

Plugin QGIS para Otimização do Traçado e do Investimento para Gasodutos de CO₂

Rodrigo Ferreira Pintassilgo

Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Departamento de Engenharia Informática
Mestrado em Eng.^a Informática – Computação Móvel

Leiria, Março de 2026

Plugin QGIS para Otimização do Traçado e do Investimento para Gasodutos de CO₂

Rodrigo Ferreira Pintassilgo

Orientadores: Carlos Fernando de Almeida Grilo

Professor, Politécnico de Leiria

Rosa Isabel Alves Cordeiro Matias

Professora, Politécnico de Leiria

Sílvia Odete da Silva Ferrão

Professora, Politécnico de Leiria

Hugo Carlos Rosa Coelho Matias

CEO, Net4CO2

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Departamento de Engenharia Informática

Mestrado em Eng.^a Informática – Computação Móvel

Projeto

Leiria, Março de 2026

Plugin QGIS para Otimização do Traçado e do Investimento para Gasodutos de CO₂

Copyright © 2026 - Rodrigo Ferreira Pintassilgo, Escola Superior de Tecnologia e Gestão.

A presente dissertação é um trabalho original, elaborado exclusivamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos contribuíram para a sua elaboração. É permitida a sua reprodução parcial com indicação do autor e referência ao grau, ano letivo, instituição—*Politécnico de Leiria*—e data da defesa pública.



O presente trabalho beneficiou da utilização do modelo *IPLeiria-Thesis*.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar o meu sincero agradecimento aos meus orientadores de tese, Carlos Grilo, Rosa Matias e Sílvia Ferrão, por todo o acompanhamento, disponibilidade e orientação ao longo deste projeto. As reuniões de *brainstorming*, o acompanhamento contínuo e o espírito crítico que sempre demonstraram foram fundamentais para a definição, consolidação e maturação do trabalho desenvolvido. A sua experiência e apoio foram determinantes para ultrapassar desafios técnicos e metodológicos, contribuindo de forma decisiva para a qualidade final deste projeto.

Agradeço igualmente à Net4CO2 e a todos os seus colaboradores que participaram nas reuniões de acompanhamento ao longo do desenvolvimento do projeto. As suas contribuições foram essenciais para validar os avanços alcançados, confirmar a coerência do rumo seguido e assegurar que o produto desenvolvido fazia sentido do ponto de vista técnico, estratégico e aplicado. Este contacto com o contexto real do setor foi extremamente enriquecedor e trouxe uma dimensão prática muito relevante ao trabalho.

Por fim, deixo um agradecimento especial aos meus pais, pelo apoio indireto, compreensão e incentivo constantes ao longo de todo este percurso académico. A sua presença e confiança foram um suporte essencial durante as diferentes fases deste projeto.

RESUMO

O planeamento de infraestruturas de transporte de dióxido de carbono (CO_2) é um elemento crítico para a implementação eficaz de projetos de captura e armazenamento de carbono (CCS, do inglês *Carbon Capture and Storage*), especialmente em contextos onde essas infraestruturas ainda não existem. Este projeto aborda o problema do planeamento ótimo de gasodutos de CO_2 em Portugal Continental, integrando critérios técnicos, económicos e territoriais através de sistemas de informação geográfica (GIS, do inglês *Geographic Information Systems*).

A abordagem proposta baseia-se na construção de superfícies de custo espaciais, representadas em formato *raster*, resultantes da combinação ponderada de múltiplos fatores espaciais, nomeadamente ocupação do solo, declive do terreno, cruzamentos com infraestruturas existentes e reutilização de corredores energéticos. Com base nessas superfícies, aplica-se o algoritmo *least cost path* (LCP) para determinar traçados ótimos entre fontes emissoras e potenciais locais de armazenamento. Complementarmente, é integrada uma componente de estimativa económica que permite calcular o investimento inicial de capital (CAPEX) dos gasodutos, tendo em conta parâmetros físicos e operacionais, seguindo o modelo COMET.

A metodologia foi implementada numa plataforma digital sob a forma de um *plugin* para QGIS, permitindo uma utilização interativa e flexível por diferentes *stakeholders*. Os resultados obtidos em vários cenários nacionais demonstram a capacidade da solução em gerar traçados tecnicamente viáveis, sensíveis às condicionantes territoriais e com estimativas económicas consistentes. O trabalho contribui assim para o apoio ao planeamento estratégico de redes de transporte de CO_2 em fases preliminares, constituindo uma ferramenta relevante para o desenvolvimento futuro da captura e armazenamento de carbono (CCS) em Portugal.

Palavras-Chave: Transporte de CO_2 , Planeamento de gasodutos, Sistemas de informação geográfica, *Least cost path*, Análise multicritério.

ABSTRACT

The planning of carbon dioxide (CO_2) transport infrastructure is a critical component for the effective deployment of carbon capture and storage (CCS) projects, particularly in regions where such infrastructure is still at an early stage. This dissertation addresses the problem of optimal CO_2 pipeline routing in mainland Portugal by integrating technical, economic, and territorial criteria through geographic information systems (GIS).

The proposed approach is based on the construction of raster cost surfaces derived from the weighted combination of multiple spatial factors, including land use, terrain slope, crossings with existing infrastructures, and the reuse of established energy corridors. Based on these cost surfaces, the LCP algorithm is applied to determine optimal pipeline routes between emission sources and potential storage sites. In addition, an economic estimation component is integrated to calculate the initial capital investment (CAPEX), considering physical and operational parameters in accordance with the COMET model.

The methodology was implemented as a digital platform in the form of a QGIS plugin, enabling interactive use and scenario analysis by different stakeholders. The results obtained for several national case studies demonstrate the platform's ability to generate technically feasible routes that reflect territorial constraints and provide consistent economic estimates. Overall, this work contributes to supporting early-stage strategic planning of CO_2 transport networks and represents a practical decision-support tool for the future development of CCS infrastructure in Portugal.

Keywords: CO_2 transport, Pipeline routing, Geographic information systems, Least cost path, Multi-criteria analysis.

CONTEÚDO

<i>Lista de Figuras</i>	xiv
<i>Lista de Tabelas</i>	xvii
<i>Glossário</i>	xx
<i>Siglas</i>	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos do projeto	3
1.3 Abordagem metodológica	3
1.4 Estrutura do documento	4
2 Estado da arte	6
2.1 Panorama nacional	6
2.2 Metodologias de planeamento de corredores	8
2.3 Modelos de estimação de custo de gasodutos	9
2.4 Modelo integrado da região do Mediterrâneo Ocidental	10
3 Modelação do problema	15
3.1 Descrição do problema	15
3.2 Modelo económico de referência	16
3.3 Da fórmula económica ao custo por célula para o LCP	18
3.4 Parâmetros e valores de referência	19
3.5 Fatores de custo	20
3.5.1 Ocupação de Solo (F_{lu})	21
3.5.2 Declive do terreno (F_s)	22
3.5.3 Cruzamentos (F_{ci}) e Número de Infraestruturas (N)	23
3.5.4 Corredores (F_c)	25
3.6 Justificação da abordagem	27
4 Desenvolvimento	28
4.1 Requisitos	28
4.1.1 Requisitos funcionais identificados	29
4.1.2 Requisitos não funcionais	30
4.2 Arquitetura funcional da plataforma	30

4.3	Cálculo dos fatores de custo	32
4.3.1	Ocupação do solo	32
4.3.2	Declive do terreno	35
4.3.3	Cruzamentos com infraestruturas	36
4.3.4	Corredores existentes	38
4.4	Integração e funções complementares	41
4.4.1	Funções auxiliares	41
4.4.2	Cálculo do <i>least cost path</i>	43
4.4.3	Estimativa económica	46
5	Resultados	50
5.1	Casos de estudo reais	51
5.2	Cenários nacionais	52
5.2.1	Definição dos cenários e traçados ótimos	52
5.2.2	Análise detalhada do CAPEX	57
5.2.3	Análise do desempenho	57
5.3	Comparação com casos de referência	60
6	Conclusão	63
6.1	Contributos do trabalho	64
6.2	Trabalho futuro	64
	<i>Referências</i>	68
	Apêndices	
A	Instalação do <i>plugin</i>	79
A.1	Requisitos	79
A.2	Instalação via ficheiro ZIP (recomendado)	79
A.3	Instalação manual	80
A.4	Verificação da instalação	81
A.5	Resolução de problemas comuns	82
A.6	Desinstalação	82

LISTA DE FIGURAS

2.1	Resultados preliminares da infraestrutura de transporte de CO ₂ em 2030 .	14
3.1	Classes temáticas da Carta de Ocupação e Uso do Solo Conjuntural 2024 .	21
3.2	Representação das infraestruturas lineares em Portugal	24
3.3	Representação da rede nacional de gasodutos e oleodutos	26
4.1	Estrutura funcional da plataforma desenvolvida	31
4.2	Interface do separador <i>Land Use</i>	33
4.3	Diálogo auxiliar do separador <i>Land Use</i>	34
4.4	Interface do separador <i>Slope</i>	35
4.5	Interface do separador <i>Crossings</i>	37
4.6	Interface do separador <i>Corridors</i>	39
4.7	Interface do separador <i>Aux</i>	42
4.8	Interface do separador <i>LCP</i>	44
4.9	Interface do separador <i>Price Estimation</i>	46
4.10	Diálogo auxiliar do separador <i>Price Estimation</i>	47
5.1	Traçado ótimo para o cenário C1 (Leiria–Coimbra).	54
5.2	Traçado ótimo para os cenários C2 e C3 (Sines–Leiria).	55
5.3	Traçado ótimo para o cenário C4 (Sagres–Bragança).	56
5.4	Comparação dos traçados ótimos para o cenário C4 (Sagres–Bragança) . .	59
A.1	Janela de instalação de plugin via zip no QGIS	80

LISTA DE TABELAS

2.1	Fatores de custo do terreno considerados no modelo COMET	12
3.1	Parâmetros de referência para estimativa económica de gasodutos de CO_2	20
3.2	Fatores de custo associados ao uso do solo	22
3.3	Fatores de custo por intervalos de declive	23
3.4	Fatores de custo para cruzamentos com infraestruturas	23
3.5	Fatores de custo associados a corredores energéticos	25
5.1	Características técnicas e custos de investimento dos gasodutos analisados	52
5.2	Cenários nacionais considerados e resultados do traçado ótimo	53
5.3	CAPEX por segmento e estação de compressão	57
5.4	Impacto da reamostragem e do método de estimativa no cenário C4	60

GLOSSÁRIO

<i>raster</i>	Modelo de dados geoespaciais que representa o território como uma grelha regular de células (píxeis), em que a cada célula é atribuído um valor numérico correspondente a uma variável espacial contínua, como elevação, uso do solo ou custo de atravessamento.
corredor	Faixa espacial contínua que representa uma rota potencial para a implantação de uma infraestrutura linear, como um gasoduto, definida com base em critérios técnicos, económicos, ambientais e territoriais. O termo pode também referir-se a corredores existentes, previamente ocupados por infraestruturas lineares, cuja reutilização pode reduzir custos de licenciamento e impactos ambientais e sociais.
célula	Unidade espacial elementar de uma matriz raster, correspondente a uma área regular do território, à qual é atribuído um valor representativo de uma variável espacial, como custo, declive ou uso do solo.
resolução espacial	Dimensão real do terreno representada por cada célula de uma grelha <i>raster</i> . Este parâmetro determina o nível de detalhe espacial da representação, influenciando a precisão dos resultados e o custo computacional dos processos de análise espacial.
sumidouro	Formação geológica ou local tecnicamente adequado para o armazenamento permanente de dióxido de carbono capturado.
superfície de custo	Representação espacial em <i>raster</i> onde cada célula contém um valor numérico que expressa o custo relativo de atravessamento dessa localização.

SIGLAS

AHP	<i>analytic hierarchy process</i> (processo de hierarquia analítica).
CAPEX	<i>capital expenditure</i> (investimento inicial de capital).
CCS	<i>carbon capture and storage</i> (captura e armazenamento de carbono).
COS	Carta de Uso e Ocupação do Solo.
COSc	Carta de Ocupação do Solo Conjuntural.
DEM	<i>digital elevation model</i> (modelo de elevação digital).
DGT	Direção-Geral do Território.
GDAL	<i>geospatial data abstraction library</i> .
GIS	<i>geographic information system</i> (sistema de informação geográfica).
LCP	<i>least cost path</i> (caminho de menor custo).
MCDA	<i>multi-criteria decision analysis</i> (análise de decisão multicritério).
OPEX	<i>operational expenditure</i> (custos anuais de operação e manutenção).
WFS	<i>web feature service</i> (serviço de elementos geográficos).
WMS	<i>web map service</i> (serviço de mapas <i>web</i>).

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as tecnologias de CCS têm vindo a revelar-se como uma ferramenta imprescindível na mitigação das alterações climáticas. Em consequência de políticas climáticas ambiciosas, tem-se verificado recentemente um aumento sem precedentes no interesse e investimento em projetos com estas tecnologias. O apoio governamental atingiu níveis históricos, com investimentos na ordem dos milhares de milhões¹, tanto nos EUA ([Energy, 2021](#)) como na União Europeia ([Europeia, 2023](#)). Este estímulo traduziu-se no rápido crescimento global de projetos. Em 2023, por exemplo, a capacidade de captura total de CO₂ aumentou cerca de 48% num único ano, e foram adicionadas 198 novas instalações CCS ao portefólio de projetos em desenvolvimento ([Institute, 2023](#)).

Em simultâneo, os gasodutos de CO₂ revelam-se como um elemento-chave nos projetos CCS, pois garantem a ligação entre as fontes emissoras e os locais de armazenamento geológico. Segundo o relatório do *Global CCS Institute* ([Institute, 2024](#), págs. 8–9), embora seja viável transportar pequenas quantidades de CO₂ por estradas ou ferrovias em distâncias curtas, em grandes volumes e longas distâncias, o transporte preferencial é tipicamente por gasodutos de alta pressão. De facto, como muitas instalações emissoras se encontram a grande distância de formações geológicas adequadas para injeção de CO₂, é inevitável a utilização de gasodutos para transportar o CO₂ capturado para reservatórios de armazenamento a longo prazo. Tendo isto em conta, a maioria dos projetos de CCS em desenvolvimento prevê a utilização de gasodutos para transportar CO₂. Globalmente, 41 instalações comerciais já em operação ou construção utilizam gasodutos, e 195 dos 325 projetos em fase de planeamento avançado optarão pelo transporte via gasoduto. Este interesse acrescido reflete o reconhecimento generalizado de que os gasodutos são o elo vital entre a captura e o armazenamento de CO₂ e indispensáveis para viabilizar as metas climáticas nas próximas décadas.

¹ Em conformidade com a escala longa utilizada em Portugal, onde mil milhões correspondem a 10⁹

1.1 Motivação

O planeamento estratégico e geoespacial de redes de gasodutos de CO₂ é amplamente reconhecido como um elemento essencial para viabilizar a implementação de projetos de CCS em larga escala. Diversos estudos e relatórios internacionais indicam que uma abordagem otimizada ao planeamento destas infraestruturas, nomeadamente ao nível do traçado dos gasodutos e da localização dos sistemas de armazenamento, pode contribuir significativamente para a redução de custos e para a minimização dos impactos ambientais e sociais associados (Kuby et al., 2011; D et al., 2024). Por outro lado, o planeamento coordenado e partilhado a longo prazo destas redes permite reduzir a necessidade de infraestruturas redundantes e diminuir os custos de transporte por tonelada de CO₂, quando comparado com soluções fragmentadas (Great Plains Institute, 2020).

No contexto nacional, as iniciativas de CCS encontram-se ainda numa fase inicial de desenvolvimento, refletindo uma presença relativamente limitada de Portugal neste domínio. Atualmente, não existem projetos de CCS em operação no país (Clean Air Task Force, 2024), o que evidencia um atraso face a outras regiões, mas representa simultaneamente uma oportunidade estratégica. A ausência de infraestruturas existentes permite conceber soluções de raiz, mais adequadas às especificidades do território nacional e potencialmente mais eficientes do ponto de vista técnico, económico e ambiental. Neste sentido, Portugal encontra-se numa posição favorável para integrar esta área emergente, alinhando-se com os objetivos climáticos europeus e explorando oportunidades associadas à transição energética.

Neste enquadramento, destacam-se iniciativas nacionais como o laboratório colaborativo Net4CO₂, que evidenciam o interesse em colmatar as lacunas existentes (Net4CO₂ - Network for a Sustainable CO₂ Economy, 2025). A Net4CO₂ reúne um consórcio multidisciplinar composto por universidades, centros de investigação e empresas, com o objetivo de desenvolver soluções inovadoras de descarbonização e promover uma economia sustentável de CO₂. A nível nacional, existem também trabalhos relevantes nesta área, nomeadamente o roteiro para a captura e armazenamento de carbono em Portugal (Seixas et al., 2015) e estudos focados na modelação e planeamento de infraestruturas de transporte de CO₂ na região do Mediterrâneo Ocidental (Van den Broek et al., 2013), que evidenciam a complexidade e importância do problema em análise.

A participação em projetos financiados pela União Europeia reforça o compromisso nacional com o avanço da investigação e desenvolvimento nesta área, contribuindo para a consolidação de conhecimento técnico relevante. Neste sentido, o desenvolvimento de ferramentas que apoiem o planeamento otimizado de redes de transporte de CO₂ assume particular relevância para a implementação eficaz de infraestruturas de CCS e para o posicionamento de Portugal na vanguarda das soluções de descarbonização.

1.2 Objetivos do projeto

Este projeto foi desenvolvido tendo por referência o laboratório colaborativo Net4CO₂ ([Net4CO₂ - Network for a Sustainable CO₂ Economy, 2024](#)) e visa o desenvolvimento de uma plataforma digital para apoiar o planeamento otimizado dos gasodutos de transporte de CO₂, com base na análise de dados geoespaciais. Em cenários do mundo real, o transporte de CO₂ de uma fonte de emissão para um local de armazenamento ou utilização, através de um gasoduto, requer uma consideração cuidadosa de múltiplas restrições espaciais, técnicas e ambientais. A plataforma destina-se a responder a necessidades reais identificadas no contexto do setor. Para tal, propõe-se cumprir os seguintes objetivos:

- Implementar um sistema para seleção de rotas, que permite determinar o percurso ótimo para gasodutos, tendo em conta múltiplos critérios técnicos, económicos e ambientais. Os critérios são fornecidos através de dados geográficos baseados em sistema de informação geográfica (GIS), tais como dados sobre a utilização do solo, a elevação do terreno e infraestruturas existentes.
- Desenvolver uma interface gráfica interativa e intuitiva, que permita aos utilizadores introduzir valores de parâmetros personalizados e visualizar os trajetos gerados. Esta interface destina-se a facilitar a participação de *stakeholders* no processo de decisão.
- Incluir componente de análise económica, que estime os custos de construção com base na complexidade e riscos do trajeto, tipo de terreno, infraestrutura envolvida.

Ao responder às exigências, este projeto visa preencher uma lacuna crítica essencialmente no panorama nacional, fornecendo uma solução digital robusta que facilite e torne mais eficiente o planeamento criterioso destas infraestruturas. Além disso, ao responder a desafios reais do setor, o projeto tem o potencial de estimular novas abordagens colaborativas, reforçando o papel de Portugal no cumprimento dos objetivos climáticos europeus.

1.3 Abordagem metodológica

O desenvolvimento deste projeto assentou numa estratégia de Prototipagem Evolutiva (*Evolutionary Prototyping*), particularmente adequada a trabalhos de natureza exploratória com requisitos complexos e não totalmente definidos à partida. Esta metodologia permitiu a construção progressiva de uma solução funcional através de melhorias sucessivas, resultantes da experimentação contínua e da validação pelos orientadores técnicos e pela entidade proponente (Net4CO₂) garantindo a relevância prática da solução desenvolvida.

Ao contrário de metodologias de desenvolvimento com planeamento rígido e requisitos fixos, a Prototipagem Evolutiva assume que os requisitos podem e devem evoluir ao longo do processo, acompanhando a maturação da compreensão do problema. Cada iteração funcionou como um ciclo de investigação e desenvolvimento: análise e exploração conceptual, seguida de implementação e teste de uma versão preliminar, e finalmente a sua avaliação crítica. Os resultados de cada ciclo informavam o seguinte, permitindo uma adaptação constante e fundamentada da direcção do projeto.

Dado o carácter exploratório do projeto, envolvendo o processamento de *rasters* complexos e a experimentação de algoritmos de optimização de traçados, esta abordagem revelou-se particularmente eficaz. O trabalho foi documentado e organizado através da plataforma Notion ([Notion Labs, Inc., 2024](#)), que permitiu manter registos estruturados de decisões técnicas, hipóteses testadas e notas relevantes ao longo das iterações, oferecendo a flexibilidade necessária para um processo de natureza interdependente e exploratória.

A colaboração com a Net4CO2 contribuiu para a aplicação desta metodologia através da partilha de conhecimento especializado e da validação externa dos resultados obtidos. As reuniões ocasionais com a entidade proponente permitiram discutir questões técnicas pertinentes, interpretar resultados à luz de necessidades reais do setor e obter perspetivas práticas sobre a aplicabilidade da solução desenvolvida. A abordagem metodológica foi consolidada com base em referências da literatura especializada, nomeadamente o caso de estudo de [Van den Broek et al. \(2013\)](#), que serviu como base conceptual robusta para o desenvolvimento do modelo implementado. As reuniões semanais com os orientadores académicos garantiram o acompanhamento contínuo e asseguraram que as decisões metodológicas eram validadas em tempo útil.

Esta abordagem iterativa e colaborativa possibilitou a sintonia entre a evolução técnica do projeto e a sua conceção científica, assegurando que o resultado final decorreu de um processo sistemático de refinamento orientado por validação técnica real.

1.4 Estrutura do documento

Este relatório encontra-se organizado em seis capítulos. O presente capítulo apresenta o enquadramento do tema, incluindo a motivação, os objetivos e a abordagem metodológica adotada, sendo ainda descrita a estrutura do documento.

Segue-se o Capítulo 2, onde é descrito o estado da arte, com análise das principais metodologias de planeamento de corredores para gasodutos de CO₂ e dos modelos de estimação de custos existentes, com especial enfoque no modelo do caso de estudo de [Van den Broek et al. \(2013\)](#), que serve de base conceptual ao trabalho desenvolvido. No Capítulo 3, o problema é formalizado, sendo definida a modelação adotada para

integrar a otimização espacial com a componente económica, incluindo a derivação das expressões utilizadas e a sua adaptação ao contexto do estudo.

O Capítulo 4 apresenta o desenvolvimento da solução proposta, descrevendo a arquitetura da plataforma, os requisitos identificados e a implementação dos diferentes módulos do *plugin* QGIS, incluindo o cálculo dos fatores de custo e a geração de trajetos ótimos. Posteriormente, o Capítulo 5 expõe os resultados obtidos através da aplicação da metodologia a casos de estudo reais e cenários nacionais, permitindo avaliar o desempenho da solução e a sua sensibilidade aos diferentes parâmetros considerados. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho, destacando os principais contributos alcançados e identificando limitações e direções para investigação futura.

Adicionalmente, o Apêndice A descreve os procedimentos necessários para a instalação do *plugin* desenvolvido, permitindo a sua utilização por terceiros.

ESTADO DA ARTE

O planeamento de gasodutos de CO_2 tornou-se um processo central nas estratégias globais da descarbonização, acompanhando o crescimento das iniciativas de CCS. As infraestruturas de transporte e armazenamento de CO_2 são frequentemente referidas como a peça fundamental da indústria de gestão de carbono, sendo essenciais para ligar fontes de emissão e armazenamentos.

2.1 Panorama nacional

A rede nacional de transporte de CO_2 por gasoduto permanece numa fase inicial. Apesar das metas nacionais de neutralidade carbónica para 2045 ([Governo de Portugal, 2024](#)), Portugal não possui ainda gasodutos de CO_2 operacionais. A legislação para armazenamento geológico já foi transposta ([Assembleia da República, 2012](#)), mas nenhuma licença de armazenamento foi atribuída até ao momento ([Direção-Geral de Energia e Geologia \(DGEG\), 2024](#)). Este cenário evidencia a necessidade de estudos preliminares e planeamento estruturado antes da implementação de uma futura rede de gasodutos.

Estudos estratégicos, como o *CCS Roadmap Portugal* ([Seixas et al., 2015](#)), identificam o CCS como uma solução custo-efetiva para reduzir emissões industriais, sobretudo no setor do cimento. Contudo, a ausência de incentivos económicos, incertezas regulatórias e variáveis associadas ao custo da captura dificultam a sua implementação. Os autores recomendam uma abordagem integrada que inclua clarificação regulatória, mecanismos de financiamento e projetos-piloto de injeção, sem os quais o desenvolvimento do CCS em Portugal permanecerá limitado.

