

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

TRAÇADO ECONÔMICO DE CANAIS ABERTOS: MODELOS BASEADOS EM IA E PROGRAMAÇÃO DINÂMICA – PARTE II: APLICAÇÃO PRÁTICA

Francisco Jácome Sarmento¹

Abstract: This second part of the study applies the models developed in Part I to the optimization of two real canal projects: the Ramal do Agreste in Pernambuco, which has already been built, and the Canal do Mato Grande in Rio Grande do Norte, still under design. Real terrain elevation matrices and project-based technical parameters are used. The performance of models based on modified A*, genetic algorithms, and dynamic programming is comparatively evaluated. Results reveal more cost-effective routes in terms of length and earthwork volumes, as well as identify model limitations and possibilities for refinement toward real-world engineering applications.

Resumo: Esta segunda parte do trabalho aplica os modelos desenvolvidos na Parte I à otimização do traçado de dois canais reais: o Ramal do Agreste, em Pernambuco, já construído; e o Canal do Mato Grande, no Rio Grande do Norte, ainda em fase de concepção. São utilizadas matrizes reais de cotas e parâmetros técnicos extraídos de projetos. A performance dos modelos baseados em A* modificado, algoritmos genéticos e programação dinâmica é avaliada comparativamente. Os resultados revelam trajetórias mais econômicas em termos de custo e movimentação de terra, além de apontar limitações e possibilidades de refinamento dos modelos para aproximação à prática de projeto executivo.

Palavras-Chave – Algoritmo A*, Programação Dinâmica, algoritmos genéticos; canais abertos.

INTRODUÇÃO

Dando continuidade ao estudo teórico apresentado na Parte I deste trabalho, no qual foram exploradas abordagens matemáticas e computacionais para a otimização do traçado de canais abertos, esta segunda parte dedica-se à aplicação prática dos modelos desenvolvidos. O objetivo é avaliar o desempenho das rotas propostas por algoritmos heurísticos e metaheurísticos em dois contextos concretos do semiárido nordestino: o Ramal do Agreste, em Pernambuco, e o Canal do Mato Grande, no Rio Grande do Norte. Ambos os empreendimentos se inserem no escopo de iniciativas estruturantes do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), voltadas para a segurança hídrica em áreas vulneráveis.

O Ramal do Agreste, cuja construção já se encontra substancialmente concluída, fornece um campo fértil para validação retroativa dos modelos. A partir da comparação entre a geometria real implantada e as rotas geradas por diferentes técnicas de otimização, torna-se possível quantificar ganhos potenciais em termos de custo, extensão do canal e volume de movimentação de terra. Essa análise retrospectiva também permite avaliar a viabilidade de substituição, ou ao menos de complementação, dos métodos tradicionais de projeto por ferramentas baseadas em algoritmos computacionais, com ênfase na integração de modelos digitais de terreno e restrições hidráulicas operacionais.

¹) Professor Titular da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Campus I, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – DECA, Centro de Tecnologia, João Pessoa – PB,(83) 3216-7355, e-mail: franciscojacomesarmento@gmail.com

No caso do Canal do Mato Grande, na presente data ainda em fase preliminar de concepção, a aplicação dos modelos propostos assume um caráter prospectivo. Utilizando-se de matrizes de cotas altimétricas obtidas a partir de levantamentos recentes (Rizzoli, 2017 e Wessel, 2018), o estudo propõe traçados otimizados para o canal, considerando distintos critérios de custo e restrições geométricas. Como a obra ainda não foi construída, os resultados aqui obtidos podem, em tese, influenciar ou subsidiar a tomada de decisão quanto ao seu traçado, viabilizando uma solução economicamente mais eficiente e ambientalmente menos agressiva.

Diferentemente da Parte I, cujo foco esteve concentrado na formalização dos modelos e na apresentação das equações fundamentais, esta segunda etapa enfatiza a implementação computacional e a análise crítica dos resultados obtidos. São utilizados dados disponíveis de topografia, considerando apenas limitações geométricas impostas por obstáculos naturais (cotas máximas e mínimas para o espaço de busca), parâmetros hidráulicos extraídos de estudos de projeto, mas deixando de fora, nessa fase de investigação da performance dos modelos, zonas de exclusão representadas por reservas ambientais, zonas urbanas, corpos hídricos (lagos naturais e artificiais), obras de infraestrutura existentes (rodovias, ferrovias, cabeamentos, etc.). A estrutura do texto segue uma organização por estudos de caso, com seções dedicadas à descrição dos dados de entrada, dos parâmetros utilizados e da análise comparativa entre diferentes cenários simulados. A articulação entre teoria e prática constitui, portanto, o eixo central desta Parte II.

CARACTERIZAÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO

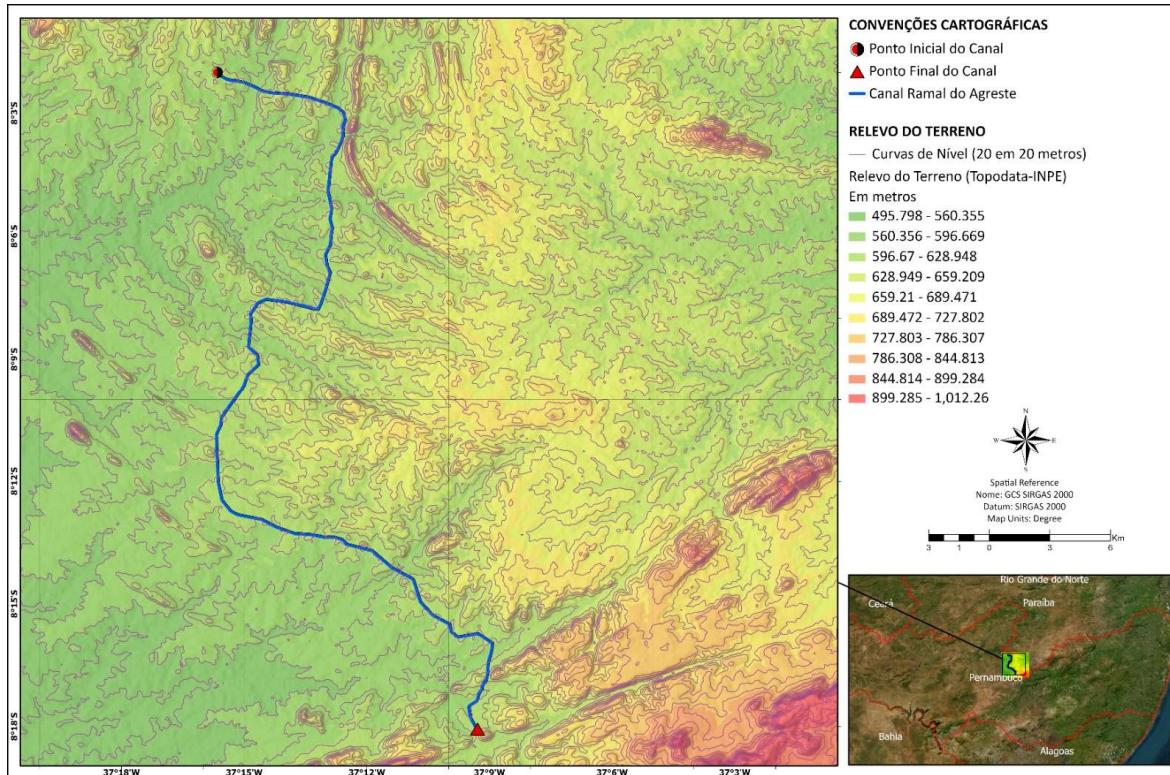
Ramal do Agreste Pernambucano

O Ramal do Agreste (Figura 1) é um dos principais componentes do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), com a função de distribuir águas do Eixo Leste para diversas regiões do interior de Pernambuco. A obra foi concebida para reforçar o abastecimento de dezenas de municípios do Agreste pernambucano, região caracterizada por clima semiárido e elevado déficit hídrico. Com aproximadamente 70,6 km de extensão, o canal principal do ramal é projetado para operar com uma vazão média de 8 m³/s, sendo revestido em concreto e contando com estruturas hidráulicas como aquedutos, túneis, sifões e dispositivos de controle de nível.

O traçado do Ramal do Agreste percorre uma topografia acidentada, o que impôs desafios significativos à sua implantação. A escolha da rota se deu tradicionalmente por métodos convencionais, baseando-se em estudos de viabilidade topográfica, ambiental e fundiária. No entanto, conforme evidenciado por Sarmento (2014b), a rota adotada apresenta trechos com potencial de otimização considerável, tanto em termos de extensão quanto de movimentação de terra. A pesquisa mencionada aplicou um algoritmo metaheurístico para propor soluções alternativas mais econômicas, demonstrando que há margem para ganhos relevantes se forem consideradas metodologias automatizadas e orientadas por critérios de custo.

A análise da rota do Ramal do Agreste por meio do algoritmo A* modificado (Sarmento, 2014a) teve como principal dado de entrada a matriz real de cotas altimétricas e considerou fatores como volumes de corte e aterro, declividade do fundo do canal, bem como abordou opções entre contornar obstáculos topográficos ou adotar túneis, etc. Os resultados evidenciaram que a rota existente tende a acompanhar curvas de nível e evitar áreas de relevo mais acidentado, ainda que, em alguns casos, um traçado mais direto (com maior uso de aterros) pudesse gerar trajetos economicamente mais vantajosos. O estudo serve, portanto, como um importante ponto de comparação para validar a aplicabilidade dos modelos desenvolvidos na Parte I deste artigo.

Figura 1 – Ramal do Agreste Pernambucano – Trecho em canal derivado a partir do Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco - PISF.

