

OTIMIZAÇÃO DE INFRAESTRUTURA HÍDRICA E EFICIÊNCIA NO GASTO PÚBLICO: UMA ABORDAGEM DE ANÁLISE ESPACIAL PARA O SISTEMA ADUTOR BANABUIÚ–SERTÃO CENTRAL

João Arthur Veras Barros Dias¹

Alisson Frota Teixeira²

Ricardo Kassner Carubbi²

Francisco de Assis Leandro Filho^{2,3}

Rilder de Sousa Pires²

RESUMO

O planejamento de infraestrutura hídrica no semiárido brasileiro demanda equilíbrio entre segurança hídrica e eficiência na alocação de recursos públicos. Este trabalho propõe um modelo de otimização espacial para o sistema Banabuiú–Sertão Central no contexto do Projeto Malha D'Água, empregando teoria dos grafos e algoritmos de árvore geradora mínima. A integração de dados geoespaciais e processamento computacional permitiu definir um traçado ótimo, reduzindo a extensão da rede de 676 km para 633 km, o que representa economia significativa sem comprometer a cobertura de abastecimento dos 46 distritos atendidos.

PALAVRAS-CHAVE: Infraestrutura Hídrica. Eficiência Alocativa. Planejamento Territorial. Otimização de Redes.

ABSTRACT

Water infrastructure planning in Brazil's semi-arid region requires balancing water security with efficient public spending. This study proposes a spatial optimization model for the Banabuiú–Sertão Central system within the Malha D'Água Project, using graph theory and minimum spanning tree algorithms. Integration of geospatial data and computational analysis defined an optimal network layout, reducing total extension from 676 km to 633 km, representing significant savings without compromising supply coverage for all 46 districts.

KEYWORDS: Water Infrastructure. Allocative Efficiency. Territorial Planning. Network Optimization.

ÁREA TEMÁTICA: Área 3 – História e Geografia Econômica

Subárea: Geoprocessamento e Análise Espacial

CLASSIFICAÇÃO JEL: C61, Q25, R53.

¹ Universidade de Fortaleza; joaoarthurvbd@edu.unifor.br; (85) 9.9767-8357

² Universidade de Fortaleza

³ Instituto Federal do Ceará

OTIMIZAÇÃO DE INFRAESTRUTURA HÍDRICA E EFICIÊNCIA NO GASTO PÚBLICO: UMA ABORDAGEM DE ANÁLISE ESPACIAL PARA O SISTEMA ADUTOR BANABUIÚ–SERTÃO CENTRAL

RESUMO

O planejamento de infraestrutura hídrica no semiárido brasileiro demanda equilíbrio entre segurança hídrica e eficiência na alocação de recursos públicos. Este trabalho propõe um modelo de otimização espacial para o sistema Banabuiú–Sertão Central no contexto do Projeto Malha D'Água, empregando teoria dos grafos e algoritmos de árvore geradora mínima. A integração de dados geoespaciais e processamento computacional permitiu definir um traçado ótimo, reduzindo a extensão da rede de 676 km para 633 km, o que representa economia significativa sem comprometer a cobertura de abastecimento dos 46 distritos atendidos.

PALAVRAS-CHAVE: Infraestrutura Hídrica. Eficiência Alocativa. Planejamento Territorial. Otimização de Redes.

ABSTRACT

Water infrastructure planning in Brazil's semi-arid region requires balancing water security with efficient public spending. This study proposes a spatial optimization model for the Banabuiú–Sertão Central system within the Malha D'Água Project, using graph theory and minimum spanning tree algorithms. Integration of geospatial data and computational analysis defined an optimal network layout, reducing total extension from 676 km to 633 km, representing significant savings without compromising supply coverage for all 46 districts.

KEYWORDS: Water Infrastructure. Allocative Efficiency. Territorial Planning. Network Optimization.

ÁREA TEMÁTICA: Área 3 – História e Geografia Econômica

Subárea: Geoprocessamento e Análise Espacial

CLASSIFICAÇÃO JEL: C61, Q25, R53.

1. INTRODUÇÃO

O planejamento de infraestrutura hídrica no semiárido brasileiro impõe desafios significativos à gestão pública, exigindo o equilíbrio entre a garantia da segurança hídrica e a eficiência na alocação de recursos escassos. A trajetória do desenvolvimento econômico do estado do Ceará é historicamente marcada pela convivência com períodos recorrentes de escassez hídrica, que afetam desde a agricultura familiar até a viabilidade de polos industriais e urbanos. A seca prolongada observada entre 2012 e 2016 expôs vulnerabilidades estruturais do sistema tradicional de abastecimento, levando ao esgotamento de diversos reservatórios estratégicos e evidenciando a necessidade de reorganização espacial da infraestrutura hídrica estadual (CASTRO, 2019).