O potencial geológico de armazenamento de CO_2 em Portugal é estimado entre 7,0 e 7,6 Gt, nomeadamente nas bacias sedimentares *offshore* ([Clean Air Task Force, 2024](#)). Os principais *clusters* emissores (Porto, Leiria e Lisboa/Sines) localizam-se próximos

da Bacia Lusitânica, o que favorece rotas de transporte mais curtas. Diversos projetos nacionais e europeus, como o *Strategy CCUS* (Barata et al., 2021), *PilotSTRATEGY* (PilotSTRATEGY Consortium, 2024) e *InCarbon* (Universidade de Évora, 2024), têm aprofundado a caracterização dos locais de armazenamento e o planeamento de redes integradas, com participação ativa de universidades, laboratórios colaborativos e indústria.

No contexto europeu, Portugal integrou-se em projetos de referência que moldaram o planeamento de gasodutos de CO₂. O *Strategy CCUS* (Strategy CCUS Consortium, 2021) definiu cenários de infraestrutura para a região Centro, enquanto que o *PilotSTRATEGY* aprofunda a caracterização de potenciais locais de armazenamento. O projeto *COMET* (COMET Consortium, 2013) desenvolveu a primeira análise integrada custo-benefício para Portugal, propondo uma rede transfronteiriça entre Portugal, Espanha e Marrocos e estimando uma capacidade de armazenamento de cerca de 7,6 Gt. Este enquadramento europeu reforçou a estratégia nacional baseada em clusters industriais, alinhada com a evolução dos *hubs* de CO₂ na Europa (Barata et al., 2021).

Apesar do número significativo de estudos realizados nos últimos anos, concretizar uma rede nacional de gasodutos de CO₂ enfrenta vários desafios relevantes para o contexto português. Entre os principais obstáculos destacam-se:

- **Técnico-científicos** - A ausência de projetos-piloto em Portugal impede validar em condições reais as operações de compressão, transporte e injeção, limitando a avaliação da capacidade de armazenamento e dos métodos de monitorização (Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), 2025; Global CCS Institute, 2024; COMET Consortium, 2013).
- **Infraestruturais** - A rede de gás natural exige adaptações complexas para operar com CO₂ em condições supercríticas (*Re-stream: Re-use of existing oil and gas infrastructure for hydrogen and CCS in Europe* 2021). Além disso, a rede atual não estabelece ligações diretas entre os principais centros emissores e os locais de armazenamento identificados, tornando necessária a construção de gasodutos dedicados (Clean Air Task Force, 2024).
- **Regulatórios e transfronteiriços** - O enquadramento legal continua incompleto, nomeadamente no que diz respeito ao armazenamento *offshore* (Clean Air Task Force, 2024) e à definição de responsabilidades (Global CCS Institute, 2024). A cooperação luso-espanhola, inspirada em acordos exemplares no Norte da Europa (Sweden, 2024), é vital para explorar conjuntamente o potencial de armazenamento e prestar serviços a indústrias de ambos os países (Clean Air Task Force, 2024).
- **Económicos** - Persistem dúvidas sobre modelos de negócio, partilha de custos e incentivos necessários para viabilizar os investimentos iniciais (Global CCS Institute, 2021). Mesmo com o aumento esperado do preço do carbono, são neces-

sários mecanismos complementares de financiamento e garantias de receita para viabilizar os primeiros projetos (Publyon, 2024).

Apesar destas barreiras, o desenvolvimento de infraestruturas CCS tem potencial para reduzir significativamente as emissões de setores intensivos como o cimento, o vidro, a química e a pasta de papel, sem comprometer a competitividade industrial (Clean Air Task Force, 2024; Seixas et al., 2015). Estudos recentes apontam ainda benefícios económicos adicionais, incluindo a criação de emprego e impacto positivo no PIB, reforçando o papel estratégico do CCS na descarbonização industrial em Portugal (Clean Air Task Force, 2024).

Em síntese, o desenvolvimento do CCS em Portugal encontra-se relativamente bem consolidado a nível teórico, mas ainda sem aplicação prática. O país dispõe hoje de informação detalhada sobre potenciais fontes e locais de armazenamento, resultante de mais de uma década de investigação. A concretização de uma rede de transporte de CO₂ poderá contribuir para as metas climáticas e criar novas oportunidades económicas.

2.2 Metodologias de planeamento de corredores

O planeamento de corredores para gasodutos de CO₂ recorre, de forma quase universal, a metodologias baseadas em GIS. Os critérios mais comuns incluem ocupação do território, declive, proximidade a infraestruturas e sensibilidade ambiental. Estes fatores são representados espacialmente e utilizados para construir superfícies de custo que suportam a análise de alternativas (Kuby et al., 2011; Seixas et al., 2015; Van den Broek et al., 2013).

A metodologia mais difundida é o *Least Cost Path* (LCP), que identifica o caminho de menor custo acumulado entre dois pontos. O LCP considera uma superfície *raster* onde cada célula representa o custo associado à sua travessia. Esta abordagem é preferida em planeamento de gasodutos porque estas infraestruturas não dependem de redes preexistentes, ao contrário dos cenários em grafos, mais adequados para redes de transporte ferroviário ou rodoviário. Os *rasters* permitem avaliar continuamente um espaço, uma vez que o território é representado por uma grelha regular de células.

Quando um único critério não é suficiente, o LCP é frequentemente combinado com métodos de decisão multicritério (*multi-criteria decision analysis* (MCDA)). Neste enquadramento, cada fator é representado por um *raster* individual, posteriormente ponderado e agregado numa superfície de custo total. A atribuição dos pesos poder ser feita manualmente ou através de métodos como o *analytic hierarchy process* (AHP), que recorre a comparações par a par para derivar pesos consistentes. Estudos aplicados

ao planeamento de oleodutos e aquedutos demonstram a utilidade do AHP quando existe necessidade de integrar múltiplos critérios com diferentes níveis de importância (Gyabeng, 2020).

Apesar de amplamente utilizado, o LCP tem as suas limitações, nomeadamente a tendência para convergir para mínimos locais quando a superfície de custos resulta da combinação de múltiplos fatores heterogénios. Dito isto, alguns estudos exploram algoritmos de procura mais avançados, incluindo variantes do algoritmo A^* (Zhao et al., 2025), capazes de incorporar objetivos múltiplos e avaliações mais sofisticadas do espaço de alternativas. A literatura também recorre a métodos de otimização evolutiva, como algoritmos genéticos, que procuram soluções através de mecanismos de seleção de cruzamento e mutação, reduzindo o risco de soluções subótimas (Ebrahimipour et al., 2009). De forma semelhante, abordagens estocásticas como o *Simulated Annealing* têm sido aplicadas ao planeamento de corredores, permitindo explorar soluções alternativas e escapar a mínimos locais (Marcoulaki et al., 2012). Em conjunto, estas metodologias complementam o LCP tradicional quando este não é ótimo.

No domínio das ferramentas computacionais de acesso público, destaca-se o SimCCS (Middleton et al., 2020), uma plataforma orientada para a otimização de redes de transporte de CO_2 com múltiplas fontes e sumidouros. Ao contrário das abordagens baseadas em *rasters* contínuos descritas anteriormente, o SimCCS recorre a um modelo de grafo ponderado, no qual os caminhos possíveis são pré-definidos e os custos atribuídos por arco. Esta abordagem permite otimizar a topologia da rede de forma eficiente, mas não inclui estimativa de CAPEX ao nível da célula nem modelação geoespacial detalhada do território. O SimCCS é, por isso, mais adequado a estudos de planeamento estratégico de redes do que ao planeamento detalhado de traçados individuais.

2.3 Modelos de estimação de custo de gasodutos

A estimativa dos custos económicos de transporte de CO_2 por gasoduto é essencial para a compreensão da viabilidade de projetos de CCS. A literatura apresenta diversos modelos tecnoeconómicos que permitem estimar o CAPEX, os custos anuais de operação e manutenção (OPEX) e o custo nivelado de transporte, ou seja, o custo total por tonelada de CO_2 transportado ao longo da vida útil do gasoduto. Este último pode ser expresso por:

$$\text{Custo Nivelado} = \frac{\text{CAPEX} + \text{OPEX anual}}{\text{Toneladas de } CO_2 \text{ transportadas por ano}}$$

O modelo de McCoy et al. (2008) trata-se de um modelo tecnoeconómico amplamente utilizado em estudos de pré-viabilidade, devido à sua simplicidade e flexibilidade. O diâmetro do gasoduto é calculado a partir da taxa de fluxo de massa de CO_2 e das pro-

priedades físicas. O CAPEX é estimado com uma relação empírica baseada em dados reais de gasodutos construídos nos Estados Unidos, em função do comprimento e do diâmetro nominal, incorporando fatores regionais que refletem variações geográficas nos custos. O custo dos materiais, nomeadamente do aço, é incluído como variável de entrada. O OPEX é calculado de forma simplificada, assumindo percentagens fixas do custo do gasoduto e das estações de compressão. Para lidar com incertezas associadas a parâmetros críticos, os autores recorrem ao método de Monte Carlo para realizar simulações que geram distribuições de probabilidade dos custos estimados. O modelo foi originalmente testado em cenários com gasodutos de até 200 km.

O modelo de [Knoope et al. \(2014\)](#) adota uma abordagem de estimativa de custo nivelado mais detalhada e foi desenvolvido com base em dados de gasodutos europeus. Para além das variáveis técnicas e operacionais comuns, os autores deste modelo incluíram fatores como o tipo de terreno, a profundidade de instalação e a densidade populacional, que permitem uma estimativa mais pormenorizada do CAPEX. O OPEX segue uma abordagem semi-analítica evitando a utilização de percentagens fixas, baseada no consumo energético das estações de compressão e nas perdas ao longo do gasoduto. O modelo pode ser aplicado tanto a gasodutos lineares como a redes e foi testado em cenários de gasodutos com extensões até 1500 km.

O modelo de [Tian et al. \(2018\)](#) apresenta um modelo que procura minimizar o custo nivelado de CO_2 , integrando explicitamente a incerteza associada a múltiplos parâmetros, como o fluxo de CO_2 , características do terreno e preços da eletricidade. O modelo procura identificar soluções economicamente mais robustas através da consideração de múltiplos cenários. Este modelo diferencia-se dos outros com a introdução de uma abordagem de otimização estocástica baseada em *Particle Swarm Optimization*, incluindo restrições operacionais como limites de pressão e potência de compressão. O modelo foi aplicado a gasodutos lineares com comprimentos até 500 km.

Para uma análise mais abrangente dos diferentes modelos de estimação de custos, recomenda-se a consulta do artigo de revisão de [Kim et al. \(2024\)](#), que sintetiza a literatura existente. Para além destes modelos, importa destacar o modelo de [Van den Broek et al. \(2013\)](#) descrito na próxima secção, particularmente relevante para o contexto do presente estudo.

2.4 Modelo integrado da região do Mediterrâneo Ocidental

Até à data, o modelo de [Van den Broek et al. \(2013\)](#) desenvolvido no âmbito do projeto COMET ([European Commission, 2010](#)), um projeto europeu financiado pela União Europeia com o objetivo de apoiar o desenvolvimento eficiente de um ecossistema de CCS, constitui a principal referência publicada sobre o planeamento de gasodutos de CO_2 na região do Mediterrâneo Ocidental (Portugal, Espanha e Marrocos). O modelo

integra análise geoespacial e económica com contributos de *stakeholders* regionais (e.g., Endesa, REN e Galp), por conseguinte, é um dos exemplos mais completos da literatura para contextos regionais.

A finalidade principal foi estudar uma infraestrutura de transporte de CO_2 custo-eficaz, adaptada às características geográficas e socioeconómicas da Península Ibérica e do Norte de África. A abordagem combinou GIS, otimização económica com o modelo TIMES-COMET e consulta a *stakeholders* regionais. O trabalho estrutura-se em cinco etapas: (i) modelação geográfica, (ii) cálculo de corredores ótimos, (iii) otimização com o modelo TIMES-COMET, (iv) *workshops* com *stakeholders* e (v) atualização final do modelo com base no feedback recolhido.

Na primeira etapa, os autores implementaram em GIS um conjunto de restrições de uso do solo, condicionantes geográficas e ambientais e informação sobre infraestruturas existentes. O sistema integrou também as fontes de emissão e os potenciais locais de armazenamento de CO_2 . A partir destes dados foi construído um *raster* com uma resolução espacial de 300m, permitindo gerar uma superfície de custos onde cada célula assume um fator de custo relativo. O custo incremental por célula foi estimado por:

$$I = B_c \cdot D \cdot \sum \{F_c \cdot F_s \cdot [F_{lu} \cdot (1 - 0,1N) + 0,1N \cdot F_{ci}] \cdot L_{cell}\} \quad (2.1)$$

onde:

- I - custo total de investimento no gasoduto (€2010);
- B_c - fator de custo base padronizado (€2010/ m^2);
- D - diâmetro do gasoduto;
- L_{cell} — comprimento do segmento de gasoduto por célula;
- F_c — fator de presença de corredor energético existente;
- F_s — fator de declive do terreno;
- F_{lu} — fator de uso do solo;
- F_{ci} — fator de cruzamento de infraestruturas (estradas, ferrovias, gasodutos);
- N — número de infraestruturas cruzadas na célula.

O somatório aplica-se a todas as células ao longo do traçado. Para evitar sobrestimações, os autores consideraram que o número de infraestruturas cruzadas (N) tem um peso de 10%. Os restantes custos por célula são estimados pelos outros fatores. Os valores adotados para os fatores resultaram de revisão de literatura e de consulta com *stakeholders* regionais.

Na segunda etapa, as fontes emissoras e os sumidouros foram agregados em *clusters*. No caso dos sumidouros, o agrupamento teve por base a continuidade de bacias sedimentares, refletindo condições geológicas e operacionais coerente para a injeção e

viabilidade técnica. De seguida, calcularam-se caminhos de menor custo entre *clusters* de fontes e sumidouros, entre fontes e entre sumidouros. Nesta fase, utilizou-se a superfície de custos construída na etapa anterior, ainda sem parametrização do custo real em função do diâmetro e do fluxo. O uso de *clusters* reduziu a complexidade do problema e permitiu sistematizar o cálculo de alternativas de traçado.

Na terceira etapa, as rotas geradas foram avaliadas com o modelo TIMES-COMET, de modo a identificar as opções mais viáveis. Os autores referem que avaliaram mais de 3000 rotas.

Na quarta etapa, foram realizados workshops em Portugal, Espanha e Marrocos para recolher *feedback* técnico, político e estratégico sobre os dados utilizados e os resultados preliminares. Participaram *stakeholders* de ministérios, universidades e empresas do setor energético, tendo sido recolhido *feedback* estruturado.

Na última etapa, os autores validaram o *feedback* recolhido e atualizaram o modelo, recalculando as rotas de menor custo com os novos dados. Foram ainda testados cenários adicionais, incluindo a possibilidade de restringir o transporte transfronteiriço de CO_2 . A Tabela 2.1 demonstra os fatores de custo encontrados na literatura, indicados pelos *stakeholders* e utilizados no projeto COMET.

Tabela 2.1: Resumo dos fatores de custo do terreno conforme encontrados na literatura, indicados por *stakeholders* nacionais e utilizados no modelo COMET. Adaptado de Van den Broek et al. (2013).

Categoria	Literatura Internacional	Questionários a Stakeholders	COMET
Fator de custo constante para gasodutos terrestres			
Custo base constante	€2010/(m ²)	1471 ^{1,2} / 1989 ²	1357
Operação e Manutenção	€2010/(m ²)/ano	24 / dependente do tempo	24
Fatores de Terreno			
Uso do Solo (F_{tu})			
Áreas não povoadas	1	1	1
Áreas urbanas e associadas	1,4 / 2 / 15	1,6 / 2	1,8
Áreas protegidas	10 / 30	1,4 / não atravessar	10
Terras cultivadas	1,1	1,1	1,1
Florestas	1,5 / 1,05	1,3	1,3
Áreas áridas	1,1 / 1,3	1,1	1,1
Corpos de água	1,8 / 3 / 10	4 / furação horizontal: solo mole = 1 M€/km; solo rochoso = 2,5 M€/km	4
Zonas regularmente inundadas	–	–	1,2
Cruzamentos (F_{cl})			
Estradas	–	3 / 3000€/m largura	3
Ferrovias	3	3 / 3000€/m largura	3
Ferrovias de alta velocidade	–	–	3
Corredores (F_c)			
Offshore (desvio)	1	3 / >1	3
Offshore (seguindo pipeline)	0,9	NA / >1	2,7 ⁵
Onshore (seguindo pipeline)	1	NA / >1	0,9
Onshore (novo traçado)	1,5	1	1
Declive (F_s)			
<10%	1	1	1
10–20%	1,1 / 1,3	1,1	1,1
20–30%	1,3 / 1,4	1,2	1,2
30–70%	–	Não questionado; incluído após workshops	3
>70%	–	–	9

Notas:

1. Valor original apresentado em EUR2007, posteriormente corrigido para inflação e variações de preços industriais com base no *European Capital Cost Index*.

2. Custos baseados em gasodutos de gás natural.
3. Inclui todos os componentes de CAPEX: engenharia, materiais, construção, arranque, licenças, aquisição de terrenos e direitos de passagem.
4. Acresce um custo de 1 200 000 € por estação de válvula de bloqueio, considerando um diâmetro de um metro. O espaçamento entre estações é de 10 km em zonas suburbanas, 20 km em zonas rurais, bem como no início e no fim do gasoduto.
5. Fatores de terreno para gasodutos *offshore* que desviam ou seguem infraestruturas existentes, conforme indicado por [Van den Broek et al. \(2013\)](#), foram considerados como 1 e 0,9, respetivamente. Uma razão semelhante foi aplicada aos fatores de terreno mais elevados utilizados para Portugal, Espanha e Marrocos, resultando num fator de 27 para gasodutos *offshore* que seguem infraestruturas existentes.

Com base neste modelo, os autores obtiveram uma rede de transporte de CO_2 otimizada e adaptada às características geográficas e técnicas de Portugal, Espanha e Marrocos. Os resultados evidenciam que, para além da distância, fatores como o número de infraestruturas cruzadas, a presença de áreas ambientalmente protegidas e a topografia, em particular no norte de Espanha, têm um impacto significativo nos custos. As rotas finais foram consideradas técnica e economicamente viáveis, e ajustadas com base no contributo de *stakeholders*, visando maior aceitabilidade social. A Figura seguinte representa os resultados preliminares da possível infraestrutura em 2030 num cenário de elevada procura.

Face aos modelos descritos, o presente trabalho adota o modelo de [Van den Broek et al. \(2013\)](#) como referência metodológica. A escolha decorre, antes de mais, da especificidade regional do modelo, que ao contrário das formulações de [McCoy et al. \(2008\)](#) e [Knoope et al. \(2014\)](#), calibradas para contextos norte-americano e europeu genérico, foi desenvolvido e validado para a Península Ibérica e o Norte de África, incorporando dados geográficos, económicos e contributos de *stakeholders* regionais. Acresce que a sua formulação integra explicitamente a análise geoespacial com a estimativa económica ao nível da célula, estabelecendo uma correspondência direta com a abordagem LCP adotada neste projeto.

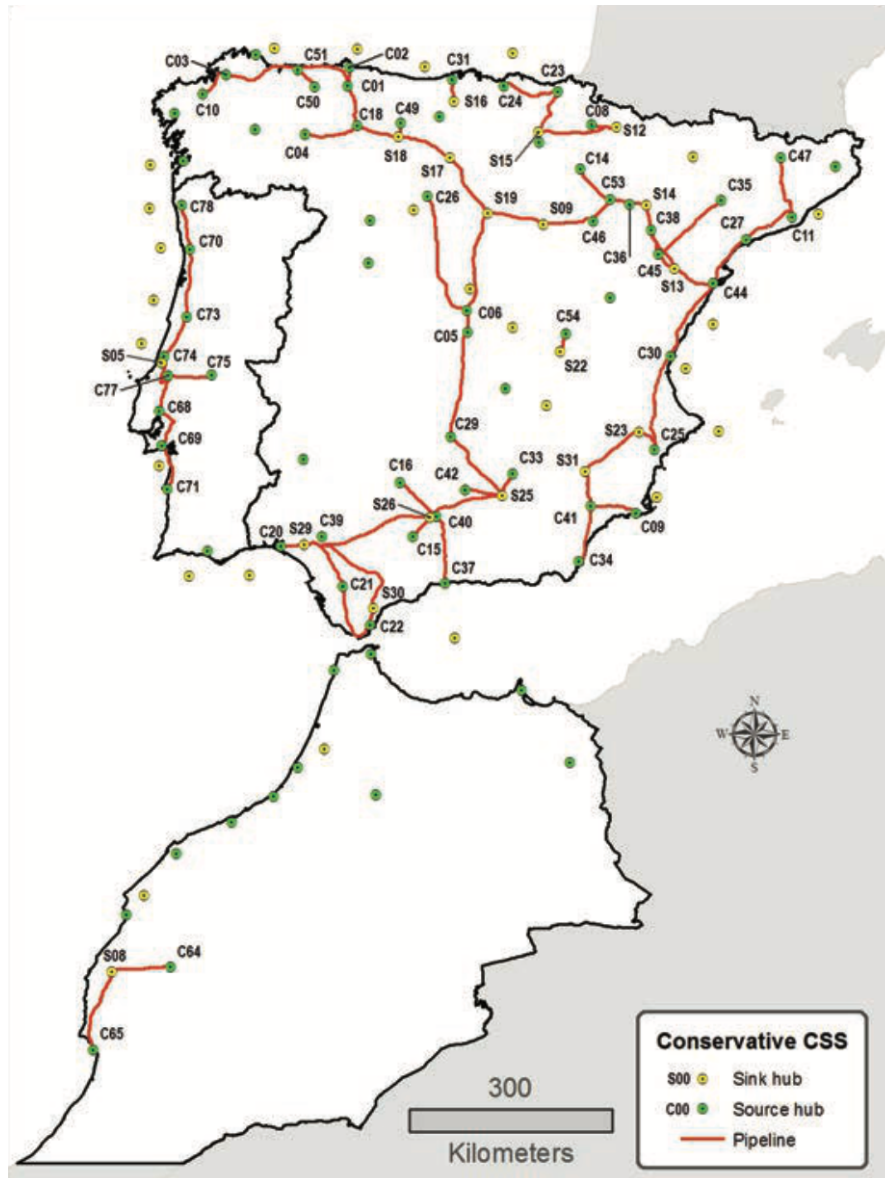


Figura 2.1: Resultados preliminares da possível infraestrutura de transporte de CO₂ em 2030, num cenário de elevada procura, com uma meta de mitigação de 40% em 2050 (comparado a 1990), exigindo que os gasodutos sigam preferencialmente infraestruturas existentes e sem transporte transfronteiriço.
 Fonte: *Van den Broek et al. (2013)*

MODELAÇÃO DO PROBLEMA

Este capítulo formaliza o problema de traçado ótimo de gasodutos de CO_2 que este projeto procura resolver, descrevendo a modelação adotada para integrar, de forma coerente, a otimização espacial (via LCP) e a estimativa económica de investimento (CAPEX). A abordagem adotada inspira-se no modelo de [Van den Broek et al. \(2013\)](#), que combina fatores territoriais representados em ambiente GIS com uma formulação económica célula-a-célula.

3.1 Descrição do problema

Tal como referido no Capítulo [1](#), o objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema capaz de determinar o traçado economicamente ótimo de um gasoduto para transporte de CO_2 entre uma fonte emissora e um local de armazenamento geológico, bem como estimar o investimento total associado à sua implementação.

O problema pode ser formulado como um problema de minimização de custo sujeito a condicionantes técnicas, económicas e territoriais, incluindo ocupação do solo, declive do terreno, cruzamentos com infraestruturas lineares e eventual utilização de corredores existentes. Embora o caso de estudo incida sobre Portugal Continental, a metodologia proposta é aplicável a outras regiões, desde que existam dados geoespaciais equivalentes e uma parametrização de custos adequada ao respetivo contexto.

Do ponto de vista computacional, o território é representado por uma grelha *raster*, onde cada célula constitui uma unidade espacial à qual é atribuído um custo relativo de atravessamento. A determinação do traçado ótimo é então formulada como um problema de caminho de menor custo acumulado entre dois pontos, sendo resolvido através do cálculo do LCP. Uma vez obtido o traçado ótimo, procede-se à estimativa económica detalhada do investimento, incorporando o comprimento efetivo do gasoduto, o diâmetro necessário e os custos associados a eventuais estações de compressão.