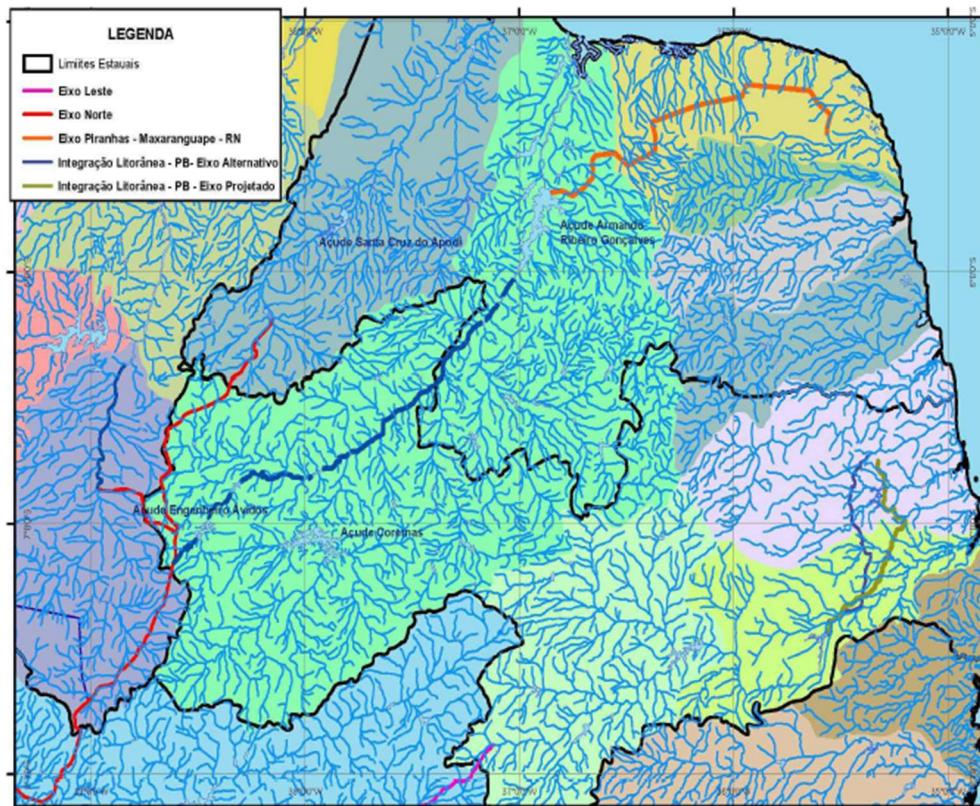


Canal do Mato Grande

O Canal do Mato Grande (Figura 2), também identificado em sua fase inicial como Canal de Maxaranguape, é uma proposta de infraestrutura hidráulica estratégica para o estado do Rio Grande do Norte. Diferentemente do Ramal do Agreste, na presente data este empreendimento ainda se encontra em fase de concepção, o que abre amplas possibilidades para aplicação de modelos computacionais de otimização na definição de seu traçado. A proposta é transportar águas da barragem Armando Ribeiro Gonçalves até a região do Mato Grande, favorecendo a irrigação, o abastecimento urbano e a segurança hídrica em uma região com elevado potencial agrícola e grandes vulnerabilidades climáticas.

Ainda em Sarmento e Molinas (2012), com base em dados de altimetria disponível (RSTM) foram estudadas diferentes configurações de traçado para o canal, comparando alternativas que priorizam rota direta, rota mais suave e rota mais econômica em termos de movimentação de terra. Conforme os autores, “o algoritmo faz uso de uma rotina própria, capaz de projetar, de forma parametrizada, uma seção transversal exigida pelo canal com dada cota de fundo e geometria da seção hidráulica informada. Dentre outras facilidades, a parametrização facilita à escolha do projetista vários critérios de inserção automática de berma nos cortes mais pronunciados, bem como definir a largura da mesma. Também definível é a inclinação dos taludes nas seções em corte, aterro ou mista. O projeto geométrico de cada tipo de seção é realizado automaticamente sobre o perfil transversal ao terreno natural em cada estaca, cujas cotas e distâncias são igualmente extraídas do MDT de forma automática. Originalmente, essa rotina foi desenvolvida como parte do sistema computacional SIDOC - Sistema Integrado de Dimensionamento e Orçamento de Canais descrito em Sarmento (2008)”.

Figura 2 – Canal do Mato Grande, antes denominado Canal de Maxaranguape: primeiro traçado obtido por Sarmento e Molinas (2012). Fonte: Sarmento e Molinas (2012)



APLICAÇÃO E RESULTADOS

As informações demandadas em ambas as aplicações mencionadas consistiram em: (i) Matriz digital de cotas do terreno, tendo sido utilizado TOPODATA (2025) no caso do Ramal do Agreste e Wessel (2018) no caso do Canal do Mato Grande; coordenadas dos pontos de captação e de entrega da água; cotas iniciais do fundo dos canais estudados e declividade longitudinal (fixada pelo projetista e constante ao longo da rota).

No caso do Modelo 2 (algoritmo genético), com o objetivo de reduzir o tempo de processamento computacional, foram informadas zonas de exclusão, ou seja, zonas por onde a rota ótima buscada não poderia adentrar, cuja definição baseou-se simplesmente no estabelecimento de cotas altimétricas mínima e máxima. Com isso, foi delimitada uma faixa altimétrica formadora do espaço geográfico de busca da rota ótima.

Foram testadas diversas proporções entre custos unitários de cortes e de aterro. Empiricamente, sabe-se que uma proporção realista é da ordem de 1 unidade de custo com corte sendo equivalente ao dispêndio de 10 unidades de custo com a implantação de aterro. Tal proporção 1:10 foi adotada como base para o processamento dos algoritmos apresentados na Parte I do presente artigo.

No caso específico do Modelo 2, o valor dos parâmetros relacionados ao algoritmo genético foram os seguintes: tamanho da população $N = 500$, número de gerações $G = 500$, taxa de mutação $\mu = 0,1$, e tamanho do torneio $T = 3$.

É necessário ressaltar que os resultados de rotas obtidos automaticamente pelos modelos aqui considerados são apresentados de forma bruta, ou seja, sem nenhum retrabalho manual que as adeque às práticas executivas demandadas em projetos de engenharia dessa natureza. Em outras palavras, em

todas essas rotas, há ainda a necessidade de se adequar o traçado, linearizando trechos, inserindo curvas de concordância, avaliando situações pontuais de possível encurtamento local do caminhamento, em particular, quando o canal traçado tende a seguir determinada curva de nível, tornando-se excessivamente sinuoso..

Há também que se analisar os impactos dessas decisões à luz do que elas podem implicar em termos de obras de drenagem (e.g. quantidade e dimensões de bueiros, pontilhões, passagens de fauna, overchute, etc.) e de travessia de vales (possibilidade de uso de ponte-canal, barragem ou sifão) e contorno de elevações (possibilidade de adoção de um túnel). Por último, mas não menos importante, caso a rota bruta venha a cruzar áreas restritivas (e.g. reservas ambientais, zonas urbanas) ou infraestrutura preexistente o impacto disso poderá implicar pode ser na concepção da rota como um todo, exigindo o reprocessamento do modelo em uso, desta feita informando como dado de entrada essas zonas de exclusão.

Denominaremos todas essas eventuais necessidades de conversão do resultado bruto (rota ótima obtida pelo modelo) em uma rota executiva de “refinamento da solução”.