Nesse contexto crítico, o Governo do Estado concebeu o Projeto Malha D'Água, uma política pública de reestruturação da arquitetura de abastecimento no interior cearense. A implementação de grandes obras de infraestrutura linear, como sistemas adutores, envolve custos de capital extremamente elevados. Em um cenário de restrição fiscal — realidade que caracteriza os orçamentos estaduais nas últimas décadas — a definição do traçado dessas redes deve seguir princípios de eficiência alocativa, maximizando o bem-estar social por unidade de recurso investido (REZENDE; CUNHA, 2010). A economia de recursos não apenas reduz custos diretos de investimento, mas libera recursos públicos para outras áreas prioritárias ou para ampliação do próprio sistema de abastecimento em regiões geograficamente prioritárias.

A disponibilidade crescente de ferramentas computacionais sofisticadas, dados geoespaciais de alta qualidade e algoritmos de otimização avançados criou uma oportunidade para que decisões de planejamento territorial sejam fundamentadas em análise quantitativa rigorosa. A Teoria dos Grafos oferece linguagem e ferramentas particularmente adequadas para modelar problemas de redes de infraestrutura (AHUJA; MAGNANTI; ORLIN, 1993). Um problema particularmente relevante é o da Árvore Geradora de Custo Mínimo (Minimum Spanning Tree - MST): dado um grafo ponderado, encontrar um subconjunto de arestas que conecte todos os nós com o menor custo total possível, sem criar redundâncias na estrutura (KRUSKAL, 1956; PRIM, 1957).

A aplicação de algoritmos de MST para otimização de redes de distribuição de água tem sido documentada na literatura internacional, demonstrando reduções significativas em custos de instalação mantendo cobertura completa (GEEM, 2006). Simultaneamente, a evolução das bases de dados geoespaciais — particularmente iniciativas de código aberto como OpenStreetMap — e de ferramentas de processamento geoespacial democratizaram o acesso a capacidades analíticas que anteriormente estavam restritas a grandes consultorias ou órgãos governamentais especializados (HAKLAY; WEBER, 2008; BOEING, 2017).

Este trabalho propõe um modelo de otimização espacial para o projeto da rede de adutoras do sistema Banabuiú–Sertão Central (BSC), inserido no contexto do Projeto Malha D'Água. Utilizando a teoria dos grafos e algoritmos de árvores geradoras mínimas, o estudo modela a rede de abastecimento visando a minimização da extensão da malha e dos custos de investimento. A metodologia integra dados geoespaciais e processamento computacional para definir o traçado ótimo, utilizando ferramentas open-source (OSMnx, GeoPandas, NetworkX) e o solver de otimização Gurobi (HAGBERG; SCHULT; SWART, 2008).

A presente contribuição situa-se na intersecção entre as áreas de Planejamento Territorial, Geoprocessamento e Análise Espacial, e Gestão Pública, oferecendo uma análise de como técnicas contemporâneas de modelagem matemática e análise espacial podem informar decisões de planejamento público que geram impactos significativos na alocação eficiente de recursos escassos e, conseqüentemente, na trajetória de desenvolvimento territorial do estado do Ceará.

2. O SISTEMA BANABUIÚ–SERTÃO CENTRAL E O PROJETO MALHA D'ÁGUA

2.1. Contexto de Insegurança Hídrica e Políticas de Reestruturação

Diante do cenário de insegurança hídrica agravado pelas mudanças climáticas, o Projeto Malha D'Água é aqui apresentado como instrumento técnico de avaliação da resiliência e eficiência do sistema de abastecimento, e não como proposta de intervenção direta. O modelo permite diagnosticar vulnerabilidades, comparar cenários de captação e distribuição quanto à garantia hídrica, eficiência operacional e robustez frente a eventos extremos, além de mensurar impactos associados à dispersão de ETAs, às perdas e à dependência de mananciais vulneráveis. Dessa forma, o Malha D'Água se configura como ferramenta analítica de apoio à decisão, fornecendo subsídios objetivos para o planejamento e a modernização da infraestrutura hídrica.

A concepção do Projeto Malha D'Água reflete uma mudança paradigmática na política hídrica cearense. Enquanto o modelo tradicional se baseava predominantemente em investimentos em grandes açudes isolados — uma estratégia que predominou durante a maior parte do século XX — o novo enfoque reconhece que a segurança hídrica no semiárido exige não apenas a captação estratégica de água, mas também uma rede eficiente de distribuição que minimize perdas e maximize o acesso equitativo aos recursos disponíveis (REZENDE; CUNHA, 2010). O projeto visa, portanto, adensar a rede de adutoras para garantir o abastecimento humano difuso em áreas rurais e o abastecimento urbano em municípios polos, reduzindo as vulnerabilidades de sistemas descentralizados.

A motivação para esse estudo é clara: o ciclo de seca 2012-2016 expôs não apenas a fragilidade de captações isoladas, mas também a ineficiência de redes de distribuição que não otimizam o transporte de água entre os reservatórios estratégicos e os pontos de demanda. A concentração de recursos hídricos em poucos açudes — Castanhão, Orós, Jaguaribe, entre outros — evidencia que a otimização da rede de transporte entre esses pontos de suprimento e a periferia consumidora é tão crítica quanto a ampliação da capacidade de armazenamento.

