

Revisão sistemática da literatura sobre os métodos e os procedimentos para a busca do traçado ótimo de adutoras

Armando Dias Duarte¹, José Almir Cirilo² e Saulo de Tarso Marques Bezerra²

¹Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Rua Acadêmico Hélio Ramos, S/Nº. Cidade Universitária. Recife-PE, Brazil (CEP 50740-530). E-mail: armando01.dias@gmail.com.

²Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Tecnologia. Av. Marielle Franco, km 59. Nova Caruaru. Caruaru-PE, Brasil (CEP 55014-900).

Resumo. Um dos desafios mais urgentes que a humanidade enfrenta diz respeito à gestão das águas. Em todo o mundo, regiões estão lidando com a crescente demanda por água potável, resultando em uma crise de escala global que está modificando a vida das pessoas, a agricultura, a indústria e o meio ambiente. Uma das estratégias adotadas para suprir a demanda hídrica é a construção de adutoras, sistemas que transportam água de fontes hídricas para as regiões consumidoras. A construção de uma adutora não é uma tarefa simples, é necessário considerar diversos fatores, como a topografia do terreno, a distância entre a fonte de água e o destino final, a minimização de impactos ambientais e a eficiência do sistema. É nesse contexto que o presente trabalho tem como objetivo realizar a revisão bibliográfica a respeito sobre métodos e procedimentos na busca por traçados de adutoras.

Palavras-chave: Revisão sistemática; Otimização; Adutoras.

Abstract. *Systematic literature review on methods and procedures for finding the optimal alignment of water pipeline.* One of the most pressing challenges that humanity faces relates to water management. Across the world, regions are dealing with the growing demand for clean water, resulting in a global-scale crisis that is altering people's lives, agriculture, industry, and the environment. One of the strategies adopted to meet the water demand is the construction of water pipelines, which transport water from water sources to consumer regions. Building a water pipeline is not a simple task; it requires considering various factors such as the terrain's topography, the distance between the water source and the final destination, minimizing environmental impacts, and the efficiency of the

Recebido
08/07/2023

Aceito
20/08/2023

Publicado
31/08/2023



Acesso aberto



ORCID

0000-0003-2571-7705
Armando Dias Duarte

0000-0002-8672-0898
José Almir Cirilo

0000-0002-5815-5908
Saulo de Tarso
Marques Bezerra

system. Within this context, the present study aims to conduct a literature review on methods and procedures in the search for water pipeline routes.

Keywords: Systematic review; Optimization; Water pipelines.

Introdução

A escassez hídrica presente na região do sertão nordestino faz com que a população procure outros meios de obter acesso à água para abastecimento, como, por exemplo, de caminhões do tipo pipa e poços artesanais. Essa dificuldade persiste ao longo dos anos e vem se tornando um desafio para os gestores administrarem a problemática. Diante deste cenário, a Organização das Nações Unidas (ONU) propôs os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que são compostos por 17 objetivos e 169 metas, que deverão ser efetivados até 2030. Essas propostas são uma continuação dos oito Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) (Silva e Granziera, 2019). Dentre esses objetivos, o 6 está relacionado à água potável e saneamento, que visa a assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e saneamento para todos. Entre suas metas, a primeira delas (6.1) traça um objetivo de até 2030 alcançar o acesso universal e equitativo à água potável, segura e acessível para todos, e a quarta meta (6.4) de até 2030 aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores e assegurar retiradas sustentáveis e o abastecimento de água doce para enfrentar a escassez de água reduzindo substancialmente o número de pessoas que sofrem com este problema (ONU, 2019).

A palavra adução, tem origem na palavra em latim *adductio*, cujo significado remete à ação de conduzir. Em regiões onde o déficit hídrico é notório, a construção das Adutoras é considerada uma das alternativas para a solução do problema de abastecimento de água potável, pois são estruturas cruciais para áreas urbanas e rurais, contribuindo significativamente para a saúde pública e o bem-estar da população (WHO, 2019).

De acordo com Bezerra e Cheung (2013), a adução é o “conjunto de tubulações, conexões e peças especiais destinadas a transportar água entre as unidades dos sistemas de abastecimento.” Nesse sentido, permite que o transporte da água da fonte (captação) até o tratamento ou do tratamento até o sistema de distribuição de água. A principal norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) relacionada ao projeto de construção de adutoras é a NBR 12.215:1997 (ABNT, 1997), que leva em consideração algumas condições específicas para o traçado de adutoras, entre elas estão o dimensionamento de forma correta dos diâmetros para condutos forçados, as perdas de carga, a declividade, a vazão para o dimensionamento e etc. de forma a se determinar a velocidade média de circulação da água (Gomes, 2001).

Diante do que foi exposto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica a respeito dos principais trabalhos que trazem como temática a busca pelo traçado de adutoras.

Metodologia

Com o propósito de compreender o emprego da temática de elaboração de traçados de adutoras, uma pesquisa bibliográfica foi realizada, fundamentada no método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis* (PRISMA), que se divide em quatro etapas, a identificação, a seleção, a elegibilidade e a inclusão (Figura 1) (Nascimento et al., 2019). Alguns estudos aplicaram essa metodologia para abordar

diversas temáticas, visando à sistematização de trabalhos (Urrútia e Bonfill, 2010; Lima et al., 2018).

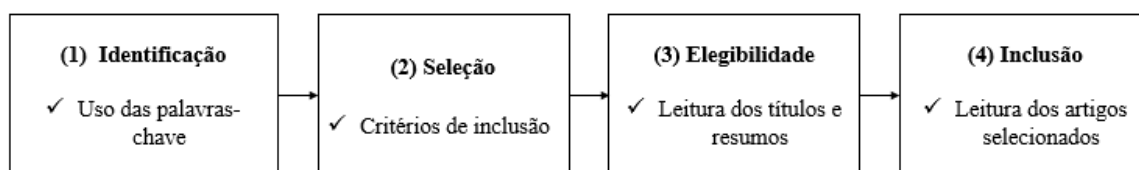


Figura 1. Etapas do método PRISMA utilizada na identificação dos artigos.

Tabela 1. Artigos identificados com a temática da qualificação.