3.2 Modelo económico de referência

A estimativa do investimento do gasoduto assenta na formulação proposta pelo modelo de [Van den Broek et al. \(2013\)](#), já apresentada anteriormente no Capítulo 2, onde o custo resulta da soma dos custos locais ao longo das células atravessadas. A expressão base é:

$$I = B_c \cdot D \cdot \sum \{F_c \cdot F_s \cdot [F_{lu} \cdot (1 - 0,1N) + 0,1N \cdot F_{ci}] \cdot L_{cell}\} \quad (3.1)$$

onde:

- I — investimento total no gasoduto;
- B_c — fator de custo base padronizado;
- D — diâmetro do gasoduto;
- L_{cell} — comprimento efetivo do gasoduto no interior da célula;
- F_{lu} — fator de custo associado à ocupação do solo;
- F_s — fator de custo associado ao declive do terreno;
- F_{ci} — fator de custo associado a cruzamentos com infraestruturas;
- F_c — fator de custo associado à presença de corredores existentes;
- N — número de cruzamentos com infraestruturas na célula.

Esta expressão tem duas implicações importantes para a modelação do projeto. Primeiro, o custo não depende apenas da distância, mas também das características territoriais atravessadas, representadas pelos fatores F_{lu} , F_s , F_{ci} e F_c . Além disso, o termo $[F_{lu} \cdot (1 - 0,1N) + 0,1N \cdot F_{ci}]$ introduz uma ponderação progressiva entre o custo associado ao uso do solo e o custo dos cruzamentos: quando $N = 0$, o custo é determinado apenas por F_{lu} ; à medida que o número de infraestruturas na célula aumenta, a influência de F_{ci} torna-se mais relevante, podendo representar até 10% do custo local por infraestrutura. Segundo, o custo é acumulado célula a célula, o que permite ligar naturalmente o modelo económico a uma abordagem de otimização espacial baseada em superfície de custos.

Fórmulas auxiliares do modelo económico

O diâmetro D é estimado a partir de condições operacionais e propriedades do escoamento. Na prática, a expressão apresentada resulta de uma reorganização da equação de Darcy-Weisbach (combinada com as relações usuais entre caudal mássico, velocidade e área de secção), isolando-se D em função da perda de carga admissível por unidade de comprimento. Esta forma, adotada por [Strachan et al. \(2011\)](#), é amplamente utilizada em modelos tecnoeconómicos de transporte de CO_2 :

$$D = \left(\frac{8 \cdot \lambda \cdot M^2}{\pi^2 \cdot \rho \cdot \frac{\Delta p}{L}} \right)^{1/5} \quad (3.2)$$

onde:

- λ é o fator de fricção de Darcy (adimensional);
- M é a taxa de fluxo mássico de CO_2 (kg/s);
- ρ é a massa volúmica do CO_2 (kg/m³);
- $\frac{\Delta p}{L}$ é a queda de pressão admissível (Pa/m);
- π é a constante matemática pi.

Esta fórmula relaciona o diâmetro necessário com as propriedades do fluido transportado e as condições operacionais desejadas, garantindo que a queda de pressão ao longo do gasoduto não excede o limite admissível.

Devido às limitações associadas à queda de pressão ao longo do gasoduto, traçados de grande extensão requerem a instalação de estações de compressão de CO_2 (*booster stations*). Assim sendo, neste trabalho adota-se o critério hidráulico recomendado pela Net4CO2 e por Seixas et al. (2015), assumindo uma queda de pressão admissível de 0,02 MPa/km e uma queda total máxima de 3 MPa por segmento. Destas hipóteses resulta um comprimento máximo teórico de **150 km** entre estações de compressão, dado por:

$$L_{max} = \frac{3 \text{ MPa}}{0,02 \text{ MPa/km}} = 150 \text{ km}$$

A abordagem de segmentação do traçado funciona da seguinte forma:

- Para traçados com comprimento total ≤ 150 km, calcula-se um único custo de segmento I_p , utilizando o comprimento total como $L_{segment}$;
- Para traçados com comprimento total > 150 km, o traçado é dividido em segmentos de até 150 km, calculando-se um I_p para cada segmento, e adicionando-se uma estação de compressão entre cada par de segmentos consecutivos.

A potência necessária para o compressor de cada estação (S_c) é estimada através de uma expressão simplificada baseada no balanço energético do processo de compressão, amplamente utilizada em modelos tecnoeconómicos de transporte de CO_2 . Esta formulação, adotada por Seixas et al. (2015) e recomendada pela Net4CO2, relaciona a potência requerida com o trabalho necessário para compensar a queda de pressão ao longo do segmento:

$$S_c = \frac{M \cdot \Delta p}{\rho \cdot B_{eff}}, \quad (3.3)$$

onde B_{eff} representa a eficiência do compressor (adimensional), tipicamente assumida como 0,75.

O custo de investimento de cada estação de compressão (I_B) é estimado através de uma correlação empírica linear entre a potência instalada e o investimento total, conforme utilizado em Seixas et al. (2015):

$$I_B = 0,547 \cdot S_c + 0,42 \quad (\text{em M€}_{2010}) \quad (3.4)$$

O custo total do gasoduto é então obtido por:

$$I_{total} = \sum I_p + \sum I_B, \quad (3.5)$$

onde $\sum I_p$ corresponde ao investimento dos segmentos do gasoduto (via Equação (3.1)) e $\sum I_B$ ao investimento das estações de compressão necessárias.

3.3 Da fórmula económica ao custo por célula para o LCP

Neste trabalho, o objetivo é que o LCP minimize, o mais diretamente possível, o mesmo tipo de custo que é posteriormente utilizado na estimativa económica. Assim, a superfície de custo é construída a partir da expressão do somatório da Equação (3.1), definindo-se o custo local por célula como:

$$\text{Custo}_{cell} = F_c \cdot F_s \cdot [F_{lu} \cdot (1 - 0,1N) + 0,1N \cdot F_{ci}] \quad (3.6)$$

A Equação (3.6) corresponde à componente espacialmente variável do custo económico por célula. O termo geométrico L_{cell} , que representa o comprimento efetivo do gasoduto no interior da célula, não é considerado nesta fase. Tal deve-se ao facto de, antes da determinação do traçado ótimo, não ser conhecido o comprimento efetivo do segmento de gasoduto que atravessará cada célula da grelha, o qual depende da geometria do percurso calculado. Além disso, para efeitos de determinação do caminho de menor custo acumulado, multiplicar todos os custos por um fator constante não altera a solução ótima. Assim, o termo L_{cell} é incorporado apenas na fase de estimativa económica final, após o traçado estar definido.

O parâmetro N representa, no modelo original, o número de infraestruturas efetivamente cruzadas pelo gasoduto numa determinada célula. Contudo, numa fase prévia ao cálculo do traçado, essa informação é desconhecida. Assim sendo, neste trabalho, o valor N para o custo da célula é determinado a partir da contagem do número de entidades lineares (estradas e ferrovias) presentes no interior de cada célula, obtida através da interseção das camadas vetoriais com a grelha *raster*. Esta abordagem funciona como uma aproximação da complexidade potencial de cruzamentos, ou seja, células com maior densidade de infraestruturas são consideradas mais propensas a implicar cruzamentos com infraestruturas e, conseqüentemente, maior custo expectável.

O termo $0,1N$ funciona como ponderação do componente associado aos cruzamentos. Para que a expressão mantenha interpretação económica coerente, é necessário garantir que $0 \leq 0,1N \leq 1$, evitando que o termo $(1 - 0,1N)$ se torne negativo. Caso $N > 10$, a ponderação associada ao uso do solo inverter-se-ia, conduzindo a valores de custo local sem significado físico. Assim, impõe-se a condição $N \leq 10$, garantindo estabilidade matemática e consistência tanto no cálculo do LCP como na aplicação da Equação (3.1) na estimativa económica final.

Com a superfície de custo definida por (3.6), o traçado ótimo é obtido como o caminho que minimiza o custo acumulado:

$$C_{accu} = \sum_{k \in \text{células do caminho}} \text{Custo}_{cell}(k) \quad (3.7)$$

Após o cálculo do LCP, a estimativa económica completa é então aplicada ao traçado final, permitindo calcular o investimento com base na Equação (3.1) e nas expressões auxiliares apresentadas, incluindo o cálculo de diâmetro e o eventual custo de estações de compressão.

3.4 Parâmetros e valores de referência

Os parâmetros utilizados nas equações de estimativa económica foram definidos com base em diferentes fontes da literatura e complementadas por recomendações técnicas da Net4CO₂, entidade proponente deste projeto. Esta abordagem permite assegurar coerência com modelos tecnoeconómicos estabelecidos, ao mesmo tempo que incorpora ajustamentos alinhados com o contexto aplicado do estudo.

Em particular, o fator de custo padronizado (B_c) foi adotado com base no modelo desenvolvido por Van den Broek et al. (2013), no âmbito do projeto COMET, que constitui a principal referência para a modelação económica considerada neste trabalho. Os parâmetros hidráulicos, nomeadamente o fator de fricção de Darcy (λ), a queda de pressão admissível ($\Delta p/L$) e o comprimento máximo de segmento (L_{max}), foram definidos com base na formulação apresentada em Seixas et al. (2015).

A eficiência do compressor (B_{eff}) foi igualmente baseada em Seixas et al. (2015), tendo sido adotado o valor de 0,75 de acordo com as recomendações técnicas da Net4CO₂, refletindo condições operacionais realistas para sistemas de compressão em infraestruturas de transporte de CO₂.

Relativamente à massa volúmica do CO₂ (ρ), foi considerado o valor de 827 kg/m³, consistente com valores reportados na literatura para CO₂ em fase supercrítica (Kim

et al., 2024), e alinhado com as recomendações fornecidas pela Net4CO₂.

A Tabela 3.1 apresenta os principais parâmetros adotados e os respectivos valores de referência. Os valores apresentados correspondem a hipóteses conservadoras adequadas a estudos de planeamento estratégico. Alguns parâmetros são assumidos como constantes de referência (por exemplo, B_c , λ , ρ e B_{eff}), enquanto outros dependem diretamente das características específicas do projeto. Em particular, o caudal mássico M varia em função da quantidade de CO₂ a transportar, influenciando diretamente o diâmetro calculado do gasoduto e, conseqüentemente, o investimento total.

Importa ainda salientar que o comprimento máximo de segmento ($L_{max} = 150$ km) não constitui um valor arbitrário, resultando do critério hidráulico adotado (queda de pressão admissível de 0,02 MPa/km e queda total máxima de 3 MPa por segmento), conforme descrito em Seixas et al. (2015). Em aplicações reais, estes parâmetros podem necessitar de ajuste em função das condições operacionais específicas, propriedades do fluido transportado, requisitos regulamentares ou critérios de projeto adotados pelo promotor.

Tabela 3.1: Parâmetros de referência para estimativa económica de gasodutos de CO₂, com base em Seixas et al. (2015) e recomendações da Net4CO₂.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade	Descrição
Fator de custo padronizado	B_c	1357	€/2010/m ²	Custo base de instalação por unidade de área de secção transversal
Fator de fricção de Darcy	λ	0,015	—	Coeficiente de fricção para escoamento em tubagem
Taxa de fluxo mássico	M	—	kg/s	Caudal mássico de CO ₂ transportado (dependente do projeto)
Massa volúmica do CO ₂	ρ	827	kg/m ³	Densidade do CO ₂ em condições típicas de transporte
Queda de pressão admissível	$\Delta p/L$	0,02	MPa/km	Perda de pressão máxima permitida por unidade de comprimento
Eficiência do compressor	B_{eff}	0,75	—	Eficiência energética do sistema de compressão
Comprimento máximo do segmento	L_{max}	150	km	Distância máxima entre estações de compressão (derivada do critério hidráulico)

3.5 Fatores de custo

A resolução do problema requer dados geoespaciais que representam cada fator e um critério para converter esses dados em custos numéricos. Neste projeto, os custos foram retirados diretamente da Tabela 2.1 do modelo de referência, que já inclui os crité-

rios de avaliação implícitos nos dados. Adicionalmente, a seleção das fontes de dados procurou maximizar a adequação ao contexto português e a compatibilidade com o processamento *raster*.

3.5.1 Ocupação de Solo (F_{lu})

Após análise de diferentes fontes, optou-se por utilizar a **Carta de Ocupação do Solo Conjuntural 2024 - Pré-Verão** ([Direção-Geral do Território, 2024a](#)), disponibilizada pela Direção-Geral do Território (DGT) ([Direção-Geral do Território, 2025a](#)) e visualizável na plataforma viSMOS da DGT ([Direção-Geral do Território, 2024c](#)). Esta fonte apresenta-se em formato *raster*, o que simplifica a integração.

Alternativas como o CORINE Land Cover (CLC) ([Copernicus Land Monitoring Service, 2024](#)) foram consideradas, mas apresentam resolução espacial inferior e atualizações menos frequentes. Adicionalmente, a disponibilização em EPSG:3035 implicaria reprojeção para o sistema de coordenadas adotado na implementação, aspetos detalhes no Capítulo 4.

A DGT disponibiliza a **Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS)** ([Direção-Geral do Território, 2022b](#)), uma cartografia vetorial produzida por interpretação visual de ortofotomapas e tipicamente atualizada de cinco em cinco anos, e a **Carta de Ocupação do Solo Conjuntural (COSc)** ([Direção-Geral do Território, 2022a](#)), uma cartografia raster com resolução espacial de 10m, menor detalhe temático e atualização anual baseada em imagens pelo satélite Sentinel-2 ([Copernicus Programme, 2024](#)) e métodos automatizados. Optou-se pela utilização da versão mais recente da COSc devido à sua resolução espacial, formato *raster* e capacidade de representar variações anuais relevantes.

A Figura 3.1 apresenta a legenda temática utilizada pela COSc.



Figura 3.1: Legenda das classes temáticas da Carta de Ocupação e Uso do Solo Conjuntural 2024 (Pré-verão). Fonte: [Direção-Geral do Território, 2024b](#)

As categorias de uso do solo do COMET não correspondem diretamente às classes temáticas da COSc. Assim, estabeleceu-se uma associação entre classes COSc, categorias COMET e fatores de custo, apresentada na tabela seguinte.

Tabela 3.2: Associação entre classes temáticas da COSc 2024, categorias COMET e fatores de custo correspondentes.

ID da Classe	Classe Temática	Uso do Solo COMET	Fator de Custo
100	Artificializado	Áreas urbanas e associadas	1,8
211 212 213	Culturas anuais de outono/inverno Culturas anuais de primavera/verão Outras áreas agrícolas	Terras cultivadas	1,1
311 312 313 321 322 323	Sobreiro e Azinheira Eucalipto Outras folhosas Pinheiro bravo Pinheiro manso Outras resinosas	Florestas	1,3
410 420	Matos Vegetação herbácea espontânea	Áreas áridas	1,1
500	Superfícies sem vegetação	Áreas não povoadas	1
610	Zonas húmidas	Zonas regularmente inundadas	1,2
620	Água	Corpos de água	4

3.5.2 Declive do terreno (F_s)

O declive é derivado a partir de um modelo de elevação digital (DEM), isto é, um *raster* onde cada célula contém a altitude relativamente ao nível médio do mar. O processamento para a derivação do declive é descrito no Capítulo 4.

Para a seleção do DEM considerou-se alternativas em plataformas como o OpenTopography ([OpenTopography, s.d.](#)) e conjuntos já preparados e reprojetados para EPSG:3763 disponibilizados pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP) ([José Alberto Gonçalves et al., s.d.](#)). Entre as opções analisadas, destacam-se: (i) SRTM-DEM ([NASA Earthdata, 2000](#)), derivado da missão SRTM da NASA em 2000 ([NASA Earthdata, 2000](#)); (ii) ASTER-GDEM, com cobertura global e resolução espacial superior, mas potencialmente mais ruidoso em relevo acentuado ([CIIMAR – Coastal Monitoring and Management Group, s.d.\(b\)](#)); e (iii) ALOS World 3D DEM, de elevada qualidade, mas com maior incidência de píxeis vazios ([CIIMAR – Coastal Monitoring and Management Group, s.d.\(a\)](#)).

Optou-se pelo SRTM-DEM disponibilizado pela FCUP, por apresentar boa qualidade geral, menor incidência de píxeis vazios e compatibilidade direta com o sistema de coordenadas adotado. Com o declive derivado, atribuem-se fatores de custo por intervalos, conforme o modelo COMET. A Tabela 3.3 resume os valores utilizados.

Tabela 3.3: Fatores de custo associados a intervalos de declive para novo traçado onshore, segundo o modelo COMET.

Declive (%)	Fator de Custo (F_s)
< 10%	1
10–20%	1,1
20–30%	1,2
30–70%	3
> 70%	9

3.5.3 Cruzamentos (F_{ci}) e Número de Infraestruturas (N)

Tanto para representar o fator de custo dos cruzamentos com as redes rodoviárias e ferroviárias (F_{ci}) como o número de infraestruturas lineares (N), utilizam-se dados oficiais do portal dados.gov ([Agência para a Modernização Administrativa, 2024](#)), fornecidos pela Infraestruturas de Portugal ([Infraestruturas de Portugal, S.A., 2024a](#)).

Os dados encontram-se em formato vetorial ([Infraestruturas de Portugal, S.A., 2024c](#); [Infraestruturas de Portugal, S.A., 2024b](#)), exigindo conversão para *raster* para integração na superfície de custo; este processo é descrito no Capítulo 4.

As redes rodoviária e ferroviária, que são inicialmente camadas distintas são unidas numa única camada vetorial e posteriormente convertidas em *rasters* independentes. Estes *rasters* permitem, por um lado, identificar a presença de cruzamentos em cada célula para efeitos de atribuição do fator de custo F_{ci} e, por outro, determinar o número total de infraestruturas que intersejam cada célula, correspondendo ao parâmetro N utilizado na Equação (3.6).

Embora o modelo COMET incluísse ferrovias de alta velocidade, este tipo de infraestrutura não existe atualmente em Portugal Continental, pelo que não foi considerado. Para células sem cruzamentos assume-se um fator neutro de 1, penalizando apenas a presença efetiva de infraestruturas.

A Tabela 3.4 apresenta os fatores adotados. A Figura 3.2 ilustra a distribuição das principais infraestruturas lineares utilizadas.

Tabela 3.4: Fatores de custo associados à presença de cruzamentos com infraestruturas, segundo o modelo COMET.

Tipo de Cruzamento	Fator de Custo (F_{ci})
Ausência de cruzamentos	1
Estradas	3
Ferrovias	3
Ferrovias de alta velocidade	– ¹

¹ Não considerado neste projeto por inexistência deste tipo de infraestrutura em Portugal Continental.



Figura 3.2: Representação das principais infraestruturas lineares em Portugal continental. As linhas a laranja correspondem à rede ferroviária e as linhas a azul à rede rodoviária, incluindo autoestradas, itinerários principais, complementares e outras vias. Mapa gerado no QGIS com base nos dados oficiais fornecidos pela Infraestruturas de Portugal: *Infraestruturas de Portugal, S.A. (2024c)* e *Infraestruturas de Portugal, S.A. (2024b)*.

3.5.4 Corredores (F_c)

Como referido no Capítulo 2, atualmente não existem infraestruturas dedicadas ao transporte de CO_2 em Portugal. Ainda assim, a reutilização de corredores já ocupados por outras infraestruturas lineares, como gasodutos ou oleodutos, pode reduzir significativamente os custos associados ao licenciamento, bem como os impactos ambientais e sociais, uma vez que estes corredores já foram previamente sujeitos a processos de negociação, servidão e avaliação de viabilidade.

Neste contexto, optou-se pela utilização dos dados da Servidão e Restrição de Utilidade Pública (SRUP) disponibilizados pela DGT, que incluem a localização dos gasodutos e oleodutos atualmente em vigor em Portugal Continental ([Direção-Geral do Território, 2025b](#)).

A DGT disponibiliza estes dados através de dois serviços: *web feature service* (WFS) e *web map service* (WMS). O WFS fornece informação vetorial, permitindo o acesso direto à geometria dos corredores, enquanto o WMS disponibiliza apenas imagens cartográficas, não adequadas a análise espacial. Deste modo, no planeamento de corredores de CO_2 , o WFS constitui a opção adequada, possibilitando a integração dinâmica das camadas no sistema GIS utilizado, neste caso o QGIS.

Tal como no caso dos cruzamentos, os dados vetoriais dos corredores foram sujeitos a pré-processamento e convertidos para formato *raster*, de forma a permitir a atribuição de custos por célula na superfície de custo. Embora não existam atualmente corredores *offshore* no contexto português, optou-se por manter esta diferenciação de custos, garantindo flexibilidade metodológica para aplicação do modelo a outros contextos ou cenários futuros.

A Tabela 3.5 apresenta os fatores de custo considerados. A Figura 3.3 apresenta a distribuição espacial dos gasodutos e oleodutos atualmente existentes em Portugal Continental, utilizados na definição do fator de custo associado aos corredores.

Tabela 3.5: Fatores de custo associados à presença de corredores, segundo o modelo COMET.

Tipo de Corredor	Fator de Custo (F_c)
<i>Offshore</i> (seguindo corredor existente)	2,7
<i>Offshore</i> (novo corredor)	3
<i>Onshore</i> (seguindo corredor existente)	0,9
<i>Onshore</i> (novo corredor)	1



Figura 3.3: Representação da rede nacional de gasodutos (a azul) e oleodutos para transporte de gás de petróleo liquefeito e produtos refinados (a vermelho). Mapa gerado no QGIS com base nos dados vetoriais do serviço WFS da Direção-Geral do Território. Fonte: *Direção-Geral do Território (2025b)*

3.6 Justificação da abordagem

A escolha das expressões utilizadas no presente modelo baseia-se em dois pilares fundamentais. Em primeiro lugar, a formulação principal para a estimativa do custo de investimento dos segmentos do gasoduto (I_p) é diretamente baseada no trabalho de [Van den Broek et al. \(2013\)](#), que constitui a principal referência científica deste projeto. Este modelo integra de forma consistente a análise espacial de corredores com a estimativa económica de gasodutos de CO_2 , tendo sido desenvolvido e validado para o contexto português.

Em segundo lugar, as expressões auxiliares para o cálculo do diâmetro do gasoduto (D), da potência dos compressores (S_c) e do custo das estações de reforço (I_B) assentam em princípios clássicos da engenharia de transporte de fluidos e em correlações empíricas amplamente utilizadas em estudos de planeamento de infraestruturas de CCS. Estas formulações são adotadas e consolidadas em [Seixas et al. \(2015\)](#), sendo igualmente recomendadas pela Net4CO2 como valores de referência adequados para estudos de avaliação preliminar e planeamento estratégico.

A integração destas diferentes componentes num modelo único permite obter uma estimativa coerente e aproximada do investimento necessário, articulando as condicionantes espaciais do território com os requisitos técnicos e operacionais do transporte de CO_2 , num nível de detalhe adequado aos objetivos deste trabalho.

DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta o desenvolvimento da solução, a definição inicial dos requisitos e a estrutura funcional da aplicação criada no âmbito deste projeto, um *plugin* desenvolvido em *Python* para o QGIS, que integra os processos de cálculo do LCP e de estimativa económica de gasodutos de transporte de CO_2 .

Inicialmente, o projeto passou por uma fase de exploração e experimentação com ferramentas QGIS, que serviu para compreender o funcionamento do QGIS, a manipulação de camadas *raster* e vetoriais, e os princípios do cálculo do LCP. Esta fase foi essencial para consolidar o entendimento dos processos envolvidos e para definir a direção do trabalho, culminando na decisão de desenvolver um *plugin* dedicado no QGIS.

Assim, este capítulo descreve o sistema de forma global, apresentando a sua estrutura funcional e o papel de cada um dos módulos que o compõem. Os módulos consistem no cálculo dos fatores de custo (uso do solo, declive, cruzamentos e corredores), no cálculo do LCP, nas funções auxiliares e à posterior estimativa económica. Cada módulo corresponde a um separador da interface do *plugin* e representa uma etapa distinta do fluxo de trabalho.

4.1 Requisitos

No Capítulo 1 apresentam-se os objetivos gerais do projeto e a sua motivação. Nesta secção, procede-se a uma análise com maior detalhe dos requisitos que orientaram o desenvolvimento. Ao contrário de um projeto tradicional de desenvolvimento de *software*, a natureza exploratória deste projeto implicou um certo nível de flexibilidade dos requisitos.

O projeto tinha como objetivo o desenvolvimento de uma plataforma digital para apoiar o planeamento otimizado de gasodutos de transporte de CO_2 , recorrendo a um GIS.