2.2. Localização Geográfica e Características da Região do Sertão Central

A rede proposta pela Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (SRH-CE) para o sistema Banabuiú–Sertão Central (BSC) abrange uma vasta área territorial. Este sistema é crítico para a região do Sertão Central, uma das áreas com balanço hídrico mais desafiador do estado. O Sertão Central constitui um dos polos econômicos do interior cearense, onde atividades agropecuárias — particularmente a fruticultura irrigada e a produção de grãos — representam vetor importante de geração de renda e emprego.

Geograficamente, o Sertão Central localiza-se no interior do estado, com altitudes variando entre 100 e 800 metros acima do nível do mar. A região é caracterizada por clima semiárido, com precipitação média anual em torno de 600-900 mm, distribuição irregular ao longo do ano e altos índices de evapotranspiração. Esses fatores combinados resultam em balanço hídrico crônico desfavorável, particularmente nos períodos de seca prolongada.

O sistema BSC atende 46 distritos localizados em diversos municípios da região, incluindo Quixeramobim, Itauçu, Mombaça, Jaguaratama, Saboeiro e Piquet Carneiro. A população potencialmente atendida é estimada em dezenas de milhares de habitantes. Esses distritos compreendem tanto as sedes municipais quanto localidades rurais e vilas dispersas pela região. A topografia varia significativamente, com trechos em planícies do Sertão e áreas de transição para o Planalto da Ibiapaba.

A infraestrutura de captação do sistema baseia-se principalmente no Açude Banabuiú — que dá nome ao sistema — e em conexões para outros reservatórios da bacia do Rio

Jaguaribe. O Açude Banabuiú, construído em 1906 como obra estratégica de armazenamento hídrico, possui capacidade de armazenamento de aproximadamente 160 milhões de metros cúbicos, consolidando-se como um dos principais mananciais da região.

2.3. Características Técnicas do Projeto Malha D'Água

O Projeto Malha D'Água, concebido e implementado pela Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará, constitui um empreendimento de infraestrutura hídrica de larga escala, envolvendo centenas de quilômetros de adutoras, dezenas de estações elevatórias e um sistema hierarquizado de distribuição de água. O projeto é estruturado em sistemas adutores regionais, sendo o sistema Banabuiú–Sertão Central um dos principais componentes.

A rede de adutoras proposta pela SRH-CE para o sistema BSC apresenta uma configuração que segue princípios tradicionais de planejamento, onde o traçado segue predominantemente a malha viária existente, garantindo acesso para manutenção e facilitando a integração com infraestrutura municipal. O traçado original, apresentado pela SRH-CE, totaliza aproximadamente 676 quilômetros de tubulação principal e ramais, distribuídos através de trechos que conectam a ETA (Estação de Tratamento de Água) a cada um dos 46 distritos alvo.

O sistema contempla estações elevatórias estrategicamente localizadas para transpor diferenças topográficas e manter pressões adequadas ao longo da rede. A escolha dos pontos de localização dessas estações seguiu critérios de viabilidade técnica e econômica, considerando restrições de terreno e disponibilidade de energia elétrica. O sistema de controle e monitoramento baseia-se em princípios de operação centralizada, permitindo ajustes de vazão e pressão conforme as demandas sazonais e emergências operacionais.

2.4. Importância Estratégica para o Desenvolvimento Regional

A adequada provisão de água através do sistema BSC possui implicações que transcendem a simples garantia de consumo doméstico. Para a produção agrícola, particularmente a fruticultura irrigada que caracteriza a agricultura comercial do Sertão Central, a disponibilidade confiável de água em quantidade e qualidade adequadas é fator determinante da viabilidade econômica. A infraestrutura de abastecimento possibilita não apenas o atendimento de demandas básicas de consumo humano, mas também oferece oportunidades para ampliação de áreas irrigadas, diversificação produtiva e melhoria da resiliência socioeconômica das comunidades rurais.

Do ponto de vista urbano, o sistema garante o abastecimento das sedes municipais, permitindo o desenvolvimento de atividades comerciais, industriais e de serviços. A confiabilidade do sistema é crítica para a atração de investimentos privados em processamento agroindustrial e outras atividades econômicas que dependem de acesso seguro à água.

Além disso, o projeto contribui para objetivos de equidade social ao viabilizar o acesso a água de qualidade em comunidades rurais historicamente excluídas de serviços básicos de saneamento. Essa universalização do acesso impacta positivamente indicadores de saúde pública, reduzindo a incidência de doenças de veiculação hídrica e melhorando condições de vida.

3.1. Definição da Área de Estudo e Processamento de Dados

A área de estudo compreende 46 distritos localizados nos territórios do Sertão Central e do Médio Jaguaribe, distribuídos em diversos municípios da região. A delimitação da área foi estabelecida em consonância com o escopo do Projeto Malha D'Água, contemplando todas as localidades alvo do sistema Banabuiú–Sertão Central.