Autoria	Título	Heurística/Ferramenta utilizada/Técnica
Luettinger e Clark (2005)	Geographic information system-based pipeline route selection process	GIS software
Hardin et al (2008)	Selecting the best pipeline route based on facts not feelings	Função utilidade + Análise de sensibilidade
Salah e Atwood (2011)	Pipeline alignment optimization: Automated GIS-based approach	ArcGIS network analyst + Microsoft Office (Excel) + VBA
Sarmiento (2012)	Um algoritmo metaheurístico de apoio à otimização do traçado de adutoras	Método da triangulação
Maughn e Byrnes (2013)	Challenges in completing a large diameter water transmission pipeline	Ferramentas e conhecimento prévio de outras obras do mesmo segmento
Mohammed e Majid (2014)	Design of optimal water distribution network using geographic information system in Yola Nigeria	ArcGIS network analyst
Suleiman et al. (2015)	Optimal route location by least cost path (LCP) analysis using (GIS): A case study	ArcGIS network analyst
Kathuo e Mubea (2016)	Application of GIS technologies in optimal routes modelling of water utilities to spur development	Erdas + ArcGIS network analyst + método Analytic Hierarchy Process (AHP)
Roy et al. (2016)	Use of remote sensing and geospatial technique for pre-feasibility analysis of rural water pipeline grids	Quantum GIS (profile tool) + plataforma online de geoprocessamento
Arabi e Gharehhasanloo (2018)	Application and comparison of analytical hierarchy process (AHP) and network methods in path finding of pipeline water transmission system, from Taleghan's Dam to Hashtgerd New City, Tehran, Iran	ArcGIS network analyst + IDRISI selva + método analytic hierarchy process (AHP)
Albiero et al. (2018)	Economic feasibility of underwater adduction of rivers for metropolises in semiarid coastal environments: case studies	Valor presente líquido, taxa de retorno interna e payback
Amaral et al. (2020)	Uso de técnicas de geoprocessamento na otimização do traçado de sistemas adutores de abastecimento de água com a utilização de uma base de dados de alta definição	GIS software + método Delphi + método analytic hierarchy process (AHP)
Simon et al. (2021)	Selection of the shortest route of transporting water from Yola Water Service Station to Yolde Pate, Adamawa State	ArcGIS network analyst
Jain et al. (2021)	Water pipeline routing using GIS	ArcGIS network analyst
Sarmiento (2022)	Automatic routing of water supply pipelines	Heurística A* com modificações + VB

No início para a busca na base de dados, a plataforma *Scopus* foi escolhida através do portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Os termos-chave "*Pipeline*", "*Optimization*", e "*Water Distribution Systems*" foram utilizados com o operador booleano "*and*", resultando em 354 artigos e quatro capítulos de livros, incluídos entre os anos de 1970 e 2022. Na primeira rodada, os critérios resultaram em aplicações variadas, incluindo o controle de pressão, estimativa de diâmetro ótimo, redes de abastecimento, irrigação, traçado de estradas, uso para caminhos ótimos de gasodutos, etc. Na etapa seguinte, novos critérios foram aplicados, incluindo as palavras-chave "*Water pipelines*", "*Design*" e "*Hydraulics*". Após a nova filtragem, foram obtidos 133 artigos. Em seguida, os títulos e informações adicionais foram exportados para análise no *software* Excel.

Na terceira etapa da elegibilidade, procedeu-se à leitura dos títulos e resumos dos artigos, tendo sido aplicados critérios de seleção baseados em dois questionamentos:

1. O estudo está em consonância com o tema abordado?
2. O estudo apresentou métodos de otimização para traçados de adutoras?

Após o uso dos novos critérios, foram obtidos quatro trabalhos. De forma a aumentar a quantidade de trabalhos pesquisados, optou-se por utilizar outra plataforma de divulgação de pesquisas científicas, a plataforma *Research Gate* e descoberto Sarmiento (2012) e Amaral et al. (2020), que estão de acordo com as perguntas do critério elegibilidade, e, dessa forma, foi utilizada as opções de artigos similares e descobertos mais artigos para compor as discussões, totalizando 15 artigos. Os trabalhos encontrados estão listados na Tabela 1.

Resultados e discussão

Luettinger e Clark (2005) conduziram um estudo no Distrito Metropolitano de Salt Lake e Sandy, onde foi iniciada a construção de um aqueduto subterrâneo com extensão aproximada de 9 a 12 km. De acordo com o Plano Mestre das cidades, em 1998, havia necessidade prevista para 2025 de um aumento de 3,1 m³/s no transporte e tratamento de água potável para atender às respectivas populações. A elaboração do projeto teve início em 2001, tendo como objetivo principal a seleção de uma rota viável de tubulação que ligasse a Estação de Tratamento de Água, situada a aproximadamente 9 a 12 km, a pontos intermediários de entrega, minimizando os impactos sociais e os custos relacionados à tubulação.

Durante a elaboração do projeto, a equipe enfrentou o desafio de construir o aqueduto passando por ferrovias, canais, riachos, parques, áreas urbanas, áreas sensíveis e zonas sísmicas. A seleção das melhores rotas foi realizada através do uso de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), com base em um banco de dados composto por mapas digitais, incluindo informações físicas (estradas, canais), políticas, demográficas (estabelecimentos residenciais e comerciais), topológicas (elevação) e outras características, como zonas de abalos sísmicos. Após a composição do banco de dados, foi criado um mapa de utilidades, compilando todas essas informações. Segundo a reportagem da KSL (2007), o projeto foi concluído no ano de 2007, após ter sido iniciado em 2004. Ele resultou na adição de 26.4978,82 metros cúbicos de água tratada por dia. O traçado final teve um comprimento de 12 km e foi orçado em 250 milhões de dólares americanos, com os pontos de captação de água sendo *Little Cottonwood Creek* e o Reservatório *Deer Creek*. Este empreendimento representa uma investigação interessante que abrangeu uma série de variáveis que englobam aspectos da área de engenharia, bem como aspectos sociais, a fim de determinar o melhor curso de ação.

