espacial de análise, é interessante representar os resultados de forma que os padrões espaciais possam ser interpretados de maneira clara e contínua. Nesse sentido, técnicas de interpolação espacial podem ser empregadas para transformar informações discretas em superfícies de análise (Burrough et al, 1998). Entre elas está o método do Inverso da Distância Ponderada (IDW), fundamentado no princípio de que elementos geograficamente próximos tendem a apresentar maior relação do que elementos mais distantes (Burrough, et al 1998). A aplicação dessa abordagem permite evidenciar tendências espaciais e facilitar a identificação de áreas com maior potencial de criticidade

OBJETIVO

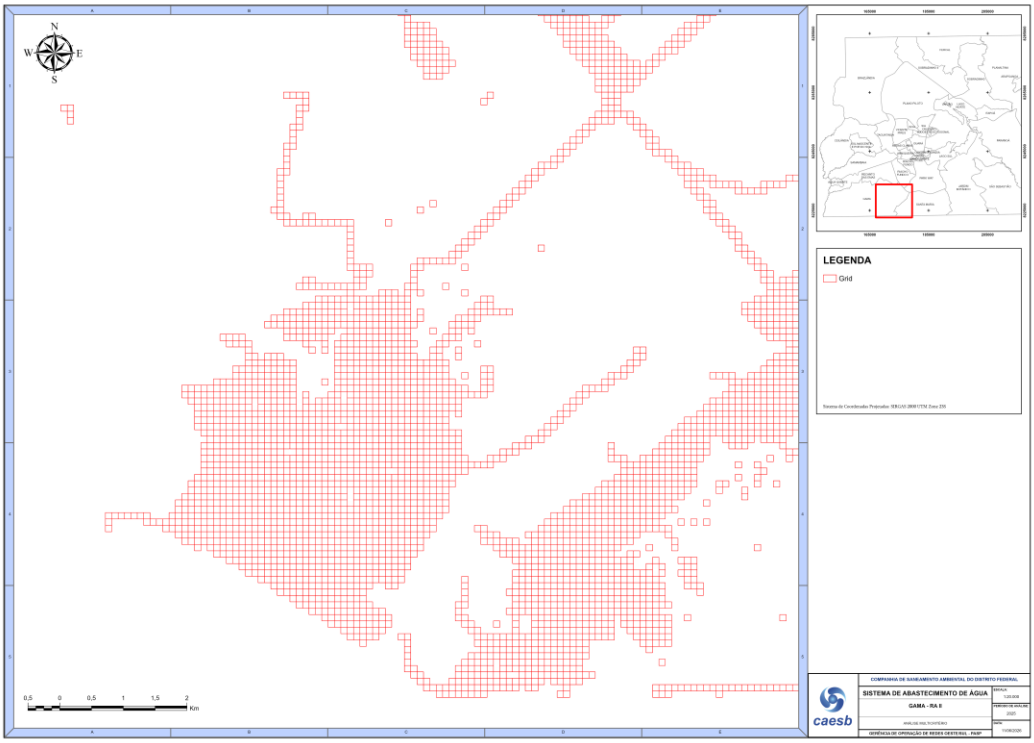
Desenvolver e aplicar uma metodologia de análise multicritério espacial para priorização de manutenção ou intervenção em redes de distribuição de água, integrando variáveis cadastrais e operacionais em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica), com geração de mapas temáticos capazes de identificar áreas prioritárias de intervenção em diferentes locais da cidade.

METODOLOGIA

A pesquisa foi conduzida em ambiente geoespacial utilizando o software ArcGIS Pro através de rotinas automatizadas em Python, a partir de bases cartográficas cadastrais e operacionais do SAA. O processamento iniciou-se com a geração de uma malha regular (grid) de 100 m × 100 m sobre a área de estudo. Em seguida, foram mantidas apenas as células que continham trechos de rede ou ligações em seu interior, uma vez que todos os critérios avaliados estão direta ou indiretamente associados a esses elementos. Embora a maior parte das variáveis analisadas esteja relacionada à infraestrutura da rede, critérios como volume micromedido e quantidade de ordens de serviço de vazamento (consertos de ramal) estão vinculados às ligações. No caso das OSs, o georreferenciamento é realizado a partir da ligação mais próxima ao local de execução, justificando a manutenção dos grids que continham ligações mesmo na ausência de trechos de rede em seu interior.