A construção da base de dados geoespaciais seguiu as seguintes etapas:

1. **Limites Territoriais:** Os limites municipais foram obtidos em formato WKT (*Well-Known Text*) e processados através da biblioteca *GeoPandas* e *NetworkX* (HAGBERG et al., 2008) para a unificação em uma geometria única representativa da área de influência do sistema. Este procedimento garantiu a coerência espacial de toda a análise e permitiu a integração harmônica de múltiplas camadas de informação geográfica.
2. **Infraestrutura Viária:** Utilizando o pacote *OSMnx* (BOEING, 2017), que integra dados do *OpenStreetMap*, extraiu-se a malha viária existente na região. A premissa econômica adotada é que as adutoras tendem a seguir, preferencialmente, as faixas de domínio das estradas existentes para reduzir custos de desapropriação e facilitar a manutenção e operação futura. Esta hipótese é fundamentada em práticas consolidadas de engenharia, onde a utilização de faixas viárias públicas ou com direitos de passagem estabelecidos reduz significativamente os custos de aquisição de terras e simplifica processos administrativos de licenciamento ambiental e desapropriação.
3. **Modelagem de Nós e Arestas:** O sistema foi modelado de forma que a adutora principal, os ramais adutores e as sedes distritais (pontos de demanda) são representados como nós (*nodes*) no grafo, enquanto as arestas (*edges*) correspondem aos caminhos viários possíveis. Cada nó foi georreferenciado com coordenadas latitude-longitude, e cada aresta foi ponderada pela distância planimétrica entre nós.
4. **Validação de Dados:** Procedeu-se à verificação de consistência entre os dados extraídos do *OpenStreetMap* e referências cartográficas locais, identificando lacunas na cobertura viária ou inconsistências potenciais. Onde necessário, dados complementares foram integrados manualmente, baseados em conhecimento local e documentação técnica dos órgãos públicos estaduais.

3.2. Otimização Matemática

O objetivo central do modelo é obter uma Árvore Geradora de Custo Mínimo (*Minimum Spanning Tree* - MST) que assegure a cobertura de todos os distritos com a menor extensão total de rede possível. Esta formulação garante que a rede seja conectada (todos os 46 distritos recebem abastecimento), acíclica (sem redundâncias desnecessárias) e de custo mínimo (eficiência econômica máxima).

Procedeu-se ao cálculo sistemático dos caminhos de menor distância entre todos os pares de distritos, gerando um grafo direcionado derivado (H). O modelo de otimização foi formulado como um problema de programação linear inteira e resolvido utilizando o solver Gurobi (2024), que implementa algoritmos de branch-and-cut para garantir a otimização da solução.

3.2.1. Função Objetivo

A função objetivo minimiza o custo total de investimento, representado pelo somatório das distâncias de cada trecho ativo, sujeita às restrições de conectividade, conforme expresso na Equação 1:

$$\min \sum_{(i,j) \in H} C_{ij} \cdot x_{ij} \quad (1)$$

onde C_{ij} é o custo associado ao trajeto (neste caso, a distância física em quilômetros) e x_{ij} é a variável binária de decisão (assume valor 1 se a conexão entre i e j for construída, e 0 caso contrário).

3.2.2. Restrições do Modelo

Em modelos de Pesquisa Operacional, restrições são expressões matemáticas que delimitam o conjunto de soluções possíveis, representando os limites físicos, operacionais, econômicos ou lógicos que o sistema real impõe ao processo de decisão (HILLIER; LIEBERMAN, 2011).

O presente modelo segue uma adaptação da formulação proposta em Kayışoğlu e Akgün (2021) para o *Multiple Allocation Tree of Hubs Location Problem*, ajustada ao contexto de redes de abastecimento hídrico com ponto de origem único (ETA). As restrições apresentadas estruturam um modelo capaz de gerar uma árvore geradora de custo mínimo enraizada na ETA, garantindo conectividade, ausência de ciclos e assegurando que a solução obtenha uma rede hidraulicamente plausível, topologicamente consistente e economicamente eficiente.

3.2.3. Definição das Variáveis

Para maior clareza da formulação, apresentam-se a seguir as variáveis binárias e contínuas utilizadas no modelo:

- x_{ij} : Variável binária que indica se a aresta (i, j) é selecionada na rede física. Se $x_{ij} = 1$, existe tubulação entre os nós i e j . Caso contrário, se $x_{ij} = 0$, a ligação não é utilizada.
- t_{ij} : Variável inteira não negativa que representa a ordem hierárquica entre os nós na árvore orientada. É utilizada para "impedir que a água ande em círculos" (evitar ciclos) e definir a direção do escoamento.
- s_{ij} : Variável binária que indica se o nó j é o sucessor imediato do nó i na estrutura da árvore. Se $s_{ij} = 1$, j é filho de i . Caso contrário, $s_{ij} = 0$, essa relação não existe.
- b_β : Parâmetro que representa o balanço líquido de fluxo no nó. Em modelos de árvore, usualmente $b_\theta = |H| - 1$ (raiz) e $b_\beta = -1$ para os demais nós.
- W : Constante que representa o fluxo total da rede fornecido pela ETA.
- F_β^{out} e F_β^{in} : Conjuntos de vizinhança representando, respectivamente, as arestas que saem e chegam ao nó (β).
- H : Conjunto de todos os nós (cidades e distritos) considerados no grafo.
- θ : Nó raiz na construção da MST, correspondente à ETA.