De acordo com Hardin et al. (2008), no estudo realizado próximo a uma região metropolitana no centro do Texas, uma solução foi buscada para atender às necessidades hídricas das cidades *Cedar Park*, *Leander* e *Round Rock*. Em 2006, as cidades concordaram em criar a *Brushy Creek Regional Utility Authority* (BCRUA), tendo como ponto de captação o Lago Travis. O estudo destaca que, como em qualquer análise de rotas de adutoras, há uma grande quantidade de alternativas. Por esse motivo, alguns critérios básicos de triagem foram estabelecidos para limitar essas alternativas. Os critérios incluíram o limite superior do custo de capital (qualquer construção que envolva questões subaquáticas ou túneis foi desconsiderada), o comprimento total da adutora (qualquer alternativa com comprimento total maior que duas vezes a distância aproximada em linha reta, que era de aproximadamente 7,32 km, foi desconsiderada), impactos na área ambiental local (qualquer traçado que atravessasse a grande reserva ambiental conhecida como *Balcones Canyonland Preserve* foi desconsiderado) e restrições de limite de propriedade (qualquer traçado que se estendesse por uma grande área privada foi desconsiderado). Após a identificação das alternativas para a rota, a equipe responsável pelo projeto estabeleceu quatro objetivos e critérios para a seleção da rota final. O primeiro objetivo é o menor custo, incluindo considerações sobre mitigação, serviços, licenças, entre outros fatores. O segundo objetivo concentra-se na minimização dos problemas durante a fase de construção, incluindo o número de proprietários afetados pelo empreendimento, escolas, empresas, fechamento de estradas e outros fatores. O terceiro objetivo é a minimização do impacto ambiental, com o objetivo de evitar a perturbação de habitats naturais. Por fim, o quarto objetivo é o menor número de licenças e permissões necessárias para o empreendimento. Para cada um desses quatro objetivos, foram desenvolvidos mais de 30 indicadores, com o objetivo de avaliar as alternativas, através da consulta de diferentes especialistas das três cidades. Em seguida, foram atribuídos pesos e médias às medidas, de modo a permitir que as decisões lógicas permitissem a classificação das preferências em uma tabela para posterior análise. Por meio das diversas alternativas, foi escolhido o melhor traçado. Atualmente, de acordo com as informações da BCRUA (2022), o empreendimento está na sua segunda fase, com captação de água bruta através de duas entradas de lagos, que são conectados a um túnel por gravidade e transportam 548.884,70 m³ de água bruta por dia para uma estação de bombeamento.

Salah e Atwood (2011) apresentaram um avanço nos estudos de soluções ótimas para infraestrutura hídrica, por meio da aplicação de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) para análise e classificação de rotas de adutoras. Como ferramenta computacional, os autores utilizaram o pacote de *Network Analyst* disponibilizado pelo *software* comercial ArcGIS, que é capaz de criar um ponto inicial e um ponto de captação, cuja capacidade de analisar a distância entre eles é demonstrada após a inserção de camadas e restrições geográficas. Os autores utilizaram *scripts* que compõem os *Arc Objects*, que contém bibliotecas e pacotes para automatizar o processo em conjunto com aplicação em *Visual Basic for Application* (VBA) para o desenvolvimento de uma aplicação, os autores afirmam que o uso do VBA foi por que ele tem uma facilidade com o uso dos produtos ESRI's ArcGIS e *Microsoft Office* (Salah e Atwood, 2011). O processo automatizado permitiu com que fossem modelados e implementados em planilhas da *Microsoft Excel*, os fatores da ponderação subjetiva. Foram utilizados três critérios principais: restrições, socioeconômicos e custo. Os autores indicam que há inúmeros métodos para achar a solução ótima de um corredor e que qualquer *software* GIS pode ser feito por meio de um vetor ou análise baseada em pixels do *raster* (Salah e Atwood, 2011). No estudo em questão, foi utilizada a análise de vetores e o complemento ArcGIS *network analyst*. Para realizar os cálculos da rota mínima, o algoritmo utilizado pela ArcGIS *network analyst* tenta encontrar uma rota através de um conjunto de paradas com o mínimo de impedimentos. Esse fator de impedimento pode ser o tempo de viagem entre a rede, como também pode ser uma pontuação do segmento da rede. O algoritmo é baseado

nos preceitos de Dijkstra (1959), que primeiro calcula um destino assimétrico por meio de uma matriz de custo entre os pontos de início e fim. O algoritmo quebra a rede em nós, cujas linhas se unem aos pontos de início e fim. Cada linha possui um custo associado, e diversos caminhos possíveis entre a origem e destino, porém o caminho calculado depende de quais nós, são visitados e a em qual ordem (Salah e Atwood, 2011). Então para compor o custo do traçado, o algoritmo do *ArcGIS network analyst* aplica uma inserção para construir uma solução inicial, e a cada passo, o algoritmo de inserção, insere a parada não visitada de menor custo na solução parcial atual (Salah e Atwood, 2011). A caracterização da rede de tubos foi realizada por meio de fotos aéreas dos segmentos que ligavam os pontos de origem e fim. Em seguida a matriz de decisão foi elaborada, levando em consideração os pesos importantes para a agência governamental. Os resultados obtidos foram disponibilizados em duas saídas, uma delas espacial (através da rota ótima) e tabular (por meio de planilhas da *Microsoft Excel*). Os autores recomendam o uso de recursos computacionais adequados em casos de modelagem mais complexa para reduzir o tempo de processamento. Eles apontam o uso de um algoritmo de melhor rota hierárquica como uma alternativa que consumiria menos tempo e recursos, mesmo tendo obtido quatro possíveis rotas ótimas no estudo.

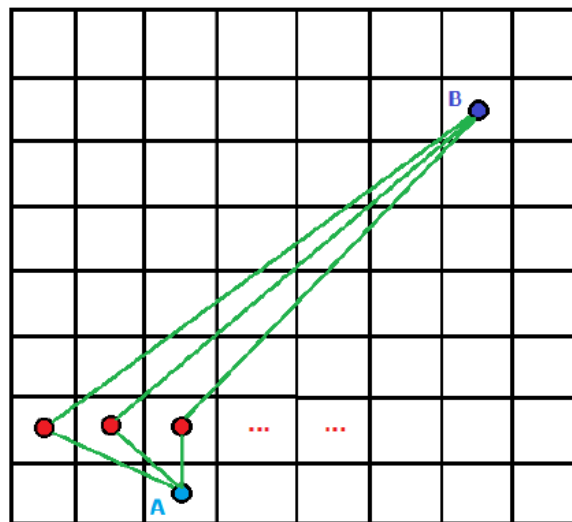


Figura 2. Método da triangulação. Fonte: Sarmiento (2012).

Sarmiento (2012) apresenta um algoritmo metaheurístico de busca do traçado ótimo de adutoras considerando custos de passagem através do reticulado derivado do modelo digital de terreno. Denominado pelo autor como “método da triangulação”, o algoritmo usa como informações iniciais, além das cotas topográficas da área de interesse, a localização dos pontos de captação (ponto A) e de entrega (ponto B) da água. Conforme mostra a Figura 2, a busca inicia no ponto A e avança explorando triangulações entre a retícula de partida e cada uma das retículas disposta no alinhamento adjacente na direção do ponto de entrega da água (ponto B), formando assim o primeiro cateto do triângulo. O segundo cateto será formado interligando-se cada retícula adjacente com o ponto B. Ao longo dos dois trajetos retilíneos constitutivos de cada triangulação é identificada a máxima cota topográfica, bem como calculado o comprimento total dos dois catetos. Com essas duas informações, pode-se calcular os custos de passagem em se adotar cada uma

dessas rotas, sendo escolhida aquela que apresentar o menor custo total. Uma vez identificado o vértice da rota mais econômica, este passa a ser o novo ponto de partida do processo algorítmico, que somente se encerra quando alcançado o ponto de entrega da água. A busca é realizada tanto na direção vertical, como na direção horizontal, onde as retículas adjacentes encontram-se dispostas na forma de colunas na grade ilustrada na Figura 2.