Modelo 1: Determinação do traçado ótimo com base no algoritmo A* modificado

Embora tenha sido aplicada uma simplificação na rotina computacional do SIDOC (Sarmento, 2008), a qual consistiu em projetar as seções geométricas de terraplenagem sobre terreno natural considerado horizontal ao longo das seções topográfica transversais ao eixo do canal, o tempo de processamento computacional para preparação da camada (*layer*) de custos é extremamente longo. A depender da dimensão da matriz topográfica, pode consumir horas de processamento em *laptops*, ainda que com configurações de *hardware* robustas. O principal fator implicante nessa demora computacional é o tempo consumido pela rotina mencionada para obter o projeto individual da seção geométrica de terraplenagem para todos os pontos investigados pelo modelo.

A figura 3 apresenta tanto a rota obtida pelo Modelo 1 sem refinamento da solução, como também o caminhamento da obra já executado em campo. Antes de qualquer comparação entre as trajetórias mostradas ressalte-se que (i) o traçado executivo do Ramal do Agreste foi definido com base em topografia de campo, diferindo do MDT utilizado neste estudo, de precisão inferior; (ii) a solução executiva passou por refinamento, envolvendo as análises e considerações objetivas e subjetivas requeridas pela elaboração do Projeto Executivo de engenharia desse tipo de infraestrutura.

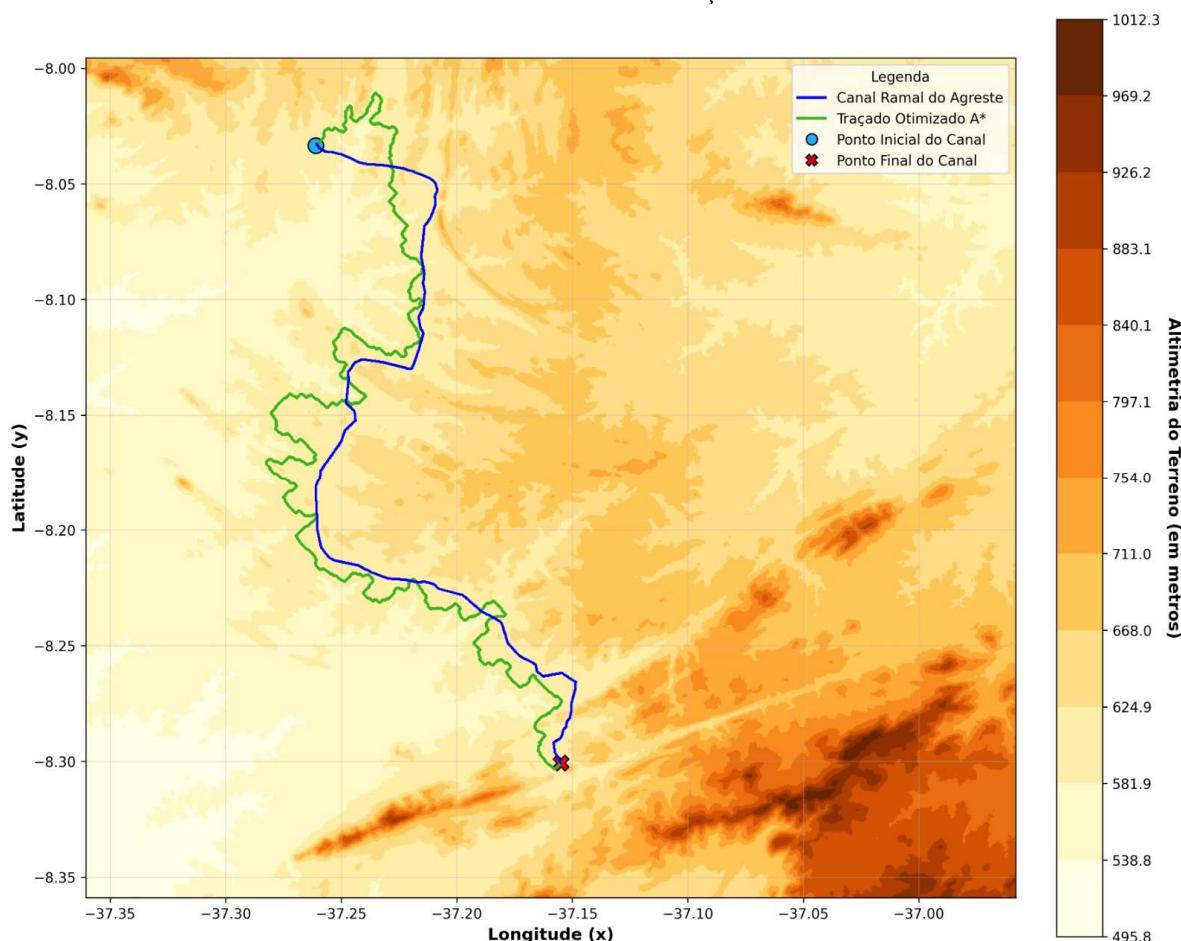
Feita a ressalva, passamos a comentar aspectos da rota ótima bruta obtida. Em primeiro lugar, observa-se que o caminhamento gerado automaticamente pelo modelo preservou aproximadamente a topologia da rota executiva construída, aproximando-se e afastando-se das áreas mais elevadas, conforme também o fizeram os engenheiros projetistas responsáveis pela concepção final do canal.

O modelo utilizado toma decisões locais e não possui nenhuma função de penalização que realisticamente masure o impacto de cada uma dessas decisões locais na qualidade da concepção geral da rota. Essa deficiência do algoritmo é bem exemplificada logo no início da rota calculada, pois, conforme se observa na figura 3, a rota bruta parte em sentido contrário ao ponto de entrega da água.