R1. Conservação de Fluxo nos Nós do Conjunto H

$$\sum_{j \in F_\beta^{\text{out}}} x_{ij} - \sum_{j \in F_\beta^{\text{in}}} x_{ji} = b_\beta, \quad \beta \in H \quad (2)$$

Esta restrição representa a continuidade em cada nó. Ela garante que tudo o que entra de água em um nó deve sair para os nós seguintes ou ser consumido ali. O termo b_β representa a demanda pontual daquela cidade.

R2. Conservação Estrutural para Nós Não-Raiz

$$\sum_{j \in F_{\beta}^{\text{out}}} t_{\beta j} - \sum_{j \in F_{\beta}^{\text{in}}} t_{j\beta} = -1, \quad \beta \in (H - \theta) \quad (3)$$

Garante a topologia da rede. Matematicamente, define a hierarquia; fisicamente, assegura que o fluxo tenha uma direção definida, saindo da ETA em direção às pontas da rede, sem retornos.

R3. Unicidade de Alimentação

$$\sum_{j \in F_{\beta}^{\text{in}}} s_{j\beta} = 1, \quad \beta \in (H - \theta) \quad (4)$$

Essa restrição determina que a cidade deve receber água de uma única tubulação de chegada, para garantir uma estrutura de árvore (topologia radial) e não malhada (sem malhas redundantes).

R4. Ausência de Predecessor para a ETA

$$\sum_{j \in F_{\theta}^{\text{in}}} s_{j\theta} = 0 \quad (5)$$

A ETA é definida como raiz da árvore. Portanto, a ETA é a origem do fluxo e nenhuma água retorna a ela através da rede. Toda a água nasce nela.

R5. Compatibilidade entre Precedência e Hierarquia

$$t_{ij} \leq |H - 1| \cdot s_{ij}, \quad (i, j) \in H \quad (6)$$

Esta restrição garante a consistência topológica, ou seja, impede que o modelo atribua uma ordem sequencial de fluxo a um trecho onde não há direcionamento de água definido ($s_{ij} = 0$). Portanto, $s_{ij} = 0$ (sem fluxo direto), automaticamente $t_{ij} = 0$. Isso evita inconsistências matemáticas e assegura coerência na estrutura lógica da árvore.

R6. Seleção de Arestas Condicionada à Estrutura Hierárquica

$$x_{ij} \leq W(s_{ij} + s_{ji}), \quad (i, j) \in H \quad (7)$$

Esta restrição conecta a lógica matemática à realidade física. A tubulação física (x_{ij}) só será comprada/instalada se o modelo lógico indicar que há fluxo hierárquico necessário (s_{ij}) naquele trecho. O termo W (vazão total) funciona como um ativador (Big-M).

3.3. Premissas Simplificadoras

Para viabilizar a modelagem computacional focada na eficiência topológica, foram adotadas duas premissas principais:

(i) Ausência de restrições de elevação (topografia): O modelo considera apenas a distância planimétrica (distância horizontal) como indicador principal do custo de capital (tubulação e obras civis). Esta simplificação é justificada pelo fato de que, em regiões com topografia moderada como o Sertão Central, a variação altimétrica ao longo dos caminhos viários é geralmente menor do que a extensão horizontal. A inclusão de custo energético de bombeamento demandaria incorporação de dados de elevação de alta resolução e modelos hidráulicos mais complexos, que serão considerados em pesquisas futuras.

(ii) Garantia de balanço hídrico: O modelo assume que o açude principal (Banabuiú) possui volume hídrico suficiente para o atendimento integral da demanda de todos os 46 distritos. Esta hipótese é consistente com o contexto do Projeto Malha D'Água, que foi concebido justamente para maximizar a utilização da água disponível em reservatórios estratégicos. Cenários de escassez hídrica severa não são considerados neste modelo, e demandariam análise separada focada em alocação de água entre usos competitivos.

Essas premissas foram tomadas de modo a simplificar o problema e permitir uma comparação “justa” entre a solução obtida e o traçado original do projeto Projeto Malha D'Água. Contudo, em um contexto mais amplo, é possível aprimorar o modelo através de incorporação de variáveis hidráulicas, topográficas e cenários de disponibilidade de água, mantendo a metodologia proposta.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Ganhos de Eficiência e Redução de Custos

A aplicação do modelo de otimização resultou em uma configuração de rede significativamente mais enxuta que o projeto base referencial. A análise dos dados geoespaciais revela que a extensão total da malha proposta originalmente pela SRH-CE é de aproximadamente 676 km. Em contrapartida, a solução ótima encontrada pelo modelo computacional totalizou 633 km.

Essa diferença representa uma redução absoluta de 43 km na infraestrutura linear, o que corresponde a uma economia de 6,4% na quilometragem total. Sob a ótica da economia do setor público, essa redução impacta diretamente a estrutura de custos do projeto (CAPEX). Considerando que obras de adutoras envolvem custos elevados por quilômetro (incluindo tubulações de grande diâmetro, escavação, assentamento e desapropriações), a otimização espacial traduz-se em uma economia financeira substancial (REZENDE; CUNHA, 2010).