A fórmula para o cálculo do custo total proposto por Sarmento (2012) é calculada pela adição dos custos fixos e variáveis de duas maneiras. A primeira consiste na anualização dos custos de investimento na aquisição dos tubos necessários para a construção da adutora. A segunda consiste na conversão da parcela dos gastos com energia elétrica em um valor presente de capital. A formulação completa do custo total é apresentada na Equação 1.

$$C_{total} = C_{tubos} + C_{energia} \quad \text{Equação 1}$$

De acordo com Sarmento (2012), para avaliar a eficácia do método da triangulação proposto, uma região montanhosa foi escolhida para teste devido à dificuldade em encontrar um traçado otimizado em tal tipo de relevo. O autor codificou o algoritmo em Visual Basic e o programa é capaz de processar dados de localização de pontos de captação e entrega e produzir imagens, incluindo o perfil topográfico da rota considerada ótima, como apresentado nas Figuras 3 e 4.

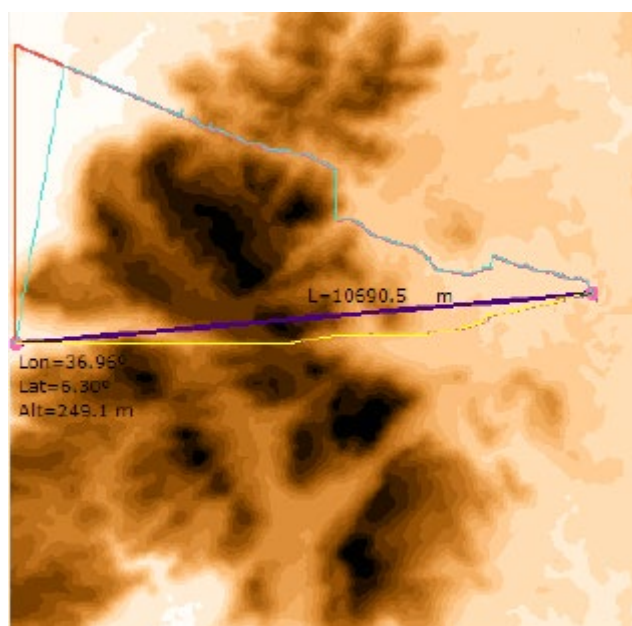


Figura 3. Resultados do método da triangulação. Fonte: Sarmento (2012).

Sarmento (2012) conclui que o algoritmo proposto não garante ser a rota determinada aquela correspondente a da tomada de decisão globalmente ótima, dada a forma como o algoritmo procede a sondagem do espaço de busca. Entretanto, as soluções obtidas refletem a otimicidade das rotas em termos das variáveis mais significativas da economicidade de projetos dessa natureza.

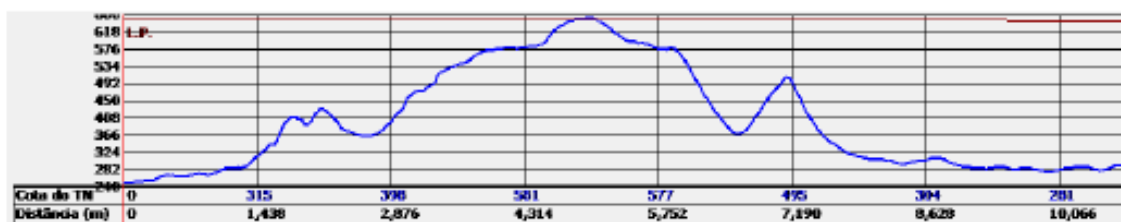


Figura 4. Perfil topográfico do método da triangulação. Fonte: Sarmento (2012).

Maughn e Byrnes (2013) detalharam os problemas preliminares e finais do traçado de uma tubulação de 84 polegadas através de propriedades rurais, urbanas e uma propriedade militar do exército americano no Distrito Municipal de Água do Norte do Texas (DMANT), em 2002. Esse empreendimento teria como objetivo atender as demandas hídricas da população do Norte do Texas.

O nome do projeto foi Allen/Plano/Frisco/McKinney adutora (APFM), cujo funcionamento estava previsto para o ano de 2010. Estava prevista a construção de 32,18 km de tubulação de 213,36 cm a 182,88 cm de diâmetro. Os projetistas também tiveram dificuldades, pois a área de construção era considerada uma das mais congestionadas da área do Norte do Texas. Por questões técnicas, o projeto foi dividido em quatro partes a serem realizadas por sucessão. Em 2007, três partes foram concluídas, sendo em 2008 a quarta fase (final) teve início, que levaria até a estação de tratamento de água e que exigiria um grande esforço de bombeamento.

Na seleção preliminar do traçado, foram considerados os impactos do acesso ao terreno, uso e ocupação do solo, impactos ambientais, a propriedade militar e os possíveis congestionamentos com outras redes de tubulações. Após a análise de três cenários, que levaram em consideração também a mudança no diâmetro da adutora, a melhor opção (combinação entre a alternativa dois e três) foi escolhida após muitas iterações e discussões com o DMANT e a empresa responsável pela obra e por meio de ferramentas e o conhecimento a partir de outros projetos. O empreendimento foi construído em outubro de 2011 e as conexões foram completadas em fevereiro de 2012. O projeto foi concedido com uma adutora de 243,84 cm de diâmetro e US\$ 21,9 milhões, e uma extensão de 8,69 km.

Mohammed e Majid (2014) utilizaram a aplicação do ArcGIS *network analyst* para determinar o ótimo no sistema de distribuição de água em Yola, Nigéria. Foram utilizados cinco conjuntos diferentes de banco de dados, dados terrestres, tubulações já existentes, uso e ocupação do solo, topografia e dados da população. Por meio do conjunto desses dados, os autores criaram os componentes que fizeram parte da rede. A rede atual de distribuição foi digitalizada em um *Digital Elevation Model* (Modelo Digital de Elevação - DEM). Os locais dos reservatórios foram determinados a partir da análise dos fluxos através da gravidade, por meio do DEM, e a melhor rota foi determinada por meio do conjunto de dados anteriormente desenvolvido. Por fim, os autores concluem que o uso da ferramenta ArcGIS *network analyst* em conjunto com DEM determinam uma ótima análise para otimização de sistemas de distribuição de água.