Segundo a informação disponibilizada pelo projeto (**Net4CO2 - Network for a Sustainable CO₂ Economy, 2024**), os principais resultados esperados são:

- **Algoritmo de otimização de rotas** - A identificação do corredor mais viável e custo-efetivo, tendo em conta critérios económicos, ambientais e técnicos.
- **Interface interativa** - Uma plataforma intuitiva de fácil utilização, que permita a introdução de parâmetros e a visualização das rotas e suas alternativas.
- **Estimativa de custos e riscos** - Inclusão de um módulo de estimação de custos que considera a complexidade de construção e dificuldade do terreno.

Contudo, importa referir que esta descrição foi disponibilizada apenas numa fase intermédia do desenvolvimento, não existia um conjunto rígido de requisitos funcionais e não funcionais desde o início. Grande parte dos requisitos foram obtidos oralmente, através da colaboração com a entidade proponente e professores orientadores, em reuniões e trocas de ideias que permitiram orientar o rumo do projeto. Em particular, desde cedo que se apercebeu que a integração no ecossistema QGIS seria a abordagem mais útil, sendo esta a recomendada pela própria entidade proponente.

Os requisitos sofreram adaptações iterativas. Inicialmente, o foco estava em implementar apenas o cálculo do LCP, combinando diferentes superfícies de custo derivadas de dados geográficos, no entanto, discutiu-se brevemente a possibilidade de realizar uma estimativa económica. Com a consolidação do LCP, surgiu a possibilidade de desenvolver e incluir uma componente económica no projeto para estimar o corredor calculado pelo LCP. Para além disto, é relevante salientar que existiam fatores de custo com maior prioridade na implementação, isto é, uma vez que o projeto tinha um caráter exploratório e ainda não existia uma perceção clara do tempo de desenvolvimento necessário nem da complexidade total, optou-se por dar maior ênfase a fatores de terreno fundamentais para o cálculo do LCP, nomeadamente o declive e a ocupação do território.

4.1.1 Requisitos funcionais identificados

Apesar do caráter aberto, é possível sintetizar um conjunto de requisitos funcionais concretos que guiaram o desenvolvimento:

- **RF1: Importação de dados geográficos** - O sistema deve permitir a utilização de dados geográficos (*rasters* e vetores), nomeadamente DEM, COSc, rede viária, rede ferroviária e corredores existentes (e.g., oleodutos, gasodutos).
- **RF2: Criação de superfícies de custo** - O sistema deve calcular *rasters* de custo por critério (uso do solo, declive, cruzamentos e corredores existentes), de forma parametrizável e intuitiva.
- **RF3: Combinação multicritério** - O sistema deve calcular um *raster* de custo único de todos os critérios, considerando pesos atribuídos a cada critério.

- **RF4: Cálculo do LCP** - Dado o *raster* de custos combinado, o sistema deve conseguir determinar o corredor ótimo entre um ponto de origem e um ponto de destino.
- **RF5: Estimativa económica (opcional no início, posteriormente integrada)** - O sistema deve fornecer uma estimativa de custos aproximada associada ao corredor calculado com base na sua complexidade de construção.
- **RF6: Exportação e visualização** - O sistema deve permitir a visualização dos resultados e permitir a exportação em formatos comuns.

4.1.2 Requisitos não funcionais

De modo complementar, definiram-se alguns requisitos não funcionais relevantes:

- **RNF1: Integração** - A solução deve ser compatível com QGIS.
- **RNF2: Usabilidade** - A interface deve ser intuitiva o suficiente para utilizadores com experiência em GIS, sem exigir conhecimentos de programação.
- **RNF3: Flexibilidade** - A plataforma deve ser flexível, permitindo que os parâmetros sejam configuráveis pelo utilizador.
- **RNF4: Reprodutibilidade** - Os cálculos devem poder ser repetidos com os mesmos dados e parâmetros com facilidade, garantindo consistência dos resultados e facilitando a validação por terceiros.

4.2 Arquitetura funcional da plataforma

A arquitetura funcional da plataforma desenvolvida reflete a estrutura lógica e modular do sistema implementado. O processo de análise está repartido em etapas distintas e complementares, cada uma responsável por uma parte específica do fluxo de trabalho, desde o cálculo dos fatores de custo até à estimativa económica do corredor final estimado.

Esta organização modular permite que cada componente funcione de forma independente, contudo de forma integrada. A separação por módulos promove flexibilidade, reprodutibilidade e, para além disso, contribui para uma melhor manutenção e possível extensão futura do *plugin*.

A Figura 4.1 ilustra esta estrutura, apresentando os quatro módulos principais da plataforma, o cálculo dos fatores de custo, o cálculo do LCP, a estimativa económica e as funções auxiliares.

O primeiro módulo, designado **Cálculo dos fatores de custo**, é responsável pela criação das superfícies de custo em *raster*. Cada um destes fatores representa um critério espacial que influencia o traçado do gasoduto. Estes fatores incluem a **ocupação do**

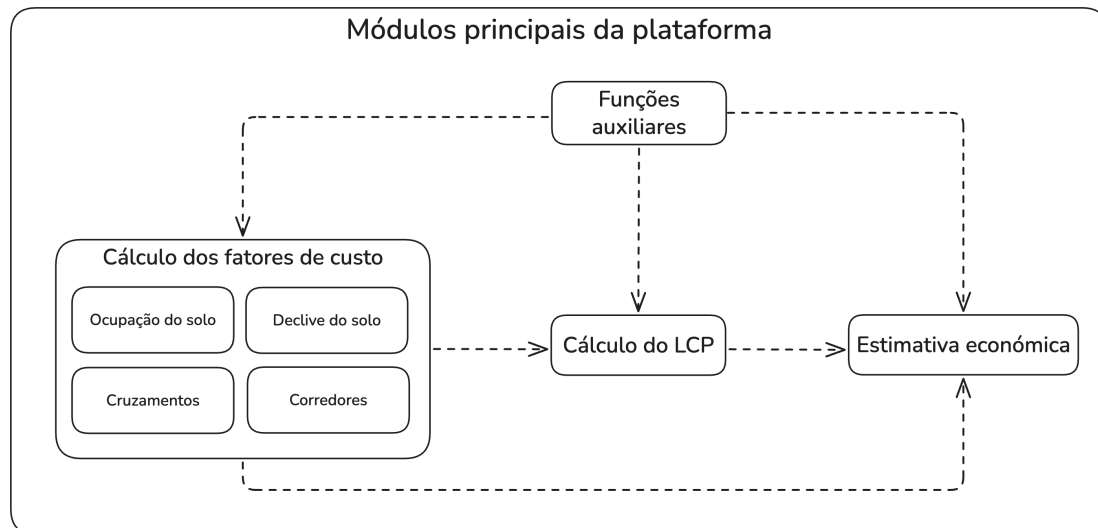


Figura 4.1: Estrutura funcional da plataforma desenvolvida, composta pelos módulos de cálculo dos fatores de custo, cálculo do caminho de menor custo (LCP), estimativa económica e funções auxiliares. Cada módulo representa uma etapa distinta do fluxo de trabalho implementado no plugin.

solo, o **declive do terreno**, os **cruzamentos com infraestruturas** (como estradas e ferrovias) e os **corredores** já estabelecidos (como oleodutos ou gasodutos existentes).

O segundo módulo, **Cálculo do LCP**, integra as superfícies de custo anteriormente criadas e combina-as num só *raster* de custo total através de uma abordagem multicritério ponderada. A partir desse *raster*, é calculado o caminho ótimo entre dois pontos, utilizando algoritmos de LCP disponíveis na API do QGIS e nas ferramentas do GRASS GIS. O resultado é um traçado vetorial que representa o corredor mais viável dado os critérios em avaliação.

O terceiro módulo, **Estimativa económica**, utiliza o traçado gerado pelo cálculo do LCP como base para estimar o custo associado ao gasoduto. Este cálculo considera a extensão total do traçado, a complexidade do terreno e o número de infraestruturas cruzadas (a partir dos *rasters* anteriormente gerados), e as fórmulas definidas no [Van den Broek et al. \(2013\)](#) e [Seixas et al. \(2015\)](#). Este componente permite quantificar de forma aproximada o investimento necessário, constituindo um complemento analítico relevante à componente espacial do *plugin*.

Por fim, o módulo das **Funções Auxiliares** disponibiliza operações de suporte à análise espacial: combinação de camadas vetoriais, reamostragem de *rasters* e recorte de *rasters* através da definição de uma área retangular por dois pontos extremos.

De forma geral, esta arquitetura modular assegura independência e reutilização das diferentes etapas do processo, permitindo que cada módulo seja executado isoladamente ou em sequência, conforme as necessidades do utilizador. Os módulos são descritos

em maior detalhe em secções posteriores deste capítulo.

4.3 Cálculo dos fatores de custo

Esta secção descreve a implementação dos módulos responsáveis pelo cálculo dos fatores de custo espaciais utilizados pela plataforma. Para cada módulo, apresentam-se a interface disponibilizada ao utilizador e os principais processos computacionais executados, com enfoque na lógica de processamento, nos algoritmos aplicados e nas bibliotecas utilizadas, omitindo detalhes ao nível do código-fonte.

A implementação destes módulos recorre principalmente a três componentes tecnológicos: (i) a **API do QGIS**, responsável pela manipulação de camadas e integração com a interface gráfica; (ii) a biblioteca *geospatial data abstraction library* (**GDAL**), utilizada em operações fundamentais sobre *rasters*, como leitura, escrita, reclassificação e alinhamento espacial; e (iii) as ferramentas do **GRASS GIS**, utilizadas pontualmente em operações de análise espacial mais especializadas.

Os módulos apresentados nesta secção correspondem ao cálculo dos fatores de custo individuais considerados no modelo: ocupação do solo, declive do terreno, cruzamentos com infraestruturas e corredores existentes. O resultado de cada módulo é um *raster* de custo que será posteriormente utilizado na integração multicritério, no cálculo do *least cost path* (LCP) e na estimativa económica.

4.3.1 Ocupação do solo

O separador *Land Use*, ilustrado na Figura 4.2, permite atribuir fatores de custo às diferentes classes de ocupação do solo. Este módulo constitui a base para avaliar o impacto do tipo de território atravessado pelo gasoduto, considerando fatores como dificuldade de construção, impacto ambiental e requisitos de licenciamento.

A interface inclui: (i) seleção da camada *raster* através de um menu *dropdown* que lista todas as camadas *raster* do projeto; (ii) uma tabela que apresenta automaticamente todas as classes identificadas no *raster* selecionado, com três colunas, *Class ID* (identificador numérico da classe), *Class Name* (nome descritivo) e *Cost* (fator de custo editável); (iii) o botão *Show COMET Values*, que abre um diálogo auxiliar (Figura 4.3) mostrando o mapeamento entre classes da Carta de Ocupação do Solo Conjuntural (COSc) e o modelo COMET; (iv) o botão *Populate according to COMET*, que preenche automaticamente os custos com valores predefinidos; e (v) o botão *Create Land Use Costs Raster*, que executa a reclassificação e gera o *raster* de custos.

Quando o utilizador seleciona um *raster* de ocupação do solo no menu *dropdown*, o *plugin* extrai automaticamente as classes disponíveis através da **API do QGIS**, consul-

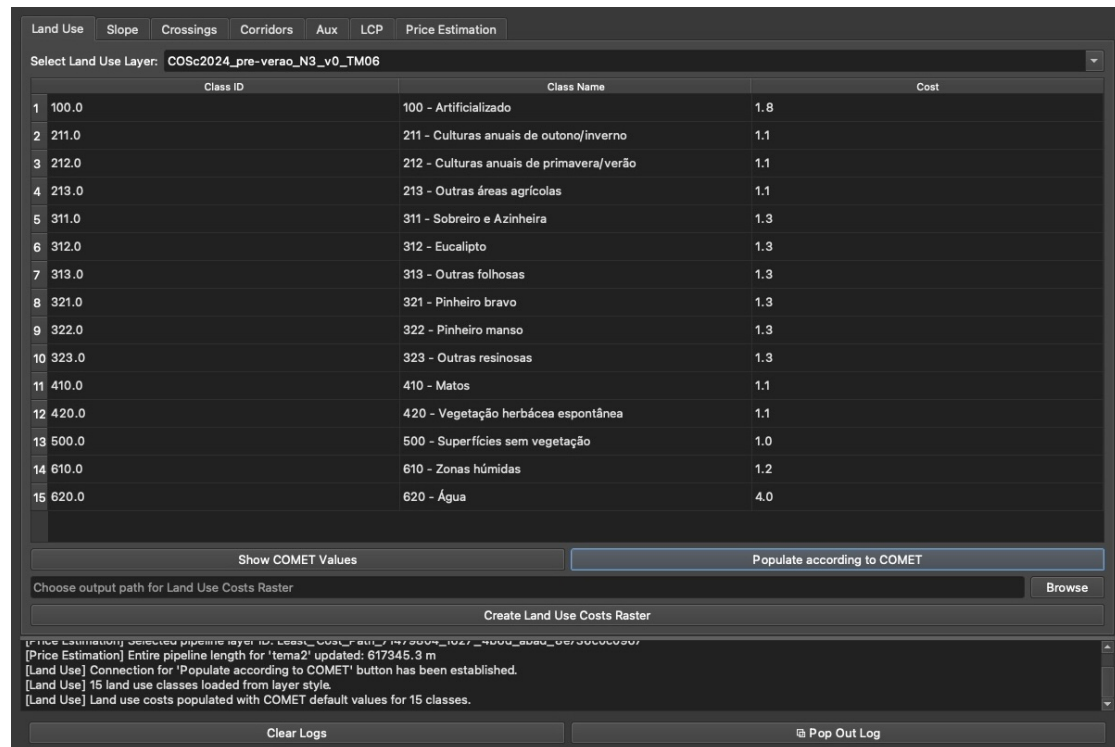


Figura 4.2: Interface do separador Land Use mostrando a tabela de associação entre classes COSc e fatores de custo.

tando o renderizador da camada (`QgsPalettedRasterRenderer`). Quando presente, este renderizador contém informação sobre os valores únicos e respetivos rótulos, permitindo popular a tabela da interface com os identificadores de classe (*Class ID*) e nomes descritivos (*Class Name*). Cada linha é inicializada com um custo predefinido de 1, editável pelo utilizador.

O botão *Populate according to COMET* preenche a coluna de custos seguindo o mapeamento entre as classes da COSc e os fatores de custo do modelo COMET, como apresentado na Tabela 3.2. Esta funcionalidade é apenas suportada para *rasters* da COSc disponibilizados pela DGT ou qualquer outro *raster* com as mesmas classes. Não obstante, o utilizador pode sempre preencher manualmente.

O botão *Create Land Use Costs Raster* executa o processo de reclassificação do *raster* de ocupação do solo, convertendo as classes temáticas originais num *raster* de custos. Para tal, o *raster* de entrada é carregado para a memória e processado de forma matricial, garantindo que a estrutura espacial original é preservada. É criada uma matriz de saída com a mesma dimensão, inicialmente preenchida com um valor penalizador para classes sem custo explicitamente definido, prevenindo a subestimação de custos em áreas não classificadas.

A atribuição de custos é realizada de forma vetorizada, associando a cada classe de

	Class ID	COSc Thematic Class	COMET Land Use	Cost Factor
1	100	Artificializado	Áreas urbanas e associadas	1.8
2	211	Culturas anuais de outono/inverno	Terras cultivadas	1.1
3	212	Culturas anuais de primavera/verão		
4	213	Outras áreas agrícolas		
5	311	Sobreiro e Azinheira	Florestas	1.3
6	312	Eucalipto		
7	313	Outras folhosas		
8	321	Pinheiro bravo		
9	322	Pinheiro manso		
10	323	Outras resinosas	Áreas áridas	1.1
11	410	Matos		
12	420	Vegetação herbácea espontânea	Áreas não povoadas	1.0
13	500	Superfícies sem vegetação	Zonas regularmente inundadas	1.2
14	610	Zonas húmidas	Corpos de água	4.0
15	620	Água		

Figura 4.3: *Diálogo auxiliar mostrando o mapeamento entre classes COSc, classes temáticas e fatores de custo COMET.*

ocupação do solo o respetivo fator de custo definido pelo utilizador ou pelo modelo COMET. Este procedimento permite aplicar simultaneamente o mesmo valor a todas as células pertencentes a uma determinada classe, assegurando elevada eficiência computacional mesmo para *rasters* de elevada resolução.

O *raster* de custos resultante é gerado em formato GeoTIFF, preservando integralmente as propriedades espaciais do *raster* original, nomeadamente o sistema de coordenadas, a resolução espacial e a extensão geográfica. O ficheiro é guardado com técnicas de compressão adequadas para reduzir o espaço em disco e otimizar o desempenho, sendo automaticamente carregado no projeto QGIS para visualização e utilização nos módulos subsequentes.

O resultado final consiste num *raster* de custos em que cada célula contém um valor numérico representativo da dificuldade relativa de atravessar o respetivo tipo de ocupação do solo. Valores mais elevados, como os atribuídos a corpos de água ou áreas urbanas, refletem maiores constrangimentos técnicos e ambientais, enquanto valores mais baixos, associados a superfícies menos condicionadas, indicam menor penalização no traçado do gasoduto. O *raster* resultante é utilizado tanto na geração da superfície de custo do LCP como na estimativa económica, onde o fator F_{lu} é lido diretamente para cada célula atravessada pelo gasoduto.

4.3.2 Declive do terreno

O separador *Slope*, ilustrado na Figura 4.4, divide o processamento em duas etapas: (i) a criação do *raster* de declives a partir de um modelo digital de elevação (DEM), e (ii) a subsequente reclassificação desses declives em intervalos com custos associados. O declive constitui um critério fundamental no planeamento de gasodutos, uma vez que terrenos mais inclinados estão associados a maiores dificuldades construtivas, maiores exigências técnicas e, conseqüentemente, a um aumento significativo dos custos de instalação.

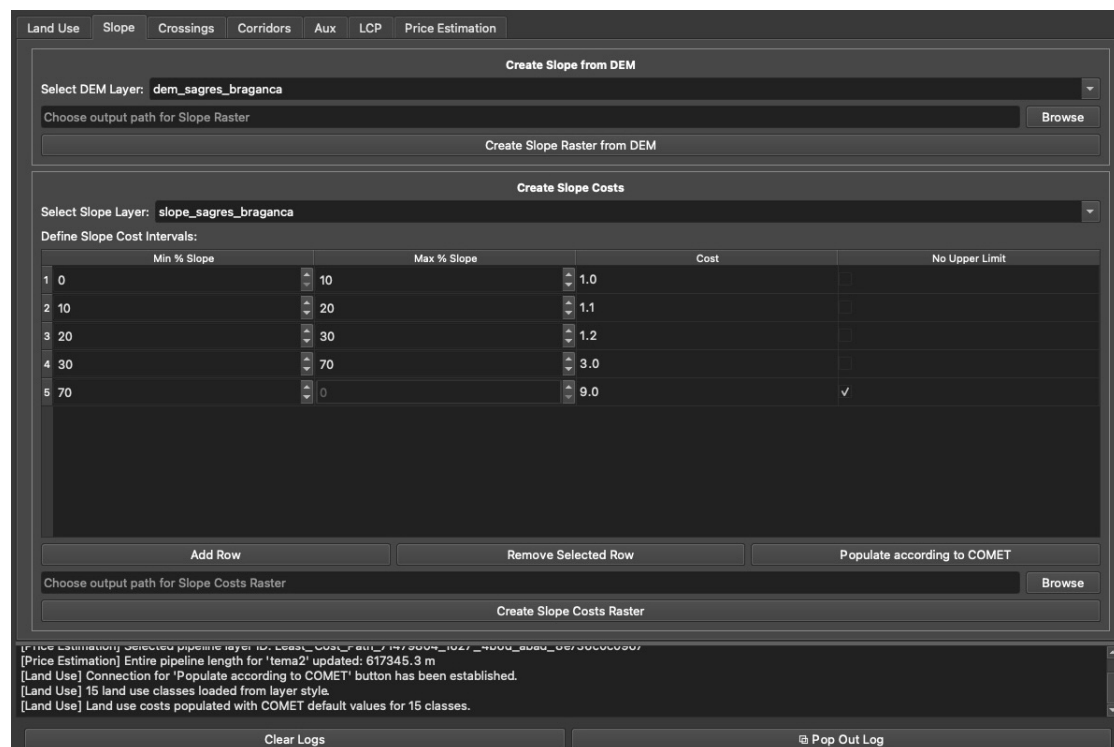


Figura 4.4: Interface do separador *Slope* mostrando as duas etapas do processamento: criação do *raster* de declives e definição dos intervalos de custo.

Ao acionar o botão *Create Slope Raster from DEM*, o *plugin* calcula o declive do terreno a partir do DEM, recorrendo a um algoritmo disponibilizado pelo *Processing Framework* do QGIS. O declive é determinado para cada célula do *raster* com base nas diferenças de elevação entre células vizinhas, resultando numa representação contínua da inclinação do terreno. O processamento é configurado de forma a assumir coerência entre as unidades horizontais e verticais e a expressar o declive em percentagem. O *raster* de declives gerado é automaticamente integrado no projeto QGIS para posterior análise.

A segunda etapa do módulo consiste na reclassificação dos valores de declive em intervalos com fatores de custo associados. Para esse efeito, a interface disponibiliza uma tabela editável onde o utilizador pode definir manualmente os limites inferior e superior de cada intervalo de declive, bem como o respetivo custo. É igualmente possível defi-

nir intervalos abertos, aplicáveis a todos os valores acima de um determinado limiar, permitindo representar declives extremos. A gestão destes intervalos é totalmente flexível, possibilitando a adição ou remoção de classes conforme necessário.

Como alternativa à definição manual, o botão *Populate according to COMET* permite preencher automaticamente a tabela com os intervalos e custos recomendados pelo modelo COMET, como apresentado na Tabela 3.3. Estes intervalos refletem o aumento progressivo da dificuldade construtiva com o declive: terrenos com inclinações moderadas apresentam custos reduzidos, enquanto declives elevados são fortemente penalizados, sendo valores superiores a 70% considerados praticamente inviáveis para a construção de gasodutos.

Após a definição dos intervalos, o botão *Create Slope Costs Raster* executa a reclassificação do *raster* de declives, convertendo os valores contínuos de inclinação num *raster* de custos. Este processo é realizado de forma matricial, aplicando cada intervalo de declive ao conjunto de células correspondente e atribuindo o fator de custo definido. A utilização de operações vetorizadas permite uma execução eficiente, mesmo para *rasters* de grande dimensão.

O *raster* de custos resultante é criado em formato GeoTIFF, preservando integralmente as propriedades espaciais do *raster* de declives original, incluindo sistema de coordenadas, resolução e extensão geográfica. O ficheiro final é automaticamente carregado no projeto QGIS, ficando disponível para integração no cálculo do custo total e no apuramento do caminho de menor custo.

O resultado final consiste num *raster* de custos de declive espacializados, onde células com inclinações reduzidas apresentam penalizações mínimas, declives intermédios são progressivamente penalizados e terrenos muito inclinados recebem custos elevados, refletindo de forma realista as limitações técnicas e económicas associadas à construção de gasodutos em topografia acentuada. O *raster* resultante é utilizado tanto na geração da superfície de custo do LCP como na estimativa económica, onde o fator F_s é lido diretamente para cada célula atravessada pelo gasoduto.

4.3.3 Cruzamentos com infraestruturas

O separador *Crossings*, ilustrado na Figura 4.5, permite calcular os custos associados ao cruzamento de infraestruturas lineares existentes, tais como estradas e linhas ferroviárias. Este fator reflete o impacto adicional que ocorre quando o traçado do gasoduto necessita de atravessar infraestruturas, implicando custos acrescidos de construção, requisitos técnicos específicos (túneis sob estradas, travessias especiais) e maior complexidade de licenciamento.