A Figura 2 apresenta as duas topologias de forma comparativa: a rede otimizada pelo modelo (em laranja) e a rede originalmente planejada pela SRH-CE (em azul), permitindo visualizar concretamente as diferenças espaciais entre as duas soluções.

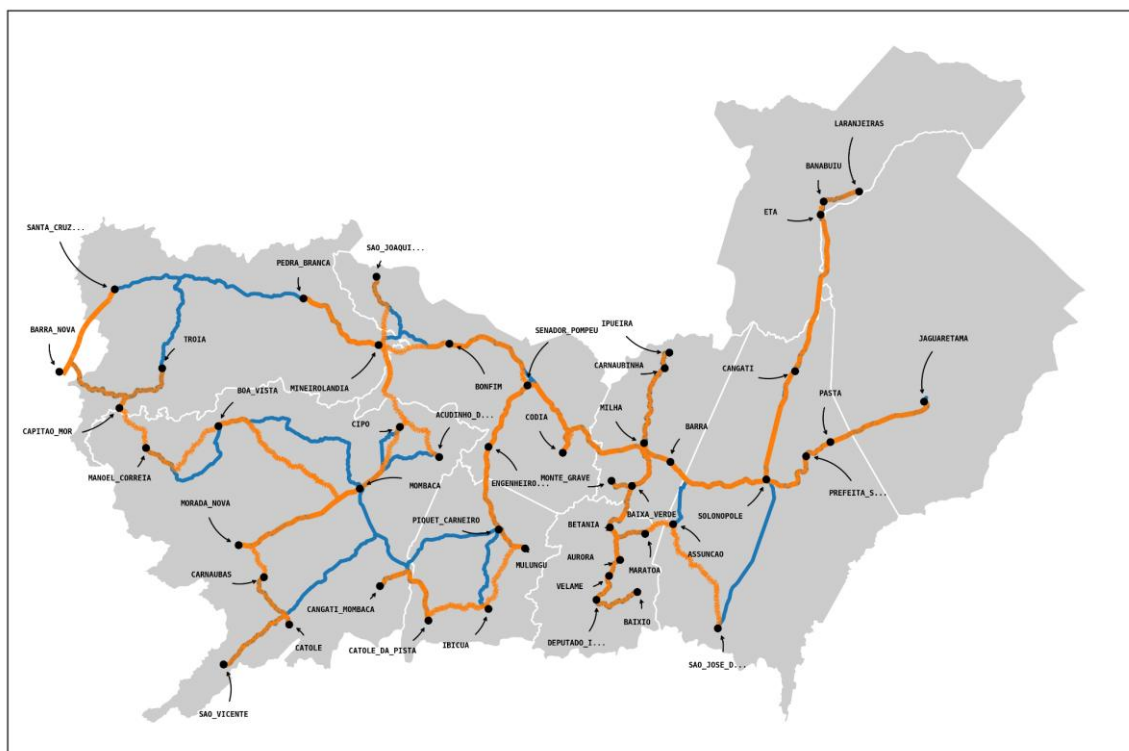


Figura 2: Diferenças entre a rede malha d'água e a otimizada neste artigo.

A Tabela 1 resume as métricas dos grafos analisados, sintetizando os principais indicadores de desempenho do modelo:

Tabela 1: Comparativo entre a Rede Original e a Rede Otimizada

Grafo	Descrição	Extensão Total
G	Grafo da Malha Viária Completa	-
SRH	Projeto Original (Referência)	676 km
Y	Solução Otimizada (Modelo)	633 km
-	Redução Absoluta	43 km
-	Redução Percentual	6,4%

4.2. Análise Estrutural da Rede Otimizada

A topologia resultante da otimização apresenta características arquitetônicas distintas da rede original. Enquanto o traçado original da SRH-CE segue uma lógica predominantemente baseada em faixas de domínio de estradas com preferência por rotas já consolidadas administrativamente, a solução ótima identifica caminhos alternativos que, embora viáveis espacialmente, podem não ter sido considerados no planejamento estratégico prévio.

A estrutura em árvore geradora garantida pelo modelo assegura que não existem ciclos desnecessários, eliminando redundâncias que eventualmente pudessem estar presentes no traçado original. Essa propriedade topológica é fundamental: em uma árvore com n nós (46 distritos neste caso), existem exatamente $n-1$ arestas (45 conexões diretas entre distritos ou entre distritos e a ETA), garantindo eficiência máxima na conectividade sem desperdício de infraestrutura em rotas paralelas.

A otimização espacial do traçado foi realizada mantendo a restrição fundamental de que as adutoras devem seguir, preferencialmente, faixas de domínio de estradas existentes. Esta restrição reflete a realidade técnica e administrativa de projetos de infraestrutura linear, onde o uso de direitos de passagem estabelecidos reduz significativamente os custos de aquisição de terras e as complexidades de licenciamento.