Suleiman et al. (2015) desenvolveram um estudo do caminho ótimo através de duas cidades no Estado de Kano, na Nigéria cujo *software* utilizado e o complemento foram o ArcGIS *network analyst*, com o tamanho das células de 30 m x 30 m. Foram levados em consideração os fatores de uso e ocupação do solo, declividade e tipos de solo. Para compor o banco de dados, e, posteriormente, serem transformados em um modelo *raster*, as imagens de satélite foram por meio do *LandSat8*, os modelos de DEM (gdem.ersdac.jspacesystem.or.jp) e os dados ambientais de órgãos governamentais.

Para realizar a composição do banco de dados, os autores realizaram um pré-processamento das imagens por meio do ArcGIS, de dados vetoriais e *raster*. Alguns dados anteriormente descritos estavam no modelo vetorial e foram convertidos para os do tipo *raster*. O espaço geográfico foi representado por meio de uma grade e os dados espaciais como blocos em uma determinada extensão para exibição e análise. O tamanho das células foi de 30 m x 30 m e todos os *raster* foram preparados para o tamanho adotado pela grade. Para a análise dos cenários, os autores utilizaram diferentes ponderações para os fatores adotados. Após o uso do *plugin*, os autores encontraram três possíveis caminhos ótimos, o Modelo 1 (31,96 km) levou em consideração o uso do solo/terra que atraiu um alto custo de compensação por meio da maior extensão. O segundo modelo foi determinado baseado na declividade do terreno e no tipo de solo. Esse resultado apresentou um menor comprimento (27,95 km) em comparação com o Modelo 1, porém o custo para a implantação poderia ser mais oneroso, já que passava por muitos terrenos particulares. O terceiro modelo, foi obtido por meio de todos os três fatores (e ocupação do solo, declividade e tipos de solo), o traçado passou pelo mesmo caminho que o Modelo 2, mas em alguns trechos foram diferentes, dado o tipo de solo, evitando passar pelos terrenos com áreas construídas e terras agrícolas. A extensão desse último modelo teve 27,73 km. Para a escolha do modelo adotado, os autores criaram uma comparação de preferências estabelecidas, como exemplo, manutenção, distância, conectividade e etc. após a análise de preferências, os autores determinaram que a melhor opção seria o Alinhamento 1, que estava contido no primeiro modelo, cujos valores de preferência eram superiores aos demais do estudo. É interessante perceber que mesmo o Modelo 1 apresentando um maior caminho (31,96 km), os fatores de preferências foram superiores aos demais de caminhos menores, pois levaram em consideração não apenas a distância, mas preferências como o custo de manutenção, conectividade e etc. para futuros trabalhos são recomendados que: a possibilidade de vincular a saída dos resultados em um *software* de projeto de estradas de forma a ser desenhada alternativas preliminares e utilizar os fatores de drenagem e litologia.

Kathuo e Mubea (2016) estudaram a avaliação e o desenvolvimento do caminho ótimo para os serviços de água no Distrito de Mumoni, no Condado de Kitui, Quênia, cujo clima predominante é o semiárido. Para realizar tal feito, os autores desenvolveram camadas *raster*: rios, precipitação, linhas de água, solos, uso e ocupação da terra, mercados e declividade, similar ao trabalho desenvolvido por Mohammed e Majid (2014), porém com algumas adições, que permitissem a conexão com todas as escolas da região. De forma a obterem os pesos para a construção das camadas *raster*, os autores utilizaram a metodologia de tomada de decisão multicritério *Analytic Hierarchy Process* (AHP) desenvolvido por Saaty (1991), que consiste na decomposição e a síntese de relações entre os critérios, com o objetivo de priorização dos indicadores, aproximando-se de uma melhor resposta de medição única de desempenho (Saaty, 1991). Os autores até citam Shukla et al. (2013) que informam que o método AHP apresenta falhas como reverter as alternativas e outras críticas, mas que continua a ser o método mais aceitável. A superfície de custo foi gerada por meio da combinação dos dados, através da sobreposição ponderada das camadas *raster* que definiu por meio dos reservatórios existentes (caixas d'água) como a fonte de captação e as escolas como pontos de destino final. Os autores recomendam que sejam feitas mais pesquisas para estabelecerem mais reservatórios adicionais para cobrirem uma maior área de forma que seja estabelecida uma nova rota de adutora.

Roy et al. (2016) utilizaram o *software Quantum QGIS* para o estudo de uma adutora hipotética por meio da plataforma online de dados geográficos, através de código aberto *Bhuvan Indian Geo-Platform of ISRO*. Para compor o banco de informações, foram utilizadas imagens topográficas do satélite *Cartosat-1* (MDT de 30 m de resolução), informações geomorfológicas e uso e ocupação do solo por meio de imagens do satélite

Resourcesat-2 LISS III. A adutora fictícia foi criada ligando algumas cidades e uma única fonte de captação. Após a criação da adutora, os autores integram por meio de arquivo *shapefile* no QGIS para visualizarem por meio do *plugin profile tool*. Os autores realizaram algumas mudanças no traçado da adutora e concluíram que o exercício hipotético pode ser realizado por meio do QGIS e o portal Bhuvan, o que contribui com a elaboração prévia e o conhecimento do perfil de construção de uma forma ágil. Os autores recomendam que em um futuro seja customizado para outras atividades de rotas.

Arabi e Gharehhasanloo (2018) determinaram o traçado ótimo por meio do *software* ArcGIS com a extensão da *network analyst*. Foi realizado um estudo de caso da adução da Represa de Taleghan até a Cidade de Hashtgerd New City, Irã. A metodologia adotada foi similar ao trabalho de Kathuo e Mubea (2016), que contou também com o uso do método multicritério AHP para os pesos que fizeram parte da superfície de custo. Os autores recomendam que cada região possui características especiais e que outros métodos, como por exemplo, o de algoritmos genéticos sejam usados em trabalhos futuros.