A figura 1 apresenta um exemplo dos grids na RA do Gama. Devido ao tamanho do grid e a escala do mapa, optou-se por representar aqui apenas uma RA como exemplo, entretanto os grids foram criados para toda a área Sul e Oeste do DF, que corresponde a 15 RAs.

Figura 1. Exemplo de Grids Criados e Selecionados na RA Gama – DF.



Fonte: Elaboração Própria.

É possível verificar alguns grids "soltos", isto se deve ao fato de que nem todas as ligações estão georreferenciadas corretamente, o que representará um erro para a análise, que será discutido neste texto.

Após a seleção da malha regular, foram estabelecidos os critérios que compõem o modelo multicritério. A Tabela 1 exibe os parâmetros selecionados e os respectivos pesos adotados no processo de ponderação. Na sequência, são descritos os procedimentos metodológicos empregados para cada critério utilizado na MCDA.

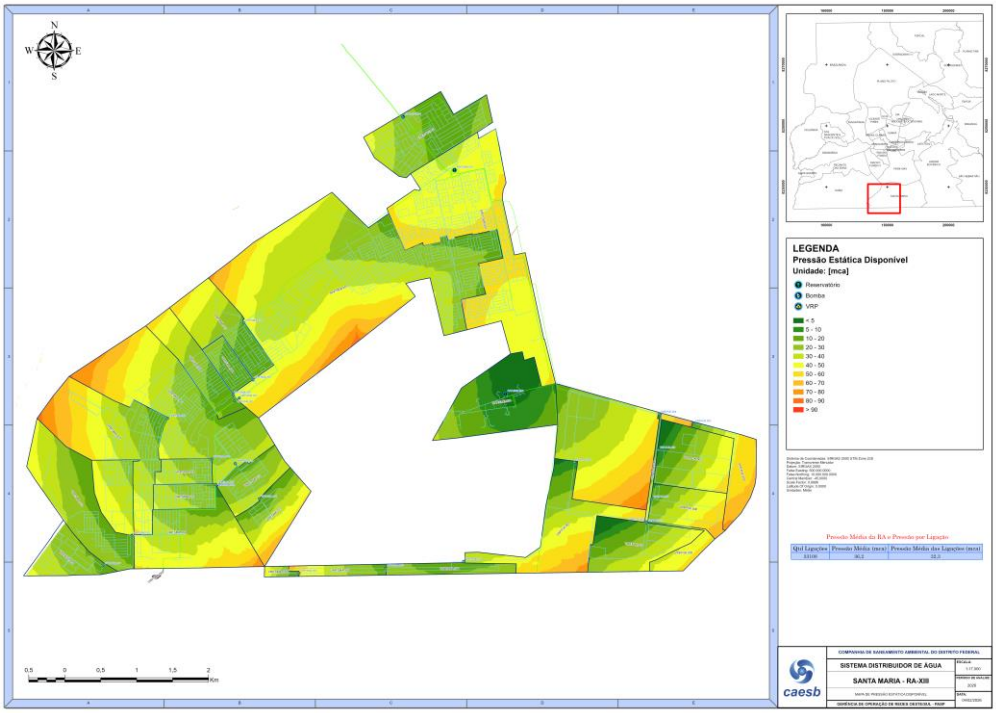
Tabela 1. Critérios e Pesos Utilizados na Análise Multi Critério

Critério	Peso (%)
Pressão Estática Disponível	20
Diâmetro da Rede	20
Idade da Rede	15
Material da Rede	10
Volume Micromedido	15
Quantidade de Ordens de Serviço de Conserto de Ramais	15
Quantidade de Conexões e Válvulas de Manobra	5

Fonte: Elaboração Própria.

- A pressão estática disponível foi obtida por meio da pressão média de cada célula do grid, calculada utilizando estatística zonal sobre um raster de pressão. O raster foi elaborado a partir de um Modelo Digital de Terreno de 5 m de resolução espacial e da carga hidráulica disponível nos reservatórios e válvulas redutoras de pressão (carga piezométrica), permitindo estimar a distribuição espacial da pressão ao longo das zonas de pressão. A Figura 2 expõe um exemplo de raster de pressão utilizado na análise.

Figura 2. Exemplo de Raster de Pressão Estática Utilizado – RA Santa Maria – DF.



Fonte: Elaboração Própria.

De maneira qualitativa, e usando como base a NBR 12.218 de 2017, foram definidas as notas para pressão estática, tal como a tabela 2.