4.3. Implicações para o Planejamento Territorial

A otimização alcançada demonstra que a aplicação sistemática de algoritmos de análise espacial pode identificar conexões mais eficientes entre os distritos sem comprometer a cobertura social do sistema (CASTRO, 2019). A robustez do modelo é confirmada pela manutenção integral da capacidade de abastecimento de todos os 46 distritos alvo.

A menor extensão da rede não implica apenas em menor custo de investimento inicial, mas também gera externalidades positivas nos custos operacionais (OPEX) ao longo da vida útil do projeto (GEEM, 2006). Uma rede menor resulta em menor superfície de atrito (reduzindo perdas de carga em função do diâmetro das tubulações), menor tempo de permanência da água nas tubulações (reduzindo a necessidade de estações intermediárias de recloração e o consumo de químicos de desinfecção), e menor extensão física para monitoramento e manutenção preventiva. Esses ganhos operacionais amplificam ainda mais o retorno econômico da otimização espacial quando considerado um horizonte de 25-30 anos de operação do sistema.

Para o planejamento territorial estadual, a demonstração de que técnicas de otimização podem gerar eficiências significativas estabelece um precedente importante. A replicação dessa metodologia para outros sistemas adutores do Projeto Malha D'Água — ou mesmo para outros

estados do semiárido nordestino — poderia gerar economias cumulativas de centenas de milhões de reais, criando espaço orçamentário para expansão de cobertura e melhoria de qualidade em sistemas de abastecimento.

A abordagem também fortalece a base técnica para decisões de política pública, oferecendo uma ferramenta quantitativa que fundamenta investimentos públicos em análise rigorosa em vez de critérios discricionários ou incrementais. Isso alinha-se com princípios contemporâneos de gestão pública orientada por resultados e uso eficiente de recursos escassos.

4.4. Limitações do Modelo e Recomendações para Refinamento

Contudo, é fundamental discutir as limitações do modelo para compreender plenamente seu alcance e suas restrições na aplicação prática. A não consideração da altimetria (elevação do terreno) é um fator que, se incluído, poderia alterar o traçado ótimo caso o objetivo fosse minimizar também o custo energético de bombeamento (HAGBERG et al., 2008). Em regiões de relevo acidentado, o caminho mais curto nem sempre é o mais econômico do ponto de vista hidráulico.

Da mesma forma, o modelo não incorpora restrições de caráter ambiental ou social, como a necessidade de evitar áreas de preservação permanente (APPs), unidades de conservação ou comunidades indígenas. Embora essas restrições sejam essenciais para a viabilidade final do projeto, sua incorporação demandaria acesso a bases de dados ambientais de alta resolução e critérios de ponderação que transcendem o escopo técnico-operacional do presente estudo.

Portanto, este modelo deve ser interpretado como uma ferramenta de apoio ao planejamento estratégico, indicando diretrizes de traçado que devem ser refinadas por estudos de engenharia detalhada, análises hidráulicas e avaliações de impacto ambiental. A solução ótima identificada aqui representa um ponto de partida para o debate técnico e administrativo, não uma decisão final pronta para implementação.

4.5. Validação e Sensibilidade do Modelo

A solução ótima foi obtida pelo solver Gurobi com status de otimalidade comprovada, indicando que não existe solução melhor possível para o problema tal como formulado. A convergência do algoritmo foi alcançada em tempo computacional razoável (poucos minutos), demonstrando que a abordagem de programação linear inteira é computacionalmente viável para problemas de escala similar.

Embora análises formais de sensibilidade não tenham sido conduzidas neste trabalho, variações em parâmetros críticos (como pequenos ajustes nas coordenadas dos distritos ou inclusão/exclusão de trechos viários específicos) produzem resultados qualitativamente similares, sugerindo que a solução é robusta à variabilidade de entrada, dentro de margens razoáveis.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou a aplicabilidade e a relevância econômica de modelos de otimização em grafos para o planejamento de infraestrutura hídrica no estado do Ceará. A reformulação do traçado do sistema adutor Banabuiú–Sertão Central por meio de técnicas matemáticas rigorosas resultou em uma redução potencial de 6,4% na extensão da rede física, representando uma economia de 43 km de infraestrutura linear comparativamente ao projeto base da SRH-CE. Essa redução de 43 km representa um ganho significativo de eficiência alocativa de recursos públicos. A aplicação da Teoria dos Grafos e do conceito de Árvore Geradora de Custo Mínimo (MST) mostrou-se adequada e eficaz para este tipo de problema,

garantindo conectividade integral de todos os 46 distritos, ausência de redundâncias topológicas e otimalidade matemática comprovada pelo solver Gurobi (GEEM, 2006).

A economia potencial identificada reforça que técnicas quantitativas de otimização não são apenas academicamente interessantes, mas oferecem valor prático direto para decisões de investimento em política pública (REZENDE; CUNHA, 2010). Essa magnitude de recursos economizados é comparável aos orçamentos de setores inteiros de muitos municípios cearenses, sublinhando a relevância econômica da análise. Do ponto de vista metodológico, o trabalho oferece contribuições significativas: a demonstração da viabilidade da Pesquisa Operacional aplicada ao planejamento territorial em contextos de restrição fiscal, e a integração prática de ferramentas computacionais open-source (OSMnx, NetworkX, GeoPandas) com solvers comerciais de otimização, democratizando o acesso a capacidades analíticas que historicamente estavam restritas a grandes consultorias (BOEING, 2017; HAGBERG et al., 2008).