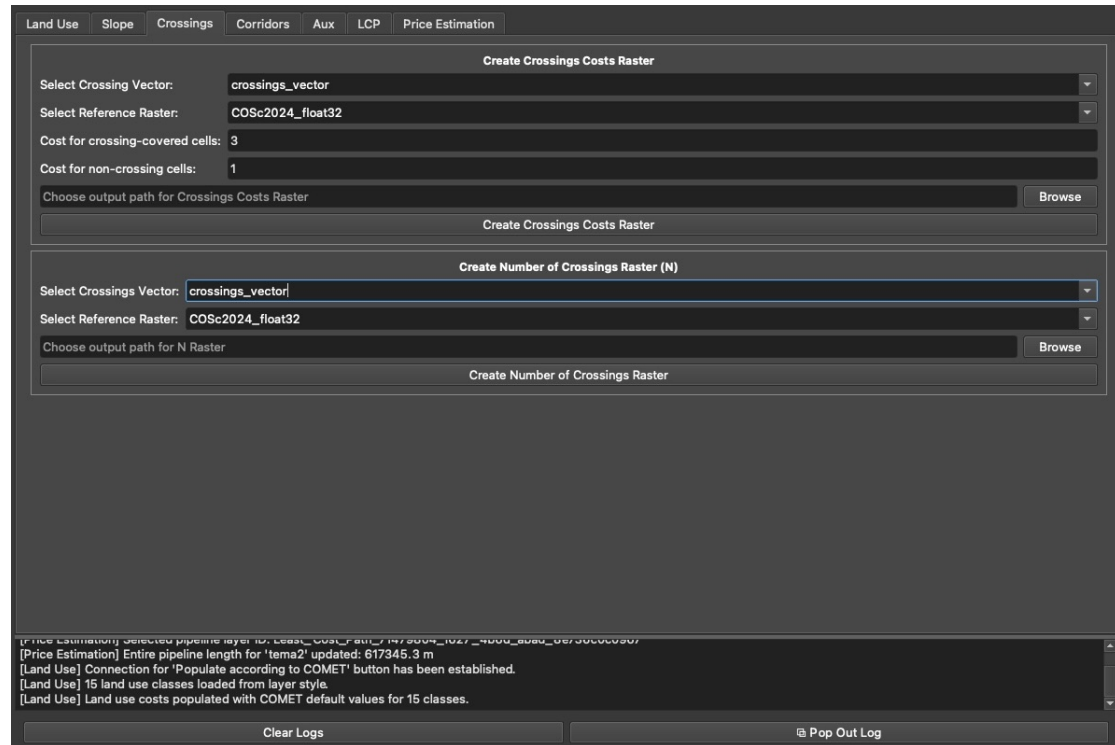


Figura 4.5: Interface do separador *Crossings* para definição de custos de cruzamento de infraestruturas.

O separador encontra-se dividido em duas secções distintas, cada uma responsável pela geração de um *raster* de saída com finalidades complementares.

A primeira secção, *Create Crossings Costs Raster*, disponibiliza os elementos necessários para a definição e cálculo do fator de custo de cruzamento F_{ci} , utilizado na fórmula multiplicativa do LCP. O utilizador começa por seleccionar a camada vetorial de cruzamentos, tipicamente contendo geometrias lineares representativas de redes rodoviárias ou ferroviárias. Em seguida, é seleccionado um *raster* de referência, que estabelece as propriedades espaciais do *raster* de custos a gerar. A interface inclui ainda dois campos numéricos para definição dos fatores de custo: um aplicável às células atravessadas por infraestruturas e outro correspondente ao custo base das células sem qualquer cruzamento. O processo é executado através do botão *Create Crossings Costs Raster*. O resultado é um *raster* binário de penalizações, onde as células associadas a cruzamentos apresentam o custo elevado e as restantes mantêm o custo base.

A segunda secção, *Create Number of Crossings Raster (N)*, destina-se à geração do *raster* auxiliar N , que representa o número de infraestruturas únicas que intersectam cada célula. Este *raster* é utilizado diretamente na fórmula multiplicativa de agregação de custos (ver Capítulo 3), onde N pondera a contribuição relativa do fator F_{ci} em função da densidade de cruzamentos. O utilizador selecciona a mesma camada vetorial de infraestruturas e um *raster* de referência, e define o caminho de saída. O algoritmo percorre todas as *features* da camada vetorial e, para cada célula da grelha, conta o número

de *features* únicas que a atravessam, utilizando o algoritmo de Bresenham (Bresenham, 1965) para identificar as células intersectadas por cada segmento linear. A contagem baseia-se em identificadores únicos de *feature* da camada vetorial, garantindo que uma infraestrutura com múltiplos segmentos é contabilizada apenas uma vez por célula. O resultado é um *raster* onde cada célula contém o número de infraestruturas distintas que a atravessam.

O *raster* de referência desempenha um papel central em ambas as secções, ao definir a grelha espacial dos *rasters* resultantes. A partir deste *raster*, o *plugin* extrai automaticamente a resolução espacial, a extensão geográfica e o sistema de coordenadas. Os valores de custo para o *raster* F_{ci} são inicializados com valores recomendados pelo modelo COMET (visualizável na Tabela 3.4): um custo elevado para células que intersectam infraestruturas e um custo base para as restantes. Esta diferenciação reflete o aumento significativo da complexidade construtiva associado aos cruzamentos, que frequentemente exigem técnicas especiais de execução, coordenação com entidades gestoras das infraestruturas e cumprimento de requisitos adicionais de licenciamento. No entanto, estes valores podem ser ajustados pelo utilizador de acordo com o contexto específico da análise.

Ambos os *rasters* resultantes são automaticamente carregados no projeto QGIS, ficando disponíveis para visualização e para integração nas fases seguintes da análise. O *raster* F_{ci} é utilizado tanto na geração da superfície de custo do LCP como na estimativa económica, onde representa o fator de custo de cruzamento de cada célula. O *raster* N , por sua vez, é utilizado exclusivamente na fase de geração da superfície de custo do LCP. Na estimativa económica, o valor de N não é lido a partir deste *raster* pré-calculado, sendo antes determinado dinamicamente para cada célula atravessada pelo gasoduto, contando o número de vezes que o vetor do gasoduto intersecta o vetor de infraestruturas dentro dessa célula (descrito em maior detalhe em Subsecção 4.4.3).

Esta abordagem assegura que o impacto das infraestruturas é representado de forma espacialmente explícita: mesmo quando uma infraestrutura atravessa apenas uma pequena porção de uma célula, o custo é aplicado à totalidade da célula, refletindo a necessidade de medidas construtivas específicas nessa localização. Embora esta discretização simplifique a realidade contínua, é adequada ao planeamento de gasodutos à escala da resolução do *raster*, onde as decisões de traçado são tomadas com base em unidades espaciais discretas.

4.3.4 Corredores existentes

O separador *Corridors*, ilustrado na Figura 4.6, permite calcular custos associados à proximidade de infraestruturas lineares existentes do tipo oleodutos e gasodutos. Ao contrário das infraestruturas lineares do tipo estradas e ferrovias consideradas na sub-

seção anterior (cujo cruzamento é penalizado), estas incentivam a proximidade, aproveitando sinergias como acessos já estabelecidos, direitos de passagem existentes e menor impacto visual cumulativo. Este fator distingue entre zonas terrestres (*onshore*) e zonas aquáticas (*offshore*), aplicando custos diferenciados.

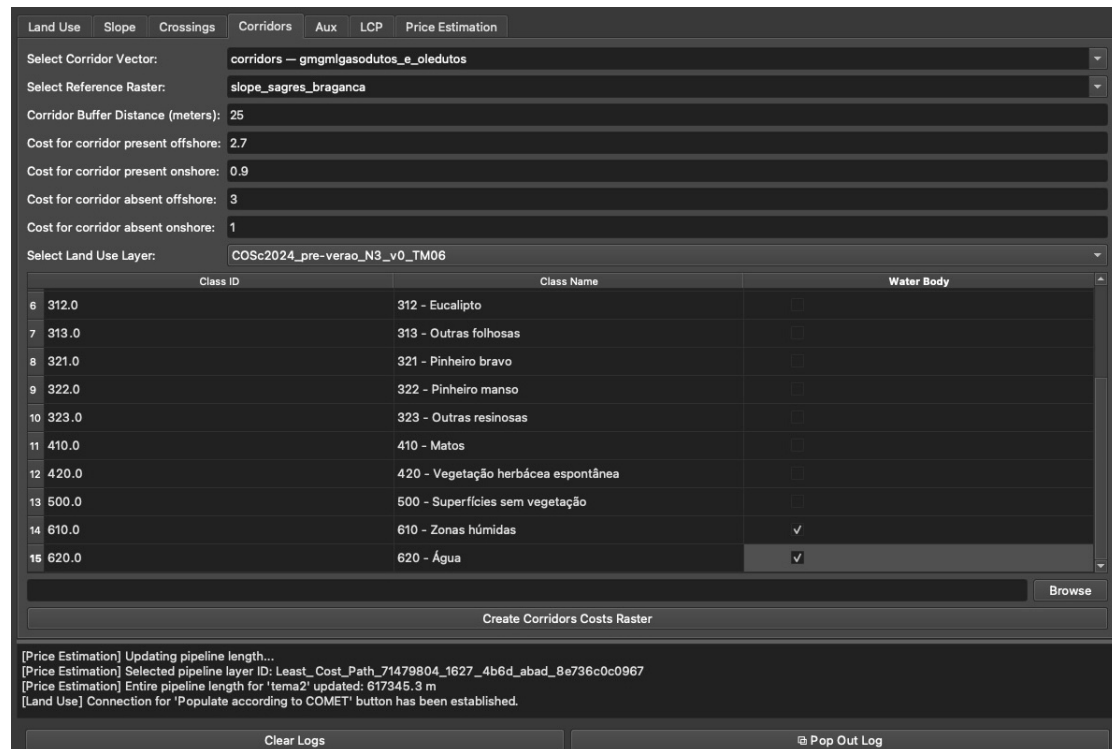


Figura 4.6: Interface do separador *Corridors* mostrando a configuração de custos diferenciados para zonas *onshore* e *offshore*, e a seleção de classes de corpos de água.

A interface do módulo de corredores apresenta uma estrutura semelhante à do separador de cruzamentos. O utilizador começa por selecionar a camada vetorial de corredores existentes e um *raster* de referência, que define as propriedades espaciais do *raster* de custos a gerar — nomeadamente a resolução espacial, a extensão e o sistema de coordenadas. Esta abordagem assegura compatibilidade total entre os diferentes *rasters* de custo utilizados ao longo da análise.

Um elemento distintivo deste módulo é a definição da distância de influência dos corredores, especificada através do parâmetro *Corridor Buffer Distance*. Este valor, definido em metros e inicializado por omissão em 25 m, determina a largura da faixa em torno das infraestruturas existentes onde se aplica o incentivo de proximidade. Esta faixa representa a zona na qual a construção de um novo gasoduto é considerada vantajosa, beneficiando de sinergias associadas à existência prévia de infraestruturas lineares, como direitos de passagem, acessos consolidados e menor impacto ambiental adicional.

A interface disponibiliza quatro parâmetros de custo, pré-preenchidos com valores re-

comendados pelo modelo COMET (visualizável na Tabela 3.5), que distinguem entre zonas terrestres (*onshore*) e aquáticas (*offshore*), bem como entre áreas próximas ou afastadas de corredores existentes. A proximidade a corredores traduz-se numa redução do custo relativo, tanto em terra como em água, enquanto a ausência de corredores implica penalizações mais elevadas, particularmente em ambiente aquático. Esta parametrização reflete duas premissas fundamentais: a reutilização de corredores existentes reduz custos e complexidade, e a construção em ambientes aquáticos é, em geral, mais dispendiosa do que em ambientes terrestres.

Um aspeto central deste módulo é a distinção entre zonas *onshore* e *offshore*, que exige a identificação explícita de corpos de água. Para esse efeito, o utilizador seleciona uma camada de ocupação do solo, normalmente a mesma utilizada no módulo correspondente. A interface apresenta então uma tabela com as classes dessa camada, permitindo identificar, através de uma *checkbox*, quais representam corpos de água. Esta seleção é posteriormente utilizada no processamento para distinguir automaticamente células terrestres de células aquáticas.

Durante a execução do módulo, o *plugin* cria uma máscara booleana a partir do *raster* de ocupação do solo alinhado com a grelha do *raster* de referência. Esta máscara é construída identificando todas as células cujo valor pertence ao conjunto de classes marcadas como corpos de água, permitindo obter uma representação binária das zonas aquáticas. As células não incluídas nessa máscara são automaticamente consideradas como zonas terrestres. Esta abordagem garante uma separação clara e consistente entre contextos *onshore* e *offshore* ao nível da grelha espacial.

Ao acionar o botão *Create Corridors Costs Raster*, o *plugin* executa um conjunto de operações sequenciais. Em primeiro lugar, é criada uma zona de buffer em torno das geometrias dos corredores existentes, representando a sua área de influência. Em seguida, o *raster* de ocupação do solo é reamostrado e alinhado com a grelha do *raster* de referência, assegurando correspondência pixel-a-pixel entre todas as camadas. Com base na máscara booleana previamente definida, é então criada uma matriz inicial de custos que distingue zonas terrestres e aquáticas afastadas de corredores.

O buffer dos corredores é posteriormente convertido em formato *raster*, originando uma segunda máscara booleana que identifica as células localizadas dentro da zona de influência das infraestruturas existentes. A combinação destas duas máscaras, corpos de água e proximidade a corredores, permite classificar cada célula numa das quatro categorias possíveis: *onshore* com corredor, *onshore* sem corredor, *offshore* com corredor e *offshore* sem corredor. A cada uma destas categorias é atribuído o fator de custo correspondente, de acordo com os parâmetros definidos pelo utilizador.

O *raster* de custos final é criado preservando todas as propriedades espaciais do *raster*

de referência e carregado automaticamente no projeto QGIS. Os ficheiros temporários gerados durante o processamento são removidos, assegurando eficiência na gestão de recursos.

O resultado consiste num *raster* de custos espacialmente diferenciado que favorece o traçado do gasoduto ao longo de corredores existentes, aplicando incentivos de custo nas zonas de proximidade e penalizações em áreas afastadas, particularmente em ambientes aquáticos. Esta abordagem promove a reutilização de infraestruturas consolidadas, reduz impactos ambientais e sociais e facilita processos de licenciamento, ao mesmo tempo que incorpora as maiores exigências técnicas e económicas associadas à construção *offshore*. O *raster* resultante é utilizado tanto na geração da superfície de custo do LCP como na estimativa económica, onde o fator F_c é lido diretamente para cada célula atravessada pelo gasoduto.

4.4 Integração e funções complementares

Esta secção descreve os módulos que complementam o cálculo dos fatores de custo e suportam a sua integração nas etapas finais da análise. Em particular, incluem-se as funcionalidades auxiliares de preparação e transformação de dados geográficos, o cálculo do *least cost path* (LCP) a partir da combinação dos fatores de custo e a estimativa económica do gasoduto com base no traçado obtido.

Em conjunto, estes módulos materializam a fase final do fluxo de trabalho da plataforma: preparação dos dados, integração multicritério, determinação do traçado ótimo e quantificação do custo de investimento associado.

4.4.1 Funções auxiliares

O separador *Aux*, ilustrado na Figura 4.7, disponibiliza três funcionalidades de suporte que facilitam a preparação e manipulação de dados geográficos ao longo do fluxo de trabalho. Como o nome indica, estas ferramentas servem propósitos auxiliares, permitindo otimizar o processamento, reduzir tempos de cálculo e preparar dados para utilização nos módulos principais.

A secção de funções auxiliares reúne um conjunto de ferramentas de suporte destinadas a facilitar a preparação, transformação e otimização dos dados geográficos ao longo do fluxo de trabalho. Estas funcionalidades não intervêm diretamente no cálculo dos fatores de custo ou do traçado ótimo, mas desempenham um papel fundamental na eficiência computacional, na coerência espacial dos dados e na simplificação das tarefas preparatórias necessárias à análise.

A primeira funcionalidade, designada *Combine Vectors*, permite a fusão de duas cama-

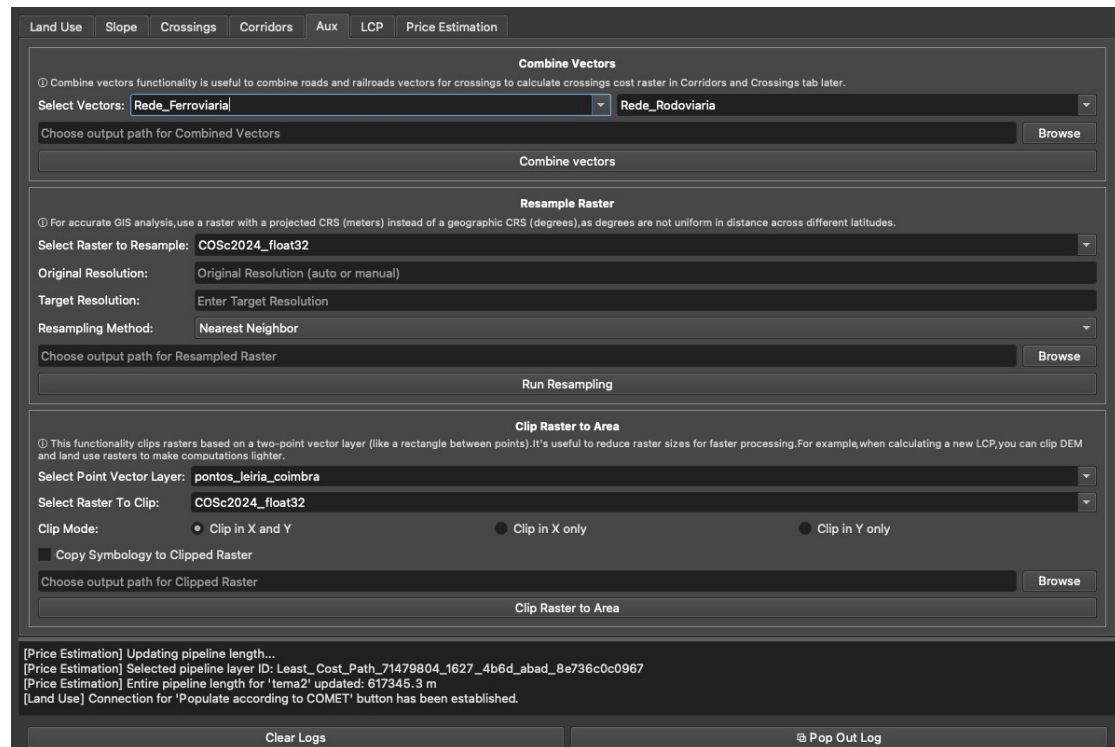


Figura 4.7: Interface do separador Aux mostrando as três funcionalidades auxiliares: combinação de vetores, reamostragem de rasters e recorte de rasters.

das vetoriais numa única camada de saída. Esta operação é particularmente útil para agregar diferentes tipos de infraestruturas lineares, como redes rodoviárias e ferroviárias, num único vetor, que pode posteriormente ser utilizado nos módulos de cruzamentos. Ao concentrar todas as infraestruturas relevantes numa única camada vetorial, evita-se a necessidade de processar múltiplos vetores em paralelo, simplificando o fluxo de trabalho e reduzindo o número de operações intermédias. A funcionalidade baseia-se numa união geométrica simples, na qual todas as geometrias das camadas de entrada são copiadas para a camada de saída, preservando os respetivos atributos, sem dissoluções ou operações topológicas adicionais. O resultado é automaticamente integrado no projeto QGIS, ficando imediatamente disponível para utilização nos módulos subsequentes.

A segunda funcionalidade, *Resample Raster*, permite alterar a resolução espacial de *rasters*, criando versões com maior ou menor detalhe espacial. Esta operação estabelece um compromisso direto entre precisão e desempenho computacional: *rasters* com resolução mais grosseira apresentam tempos de processamento significativamente inferiores, enquanto resoluções mais finas preservam maior detalhe espacial à custa de maior esforço computacional. Esta funcionalidade é particularmente útil em fases exploratórias do projeto, testes preliminares ou sempre que a resolução original dos dados seja excessiva face aos objetivos da análise. O utilizador pode definir a resolução alvo em metros e seleccionar o método de reamostragem mais adequado ao tipo de dados, entre

quatro opções disponíveis: *Nearest Neighbor*, *Bilinear*, *Cubic* e *Lanczos*. O método *Nearest Neighbor* é o mais indicado para *rasters* categóricos, como os de ocupação do solo ou de custos reclassificados, uma vez que preserva os valores originais sem introduzir interpolações. Os métodos *Bilinear*, *Cubic* e *Lanczos* são adequados para dados contínuos, como modelos digitais de elevação, oferecendo progressivamente maior suavização e qualidade de interpolação à custa de maior custo computacional. O *raster* reamostrado mantém a projeção original e é automaticamente carregado no projeto, assegurando continuidade no fluxo de trabalho.

A terceira funcionalidade, *Clip Raster to Area*, tem como principal objetivo a otimização do processamento através da redução da extensão espacial dos *rasters*. Esta ferramenta permite recortar um *raster* a uma área de interesse definida por uma camada vetorial de pontos, tipicamente representando a origem e o destino do traçado. Ao limitar a área de análise, reduz-se substancialmente o número de células a processar, acelerando todas as operações posteriores, incluindo o cálculo dos fatores de custo e do LCP. Esta funcionalidade pode ser aplicada em diferentes momentos do fluxo de trabalho, embora a abordagem mais eficiente consista em recortar os *rasters* base numa fase inicial, de forma a beneficiar todas as etapas subsequentes.

A interface disponibiliza três modos de recorte, selecionáveis através de botões de opção: *Clip in X and Y*, que recorta o *raster* em ambas as dimensões; *Clip in X only*, que limita apenas a extensão horizontal; e *Clip in Y only*, que limita apenas a extensão vertical. Esta flexibilidade permite adaptar o recorte à geometria específica do traçado em análise, por exemplo, para traçados predominantemente horizontais, o recorte em X pode ser suficiente para reduzir significativamente a área de processamento sem comprometer a margem de exploração vertical. Para garantir robustez, é aplicado automaticamente um *buffer* de segurança em torno da área definida pelos pontos, assegurando que existe margem suficiente para a exploração de caminhos alternativos pelo algoritmo de traçado. O *raster* resultante preserva todas as propriedades espaciais do *raster* original e, opcionalmente, a sua simbologia cartográfica, sendo integrado automaticamente no projeto QGIS.

No seu conjunto, estas funções auxiliares contribuem para um fluxo de trabalho mais eficiente, flexível e controlado, permitindo adaptar os dados espaciais às necessidades específicas de cada análise e reduzindo significativamente os tempos de processamento, sem comprometer a coerência metodológica do modelo implementado.

4.4.2 Cálculo do *least cost path*

O separador *LCP*, ilustrado na Figura 4.8, constitui o módulo central da plataforma, integrando todos os fatores de custo previamente calculados e determinando o traçado ótimo do gasoduto entre dois pontos. Este módulo divide-se em duas etapas funda-

mentais: a combinação ponderada dos rasters de custo individuais num raster de custo total, e o cálculo propriamente dito do caminho de menor custo utilizando algoritmos especializados do GRASS GIS.

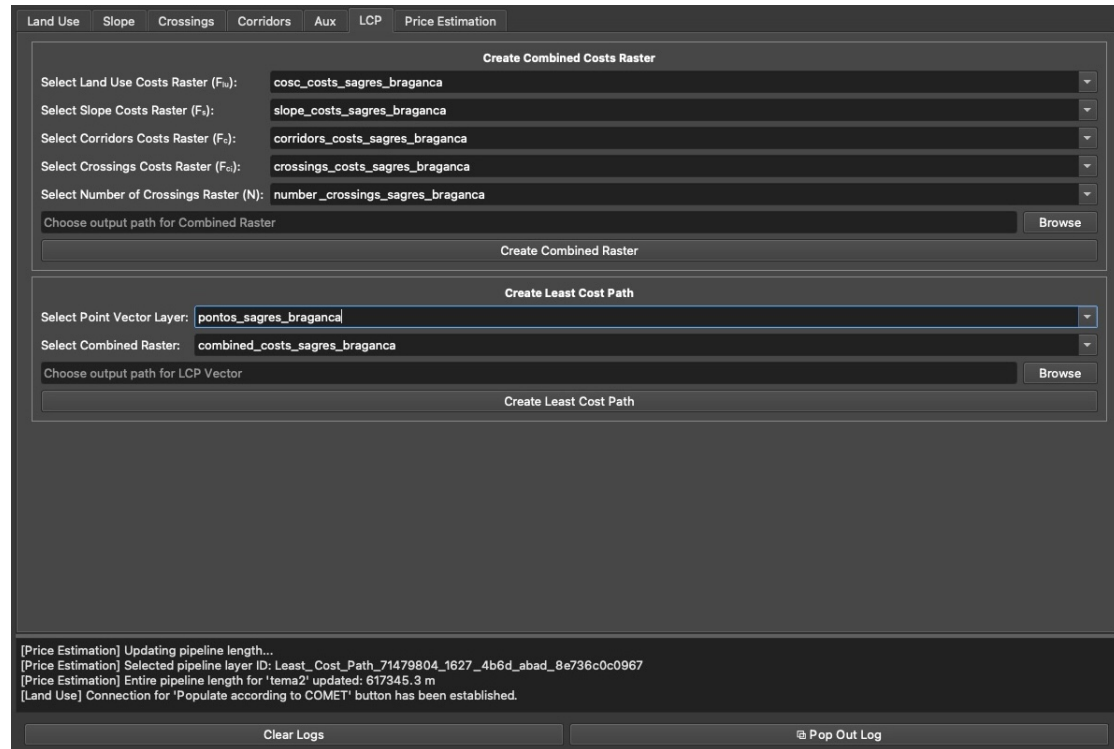


Figura 4.8: Interface do separador LCP mostrando a combinação multicritério ponderada e o cálculo do caminho de menor custo.