Tabela 2. Notas para Pressão Estática Média do Grid.

Pressão (mca)	Nota
< 15	1
15 a 25	2
25 a 35	3
35 a 45	4
> 45	5

Fonte: Elaboração Própria.

- Para os critérios relacionados à infraestrutura da rede (idade, material e diâmetro), os trechos foram inicialmente segmentados pela malha de grids por meio de operação de interseção espacial. Em seguida, cada segmento recebeu uma nota para cada parâmetro, previamente definida por meio de classificação qualitativa baseada em conhecimentos fundamentados na literatura e na experiência dos profissionais envolvidos com a gestão de ativos e falhas em SAA. Conforme descrito por Rajani et al (2001) e Kettler et al (1985), tubulações mais antigas, materiais mais suscetíveis à deterioração e condutos de menor diâmetro tendem a apresentar maior vulnerabilidade operacional.

Posteriormente, os segmentos foram agrupados pelo identificador de cada grid e, para cada célula, foi calculada a média ponderada das notas pelo comprimento dos trechos contidos em cada grid, conforme demonstrado na Equação 1. A tabela 3 apresenta as classes e notas adotadas para cada critério sendo que grids sem nenhum segmento receberam nota zero.

$$\mathbf{C_g} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(C_i * L_i)}{\sum_{i=1}^{n} L_i} \quad \text{(equação 1)}$$

Onde:

- Cg = Valor final do critério
- Ci = Nota atribuída ao segmento i
- Li = Comprimento do segmento i dentro do grid
- n = Número de segmentos presentes no grid

Tabela 3. Notas para Parâmetros Relacionados à Rede

Diâmetro (Φ)	Nota	Idade (anos)	Nota	Material	Nota
≤ 50	5	≤ 20	1	Aço	1
50 a 75	4	20 a 30	2	PEAD	2
75 a 150	3	30 a 40	3	PVC	3
150 a 200	2	40 a 50	4	Ferro	4
≥200	1	≥50	5	Cimento Amianto	5

Fonte: Elaboração Própria.

- O volume micromedido foi obtido a partir do histórico de consumo das ligações, considerando apenas registros de ligações pressurizadas (ativas ou inativas) e não agrupadas, evitando duplicidades. Para cada ligação foi calculada a mediana de todos os consumos registrados, adotada como medida representativa da demanda por apresentar menor sensibilidade a valores atípicos, como vazamentos ou erros de leitura, quando comparada à média, por exemplo (Triola, 2017). Para a definição das classes foram considerados apenas os grids com valores entre 0 e 2 L/s, faixa que apresentou distribuição mais representativa dos dados observados e melhor discriminação entre as classes.

- As OSs de consertos de ramal utilizadas na análise foram filtradas considerando apenas registros executados e baixados no ano de 2025. Para cada grid foi contabilizada a quantidade de ocorrências. De forma semelhante, as camadas de conexões (tês, cruzetas, curvas, entre outros) e válvulas de manobra (VMAs) foram filtradas para manter apenas elementos ativos, sendo posteriormente contabilizadas por célula. A soma desses elementos foi utilizada como indicador da quantidade de componentes da rede.

Os critérios de volume micromedido, quantidade de OSs de ramais e quantidade de componentes foram classificados em cinco classes por meio do método de Quebras Naturais de Jenks (Natural Breaks), implementado pela biblioteca MapClassify. Para a definição dos intervalos foram considerados apenas os grids com valores superiores a zero, e os grids sem registros receberam nota igual a zero. A qualidade dos agrupamentos foi avaliada por meio do índice Goodness of Variance Fit (GVF), calculado conforme a Equação 2. Valores de GVF próximos de 1 indicam melhor ajuste das classes à distribuição dos dados (Jenks et al, 1971). Os valores obtidos para cada parâmetro são apresentados na Tabela 4.

$$GVF = \frac{SDAM - SDCM}{SDAM}$$ (equação 2)

Onde:

- GVF = Goodness of Variance Fit
- SDAM = Sum of Squared Deviations from the Array Mean (soma dos desvios quadráticos em relação à média global dos dados)
- SDCM = Sum of Squared Deviations from the Class Means (soma dos desvios quadráticos em relação à média de cada classe)

Tabela 4. Valores de GVF Obtidos para a Classificação por Quebras Naturais de Jenks

Critério	Goodness of Variance Fit (GVF)
Micromedido (L/s)	0,9213
Qtd OS de Ramal	0,9348
Qtd de Componentes	0,9544

Fonte: Elaboração Própria.