Isso ocorre porque o algoritmo, ao calcular sucessivamente os custos locais de deslocamento para as células topográficas adjacentes, avança na direção oposta ao destino (ponto de entrega da água) na mesma proporção, deixando de considerar (i) a penalização do incremento de comprimento que terá a rota ao se desenvolver dessa maneira, diga-se de passagem, criando uma alternativa que jamais seria a de um engenheiro projetista experiente e; (ii) paralelamente, ao ceder ao benefício econômico pontual, “ignora” que a direção adotada é inviável progressivamente, pois leva à cotas topográficas que, também por decisões pontuais, fatalmente serão evitadas, determinando assim o

abandono do caminhamento e o retorno dispendioso ao rumo apropriado, acrescendo ainda mais o comprimento do canal.

Figura 3 – Ramal do Agreste: Traçado do canal executado em campo (obra concluída) e rota calculada pelo Modelo 1, sem refinamento da solução.



No restante da rota bruta, observa-se de forma recorrente as consequências dessa mesma deficiência de não ponderação penal realista das decisões tomadas com base apenas em nível local, muito embora, na configuração da rota bruta como um todo, a própria natureza construtiva do algoritmo A* modificado garanta o alcance no ponto de entrega da água, com maior ou menor grau de sinuosidade, preservando aproximadamente a forma da rota construída do canal. Certamente, tal sinuosidade da rota bruta seria reduzida caso passasse por refinamento, como o foi aquela apresentada pelo canal executado em campo, uma vez que, em várias situações, enquanto a rota bruta contornou morros, essa alternativa foi substituída por túneis na rota refinada executiva.

Modelo 2: Rota otimizada com Algoritmo Genético

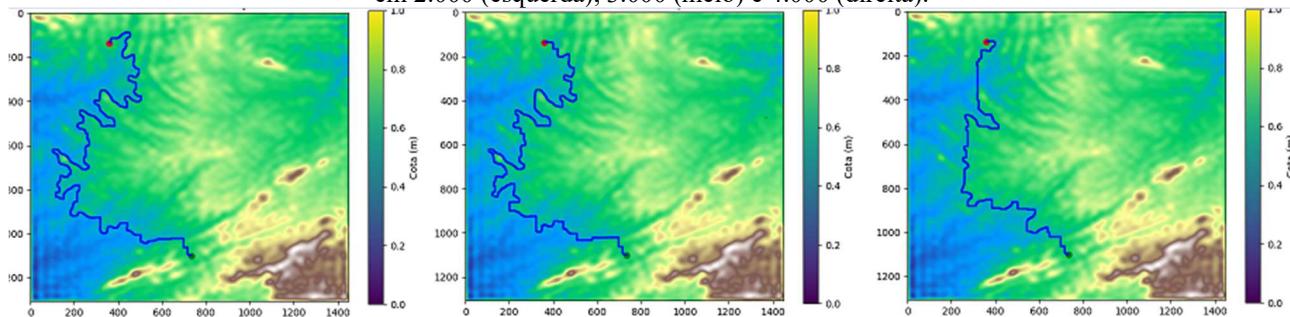
Nesse modelo, uma rota é representada por um cromossomo codificado em base binária. Tal forma de representação consome demasiado tempo computacional em problemas reais, em que o canal pode apresentar dezenas de quilômetros de extensão. Assim, adotou-se o conceito de zonas de exclusão para restringir o espaço de busca no qual evoluíram as gerações de rotas, a partir da população inicial.

Uma das principais características evidenciadas pela aplicação do Modelo 2 consistiu na sua sensibilidade à função de penalização, mais especificamente ao peso dessa penalização relativa à curvatura horizontal do caminhamento. Esse peso foi empiricamente adotado como variando de

maneira aleatória entre 1.000 e 8.000, o que garantiu uma população inicial diversificada, no sentido de conter rotas com diferentes curvaturas horizontais, desde as mais retilíneas, até as mais sinuosas.

Por sua natureza funcional, o algoritmo tende a combinar essa diversidade, produzindo rotas bem equilibradas em termos de desenvolvimento de trechos retilíneos e curvilíneos quando tais configurações se mostrarem mais econômicas, no que lhes traduz a função objetivo. Ilustrando essa influência a figura 4 mostra as rotas brutas obtidas pelo Modelo 2 tendo-se fixado na geração da população inicial o peso da curvatura em 2.000, 3.000 e 4.000 e mantida a geração de rotas pelo algoritmo A* modificado. Portanto, conforme esperado, quanto mais se penaliza as rotas que compõem a população inicial, a rota ótima bruta (cromossomo vencedor final) assume uma configuração mais retilínea.

Figura 4 – Ramal do Agreste: Traçado do canal pelo Modelo 2, sem refinamento da solução, com peso da curvatura fixo em 2.000 (esquerda), 3.000 (meio) e 4.000 (direita).



A aplicação do Modelo 2 ao Canal do Mato Grande é mostrado na figura 5. Admitiu-se, conforme Sarmiento e Molinas (2014) que o bombeamento a partir da barragem Armando Ribeiro Gonçalves seria o ideal para possibilitar o fundo do canal partir na cota 100. Essa rota ótima bruta é esquematizada em preto na referida figura com curvas de nível a cada 25 metros e base cartográfica conforme Wessel (2018), com pontos cotados a cada 12 metros. A rota se desenvolve ao longo de 15.539 pontos, o que implica em um canal com cerca de 180 km de extensão.