O cálculo do caminho de menor custo constitui o núcleo do sistema desenvolvido, integrando os diferentes fatores de custo previamente estimados e determinando o traçado ótimo do gasoduto entre dois pontos. Este módulo organiza-se em duas etapas principais: a combinação ponderada dos *rasters* de custo individuais num *raster* de custo total e o cálculo do percurso ótimo com base nesse *raster*.

No primeiro bloco da interface, *Create Combined Costs Raster*, o utilizador seleciona cinco camadas de entrada: os quatro *rasters* de fatores de custo correspondentes à ocupação do solo (F_{lu}), declive (F_s), corredores (F_c) e cruzamentos (F_{ci}), e ainda o *raster* do número de cruzamentos por célula (N), previamente gerado no separador *Crossings*. A seleção de qualquer uma destas camadas é opcional, caso não seja fornecida, o fator correspondente é tratado como neutro, assumindo o valor constante 1,0, e é registado um aviso na caixa de logs. Esta flexibilidade permite executar análises parciais sem que a ausência de um fator bloqueie o processamento.

A combinação dos fatores de custo segue a fórmula multiplicativa do modelo COMET:

$$C_{cell} = F_c \times F_s \times [F_{lu} \times (1 - 0,1 \cdot N) + 0,1 \cdot N \times F_{ci}] \quad (4.1)$$

Esta formulação, detalhada no Capítulo 3, pondera a contribuição relativa do fator de uso do solo e do fator de cruzamento em função da densidade de infraestruturas na célula, expressa por N . Para garantir estabilidade numérica da fórmula, nomeadamente para evitar coeficientes negativos no termo F_{lu} , o valor de N é limitado a um máximo de 10.

A combinação multicritério requer que todos os *rasters* de entrada partilhem a mesma grelha espacial. Caso sejam detetadas incompatibilidades de resolução ou extensão, é efetuado automaticamente um processo de alinhamento espacial, reamostrado cada *raster* para a resolução e extensão do *raster* de referência (o primeiro *raster* válido selecionado). Este alinhamento garante correspondência pixel-a-pixel entre todas as camadas, condição necessária para a aplicação correta da fórmula. Após o alinhamento, a fórmula é aplicada de forma vetorizada sobre a totalidade da grelha, garantindo eficiência computacional mesmo para *rasters* de grande dimensão. O *raster* de custo total resultante é preparado para utilização nos algoritmos de traçado, garantindo valores mínimos estritamente positivos para evitar problemas numéricos nos algoritmos GRASS GIS.

No segundo bloco da interface, *Create Least Cost Path*, o utilizador seleciona uma camada vetorial de pontos contendo, pelo menos, a origem e o destino do traçado, e o *raster* de custo combinado previamente gerado. O cálculo do percurso ótimo é realizado através de uma cadeia de quatro algoritmos especializados do GRASS GIS, executados sequencialmente: `r.cost`, `r.drain`, `r.thin` e `r.to.vect`.

Numa primeira fase, o algoritmo `r.cost` calcula, a partir do ponto de origem, uma superfície de custo acumulado que representa o custo mínimo necessário para alcançar cada célula da grelha. A propagação tem em conta o custo local de travessia de cada célula e suporta movimentos diagonais entre células adjacentes, o que aumenta a fidelidade geométrica do traçado resultante. Em paralelo, é gerada uma superfície de direções que codifica, para cada célula, o sentido de propagação do custo ótimo.

Na fase seguinte, o algoritmo `r.drain` utiliza estas duas superfícies para extrair o caminho de menor custo a partir do ponto de destino, seguindo o gradiente descendente da superfície de custo acumulado até à origem, obtendo assim o percurso globalmente ótimo. O resultado é um *raster* binário que marca as células pertencentes ao traçado. Antes da conversão para formato vetorial, este traçado raster é processado pelo algoritmo `r.thin`, que garante a propriedade topológica de largura unitária. Em determinadas configurações da superfície de custo, o `r.drain` pode produzir traçados com células adjacentes preenchidas em paralelo, formando faixas de largura superior a um pixel; esta condição provoca erros do tipo *crowded cell* no passo seguinte, que exige um traçado estritamente esquelético. Na maioria dos casos o `r.thin` não altera o traçado de forma perceptível, limitando-se a assegurar esta propriedade topológica. Por fim, o

algoritmo `r.to.vect` converte o traçado raster afinado numa geometria vetorial linear, adequada para visualização cartográfica e para utilização no módulo de estimativa económica.

A utilização combinada destes quatro algoritmos do GRASS GIS constitui uma abordagem robusta e eficiente para o cálculo de caminhos ótimos, sendo amplamente aplicada no planeamento de infraestruturas lineares e noutras áreas de análise espacial. No contexto deste trabalho, esta metodologia permite integrar de forma consistente múltiplos critérios espaciais e produzir um traçado tecnicamente fundamentado para o transporte de CO_2 .

4.4.3 Estimativa económica

O separador *Price Estimation*, ilustrado nas Figuras 4.9 e 4.10, implementa o modelo de estimativa económica descrito no Capítulo 3, permitindo calcular o custo de construção do gasoduto com base no traçado calculado pelo LCP e nas características do terreno atravessado. Este módulo representa a componente económica da análise, complementando a abordagem espacial com quantificação financeira.

Land Use Slope Crossings Corridors Aux LCP Price Estimation

① This submenu estimates the total pipeline investment cost (I_{total}) based on the selected pipeline vector and cost rasters.

The pipeline diameter (D) is calculated once using the full pipeline length and the Darcy-Weisbach equation — it is constant along the entire pipeline.

If the pipeline is 150 km or less, a single segment cost I_s is calculated. If longer, the pipeline is split into segments of up to 150 km, each with its own I_s , and a booster station (I_b) is added between each pair of consecutive segments.

Show Calculation Formulas

Select Cost Rasters and Vector	Equation Input Variables
Select Pipeline Vector: <code>lcp_sagres_braganca</code>	Pipeline Length (L , in m): 618742.72
Select Land Use Costs Raster (F_{lu}): <code>cosc_costs_sagres_braganca</code>	Standardized Cost Factor (B_c , in €/m ³): 1357
Select Slope Costs Raster (F_s): <code>slope_costs_sagres_braganca</code>	Friction Factor (λ): 0.015
Select Corridors Costs Raster (F_c): <code>corridors_costs_sagres_braganca</code>	CO2 Mass Flow Rate (M , in kg/s): 63
Select Crossings Costs Raster (F_{ci}): <code>crossings_costs_sagres_braganca</code>	CO2 Density (ρ , in kg/m ³): 827
Select Infrastructure Vector (for N): <code>crossings_vector</code>	Admissible Pressure Drop ($\Delta p/L$, in MPa/km): 0.02
Land Use Costs Resolution: ~10.0 m	
Slope Costs Resolution: ~25.0 m	
Corridors Costs Resolution: ~10.0 m	
Crossings Costs Resolution: ~10.0 m	

Calculation Mode

- ☒ Precise (Cell-based with resampling)
- ☐ Fast (Segment-based with point sampling)

Calculate pipeline price

Clear Logs Pop Out Log

Figura 4.9: Interface do separador *Price Estimation* mostrando a seleção de rasters de custo e parâmetros físicos do gasoduto.

A interface do módulo de estimativa económica encontra-se organizada em três blocos principais. O bloco *Select Cost Rasters and Vector* permite ao utilizador seleccionar: o vetor do traçado LCP previamente calculado; os quatro *rasters* de custo correspondentes aos fatores espaciais considerados (F_{lu} , F_s , F_c e F_{ci}); e um vetor de infraestruturas

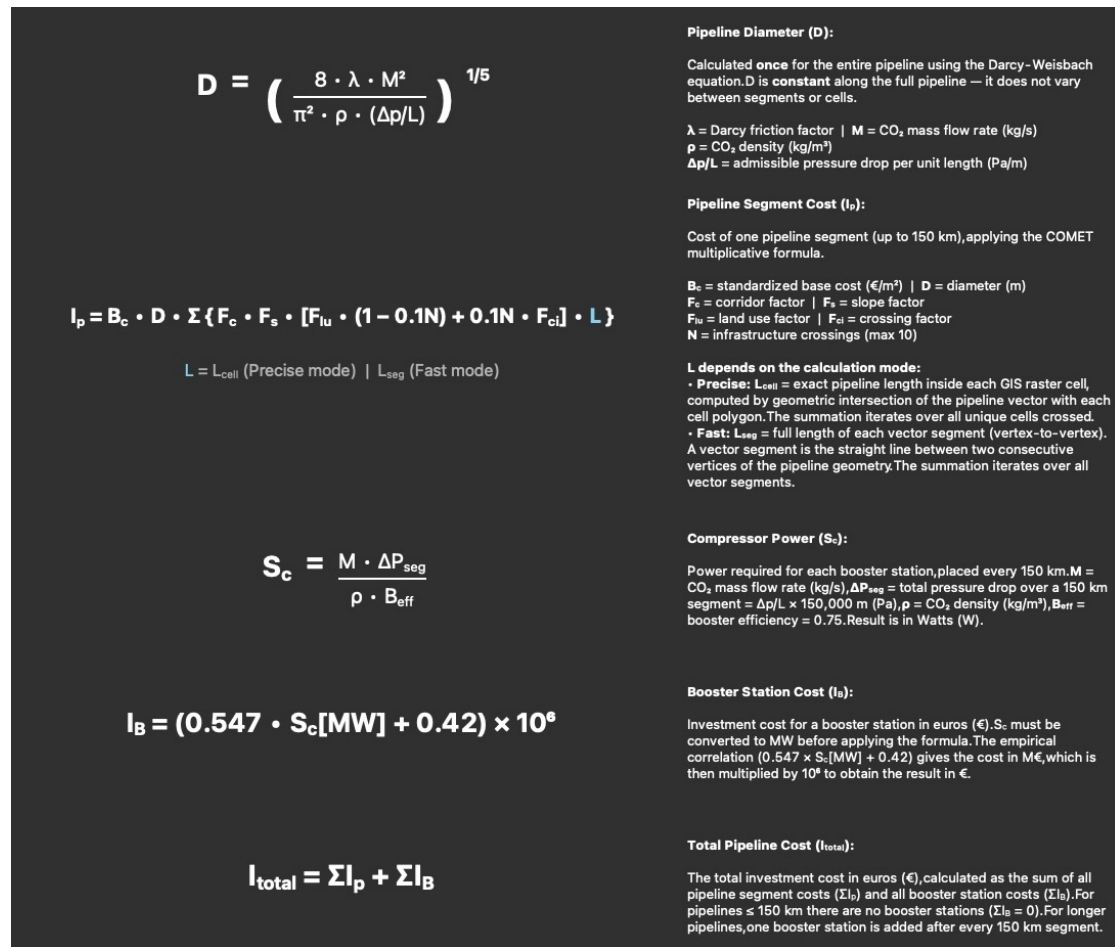


Figura 4.10: Diálogo auxiliar apresentando as fórmulas de cálculo económico: diâmetro, custo de segmento, potência do compressor, custo de booster e custo total.

lineares utilizado para contabilizar o número de cruzamentos (N). Para cada *raster* selecionado, a interface apresenta automaticamente a respetiva resolução espacial, extraída dos seus metadados, permitindo ao utilizador verificar as diferenças de escala entre as camadas.

O segundo bloco, *Equation Input Variables*, disponibiliza os campos numéricos necessários à parametrização física e económica do modelo. Estes campos são pré-preenchidos com valores de referência e incluem: o comprimento total do gasoduto (calculado automaticamente a partir do vetor LCP e apresentado em modo apenas-leitura), o fator de custo padronizado B_c (1357 €/m²), o fator de fricção de Darcy λ (0,015), a taxa de fluxo mássico de CO₂ M (cujo valor varia consoante o cenário de transporte considerado), a densidade do CO₂ ρ (827 kg/m³) e a queda de pressão admissível por unidade de comprimento $\Delta p/L$ (0,02 MPa/km). As referências destes valores encontram-se detalhadas na Secção 3.4 do Capítulo 3. O botão *Show Calculation Formulas* abre um diálogo auxiliar que apresenta, de forma explícita, todas as equações utilizadas no cálculo económico.

O terceiro bloco, *Calculation Mode*, permite ao utilizador escolher entre dois modos de cálculo através de botões de opção: o modo *Precise (Cell-based with resampling)*, selecionado por defeito, e o modo *Fast (Segment-based with point sampling)*. A escolha do modo determina a abordagem de amostragem espacial utilizada na extração dos fatores de custo ao longo do traçado, conforme descrito em detalhe nos parágrafos abaixo.

Um aspeto central da implementação prende-se com a abordagem de amostragem espacial adotada para a extração dos fatores de custo ao longo do traçado. Em ambos os modos, o algoritmo percorre o traçado vetorial **segmento a segmento**, entendendo-se por segmento o troço reto entre dois vértices consecutivos da geometria vetorial do LCP (não confundir com os segmentos de gasoduto de 150 km utilizados para o cálculo de I_p e das estações de reforço). Um único segmento de 150 km é tipicamente composto por milhares destes segmentos vetoriais vértice-a-vértice, cuja dimensão depende da resolução do traçado gerado pelo algoritmo de traçado. A diferença entre os modos reside na forma como os fatores de custo são extraídos e como o comprimento associado a cada unidade de cálculo é determinado.

No **modo Preciso**, todos os *rasters* de custo são previamente reamostrados para uma grelha espacial comum, utilizando o primeiro *raster* válido selecionado como referência de resolução. Após o alinhamento, para cada segmento vetorial é aplicado o algoritmo de Bresenham para identificar todas as células da grelha reamostrada que são atravessadas por esse segmento. Para cada célula identificada, o comprimento exato do traçado no seu interior (L_{cell}) é calculado por interseção geométrica entre o segmento vetorial e o polígono da célula. Os valores dos fatores de custo (F_{lu} , F_s , F_c , F_{ci}) são lidos diretamente das respetivas matrizes reamostradas na posição de cada célula atravessada. O número de cruzamentos N é determinado contando, para cada célula, quantas *features* do vetor de infraestruturas intersectam simultaneamente o segmento do gasoduto e o interior dessa célula, sendo limitado a um máximo de 10. Os dados de cada célula única são acumulados ao longo de todos os segmentos, e o somatório final itera sobre as células únicas atravessadas.

No **modo Rápido**, proposto neste trabalho como alternativa mais eficiente ao modo Preciso, não é efetuada qualquer reamostragem dos *rasters*. Para cada segmento vetorial, são gerados cinco pontos de amostragem distribuídos ao longo do seu comprimento, nas posições relativas 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 e 1,0 (correspondendo ao início, três pontos intermédios equidistantes e ao fim do segmento). Em cada um destes pontos, os valores de F_{lu} , F_s , F_c e F_{ci} são obtidos por consulta pontual direta aos *rasters* na sua grelha nativa, preservando a resolução original de cada camada sem qualquer interpolação. Para cada fator e para cada segmento, é retido o valor máximo entre os cinco pontos amostrados, adotando uma abordagem conservadora que representa o pior cenário de custo ao longo desse troço. O comprimento do segmento (L_{seg}) é calculado diretamente a partir da geometria vetorial. O número de cruzamentos N é determinado

contando quantas *features* do vetor de infraestruturas intersectam o segmento vetorial do gasoduto, sem distinção por célula.

Em ambos os modos, caso algum *raster* de custo não seja selecionado, o fator correspondente é tratado como neutro, assumindo o valor constante 1,0, e é registado um aviso no painel de *logs*, comportamento coerente com o módulo de cálculo da superfície de custos do LCP. Da mesma forma, caso o vetor de infraestruturas não seja fornecido, N é assumido como 1, preservando a contribuição do fator F_{ci} na fórmula multiplicativa (ao contrário de $N = 0$, que o anulava completamente). O parâmetro de entrada para a queda de pressão é $\Delta p/L$ (em MPa/km), convertido internamente para Pa/m, parâmetro físico diretamente conhecido e independente do comprimento do gasoduto. O diâmetro D é calculado uma única vez para todo o traçado com base neste valor, conforme a Equação 3.2, sendo constante ao longo de toda a infraestrutura.

Ao acionar o botão *Calculate pipeline price*, inicia-se o processo de estimativa económica. Em primeiro lugar, o diâmetro do gasoduto é calculado uma única vez para todo o comprimento do traçado, garantindo um diâmetro constante ao longo de toda a infraestrutura. Em seguida, o traçado é segmentado em troços com comprimento máximo de 150 km. Se o comprimento total do gasoduto for inferior a este valor, calcula-se um único custo de segmento I_p ; caso contrário, o traçado é dividido em múltiplos segmentos sucessivos, e é adicionada uma estação de reforço entre cada par de segmentos consecutivos. Para cada segmento, percorrem-se todas as unidades de cálculo (células no modo Preciso, segmentos vetoriais no modo Rápido) que o compõem, aplicando a fórmula multiplicativa do modelo COMET e acumulando os comprimentos correspondentes. Sempre que o comprimento acumulado excede 150 km, é calculada a potência necessária para a estação de reforço e o respetivo custo de investimento I_B . O custo total do gasoduto resulta do somatório de todos os custos de segmentos e de todas as estações de reforço, conforme expresso na Equação 3.5.

Os resultados do cálculo são apresentados de forma progressiva no painel de *logs* da aplicação. Para cada segmento são indicados o respetivo comprimento e custo I_p ; sempre que é adicionada uma estação de reforço, o custo I_B é explicitamente reportado; no final, são apresentados o diâmetro calculado D e o custo total do gasoduto I_{total} em euros.

RESULTADOS

Este capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos com a plataforma desenvolvida, com particular enfoque na validação do modelo de estimativa económica do traçado de gasodutos de CO_2 . O principal objetivo desta análise é avaliar se os custos estimados pela aplicação se encontram em ordens de grandeza compatíveis com custos observados em casos de estudo reais, garantindo assim a plausibilidade técnica e económica dos resultados produzidos.

Para esse efeito, recorreu-se à comparação com um conjunto de gasodutos de CO_2 existentes ou em planeamento, referenciados na literatura e recomendados pela entidade proponente, para os quais estão disponíveis dados consolidados de comprimento, diâmetro, capacidade de transporte e custo de investimento. Estes casos de estudo reais servem como referência externa e independente, permitindo contextualizar os resultados do modelo desenvolvido e aferir o seu comportamento face a projetos reais.

A utilização de projetos reais como base de comparação permite avaliar se os custos estimados pelo modelo se situam em ordens de grandeza compatíveis com infraestruturas efetivamente construídas ou planeadas, reduzindo o risco de validações exclusivamente teóricas. Esta abordagem possibilita ainda aferir a capacidade do modelo em reproduzir tendências globais de custo associadas a parâmetros-chave, como o comprimento do gasoduto, o diâmetro e o caudal de CO_2 transportado.

Importa salientar que o objetivo desta comparação não é a reprodução exata dos custos individuais de cada projeto real. Os projetos reais refletem condições técnicas, construtivas e económicas específicas, incorporando fatores difíceis de modelar explicitamente ou cujos dados não se encontram disponíveis de forma sistemática, nomeadamente custos de servidão e expropriação, condicionantes geotécnicas locais, constrangimentos ambientais e patrimoniais, e contingências associadas a práticas construtivas específicas. O foco reside, antes, na verificação da consistência global dos resultados e na demonstração de que a plataforma desenvolvida produz estimativas economicamente

coerentes e tecnicamente defensáveis, adequadas ao apoio ao planeamento preliminar de redes de transporte de CO₂.

A análise dos resultados estrutura-se em três secções. Na Secção 5.1, caracterizam-se os casos de estudo reais de gasodutos de CO₂ existentes ou em planeamento, que servirão como referência externa para a validação do modelo. Na Secção 5.2, aplicam-se os algoritmos e modelos desenvolvidos a um conjunto de cenários nacionais representativos do território português, obtendo-se traçados otimizados e estimativas económicas correspondentes. Por fim, na Secção 5.3, procede-se à comparação sistemática entre os resultados dos cenários nacionais e os casos de referência reais, avaliando a plausibilidade técnica e económica das estimativas produzidas pela plataforma.

5.1 Casos de estudo reais

Os casos de estudo seleccionados incluem o gasoduto operacional Cortez (Estados Unidos) o gasoduto Weyburn (Canadá) bem como os gasodutos Quest (Canadá) e Qinshui (China), ambos em fase de planeamento. Os valores de diâmetro, comprimento, capacidade e custo de investimento (CAPEX) foram recolhidos a partir do artigo de [Noothout et al. \(2014\)](#). Os casos de estudo foram recomendados pela entidade proponente.

Uma questão metodológica relevante prende-se com a consistência temporal dos custos. O modelo de estimativa económica implementado nesta dissertação baseia-se na formulação do modelo TIMES-COMET, cujos parâmetros de custo de referência se encontram expressos em euros de 2010 (€/2010). Os custos de investimento reportados em [Noothout et al. \(2014\)](#) correspondem ao ano de construção de cada gasoduto. Para assegurar coerência com a base monetária do modelo, estes valores foram ajustados a euros de 2010 em duas etapas: primeiro, aplicação do índice de preços ao consumidor do [U.S. Bureau of Labor Statistics \(2024\)](#) para deflacionar cada custo do ano de construção até 2010; depois, conversão para euros à taxa de câmbio média anual de 2010 (1 EUR = 1,326 USD). Todos os valores de CAPEX apresentados na Tabela 5.1 estão assim expressos em euros de 2010 (M€/2010), garantindo que a comparação entre estimativas do modelo e custos observados é realizada numa base monetária homogênea.

Importa salientar que esta conversão tem um carácter metodológico e não pretende atualizar os custos reais para valores atuais, mas sim alinhar todos os valores com a base económica do modelo utilizado. Deste modo, os resultados obtidos refletem a coerência interna do modelo e permitem avaliar se as estimativas produzidas pela aplicação se situam dentro de ordens de grandeza compatíveis com infraestruturas reais, quando expressas na mesma base monetária.

A Tabela 5.1 apresenta um resumo dos principais parâmetros considerados para cada

caso de estudo, incluindo o comprimento do gasoduto, o diâmetro, o caudal mássico de CO_2 e o custo de investimento ajustado para euros de 2010.

Tabela 5.1: *Características técnicas e custos de investimento dos gasodutos de CO_2 considerados como casos de estudo*

Gasoduto	Diâmetro (mm)	Comprimento (km)	Fluxo (kg/s)	CAPEX (M€/2010)
Cortez	762	808	761	1193
Weyburn	305–365	330	63	39
Quest	324	84	38	100
Qinshui	152	116	16	32

Estes casos de estudo constituem assim uma referência externa fundamental para a análise dos resultados apresentados na secção seguinte, permitindo enquadrar os custos estimados pela plataforma desenvolvida no contexto de projetos reais de transporte de CO_2 .

5.2 Cenários nacionais

Após a caracterização dos casos de estudo reais utilizados como referência externa, que constituem a referência externa fundamental para a validação posterior do modelo, procede-se nesta secção à aplicação da plataforma desenvolvida a um conjunto de cenários nacionais, definidos especificamente para avaliar o seu comportamento em contextos espaciais representativos do território português. O objetivo principal desta análise é demonstrar a capacidade da ferramenta em gerar traçados otimizados e estimativas económicas coerentes em situações de planeamento preliminar, nas quais não existe um gasoduto previamente definido.

5.2.1 Definição dos cenários e traçados ótimos

Foram definidos quatro cenários nacionais com diferentes extensões espaciais e caudais de CO_2 , de modo a avaliar o comportamento da plataforma em contextos de curta, média e longa distância, bem como analisar o impacto do caudal transportado nos resultados económicos. Os caudais considerados (38, 63 e 761 kg/s) e as gamas de comprimento (60 a 619 km) foram selecionados por referência aos casos reais apresentados na Secção 5.1, garantindo representatividade operacional e permitindo contextualizar os resultados obtidos face a projetos reais posteriormente.