Os resultados obtidos apresentaram valores de GVF superiores a 0,90 para os três parâmetros avaliados, indicando boa representação da distribuição dos dados pelos intervalos gerados pelo método de Quebras Naturais (Jenks et al, 1971). A Tabela 5 retrata esses intervalos e as respectivas notas atribuídas com base neles.

Tabela 5. Classes de Quebras Naturais de Jenks e Respectivas Notas

Micromedido (L/s)	Nota	Qtd OS de Ramal	Nota	Qtd de Componentes	Nota
≤ 0,10	1	1	1	1	1
0,10 a 0,21	2	1 a 3	2	1 a 8	2
0,21 a 0,46	3	3 a 6	3	8 a 18	3
0,46 a 1,01	4	6 a 11	4	31 a 45	4
≥ 2,00	5	11 a 31	5	45 a 115	5

Fonte: Elaboração Própria.

Após a obtenção das notas de todos os critérios, foi realizada a combinação linear ponderada para cada grid, utilizando os pesos definidos para cada parâmetro tal como foi mostrado na Tabela 1. O valor final de cada célula foi obtido pela soma ponderada das notas individuais, resultando em um índice sintético, conforme equação 3.

$$\mathbf{I_g = \sum_{j=1}^{m} (N_j * P_j)}$$ (equação 3)

Onde:

- I_g = Índice final do grid
- N_j = Nota Atribuída ao critério
- P_j = Peso atribuído ao critério
- m = Número de critérios

Com objetivo de gerar uma superfície contínua de análise, os valores finais dos grids foram convertidos em pontos localizados nos centroides de cada célula e esses pontos foram utilizados como dados de entrada para a interpolação pelo método IDW, calculado conforme as Equações 4 e 5. Os parâmetros adotados no IDW são indicados na Tabela 6.

$$\mathbf{Z(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i Z(x_i)}{\sum_{i=1}^{n} w_i}}$$ (equação 4)

$$\mathbf{w_i = \frac{1}{d_i^p}}$$ (equação 5)

Onde:

- $Z(x_0)$ = Valor final interpolado
- $Z(x_i)$ = Valor observado no ponto i
- w_i = Peso associado ao ponto i
- n = Número de pontos utilizados na interpolação
- d_i = Distância entre o ponto interpolado e o ponto amostrado
- p = Parâmetro de potência do IDW

Tabela 6. Parâmetros Usados no IDW

Potência	Distância Máxima (m)	Raio de Busca (pontos)	Resolução Espacial (m)
2	150	12	5

Fonte: Elaboração Própria.

Por fim, o raster resultante foi recortado para cada RA e poligonal regional, permitindo a produção dos mapas finais de priorização.