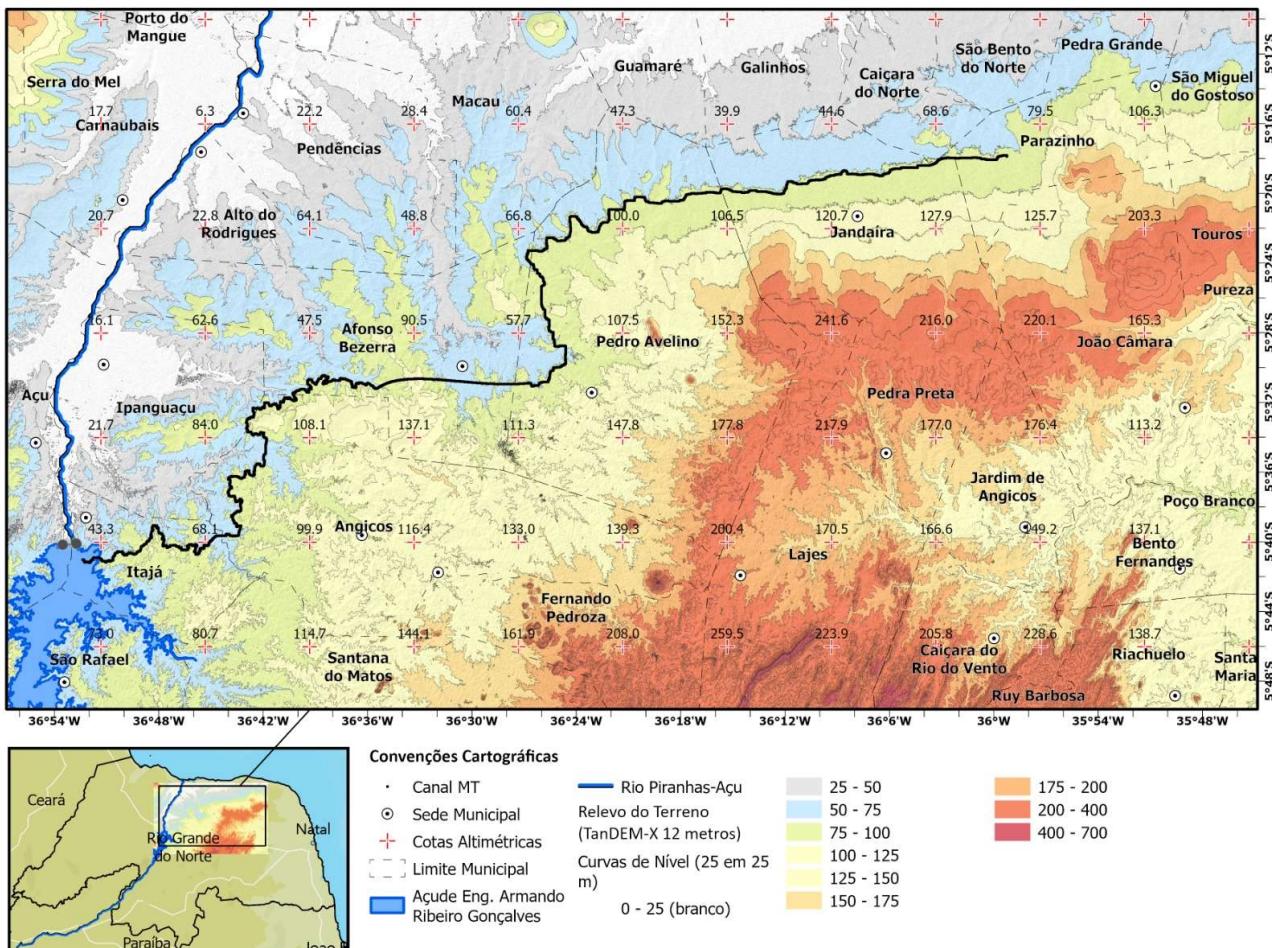
Modelo 3: Solução via Programação Dinâmica

A sensibilidade dos modelos à proporção de custos unitários relacionados à ocorrência de seções transversais geométrica de terraplenagem de corte e aterro será aqui evidenciada analisando-se resultados obtidos via a modelagem por Programação Dinâmica. A figura 6 mostra as rotas obtidas admitindo-se que o custo unitário de implantação de seções geométricas de terraplenagem nas proporções de (10:1) (\$corte:\$aterro); (1:1) (\$corte:\$aterro) e (1:10) (\$corte:\$aterro).

Conforme se observa na referida figura, em todas as alternativas simuladas há relativamente menos refinamentos a serem feitos na solução ótima bruta do que o que se constata nas rotas obtidas com os modelos 1 e 2, o que não significa que os resultados advindos do modelo 3 sejam mais atrativos do ponto de vista econômico. A proporção real de custos unitários para os tipos de seção ocorrentes ao longo de qualquer rota certamente se tornará conhecida, em valores atuais, quando do levantamento de preços unitários de mercado na fase de orçamentação da obra.

Os perfis resultantes de cada proporção de custos utilizada (lado direito da figura 6) evidenciam a sensibilidade do modelo em face dessas configurações. De fato, o favorecimento de deslocamentos para seções em aterro fica bastante perceptível no primeiro perfil da referida figura. Na parte inferior da mesma, nota-se o quanto a rota se aproximou do relevo de cotas mais elevadas, favorecendo a ocorrência de cortes. Em todos os casos, foi mantida a mesma cota de fundo e declividade longitudinal do canal, conforme Projeto Executivo implantado em campo (cota de fundo partindo da cota 595,81m e declividade de 10 cm/km).

Figura 5 – Canal do Mato Grande: Traçado do canal pelo Modelo 2 (rota em preto), sem refinamento da solução, com peso da curvatura fixo em 2.000 (esquerda), 3.000 (meio) e 4.000 (direita).



A aplicação do Modelo 3 ao Canal do Mato Grande, considerando agora que o bombeamento a partir da fonte hídrica (barragem Armando Ribeiro Gonçalves) permitiria o fundo do canal partir na cota 90,0m é comparada às rotas obtidas pelos modelos 1 e 2, todos com fundo do canal partindo na mesma cota mencionada e mesma proporção de custos unitários de corte e aterro. A rota destacada em roxo, produzida pela Programação Dinâmica (Modelo 3), em dois trechos toma um caminho diferente daquele gerado pelos Modelos 1 e 2, cujas rotas (em azul e preto) praticamente se sobrepõem.