Albiero et al. (2018) abordam o problema de adução entre cidades litorâneas através da captação de água potável, por meio da condução abaixo do nível da água utilizando rios próximos ao semiárido. Os autores estimaram, por meio do valor presente, a taxa interna de retorno para as Cidades de Fortaleza (Brasil), Dalian (China), Tel Aviv (Israel) e Gaza (Palestina). A escolha das cidades deu-se pelo fato de que apresentam características climáticas semelhantes, pois estão localizadas em regiões semiáridas e sofrem os efeitos das mudanças climáticas. Para os cálculos dos diâmetros da tubulação subterrânea, os autores levaram em consideração outros estudos e metodologias. Para a taxa de fluxos com base de valores de velocidades normalizados e o cálculo do custo relacionado com a tubulação, foram baseadas variação linear e na derivação da função de custo para o valor mínimo, através da consulta da ENCE (2018). O peso do tubo foi determinado a partir da derivação do diâmetro ótimo, baseado em termos econômicos, através da metodologia proposta por Gomes (2001). O procedimento para o cálculo de condutos forçados foi escolhido nas recomendações de Heller e Pádua (2006), que apontam a equação universal de Bresse. Após a apresentação dos diferentes cenários, os autores concluíram que a cidade de Fortaleza obteve uma viabilidade econômica sob algumas restrições, Tel Aviv e Gaza possuíam uma grande viabilidade, contudo, se a Cidade do Egito concordasse em fornecer água através do Rio Nilo. Dalian apresentou o resultado ideal em relação aos custos e, por fim, a adução submarina apresenta-se como uma prática associada na gestão do abastecimento de água em áreas metropolitanas e semiáridas.

Amaral et al. (2020) desenvolveram um modelo multicritério de decisão baseado em um SIG, que determinou, a partir de simulações, rotas de custo mínimo para o traçado de adutoras, levando em consideração os critérios de distância entre rios, áreas alagadas e a proximidade de rodovias, por meio de ponderações obtidas através de especialistas. Os autores utilizaram o método da AHP. A ferramenta utilizada para a álgebra de mapas se deu através do conjunto de ferramentas do *Spatial Analyst* (ArcGIS). A área de estudo foi um trecho da Adutora do Pajeú, localizada em Pernambuco, cuja base de dados foi oriunda do PE3D e os dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM)/TOPODATA. Os autores concluem que a metodologia proposta pode ser utilizada no desenvolvimento de projetos, dada a disponibilidade de dados e informações. Outro ponto a ser levado em consideração pelos autores é o uso de outros critérios para a tomada de decisão, como exemplo o tipo de solo e o melhoramento do critério que representa o consumo de energia através do processo de bombeamento. Os critérios e restrições a serem avaliados para o traçado de adutoras serão baseados nas recomendações de projetos e disponibilidade de informações, como declividade, distância dos principais rios e áreas alagadas, distâncias de estradas e altitude (Amaral et al., 2020).

Os estudos de Jain et al. (2021) e Simon et al. (2021) são similares com os já demonstrados anteriormente através do uso do ArcGIS *network analyst*.

Sarmiento (2022) propõe um algoritmo de determinação automática de rotas ótimas denominado Busca pelo Ajuste Geométrico da Despesa Anual (BAGDA), que se trata de “um algoritmo capaz de calcular a rota ótima para adutoras que atravessam terrenos com ou sem restrições de deslocamento adicionais às diferenças de cota e às perdas de carga a serem vencidas por bombeamento”. O critério empregado, tanto na definição do diâmetro da adutora, como no cálculo das rotas viáveis, é o da minimização da despesa anual, resultante da soma dos (i) custos anualizados referentes à aquisição da tubulação com os (ii) custos de pagamento pela energia elétrica para funcionamento do sistema ao longo de sua vida útil. A geometria das rotas mais curtas no espaço multidimensional de busca é calculada pelo algoritmo proposto, obtendo-se assim a combinação ótima entre comprimento e altura manométrica da adutora.

Objetivando demonstrar a adequabilidade do algoritmo proposto, Sarmiento (2022) apresenta quatro diferentes cenários de adução pressurizada, contextualizados em áreas topográficas obtidas de imagens SRTM, com cotas interpoladas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) a cada 30 m. O recorte topográfico utilizado coincide com a área de implantação da captação e início de adução do Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF). O algoritmo proposto leva em consideração a despesa anual referente aos custos de implantação, sendo composta pelo (i) custo de aquisição da tubulação e (ii) o custo da eletricidade ao longo da vida útil do empreendimento. O algoritmo proposto visa determinar a combinação ótima entre o comprimento da adutora e sua altura manométrica. O espaço de busca compõe-se das dimensões representativas do custo anualizado com tubulação e do custo com a energia elétrica (Sarmiento, 2022), que, em se tratando de áreas que exibam dificuldades para a implantação da linha adutora, tais como zonas pantanosas, inundadas, de proteção ambiental, com infraestrutura interferente, etc., os custos de travessia são evidentemente diferentes e devem ser invalidados e incorporados ao custo de deslocamento. Da mesma forma, em se tratando de travessia de áreas em que as declividades naturais apresentem-se acima do limite normativo, ou do recomendado pelo fabricante dos tubos podem ser restringidas, ou seja, excluídas do domínio de busca do algoritmo (Sarmiento, 2022). Adicionalmente, à serventia ao traçado automático ótimo, a metodologia de cálculo dos custos também é empregada pelo autor para determinar previamente o diâmetro mais econômico para a linha adutora, dados os parâmetros influenciadores, tais como custo de tubulação, energia elétrica, taxa de juros, vida útil do projeto, etc.

Na concepção do algoritmo BAGDA, Sarmiento (2022) cria um coeficiente (incorporado à função de penalização proposta, cerne da metodologia) denominado Coeficiente de Sinuosidade (CS), cuja função é estabelecer um peso virtual do desnível topográfico entre células adjacentes do percurso para o cômputo do valor da penalização econômica ao se adotar o deslocamento em cada direção possível. Esse valor de sinuosidade varia entre $-3 \leq CS \leq +3$. Na dinâmica peculiar do algoritmo, a busca no domínio dos custos é realizada conjugando-se o coeficiente de sinuosidade com a sistemática adoção de zonas de exclusão entre os pontos de captação e de entrega da água. Conforme o autor, as zonas de exclusão são aquelas através das quais não é permitida a passagem da adutora. Assim, para cada zona de exclusão, o coeficiente de sinuosidade irá variar no intervalo especificado pelo projetista gerando assim diversas combinações e correspondentes rotas, cada uma delas com seus respectivos custos econômicos.

Sarmiento (2022) também codificou o algoritmo em linguagem de programação Visual Basic, do Visual Studio, dotando o software de *interface* amigável (Figura 5), no qual é possível a inserção de parâmetros prévios para o desenvolvimento dos cálculos.