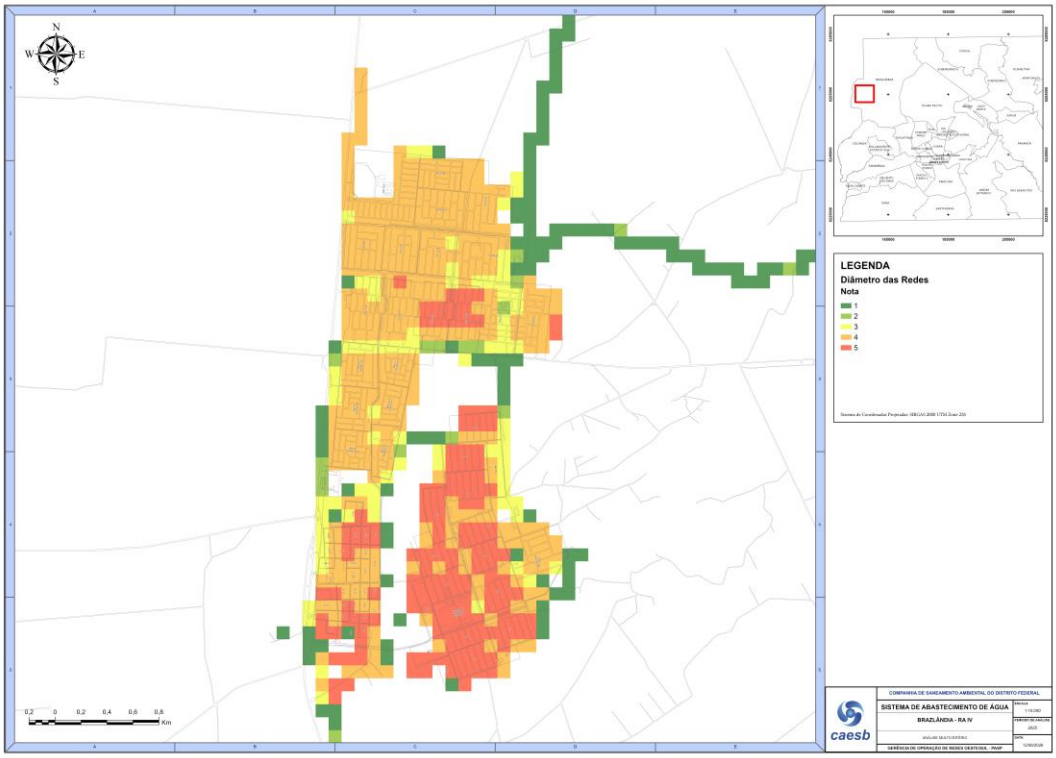
Todas as etapas de processamento descritas nesta metodologia, desde a integração dos dados geoespaciais até o cálculo das notas e a aplicação da análise multicritério, foram automatizadas por meio de scripts desenvolvidos em linguagem Python. Os códigos utilizados encontram-se disponibilizados em repositório público para consulta e reutilização (Carvalho, 2026), disponível em: https://github.com/felipecarvalho97/Water-MCDA.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 3, 4 e 5 são exemplos de mapas temáticos gerados para os critérios relacionados à infraestrutura da rede (idade, material e diâmetro). Os mapas representam as notas atribuídas a cada célula da malha regular a partir da agregação dos atributos dos trechos de rede contidos em cada grid. Embora os mesmos critérios pudessem ser representados diretamente sobre os trechos de rede, a utilização da malha regular favorece a visualização dos padrões espaciais, aumenta o contraste entre áreas com diferentes características e reduz a influência de possíveis inconsistências cadastrais, pois representa uma agregação dos dados.

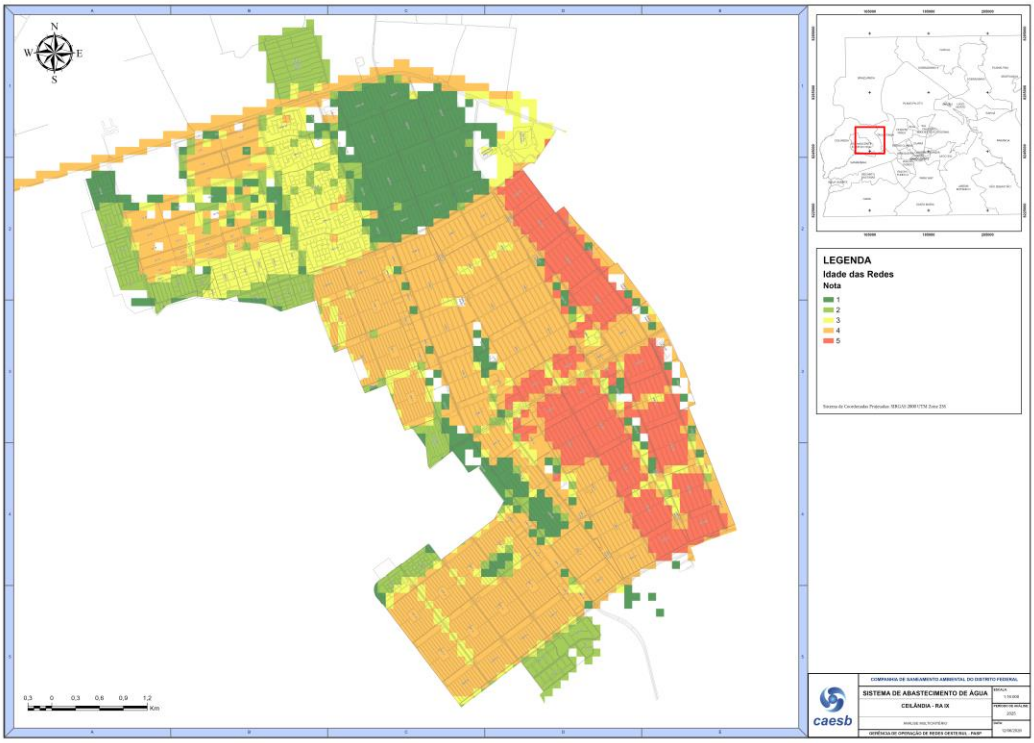
As figuras têm caráter ilustrativo e permitem visualizar como os atributos das redes foram transformados em notas espaciais antes da etapa de integração multicritério. Os demais critérios avaliados não foram apresentados individualmente, uma vez que o objetivo dessas figuras é apenas exemplificar o processo de espacialização e atribuição de notas utilizado na análise.