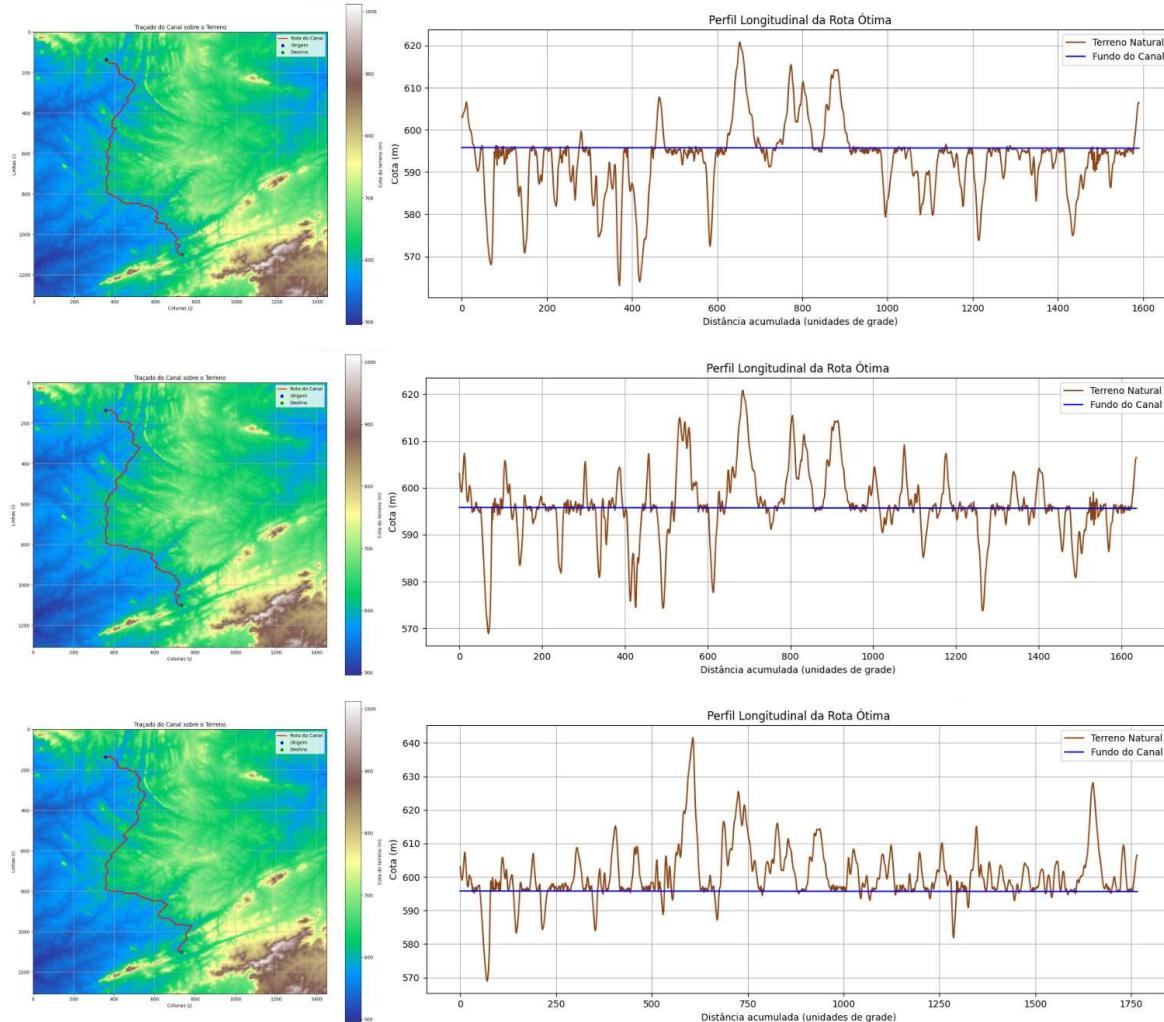
Ao se aproximar mais da faixa litorânea, a rota roxa cruza dois vales mais pronunciados em ponto mais a jusante do que o fazem as outras duas rotas. Quando do necessário refinamento da rota bruta, pode-se analisar a real significância da economia proporcionada pelo encurtamento do caminho até o ponto de entrega da água, decorrente do caminhamento adotado pela rota roxa, posto ser um caminhamento com cerca de 130 km, portanto, 40 km a menos em relação às outras duas rotas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação prática dos modelos de otimização de traçado de canais permitiu validar e contrastar seus desempenhos em contextos reais e diversos de obras hidráulicas do semiárido nordestino. A análise da rota do Ramal do Agreste mostrou existir potencial de otimização significativa, caso fossem adotadas abordagens automatizadas desde o projeto conceitual. Já o estudo do Canal do Mato Grande evidencia o valor estratégico de tais modelos quando utilizados

prospectivamente, permitindo que decisões de projeto sejam embasadas por critérios econômicos objetivos desde sua fase inicial.