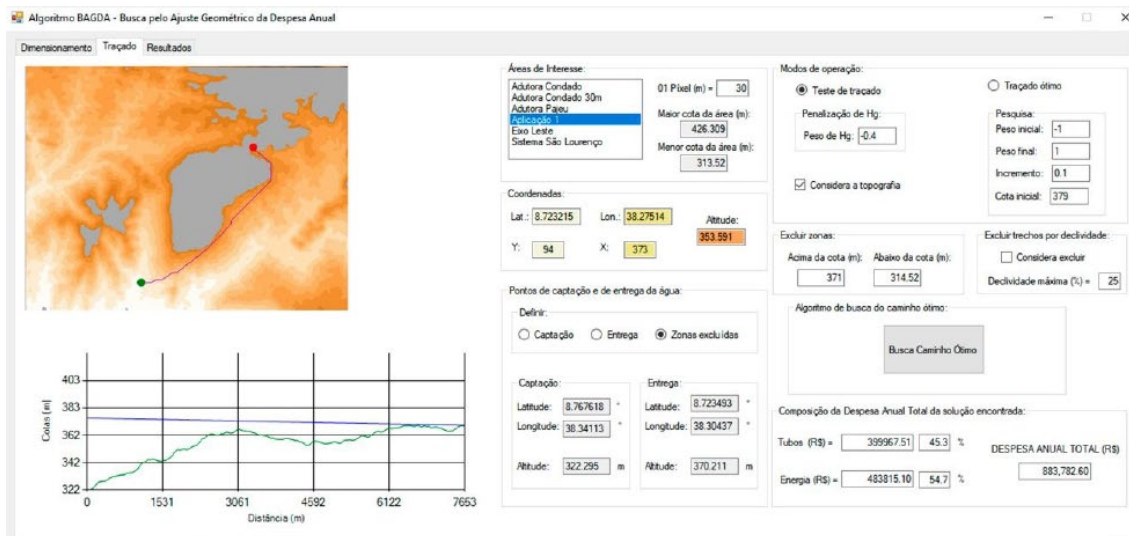


Figura 5. Interface da Heurística BAGDA. Fonte: Sarmento (2022).

Na primeira aplicação contida em Sarmento (2022), o programa desenvolvido pelo autor apresenta como valor ótimo um coeficiente de sinuosidade CS igual a $-0,4$, com zona de exclusão destacada em cor cinza na Figura 6. A rota assim obtida corresponde a um custo anual de R\$ 883.782,60 (45,3% do custo com a tubulação e 54,7% de custo da energia elétrica) e o comprimento da adutora 7.652,72 m.

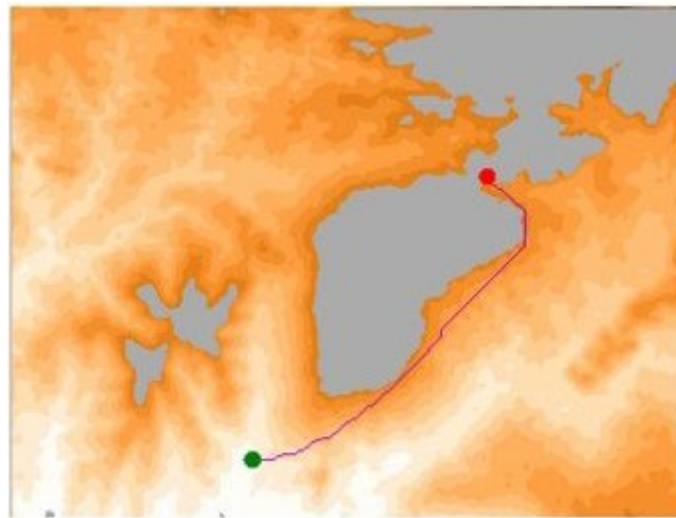


Figura 6. Resultado para um $CS = -0,4$. Fonte: Sarmento (2022).

Ainda no artigo supracitado, para as demais aplicações, o autor apresenta os respectivos CS e zonas de exclusão implicantes nos respectivos traçados ótimos e conclui que o algoritmo BAGDA é uma rápida alternativa automatizada para a determinação de traçados ótimos de sistemas adutores e que o fato do algoritmo funcionar para ambientes multidimensionais em termos de custos financeiros, oferece soluções que envolvem as

fases de implementação (aquisição das tubulações) e a fase de operação (custos anuais de eletricidade) e que representam a realidade dos projetos em termo de diâmetro da adutora e o traçado ótimo. O autor também afirma que o algoritmo BAGDA pode utilizar outros critérios de otimalidade, e que, para o estudo realizado (critério de minimização do custo) se apresenta como uma boa opção como ferramenta de projeto, na medida em que elimina a subjetividade intrínseca às metodologias que veem frequentemente sendo empregadas, essas, baseadas em SIG.

Após as análises e a revisão bibliométrica, é possível notar que houve várias formas de ser estabelecido o traçado ótimo de adutoras, desde a concepção por meio de especialistas, demonstrados pelo trabalho de Hardin et al. (2008) até a utilização da combinação entre *softwares* comerciais/livres com a elaboração de um SIG e o uso de *plugins* para a escolha do melhor traçado (Luettinger e Clark, 2005; Salah e Atwood, 2011; Mohammed e Majid, 2014; Suleiman et al., 2015; Kathuo e Mubea, 2016; Arabi e Ghareh Hassanloo, 2018; Amaral et al., 2020; Jain et al., 2021; Simon et al., 2021), já em Sarmiento (2012; 2022) são utilizadas heurísticas para encontrar os possíveis caminhos ótimos.

Conclusões

O presente artigo teve como objetivo realizar o levantamento bibliográfico das principais técnicas/métodos na busca pelo o melhor traçado de Adutoras. Os resultados demonstraram que existem diversas abordagens disponíveis para a determinação do traçado ótimo de uma adutora, incluindo métodos heurísticos, algoritmos evolutivos e técnicas baseadas em otimização matemática. Cada uma dessas abordagens apresenta suas próprias características e requisitos específicos, e a escolha do método mais adequado dependerá das características do problema em questão e das restrições envolvidas. Em suma, esta revisão bibliográfica contribui para o entendimento do estado atual da pesquisa nesse campo, destacando as principais abordagens e desafios enfrentados na busca do traçado ótimo de uma adutora, de forma que seja estimulada a participação de pesquisadores e profissionais a explorar novas soluções e aprimorar a eficiência e sustentabilidade dos sistemas de adução de água.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco - FACEPE (Processo IBPG 23076.090950/2021-66), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Processo nº 420012/2021-4, Processo nº 308202/2022-8), e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES (Código Financeiro 001).