Figura 3. Exemplo de Espacialização das Notas do Critério Diâmetro das Redes – RA Brazlândia – DF



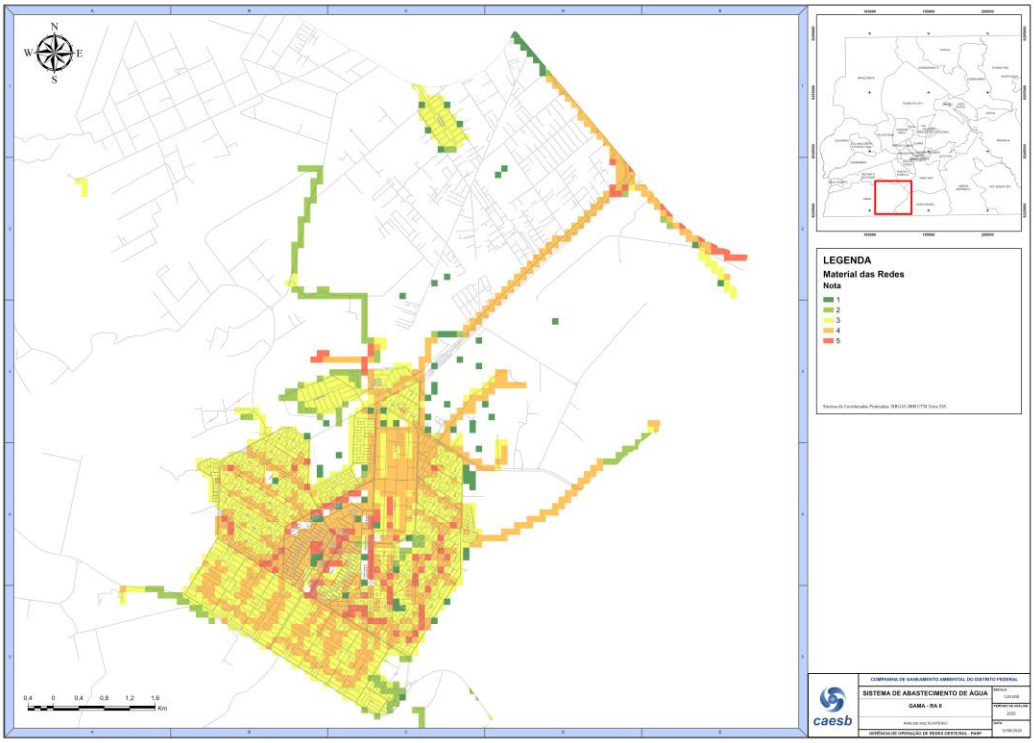
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4. Exemplo de Espacialização das Notas do Critério Idade das Redes – RA Ceilândia – DF



Fonte: Elaboração Própria.