A seleção dos pares origem-destino obedeceu a uma lógica de representatividade geográfica e industrial do território português. O cenário C1 (Leiria–Coimbra) representa um corredor de curta distância entre dois nós do litoral centro, com topografia relativamente homogênea, adequado para verificar o comportamento da plataforma em

condições de menor complexidade espacial. Os cenários C2 e C3 (Sines–Leiria) reproduzem um corredor industrialmente relevante, partindo de um dos principais clusters emissores nacionais identificados na literatura ([Clean Air Task Force, 2024](#)). A partilha do mesmo traçado por C2 e C3, diferindo exclusivamente no caudal de transporte, foi intencional, permitindo isolar o efeito do débito sobre o diâmetro calculado e o CAPEX sem introduzir variação na componente geoespacial. O cenário C4 (Sagres–Bragança) foi concebido como caso de maior exigência, aproximando-se do comprimento máximo viável em Portugal continental e atravessando quatro unidades geomorfológicas distintas: planície costeira algarvia, planície alentejana, cordilheira central e planalto transmontano. Esta heterogeneidade espacial maximiza a diversidade dos fatores de custo ao longo do traçado e a exigência computacional associada ao cálculo do LCP, pelo que os resultados obtidos para C4 constituem um limite superior em termos de erro e tempo de processamento. Traçados mais curtos ou geomorfologicamente mais homogêneos são expectavelmente tratados com desempenho igual ou superior.

Para cada cenário, o traçado foi determinado através do algoritmo LCP, com base num *raster* de custos combinados resultante da integração dos fatores de uso do solo, declive, corredores existentes e travessias de infraestruturas, de acordo com a metodologia definida no Capítulo 3. Os dados geográficos foram utilizados na sua resolução nativa, com recorte à área de interesse, sem aplicação de reamostragem, e a estimativa económica foi realizada recorrendo ao modo de cálculo preciso. Esta configuração constitui a referência base para os cenários analisados, relativamente à qual são posteriormente avaliados os impactos da redução de resolução e modo de cálculo da estimativa económica. A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros de entrada e os principais resultados obtidos para cada cenário.

Tabela 5.2: Definição dos cenários nacionais e resultados do traçado ótimo

Cenário	Origem	Destino	Fluxo (kg/s)	Comprimento (km)	Diâmetro (mm)	CAPEX (M€/2010)
C1	Leiria	Coimbra	38	60	254	23
C2	Sines	Leiria	38	237	254	90
C3			63		311	110
C4	Sagres	Bragança	761	619	843	778

Note-se que os cenários C2 e C3 partilham exatamente o mesmo traçado, diferindo apenas no caudal considerado, pelo que as diferenças entre estes cenários se manifestam exclusivamente na estimativa económica, nomeadamente no diâmetro calculado e no CAPEX resultante. Os traçados obtidos para os três percursos distintos são apresentados nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3.

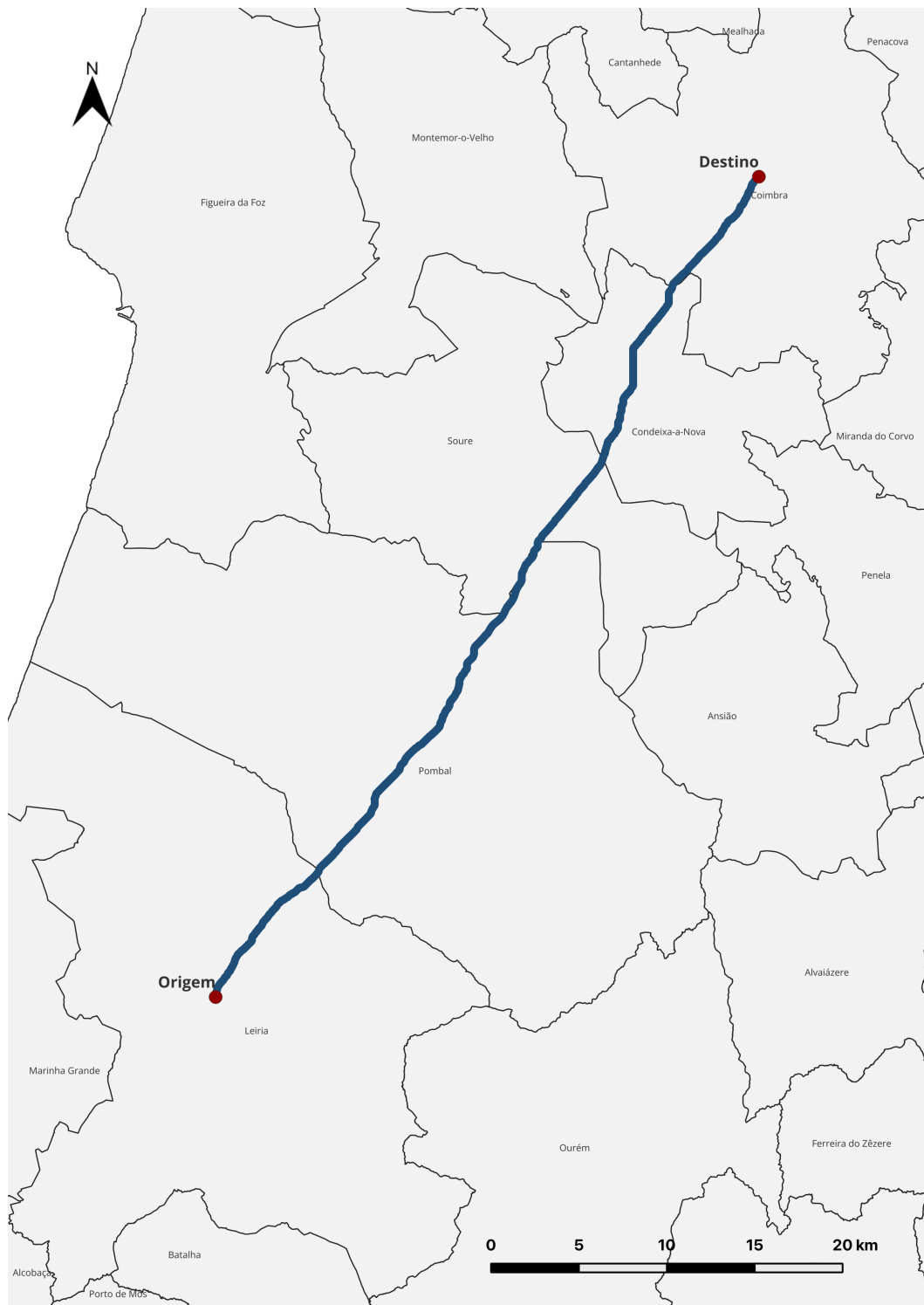


Figura 5.1: Traçado ótimo para o cenário C1 (Leiria–Coimbra).



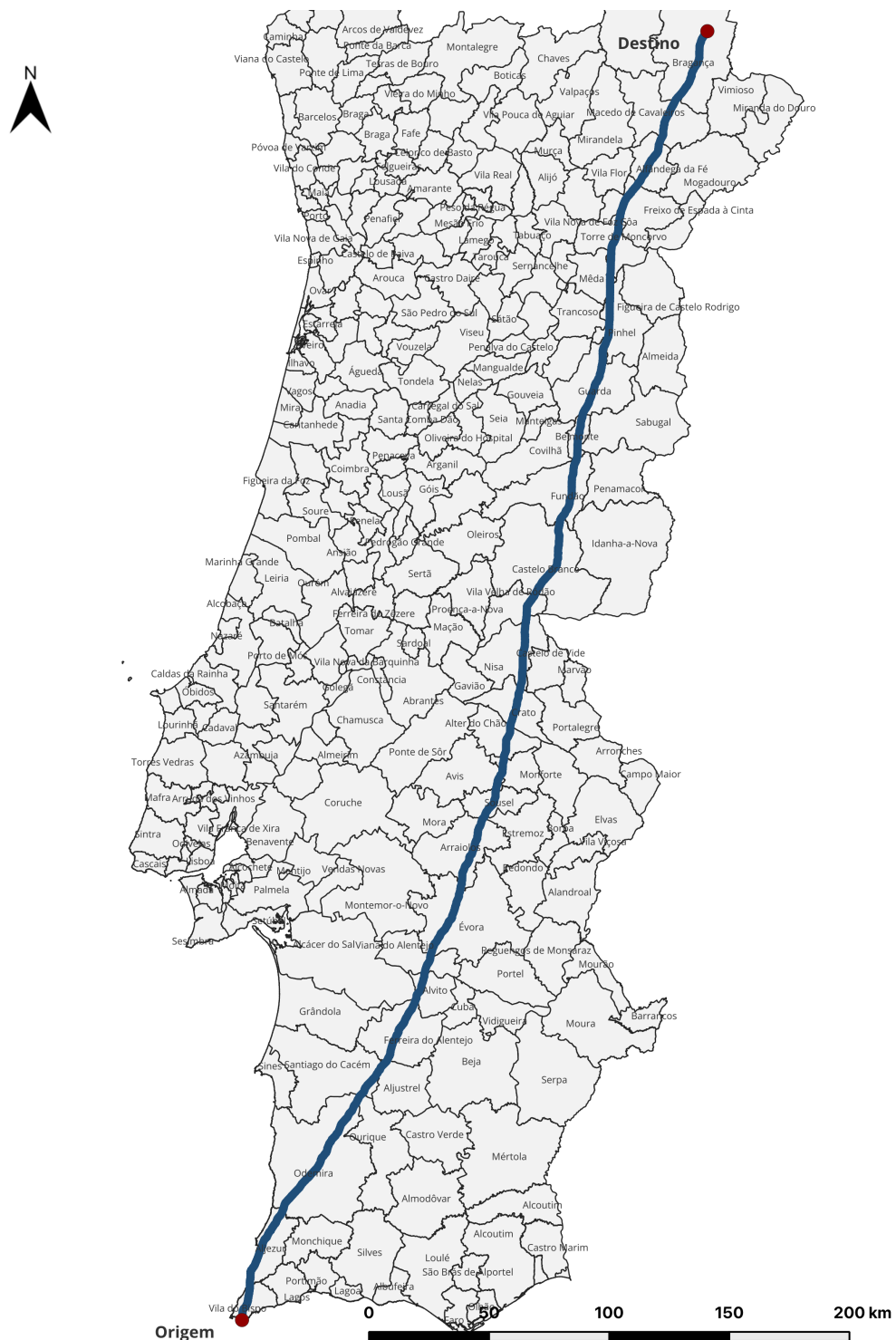


Figura 5.3: Traçado ótimo para o cenário C4 (Sagres–Bragança).

5.2.2 Análise detalhada do CAPEX

Conforme apresentado na Tabela 5.2, o custo total de investimento varia entre 23 M€ e 778 M€ consoante o cenário considerado. Para comprimentos superiores a 150 km, o traçado é dividido em múltiplos segmentos com estações de compressão intermédias, pelo que o CAPEX total resulta da soma do custo de cada segmento e das respetivas estações. A Tabela 5.3 apresenta a decomposição detalhada por cenário.

Tabela 5.3: CAPEX por segmento e estação de compressão

Cenário	Elemento	ID	CAPEX (M€/2010)	CAPEX Total (M€/2010)
C1	Segmento	S1	22,57	23
C2	Segmento	S1	57,13	90
	Booster	B1	0,52	
	Segmento	S2	32,65	
C3	Segmento	S1	69,93	110
	Booster	B1	0,59	
	Segmento	S2	39,97	
C4	Segmento	S1	187,19	778
	Booster	B1	2,43	
	Segmento	S2	188,00	
	Booster	B2	2,43	
	Segmento	S3	182,05	
	Booster	B3	2,43	
	Segmento	S4	188,14	
	Booster	B4	2,43	
	Segmento	S5	23,36	

O cenário C1, com apenas 60 km, não requer compressão intermédia, sendo o CAPEX integralmente determinado pelo custo do único segmento. Nos cenários C2 e C3, a extensão de 237 km implica a introdução de uma estação de compressão, sendo o custo superior no cenário C3 devido ao maior caudal transportado e ao consequente aumento do diâmetro. O cenário C4, com 619 km, exige quatro estações de compressão e cinco segmentos, apresentando o maior CAPEX total. Em todos os casos, o custo das estações de compressão representa uma parcela marginal do investimento total, sendo o custo dos segmentos de gasoduto o fator dominante.

5.2.3 Análise do desempenho

Com o objetivo de avaliar o impacto da reamostragem e do método de estimativa económica no desempenho computacional e nos resultados obtidos, foi realizado um teste específico com base no cenário C4 (Sagres–Bragança), por representar o caso de maior extensão espacial e o mais exigente do ponto de vista computacional. Todas as execu-

ções necessárias para conduzir o teste foram realizadas numa máquina com processador Apple M4 e 32 GB de memória RAM, sendo os tempos reportados a média de três execuções independentes.

Foram consideradas três configurações de resolução: (i) dados originais sem reamostragem, com resolução efetiva de 10 m¹; (ii) reamostragem do *raster* de custos combinados para 50 m, mantendo os dados de entrada na resolução original; e (iii) reamostragem de todos os dados de entrada para 50 m desde a fase inicial, a partir da qual todos os *rasters* de custo foram gerados nessa resolução. Para cada configuração, a estimativa económica foi calculada recorrendo a dois métodos: o método preciso, baseado em interseção geométrica célula a célula, e o método rápido, baseado em amostragem pontual ao longo do traçado.

Em todas as configurações, a reamostragem foi realizada pelo método do vizinho mais próximo (*nearest neighbour*), por ser o mais adequado para dados categóricos como o *raster* de uso do solo, uma vez que preserva os custos originais das classes sem introduzir interpolações artificiais entre categorias distintas. Para dados contínuos como o *raster* de declive, métodos interpolativos como o bilinear ou o cúbico poderiam ser considerados, mas o vizinho mais próximo foi mantido por consistência metodológica entre todas as camadas.

A Figura 5.4 apresenta os traçados obtidos para as três configurações de resolução, e a Tabela 5.4 resume os tempos de execução e os custos estimados para cada combinação de resolução e método de estimativa.

¹ O *raster* de declive foi gerado a partir de um DEM com resolução de 25 m, sendo os restantes dados de entrada nativamente a 10 m. O *raster* de custos combinados resultante foi produzido à resolução de 10 m.

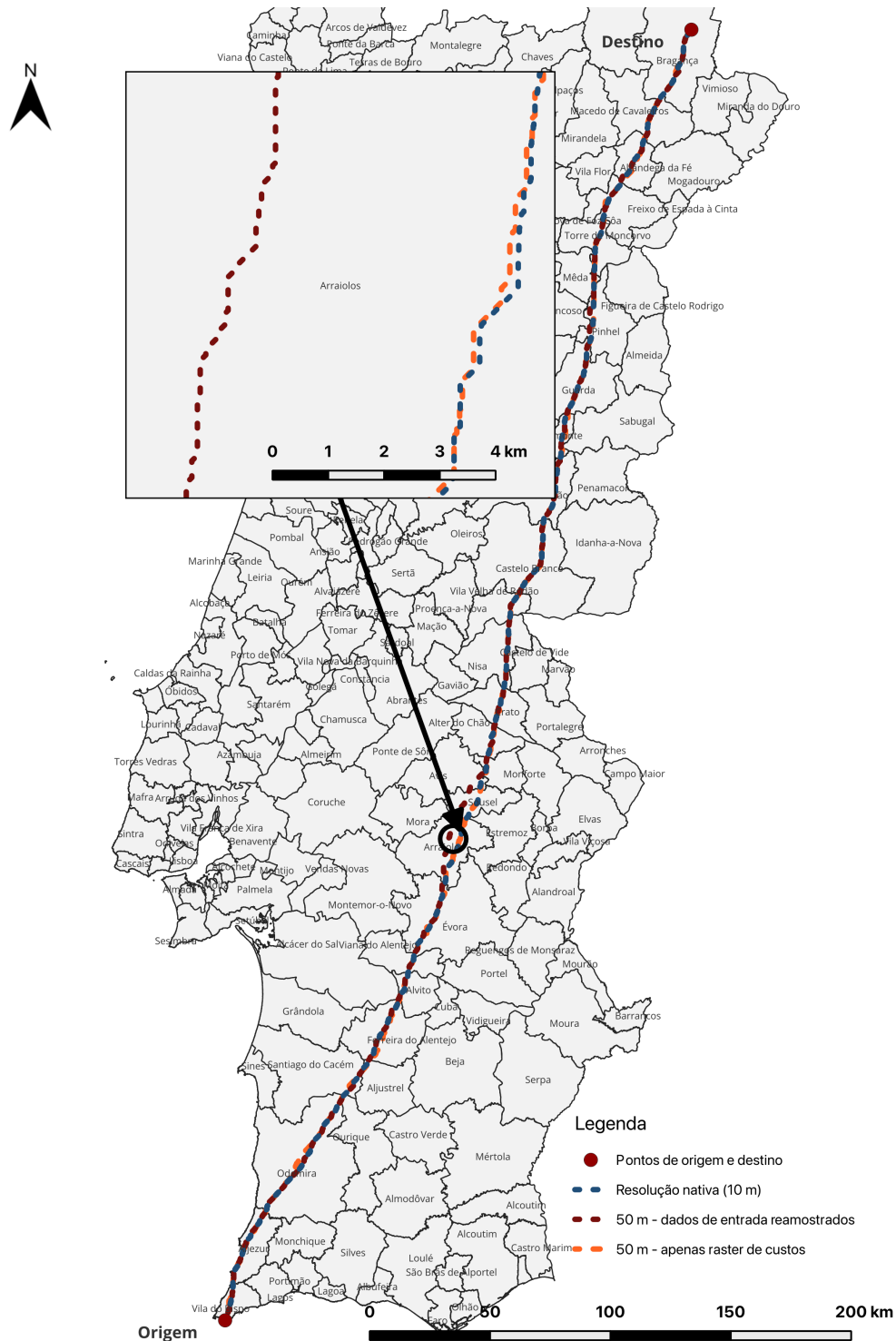


Figura 5.4: Comparação dos traçados ótimos para o cenário C4 (Sagres-Bragança): (i) traçado original sem reamostragem (linha azul tracejada); (ii) traçado obtido com reamostragem do raster de custos combinados para 50 m (linha laranja tracejada); (iii) traçado obtido com reamostragem completa dos dados de entrada para 50 m (linha vermelha tracejada). A escala do mapa, os três traçados apresentam-se sobrepostos na maior parte do percurso; o detalhe no canto superior esquerdo ilustra, a uma escala reduzida, as divergências locais entre traçados que, embora distribuídas ao longo do percurso, atingem desvios laterais da ordem de alguns quilómetros.

Tabela 5.4: Impacto do reamostragem e do método de estimativa no tempo de execução e no CAPEX estimado para o cenário C4

Caso	Resolução	Método CAPEX	Tempo LCP	Tempo CAPEX	CAPEX (M€/2010)
i	Resolução nativa (10 m)	Preciso	46 min	26 min 51 s	778
ii		Rápido		2 min 46 s	808
iii	Raster de custos combinados a 50 m	Preciso	1 min 33 s	24 min 12 s	799
iv		Rápido		51 s	842
v	Todos os dados de entrada a 50 m	Preciso	1 min 23 s	5 min 59 s	781
vi		Rápido		47 s	808

Os três traçados obtidos são globalmente coincidentes ao longo do percurso de 619 km, seguindo o mesmo corredor em toda a extensão do traçado. À escala do território, observam-se desvios locais de até alguns quilómetros entre as diferentes configurações, distribuídos ao longo do percurso. Na zona de Arraiolos, o traçado obtido com reamostragem completa dos dados de entrada (linha vermelha) apresenta um desvio mais pronunciado relativamente aos restantes dois, na ordem das dezenas de quilómetros, embora todos os traçados convirjam novamente para o mesmo corredor. Este resultado indica que a reamostragem não compromete a coerência geométrica do traçado obtido, mesmo quando aplicada a todos os dados de entrada.

Do ponto de vista computacional, os ganhos são muito expressivos. A reamostragem do raster de custos combinados para 50 m reduz o tempo de cálculo do traçado de 46 min para cerca de 1 min 33 s, uma redução de aproximadamente 97%. A utilização do método rápido de estimativa económica permite reduções adicionais muito significativas no tempo de estimativa do CAPEX, de 26 min 51 s para 2 min 46 s na resolução nativa, e de 5 min 59 s para 47 s com todos os dados a 50 m. O impacto no CAPEX estimado é limitado, com desvios máximos da ordem dos 8% face ao caso de referência (caso i, método preciso), verificados no caso iv. Estes resultados demonstram que a combinação de reamostragem com o método rápido constitui uma opção eficaz para fases exploratórias ou análises de sensibilidade, permitindo obter estimativas coerentes em menos de 2 minutos no total.

5.3 Comparação com casos de referência

Nesta secção procede-se à comparação entre os resultados obtidos para os cenários nacionais na Secção 5.2 e os casos de estudo reais apresentados na Secção 5.1, com o objetivo de avaliar se as estimativas económicas produzidas se situam dentro de ordens de grandeza compatíveis com projetos reais de transporte de CO₂. Esta comparação constitui o principal exercício de validação externa do modelo implementado.

Os gasodutos de referência apresentam custos de investimento entre 32 M€ e 1193 M€ (€/2010), para comprimentos entre 84 km e 808 km e caudais entre 16 kg/s e 761 kg/s. Os cenários nacionais analisados produzem estimativas entre 23 M€ e 778 M€ (€/2010), para comprimentos entre 60 km e 619 km e caudais dentro da mesma gama. Esta pro-

ximidade em termos de ordem de grandeza sugere que o modelo produz resultados plausíveis em contextos espaciais distintos, mantendo coerência com valores observados na prática.

A comparação por pares de caudal idêntico reforça esta conclusão, já que cada cenário nacional partilha a sua capacidade de transporte com um dos gasodutos de referência. O cenário C4 (Sagres–Bragança), com 619 km e um caudal de 761 kg/s, apresenta um CAPEX estimado de 778 M€. O gasoduto Cortez move exatamente o mesmo caudal ao longo de 808 km, a um custo de 1193 M€. Trata-se do caudal mais elevado de todo o conjunto, e ambos os projetos situam-se na mesma ordem de grandeza. A estimativa do C4 fica abaixo da do Cortez, o que é consistente com o seu traçado mais curto e com a ausência de fatores de custo específicos do contexto norte-americano.

O cenário C3 (Sines–Leiria), com 237 km e um caudal de 63 kg/s, apresenta um CAPEX de 110 M€. O gasoduto Weyburn transporta o mesmo caudal ao longo de 330 km, mas o seu custo reportado é de apenas 39 M€. Esta diferença não traduz uma inconsistência do modelo. O valor do Weyburn reflete o reaproveitamento parcial de infraestrutura já existente, em vez de construção de raiz, o que o coloca como um caso atípico dentro do conjunto de referência. Face a gasodutos construídos integralmente de novo, a estimativa obtida para o C3 mantém-se numa gama razoável.

Por fim, o cenário C1 (Leiria–Coimbra), com 60 km e um caudal de 38 kg/s, apresenta um CAPEX estimado de 23 M€, bastante abaixo dos 100 M€ reportados para o gasoduto Quest, que move o mesmo caudal ao longo de 84 km. A diferença explica-se pelo terreno exigente do Quest, no norte de Alberta, e pela presença de instalações de processamento à superfície que o modelo COMET não contabiliza. Em valor absoluto, a estimativa do C1 aproxima-se mais da do gasoduto Qinshui (116 km, 16 kg/s, 32 M€), ainda que este último transporte um caudal inferior.

Importa salientar que o objetivo desta comparação não é reproduzir com exatidão os custos individuais de cada gasoduto, mas verificar se as estimativas produzidas se situam em ordens de grandeza coerentes com infraestruturas reais. Os projetos reais incorporam fatores difíceis de modelar explicitamente, como constrangimentos regulatórios, condições geotécnicas locais e variações temporais de preços. Ainda assim, a capacidade da plataforma em reproduzir ordens de grandeza realistas e tendências coerentes constitui um indicador robusto da validade do modelo para aplicações de planeamento preliminar.

Em síntese, a comparação com casos de referência demonstra que a plataforma desenvolvida produz estimativas de custo tecnicamente plausíveis e economicamente coerentes, adequadas ao apoio a estudos exploratórios e análises preliminares de redes de transporte de CO₂.

CONCLUSÃO

Este projeto teve como objetivo o desenvolvimento e validação de uma plataforma integrada para o apoio ao planeamento preliminar de redes de transporte de CO_2 , combinando análise espacial com um modelo de estimativa económica de custos de gasodutos. O trabalho procurou responder à necessidade de ferramentas que permitam avaliar, de forma coerente e acessível, soluções de traçado e ordens de grandeza de investimento em fases iniciais de tomada de decisão.