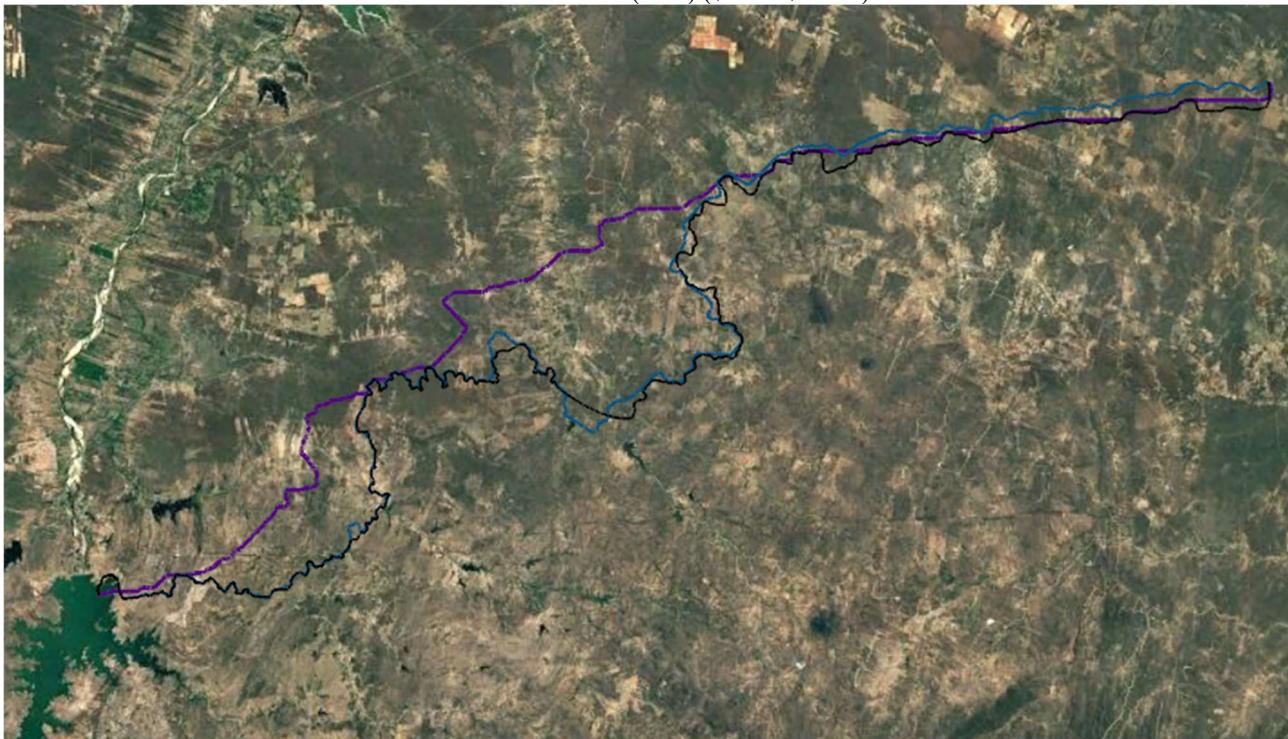
Figura 6 – Ramal do Agreste – Modelo 3 - Influência da proporção entre custos unitários de corte e aterro na determinação da rota ótima. De cima para baixo: (10:1) (\$corte:\$aterro); (1:1) (\$corte:\$aterro) e (1:10) (\$corte:\$aterro).



O Modelo 1, baseado no algoritmo A* modificado, demonstrou robustez na geração de rotas viáveis, mas sofreu limitações por sua abordagem essencialmente local e sequencial. O Modelo 2, de natureza evolutiva, revelou-se mais versátil ao permitir a exploração de diferentes configurações geométricas e adaptações a condições topográficas específicas, como vales e elevações abruptas, balanceando curvatura, extensão e custo de movimentação de terra. O Modelo 3, por sua vez, destacou-se pela clareza na formulação da solução ótima global, embora – como os demais – suas soluções careçam de refinamento para adequação às práticas executivas.

Em todos os casos, a ausência de restrições ambientais, fundiárias e urbanísticas nos modelos brutos reforça a necessidade de um refinamento posterior das rotas geradas. Contudo, mesmo sem tais ajustes, os resultados demonstram convergência com rotas construídas, reforçando a capacidade dos algoritmos de reproduzir lógicas projetuais válidas e eficientes. Não resta dúvida que, ainda que os modelos não fornecem rotas que dispensem refinamentos e o olhar da experiente do projetista, eles oferecem soluções que apontam os caminhamentos mais viáveis de forma automática, sem exigir do usuário qualquer análise prévia para guiar os algoritmos.

Figura 7 – Canal do Mato Grande – Modelos 1 (rota em azul claro), 2 (rota em preto) e 3 (rota em roxo), proporção entre custos unitários de corte e aterro (10:1) (\$corte:\$aterro) em todos os casos.



Para futuros desenvolvimentos, sugere-se incorporar penalizações associadas à travessia de obstáculos geográficos, introdução de obras de arte, uso de túneis, entre outros elementos presentes no projeto executivo de canais. A integração entre modelos de otimização e ferramentas de geoprocessamento pode ampliar ainda mais o potencial dessas abordagens, promovendo um novo paradigma para o planejamento de obras hidráulicas.

REFERÊNCIAS

- RIZZOLI, P. et al. (2017). “*Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model*”. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 132, p. 119-139, 2017.
- SARMENTO, F. J. (2008). “*Otimização de Custos de Adução na Transposição do Rio São Francisco*” in Anais do IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos do Nordeste. Salvador – BA.
- SARMENTO, F. J. (2014a). “*Metaheurística e Inteligência Artificial na Otimização do Traçado de Canais – Parte I: Aspectos Teóricos*” in Anais do XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Natal – RN.
- SARMENTO, F. J. (2014b). “*Metaheurística e Inteligência Artificial na Otimização do Traçado de Canais – Parte II: Aplicação Prática*”, in Anais do XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Natal – RN.
- SARMENTO, F. J., MOLINAS, P.A. (2012). “*Um Algoritmo Metaheurístico De Otimização Do Traçado De Canais*”, in Anais do XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, João Pessoa - PB.
- TOPODATA (2025). “*Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil*”. São José dos Campos: INPE. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/documentos.php>. Acesso em: 15 abr. 2025.
- WESSEL, B. (2018), “*TanDEM-X Ground Segment – DEM Products Specification Document*”, EOC, DLR, Oberpfaffenhofen, Germany, Public Document TD-GS-PS-0021, Issue 3.2, 2018. [Online]. Disponível em: <https://tandemx-science.dlr.de/>.