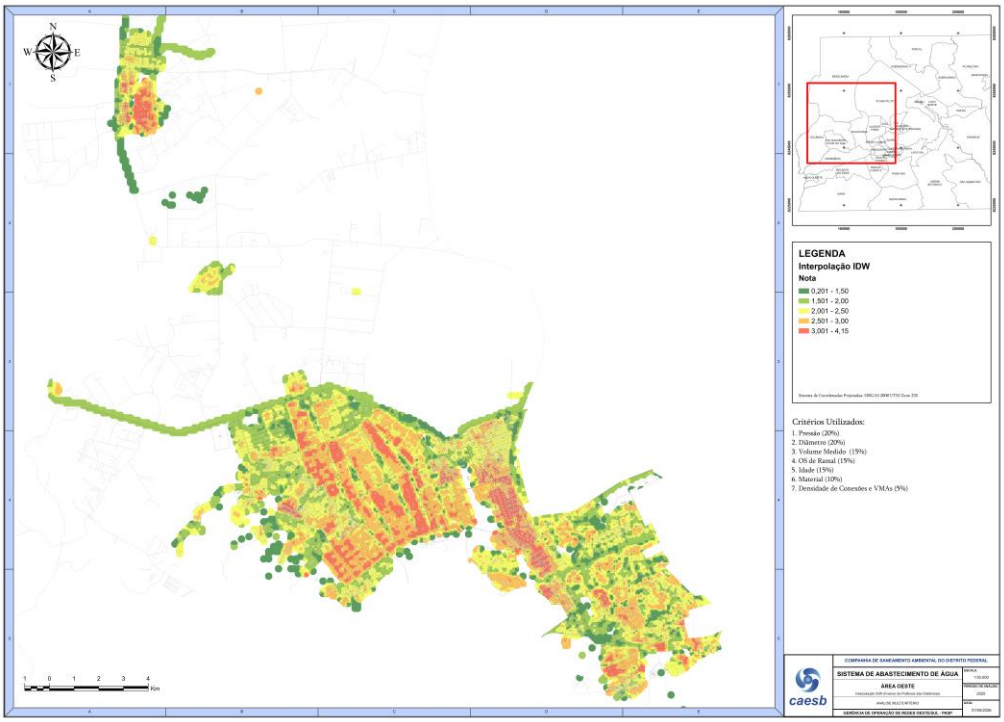
Figura 5. Exemplo de Espacialização das Notas do Critério Material das Redes – RA Gama – DF



Fonte: Elaboração Própria.

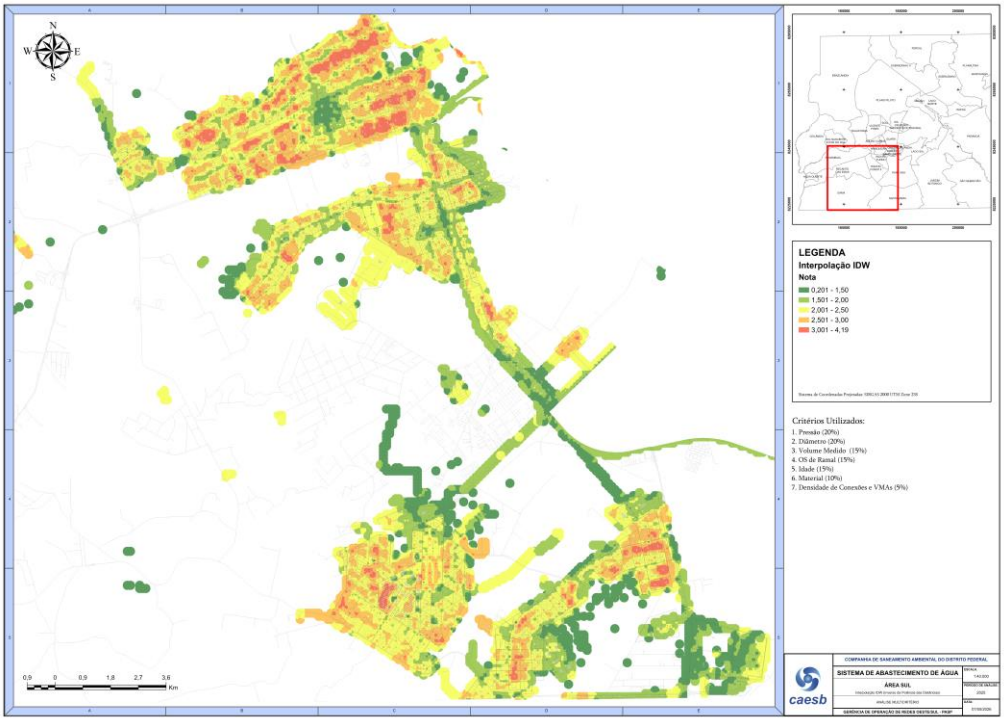
As Figuras 6 e 7 apresentam exemplos dos mapas finais obtidos pela análise multicritério, resultantes da integração dos sete critérios avaliados e da interpolação espacial por IDW. Representam a distribuição espacial da nota calculada, permitindo identificar áreas prioritárias para intervenção.

Figura 6. Exemplo de Resultado da Análise Multi Critério – Área Oeste – DF



Fonte: Elaboração Própria

Figura 7. Exemplo de Resultado da Análise Multi Critério – Área Sul – DF



Fonte: Elaboração Própria.