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12.215 - Projeto de adutora de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

Albiero, D.; Silva, M. A. D.; Melo, R. P.; Garcia, A. P.; Praciano, A. C.; Fernandes, F. R. B.; Monteiro, L. A.; Chioderoli, C. A.; Silva, A. O.; Barbosa Filho, J. A. D. Economic feasibility of

underwater adduction of rivers for metropolises in semiarid coastal environments: Case studies. **Water**, v. 10, n. 2, 215, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10020215>

Amaral, F. E.; Cirilo, J. A.; Ribeiro Neto, A. Uso de técnicas de geoprocessamento na otimização do traçado de sistemas adutores de abastecimento de água com a utilização de uma base de dados de alta definição. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 2, p. 381-391, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020193734>

Arabi, M.; Ghareh Hassanloo, S. Application and comparison of analytical hierarchy process (AHP) and network methods in path finding of pipeline water transmission system, from Taleghan's Dam to Hashtgerd New City, Tehran, Iran. **Open Access Library Journal**, v. 5, n. 4, p. 1-16, 2018. <https://doi.org/10.4236/oalib.1104303>

BCRUA - Brushy Creek Regional Utility Authority. Phase 2 - Raw water delivery system under development. 2022. Disponível em: <<https://www.bcrua.org/bcrua-news-1/2022/08/03/phase2>>. Acesso em: 09 set. 2022.

Bezerra, S. T. M.; Cheung, P. B. **Perdas de água**: tecnologias de controle. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013.

Dijkstra, E. W. A note on two problems in connection with graphs. **Numerische Mathematik**, v. 1, p. 269-271, 1959. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>

Gomes, H. P. Economic dimensioning of pipelines. **Environmental and Sanitary Engineering**, v. 6, p. 108-114, 2001.

Hardin, D.; Bridges, G.; Rundell, D. Selecting the best pipeline route based on facts not feelings. In: Gokhale, S.; Rahman, S. (Eds.). **Pipelines 2008**: Pipeline asset management - Maximizing performance of our pipeline infrastructure. Atlanta: American Society of Civil Engineers, 2008. p. 1-9. [https://doi.org/10.1061/40994\(321\)12](https://doi.org/10.1061/40994(321)12)

Jain, V.; Bhamra, R. S.; Mishra, M.; Gupta, R. Water pipeline routing using GIS. In: Bhuiyan, C.; Flügel, W. A.; Jain, S. K. (Eds.). **Water security and sustainability**. Singapore: Springer, 2021. (Lecture Notes in Civil Engineering, v. 115). p. 101-111. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9805-0_10

Kathuo, P. W.; Mubea, K. Application of GIS technologies in optimal routes modelling of water utilities to spur development. **International Journal of Science and Research**, v. 5, n. 2, p. 2319-7064, 2016.

KSL. Final piece of pipe placed in point of the mountain aqueduct. 2007. Disponível em: <<https://www.ksl.com/article/1069196/final-piece-of-pipe-placed-in-point-of-the-mountain-aqueduct>>. Acesso em: 07 set. 2022.

Lima, A. C. D.; Cunha, D. A.; Albuquerque, R. C.; Costa, R. N. A.; Silva, H. J. Alterações sensoriais em respiradores orais: revisão sistemática baseada no método PRISMA. **Revista Paulista de Pediatria**, v. 37, n. 1. p. 97-103, 2018. <https://doi.org/10.1590/1984-0462/2019;37;1;00012>

Luettinger, J.; Clark, T. Geographic information system-based pipeline route selection process. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 131, n. 3, p. 193-200, 2005. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(2005\)131:3\(193\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2005)131:3(193))

Maughn, S.; Byrnes, K. Challenges in completing a large diameter water transmission pipeline. In: Arnaout, S.; Slavin, L. (Eds.). **Pipelines 2013**: Pipelines and trenchless construction and renewals: A global perspective. Atlanta: American Society of Civil Engineers, 2013. <https://doi.org/10.1061/9780784413012.045>

Mohammed, A. B.; Majid, M. R. Design of optimal water distribution network using geographic information system in Yola Nigeria. Proceedings of the International Conference on Urban and Regional Planning, 2014.

Nascimento, R. F.; Canteri, M. H. G.; Kovaleski, J. L. Impacto dos sistemas de recompensas na motivação organizacional: revisão sistemática pelo método PRISMA. **Revista Gestão & Conexões**, v. 8, n. 2, p. 44-58, 2019. <https://doi.org/10.13071/regec.2317-5087.2019.8.2.23541.44-58>

ONU - Organização das Nações Unidas. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. 2019. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 03 maio 2023.

Roy, P.; Chandramohan, J.; Vinod Kumar, K.; Raj, A.; Shaik, M.; Bothale, V.; Diwakar, P. G. Use of remote sensing and geospatial technique for pre-feasibility analysis of rural water pipeline grids. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 45, n. 4, p. 667-672, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12524-016-0631-0>

Saaty, T. L. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: McGraw Hill, Makron, 1991.

Salah, A. M.; Atwood, D. Pipeline alignment optimization: Automated GIS-based approach. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v. 2, n. 1, p. 2-13, 2011. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ps.1949-1204.0000067](https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000067)

Sarmento, F. J. Automatic routing of water supply pipelines. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 27, e24, 2022. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220033>

Sarmento, F. J. Um algoritmo metaheurístico de apoio à otimização para o traçado de adutoras. Anais do XI Simpósio de Recurso Hídricos do Nordeste, João Pessoa, 2012.

Shukla, M.; Radadia, P.; Karande, S. S.; Lodha, S. DEMO: On the real-time masking of the sound of credit cards using hot patching. Proceedings of the 2013 ACM SIGSAC Conference on Computer & Communications Security, p. 1351-1354, 2013. <https://doi.org/10.1145/2508859.2512498>

Silva, I. M. G.; Granziera, M. L. M. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e a legislação brasileira sobre abastecimento humano: mecanismos de efetividade. **Leopoldianum**, v. 45, n. 125, p. 12-12, 2019. <https://doi.org/10.58422/releo2019.e885>

Simon, L.; Japheth, N. K.; Mohammed, U. Selection of the shortest route of transporting water from Yola Water Service Station to Yolde Pate, Adamawa State. **Journal of Research in Environmental and Earth Sciences**, v. 7, n. 1 p. 76-85, 2021.

Suleiman, S.; Agarwal, V. C.; Lal, D.; Sunus, A. Optimal route location by Least Cost Path (LCP) analysis using (GIS), a case study. **International Journal of Scientific Engineering and Technology Research**, v. 4, n. 44, p. 9621-9626, 2015.

Urrútia, G.; Bonfill, X. Declaración PRISMA: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis. **Medicina Clínica**, v. 135, n. 11, p. 507-511, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2010.01.015>

WHO - World Health Organization. Drinking-water. 2019. Disponível em: <<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>>. Acesso em: 12 mar. 2023.



Informação da Licença: Este é um artigo Open Access distribuído sob os termos da Licença Creative Commons Attribution, que permite uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.