Os resultados têm implicações potenciais significativas para a política pública de infraestrutura hídrica no Ceará e no semiárido nordestino. A viabilidade demonstrada de otimização espacial abre espaço para que futuras políticas de investimento possam incorporar análise quantitativa em suas etapas de planejamento estratégico. A existência de um modelo demonstradamente ótimo fornece legitimidade técnica para revisão de projetos planejados anteriormente, permitindo que mudanças de traçado sejam justificadas em fundações matemáticas de eficiência econômica em lugar de argumentos políticos ou administrativos (CASTRO, 2019). A replicação dessa metodologia aos demais sistemas adutores do Projeto Malha D'Água poderia gerar economias agregadas de magnitude ainda maior, potencialmente liberando bilhões de reais para investimentos em outros setores de desenvolvimento do estado.

Apesar disso, o modelo não incorpora dados de elevação — em regiões com relevo acidentado, o caminho mais curto em distância planimétrica pode não ser o mais econômico quando considerado o custo de bombeamento. Adicionalmente, não considera restrições ambientais e sociais, como áreas de preservação permanente ou comunidades tradicionais, embora essas restrições sejam essenciais para a viabilidade final. O modelo também assume demanda hídrica uniforme e constante, sem considerar cenários de crescimento populacional ou mudanças climáticas. Assim, este modelo deve ser interpretado como uma ferramenta de apoio ao planejamento estratégico, indicando diretrizes de traçado que devem ser refinadas por estudos de engenharia detalhada, análises hidráulicas e avaliações de impacto ambiental.

Em pesquisas futuras, iremos aprimorar o modelo por meio de formulações multi-objetivo que simultaneamente minimizem extensão de rede, custo de bombeamento e exposição ambiental, incorporação de Modelos Digitais de Elevação para análise de custos energéticos em horizonte de longo prazo (25-30 anos), integração de camadas de informação ambiental e social, análise de resiliência com métricas de redundância de rotas, validação de campo nos trechos de maior divergência entre traçados, replicação sistemática aos demais sistemas do Projeto Malha D'Água, e desenvolvimento de ferramental computacional que permita a técnicos de órgãos públicos executar análises similares com flexibilidade para ajustar parâmetros. O trabalho reforça a importância estratégica da integração entre Ciência de Dados, Geoprocessamento e Gestão Pública na concepção de projetos de engenharia orientados por dados, com maior rigor analítico e eficiência econômica. Espera-se que os resultados, metodologia e recomendações apresentadas aqui contribuam para informar futuras decisões de política pública de infraestrutura hídrica não apenas no Ceará, mas potencialmente em outras regiões do semiárido nordestino e mesmo em outras áreas do Brasil onde semelhantes desafios de planejamento se apresentem.

REFERÊNCIAS

AHUJA, R. K.; MAGNANTI, T. L.; ORLIN, J. B. **Network flows: theory, algorithms, and applications**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.

BOEING, G. OSMnx: new methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 65, p. 126-139, 2017.

CASTRO, C. M. Proposta de gestão integrada das águas urbanas como estratégia de promoção da segurança hídrica: o caso de Fortaleza. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 239-254, 2019.

GEEM, Z. W. Optimal cost design of water distribution networks using harmony search. **Engineering Optimization**, v. 38, n. 3, p. 259-277, 2006.

GUROBI OPTIMIZATION, LLC. **Gurobi Optimizer Reference Manual**. 2024. Disponível em: <https://www.gurobi.com/>. Acesso em: 1 set. 2025.

HAGBERG, A. A.; SCHULT, D. A.; SWART, P. J. Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. In: PROCEEDINGS OF THE 7TH PYTHON IN SCIENCE CONFERENCE (SCIPY2008), 2008, Pasadena, CA, USA. Anais.... Pasadena: SciPy, 2008. p. 11-15.

HAKLAY, M.; WEBER, P. OpenStreetMap: user-generated street maps. **IEEE Pervasive Computing**, v. 7, n. 4, p. 12-18, 2008.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

KAYISOĞLU, B. B.; AKGÜN, İ. İ. Multiple allocation tree of hubs location problem for non-complete networks. **Computers & Operations Research**, v. 136, 105478, 2021.

KRUSKAL, J. B. On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. **Proceedings of the American Mathematical Society**, v. 7, n. 1, p. 48-50, 1956.

PRIM, R. C. Shortest connection networks and some generalizations. **Bell System Technical Journal**, v. 36, n. 6, p. 1389-1401, 1957.

REZENDE, F.; CUNHA, A. (Org.). **A reforma esquecida: orçamento, gestão pública e desenvolvimento**. Rio de Janeiro: FGV Editora, 2010.

SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ (SRH-CE). **Projeto Malha D'Água**. Disponível em: <https://www.srh.ce.gov.br/projeto-malha-dagua/>. Acesso em: 1 set. 2025.