Os resultados demonstram a capacidade da metodologia em consolidar informações cadastrais, operacionais e hidráulicas em um único produto cartográfico. As áreas com maiores índices representam locais onde diferentes fatores desfavoráveis ocorrem simultaneamente, indicando regiões que podem demandar estudos mais detalhados ou ações prioritárias de manutenção, renovação de ativos e planejamento operacional. Dessa forma, a MCDA fornece um instrumento de apoio à tomada de decisão, contribuindo para a priorização de recursos em sistemas de abastecimento de água.

Os resultados também devem ser analisados considerando as limitações inerentes às bases cadastrais utilizadas. Informações georreferenciadas, especialmente relacionadas às ligações de água e aos registros operacionais, podem apresentar inconsistências de posicionamento ou cadastro, introduzindo incertezas de difícil quantificação nos resultados espaciais. Entretanto, a utilização de procedimentos de agregação espacial por grids e de indicadores estatísticos tende a reduzir a influência de erros pontuais, permitindo a identificação de padrões espaciais mais representativos do comportamento do sistema (Burrough et al, 1998). Adicionalmente, a coerência dos resultados é observada quando comparada ao conhecimento técnico das equipes gestoras e às análises operacionais já empregadas pela companhia, o que reforça a aplicabilidade da metodologia como ferramenta de apoio à tomada de decisão.

Entretanto, os resultados não devem ser interpretados de forma isolada. A análise multicritério constitui uma ferramenta complementar ao conjunto de avaliações normalmente realizadas pelas equipes de planejamento e manutenção, podendo ser utilizada em conjunto com análises de pressão, mapas de calor de ordens de serviço, indicadores de perdas e demais informações operacionais disponíveis. Além disso, a metodologia apresenta caráter flexível, permitindo a inclusão, exclusão ou ajuste de critérios conforme os objetivos da análise e as características do sistema avaliado.

CONCLUSÃO

A análise multicritério espacial mostrou-se uma ferramenta adequada para apoiar a priorização de intervenções em redes de abastecimento de água. A integração de informações cadastrais, operacionais e hidráulicas em uma malha regular permitiu representar espacialmente diferentes fatores associados à infraestrutura e ao desempenho do sistema.

A metodologia desenvolvida possibilitou transformar dados dispersos em um índice sintético de priorização, posteriormente representado por meio de superfícies contínuas geradas por interpolação espacial. Os resultados demonstraram o potencial da abordagem para identificar áreas prioritárias de forma objetiva, contribuindo para o planejamento de manutenção, renovação de ativos e intervenções no sistema.

Além de produzir resultados compatíveis com a lógica operacional do sistema, validado pela experiência dos profissionais de campo, a utilização de rotinas automatizadas em Python conferiu reprodutibilidade e facilidade de atualização à metodologia. Dessa forma, o trabalho disponibiliza um modelo replicável e adaptável a diferentes realidades operacionais, podendo incorporar novos critérios conforme as necessidades de cada sistema de distribuição de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALDREES, A.; ALMUTAIRI, A.; ALHARBI, R.; et al. GIS-Based Identification of Locations in Water Distribution Networks Vulnerable to Leakage. Applied Sciences, v.13, n.8, p.4692, 2023.

2. ABNT NBR 12218**,** Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público – Procedimento. Rio de Janeiro, 2017.

3. BURROUGH, P.A.; McDONNELL, R.A. Principles of Geographical Information Systems. Oxford: Oxford University Press, 1998.

4. CARVALHO, F. Water-MCDA: Python scripts for GIS-based Multicriteria Decision Analysis (MCDA) applied to water distribution network asset prioritization. GitHub, 2026. Disponível em: https://github.com/felipecarvalho97/Water-MCDA.

5. JENKS, G.F.; CASPALL, F.C. Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction. Annals of the Association of American Geographers, v.61, n.2, p.217-244, 1971.

6. KETTLER, A.J.; GOULTER, I.C. An analysis of pipe breakage in urban water distribution networks. Canadian Journal of Civil Engineering, v.12, n.2, p.286-293, 1985.

7. RAJANI, B.; KLEINER, Y. Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models. Urban Water, v.3, n.3, p.151-164, 2001.

8. OPENSHAW, S. The Modifiable Areal Unit Problem. Norwich: Geo Books, 1984.

9. TRIOLA, M.F. Introdução à Estatística. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.