A plataforma integra um algoritmo de LCP aplicado a *rasters* de custo multi-critério, permitindo a determinação automática de traçados ótimos em função de fatores territoriais como uso do solo, declive, corredores existentes e travessias de infraestruturas. O modelo de estimativa económica, baseado na formulação TIMES-COMET, traduz os resultados geométricos e operacionais do traçado em custos de investimento (CAPEX), incluindo a consideração explícita de segmentos de gasoduto e estações de compressão intermédias. Dois modos de estimativa foram implementados: um modo preciso, baseado em interseção geométrica célula a célula, e um modo rápido, baseado em amostragem pontual, permitindo ao utilizador equilibrar precisão e eficiência computacional consoante a fase de estudo.

Os resultados obtidos para os cenários nacionais analisados demonstram um comportamento consistente do modelo, refletindo adequadamente o impacto do comprimento do traçado e do caudal transportado nos custos estimados. A comparação com casos de estudo reais de gasodutos de CO_2 confirmou a plausibilidade económica das estimativas, que se situam dentro da mesma ordem de grandeza dos custos observados em projetos reais. A análise de desempenho demonstrou que a reamostragem dos dados de entrada para 50 m reduz o tempo de cálculo do traçado em cerca de 97%, com desvios geométricos limitados e variações no CAPEX estimado da ordem dos 8%, tornando esta configuração particularmente adequada para fases exploratórias e análises de sensibilidade.

6.1 Contributos do trabalho

Os principais contributos deste projeto podem ser sintetizados nos seguintes pontos:

- Desenvolvimento de uma plataforma integrada e intuitiva que combina análise espacial e estimativa económica para o planeamento de gasodutos de CO_2 , implementada como *plugin* QGIS e disponibilizada em <https://github.com/rpintassilgo/qgis-co2-pipeline-routing>;
- Implementação de dois modos de estimativa económica (preciso e rápido), com avaliação quantitativa do compromisso entre precisão, tempo de processamento e impacto nos resultados;
- Validação da plausibilidade económica dos resultados através da comparação com casos de estudo reais de gasodutos de CO_2 ;
- Avaliação do impacto da reamostragem espacial no traçado obtido e nas estimativas de CAPEX, demonstrando a viabilidade de análises exploratórias com dados de resolução reduzida.

6.2 Trabalho futuro

A plataforma desenvolvida constitui uma implementação operacional do modelo COMET adaptada ao contexto geoespacial e institucional português, demonstrando a viabilidade de integrar otimização espacial e estimativa económica num ambiente SIG interativo. Ainda assim, identificam-se várias linhas de evolução que poderão reforçar a robustez analítica, a flexibilidade e o âmbito de aplicação da ferramenta, mantendo o enquadramento metodológico adotado.

Ao nível económico, uma extensão natural consiste na incorporação de componentes adicionais de modelação financeira. Para além da estimativa de CAPEX atualmente implementada, poderá ser integrada a componente de OPEX, nomeadamente custos energéticos associados às estações de compressão e custos anuais de operação e manutenção. A introdução de métricas como o custo nivelado de transporte por tonelada de CO_2 permitiria uma avaliação mais abrangente da viabilidade económica dos traçados. Adicionalmente, a parametrização da atualização monetária dos custos de referência, através da indexação a índices de inflação ou a índices setoriais da construção, reforçaria a aplicabilidade do modelo a diferentes anos-base e cenários prospetivos.

No domínio do planeamento de rede, uma evolução relevante consiste na extensão da abordagem atual, centrada em ligações ponto-a-ponto, para cenários com múltiplas fontes emissoras e múltiplos locais de armazenamento. Tal desenvolvimento permitiria aproximar a ferramenta de problemas de desenho de redes de transporte, avaliando potenciais economias de escala associadas à partilha de infraestruturas e à agregação de fluxos, em coerência com a lógica de clusterização adotada em estudos europeus de

referência.

Outra vertente de desenvolvimento prende-se com a realização sistemática de análises de sensibilidade. A avaliação do impacto da variação de parâmetros críticos, como a queda de pressão admissível, os fatores territoriais ou os pressupostos hidráulicos, permitiria quantificar a robustez dos traçados obtidos e apoiar decisões estratégicas em contextos de incerteza.

Ao nível da implementação técnica, o aumento da parametrização da ferramenta constitui igualmente uma linha de evolução prioritária. A possibilidade de configurar aspetos atualmente fixos, como a distância máxima entre estações de compressão, os coeficientes de custo associados às estações ou o método de reamostragem interno dos *rasters*, conferiria maior flexibilidade e adaptabilidade a diferentes contextos geográficos e operacionais.

Por fim, o reforço da robustez computacional e da validação automática de dados, incluindo verificação de sistemas de coordenadas entre camadas, gestão mais abrangente de exceções, contribuirá para aumentar a estabilidade da ferramenta em cenários de utilização mais exigentes e com dados heterogéneos.

Em conjunto, estas extensões permitirão consolidar a plataforma como um instrumento mais completo de apoio ao planeamento preliminar de infraestruturas de transporte de CO₂, preservando a coerência metodológica com o modelo COMET que fundamenta o presente trabalho.

BIBLIOGRAFIA

Agência para a Modernização Administrativa (2024). *dados.gov.pt — Portal de Dados Abertos da Administração Pública*. URL: <https://dados.gov.pt/pt/>.

Assembleia da República (2012). *Decreto-Lei n.º 60/2012 de 14 de março – Transpõe a Diretiva 2009/31/CE, relativa ao armazenamento geológico de dióxido de carbono*. Consultado em abril de 2025. URL: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/60-2012-553447>.

Barata, Joao et al. (2021). «Strategic Planning of Regions and Territories in Europe for Low Carbon Energy and Industry Through CCUS: The STRATEGY CCUS Project». Em: *SSRN Electronic Journal*. DOI: 10.2139/ssrn.3813515. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3813515.

Bresenham, Jack E. (1965). «Algorithm for computer control of a digital plotter». Em: *IBM Systems Journal* 4.1, pp. 25–30. DOI: 10.1147/sj.41.0025.

CIIMAR – Coastal Monitoring and Management Group (s.d.[a]). *DEM ALOS AW3D Portugal 25m (EPSG:3763)*. Modelo Digital de Elevação ALOS-AW3D reprojetoado para Portugal Continental. URL: http://gis.ciimar.up.pt/gisData/dems/dem_aw3d_pt_25m.tif.

CIIMAR – Coastal Monitoring and Management Group (s.d.[b]). *DEM ASTER Portugal 25m (EPSG:3763)*. Modelo Digital de Elevação do ASTER-GDEM reprojetoado para Portugal Continental. URL: http://gis.ciimar.up.pt/gisData/dems/dem_aster_pt_25m.tif.

Clean Air Task Force (2024). *Carbon Capture and Storage (CCS) in Portugal: Fact Sheet*. URL: <https://cdn.catf.us/wp-content/uploads/2024/04/16132012/ccs-portugal-fact-sheet.pdf>.

COMET Consortium (2013). *Integrated Infrastructure for CO₂ Transport and Storage in the West Mediterranean*. <https://cordis.europa.eu/project/id/241400/reporting>. Acesso em 21 de abril de 2025.

Copernicus Land Monitoring Service (2024). *CORINE Land Cover (CLC)*. URL: <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover>.

Copernicus Programme (2024). *Copernicus Data Space Ecosystem – Sentinel-2 Data Collection*. URL: <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-2>.

D, Tumara, Uihlein A e Hidalgo Gonzalez I (2024). *Shaping the future CO₂ transport network for Europe*. Anticipation and foresight, Scientific analysis or review. Petten (The Netherlands): The Joint Research Centre. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC136709>.

Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) (2024). *Armazenamento geológico de dióxido de carbono*. URL: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/geologia/petroleo-armazenamento-de-co2/armazenamento-geologico-de-dioxido-de-carbono/>.

Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) (2025). *Armazenamento geológico de dióxido de carbono — Publicitação de Áreas Atribuídas*. URL: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/geologia/petroleo-armazenamento-de-co2/publicitacao-areas-atribuidas/armazenamento-geologico-de-dioxido-de-carbono>.

Direção-Geral do Território (2022a). *Ficha de Produto - Carta de Ocupação e Uso do Solo Conjuntural (COSc), versão 20-12-2022*. URL: https://smos.dgterritorio.gov.pt/sites/default/files/documents/Ficha_de_produto_COSc_v_20-12-2022.pdf.

Direção-Geral do Território (2022b). *Ficha de Produto - Cartografia de Uso e Ocupação do Solo (v. 20-12-2022)*. URL: http://smos.dgterritorio.gov.pt/sites/default/files/documents/Ficha_de_produto_Cartografia_de_uso_e%20ocupacao_do_solo_v_20-12-2022.pdf.

Direção-Geral do Território (2024a). *Carta de Ocupação do Solo Conjuntural 2024 (pré-verão)*. <https://dados.gov.pt/pt/datasets/carta-de-ocupacao-do-solo-conjuntural-2024-pre-verao/>.

Direção-Geral do Território (2024b). *Legenda das classes temáticas da Carta de Ocupação e Uso do Solo Conjuntural 2024 (Pré-verão)*. URL: https://geo2.dgterritorio.gov.pt/wms/COSc_preverao?version=1.3.0&service=WMS&request=GetLegendGraphic&sld_version=1.1.0&layer=COSc2024-preverao&format=image/png&STYLE=default.

Direção-Geral do Território (2024c). *VI-SMOS - Visualizador do Sistema de Monitorização da Ocupação do Solo*. URL: <https://smos.dgterritorio.gov.pt/vi-smos/>.

Direção-Geral do Território (2025a). *Direção-Geral do Território – Portal Institucional*. <https://www.dgterritorio.gov.pt/>.

Direção-Geral do Território (2025b). *SRUP - Gasodutos e Oleodutos*. URL: <https://dados.gov.pt/pt/datasets/srup-gasodutos-e-oleodutos/>.

Ebrahimipour, Ahmadreza et al. (dez. de 2009). «Routing of Water Pipeline Using GIS and Genetic Algorithm». Em: *Journal of Applied Sciences* 9. doi: [10.3923/jas.2009.4137.4145](https://doi.org/10.3923/jas.2009.4137.4145).

Energy, U.S. Department of (2021). *Infrastructure Investment and Jobs Act: Carbon Management Provisions*. URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-12/FECM%20Infrastructure%20Factsheet.pdf>.

European Commission (2010). *COMET – Integrated infrastructure for CO₂ transport and storage in the West Mediterranean*. <https://cordis.europa.eu/project/id/241400>. FP7 Project, Community Research and Development Information Service (CORDIS).

Europeia, Comissão (2023). *Innovation Fund – Large-scale Calls*. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/calls-proposals/large-scale-calls_en.

Global CCS Institute (2021). *Unlocking Private Finance for CCS: Thought Leadership Report*. Em caso de URL inativo, pesquisar pelo título do relatório em globalccsinstitute.com. Global CCS Institute. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2025/08/Unlocking-Private-Finance-For-CCS-Thought-Leadership-Report-1-1.pdf>.

Global CCS Institute (dez. de 2024). *CO₂ Storage Permitting Process in the European Union: A Guide*. Rel. téc. Acesso em 27 de abril de 2026. Em caso de URL inativo, pesquisar pelo título do relatório em globalccsinstitute.com. Global CCS Institute. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2025/08/Permitting-in-Europe-Report-9.12-FINAL.pdf>.

Governo de Portugal (2024). *Governo vai dar um novo impulso às políticas de ação climática*. URL: <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc24/comunicacao/comunicado?i=governo-vai-dar-um-novo-impulso-as-politicas-de-acao-climatica>.

Great Plains Institute (2020). *Transporting CO₂ for Carbon Capture and Storage: Regional Infrastructure for Midcentury Decarbonization*. URL: https://www.betterenergy.org/wp-content/uploads/2020/06/GPI_RegionalCO2Whitepaper.pdf.

Gyabeng, Bernard (jun. de 2020). «Selection of Optimum Petroleum Pipeline Routes Using A Multi-Criteria Decision Analysis and GIS Least-Cost Path Approach». Em: *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)* 10, pp. 572–579. doi: [10.29322/IJSRP.10.06.2020.p10270](https://doi.org/10.29322/IJSRP.10.06.2020.p10270).

Infraestruturas de Portugal, S.A. (2024a). *Infraestruturas de Portugal*. URL: <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/>.

Infraestruturas de Portugal, S.A. (2024b). *Rede Ferroviária Nacional*. URL: <https://dados.gov.pt/pt/datasets/rede-ferroviaria-nacional/>.

Infraestruturas de Portugal, S.A. (2024c). *Rede Rodoviária Nacional*. URL: <http://dados.gov.pt/pt/datasets/rede-rodoviaria-nacional/>.

Institute, Global CCS (2023). *Global Status of CCS 2023*. Em caso de URL inativo, pesquisar pelo título do relatório em globalccsinstitute.com. URL: <https://status23.globalccsinstitute.com/>.

Institute, Global CCS (2024). *Building Our Way to Net Zero: Carbon Dioxide Pipelines in the United States*. Em caso de URL inativo, pesquisar pelo título do relatório em globalccsinstitute.com. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2025/08/Building-Our-Way-to-Net-Zero-Carbon-Dioxide-Pipelin.pdf>.

José Alberto Gonçalves e André Pinhal (s.d.). *DEM data for Portugal*. <https://www.fc.up.pt/pessoas/jagoncal/dems/>.

Kim, Tea Woo, Hyun Chul Yoon e Joo Yong Lee (2024). «Review on carbon capture and storage (CCS) from source to sink; part 1: Essential aspects for CO₂ pipeline transportation». Em: *International Journal of Greenhouse Gas Control* 137, p. 104208. ISSN: 1750-5836. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2024.104208>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583624001518>.

Knoope, M.M.J. et al. (2014). «Improved cost models for optimizing CO₂ pipeline configuration for point-to-point pipelines and simple networks». Em: *International Journal of Greenhouse Gas Control* 22, pp. 25–46. ISSN: 1750-5836. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.12.016>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583613004490>.

Kuby, Michael J., Richard S. Middleton e Jeffrey M. Bielicki (2011). «Analysis of cost savings from networking pipelines in CCS infrastructure systems». Em: *Energy Procedia* 4. 10th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, pp. 2808–2815. ISSN: 1876-6102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.185>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211003821>.

Marcoulaki, Eftychia C., Ioannis A. Papazoglou e Nathalie Pixopoulou (2012). «Integrated framework for the design of pipeline systems using stochastic optimisation and GIS tools». Em: *Chemical Engineering Research and Design* 90.12, pp. 2209–2222. ISSN: 0263-8762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2012.05.012>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876212002122>.

McCoy, Sean T. e Edward S. Rubin (2008). «An engineering-economic model of pipeline transport of CO₂ with application to carbon capture and storage». Em: *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2.2, pp. 219–229. ISSN: 1750-5836. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1750-5836\(07\)00119-3](https://doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00119-3). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583607001193>.

Middleton, Richard S. et al. (2020). «SimCCS: An open-source tool for optimizing CO₂ capture, transport, and storage infrastructure». Em: *Environmental Modelling & Software* 124, p. 104560. doi: [10.1016/j.envsoft.2019.104560](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104560).

NASA Earthdata (2000). *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*. <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/srtm>.

Net4CO₂ - Network for a Sustainable CO₂ Economy (2024). *Pipeline Routing for CO₂ Transport*. URL: <https://www.net4co2.pt/project/pipeline-routing-for-co2-transport/>.

Net4CO₂ - Network for a Sustainable CO₂ Economy (2025). *Net4CO₂ Official Website*. URL: <https://www.net4co2.pt/>.

Noothout, Paul et al. (2014). «CO₂ Pipeline Infrastructure – Lessons Learnt». Em: *Energy Procedia* 63. 12th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-12, pp. 2481–2492. ISSN: 1876-6102. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.271>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214020864>.

Notion Labs, Inc. (2024). *Notion*. <https://www.notion.so>. Plataforma de produtividade e gestão de conhecimento.

OpenTopography (s.d.). *OpenTopography - High-resolution topography data and tools*. URL: <https://opentopography.org/>.

PilotSTRATEGY Consortium (2024). *About the Project – PilotSTRATEGY*. URL: <https://pilotstrategy.eu/about-the-project>.

Publyon (2024). *Carbon capture, utilisation and storage (CCUS): what is the EU's plan?* URL: <https://publyon.com/carbon-capture-utilisation-and-storage-ccus-what-is-the-eus-plan/>.

Re-stream: Re-use of existing oil and gas infrastructure for hydrogen and CCS in Europe (2021). Rel. téc. Concaawe. URL: https://www.concaawe.eu/wp-content/uploads/Re-stream-final-report_Oct2021.pdf.

Seixas, João et al. (2015). *Roteiro Nacional para a Captura e Armazenamento de Dióxido de Carbono (CCS Roadmap Portugal)*. Rel. téc. Universidade de Évora; Global CCS Institute. URL: https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/17160/1/CCS%20roadmap%20PT_D1%20final%20%28print%20version%29.pdf.

Strachan, Neil et al. (2011). «CCS in the North Sea region: A comparison on the cost-effectiveness of storing CO₂ in the Utsira formation at regional and national scales». Em: *International Journal of Greenhouse Gas Control* 5.6, pp. 1517–1532. ISSN: 1750-5836. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2011.08.009>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583611001629>.

Strategy CCUS Consortium (2021). *Strategy CCUS: Developing the CO₂ Capture and Storage Industry in 8 European Regions*. <https://www.brgm.fr/en/current-project/strategy-ccus-developing-co2-capture-storage-industry-8-european-regions>.

Sweden, Government Offices of (abr. de 2024). *Five Northern European countries conclude international arrangements on transport and storage of carbon across borders*. URL: <https://www.government.se/press-releases/2024/04/five-northern-european-countries-conclude-international-arrangements-on-transport-and-storage-of-carbon-across-borders>.

Tian, Qunhong et al. (2018). «A two-step co-evolutionary particle swarm optimization approach for CO₂ pipeline design with multiple uncertainties». Em: *Carbon Management* 9.4, pp. 333–346. DOI: 10.1080/17583004.2018.1463782. eprint: <https://doi.org/10.1080/17583004.2018.1463782>. URL: <https://doi.org/10.1080/17583004.2018.1463782>.

U.S. Bureau of Labor Statistics (2024). *Consumer Price Index*. <https://www.bls.gov/cpi/>.

Universidade de Évora (2024). *Projeto InCarbon – Soluções de Armazenamento de CO₂ via Carbonatação In-situ*. URL: <https://www.uevora.pt/investigar/projetos?id=3822>.

Van den Broek, Machteld et al. (2013). «Region Specific Challenges of a CO₂ Pipeline Infrastructure in the West Mediterranean Area Model Results Versus Stakeholder Views». Em: *Energy Procedia* 37. GHGT-11 Proceedings of the 11th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 18-22 November 2012, Kyoto, Japan, pp. 3137–3146. ISSN: 1876-6102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.200>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213004438>.

Zhao, Tong et al. (2025). «Research on multi-objective optimal route selection method for natural gas transmission pipeline». Em: *Journal of Pipeline Science and Engineering* 5.3, p. 100250. ISSN: 2667-1433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2024.100250>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667143324000775>.

Apêndices



INSTALAÇÃO DO *PLUGIN*

Este apêndice descreve o procedimento de instalação do *plugin LeastCostPipeline* no QGIS. A ferramenta foi desenvolvida como um *plugin* Python para QGIS versão 3.0 ou superior. São apresentados dois métodos de instalação: através de ficheiro ZIP (recomendado) e instalação manual.

A.1 Requisitos

Antes de proceder à instalação, é necessário garantir que os seguintes requisitos estão satisfeitos:

- QGIS versão 3.0 ou superior instalado;
- Provedor de algoritmos GRASS GIS ativo no QGIS (geralmente incluído na instalação padrão);
- Bibliotecas Python: *numpy*, *gdal*, *PyQt5* (incluídas na instalação padrão do QGIS).

A.2 Instalação via ficheiro ZIP (recomendado)

Este é o método mais simples e direto para instalar o *plugin*.

Passo 1: Obter o ficheiro ZIP

Obtenha o ficheiro `least_cost_pipeline.zip` contendo o *plugin*. Não é necessário extrair ou descompactar o ficheiro.

Passo 2: Instalar através do QGIS

1. Abra o QGIS;

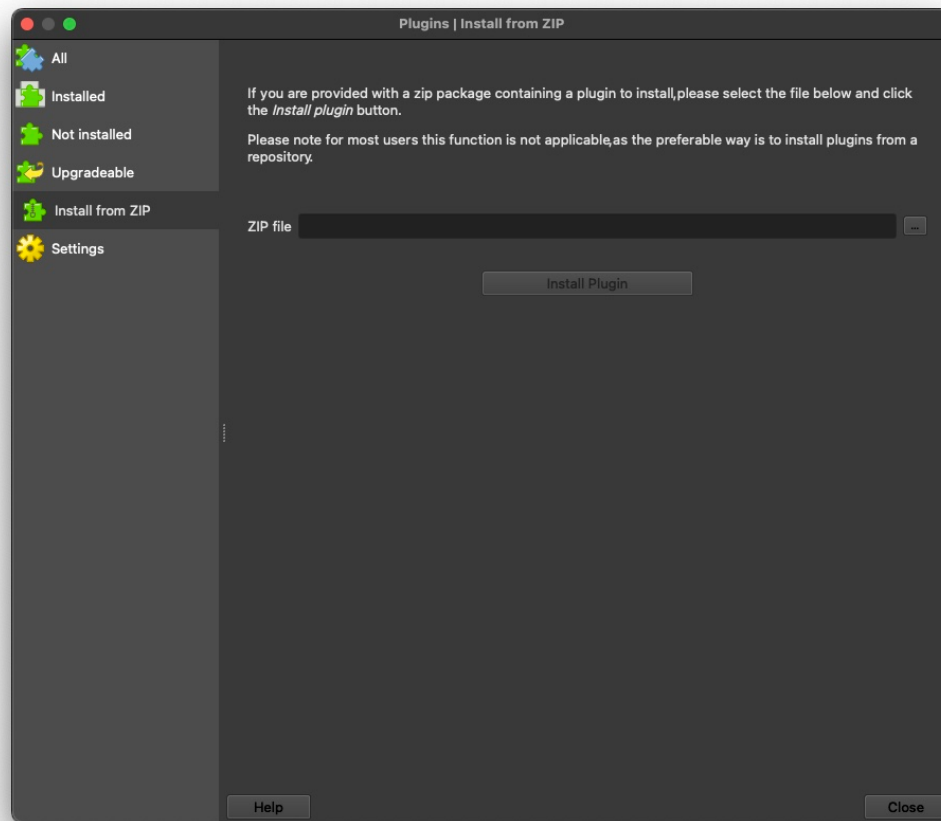


Figura A.1: Janela de instalação de plugin via zip no QGIS

2. No menu principal, aceda a **Plugins → Manage and Install Plugins...**;
3. Na janela de gestão de *plugins*, selecione a opção **Install from ZIP** no painel lateral;
4. Clique no botão ... junto ao campo *ZIP file*;
5. Navegue até à localização do ficheiro `least_cost_pipeline.zip` e selecione-o;
6. Clique em **Install Plugin**.

O QGIS irá automaticamente extrair e instalar o *plugin* no diretório correto. Uma mensagem de confirmação deverá aparecer quando a instalação estiver concluída.

Nota: Em algumas versões do QGIS, pode aparecer um aviso indicando que o *plugin* não provém de um repositório oficial. Este aviso é normal para *plugins* instalados manualmente e pode ser aceite com segurança.

A.3 Instalação manual

Alternativamente, o *plugin* pode ser instalado manualmente através da cópia direta dos ficheiros para o diretório de *plugins* do QGIS. Este método pode ser útil em situações

onde a instalação via ZIP não é viável.

Passo 1: Localizar o diretório de *plugins* do QGIS

O diretório de *plugins* varia consoante o sistema operativo utilizado:

- **Windows:** C:\Users\<username>\AppData\Roaming\QGIS\QGIS3\profiles\default\python\plugins
- **macOS:** ~/Library/Application Support/QGIS/QGIS3/profiles/default/python/plugins
- **Linux:** ~/.local/share/QGIS/QGIS3/profiles/default/python/plugins

Caso utilize um perfil personalizado do QGIS, substitua default pelo nome do perfil em uso.

Passo 2: Copiar o *plugin*

Extraia o conteúdo do ficheiro ZIP (se aplicável) e copie a pasta `least_cost_pipeline` (contendo todos os ficheiros e subdiretórios do *plugin*) para o diretório de *plugins* identificado no passo anterior. A estrutura de ficheiros deve manter-se intacta.

Passo 3: Ativar o *plugin* no QGIS

Após copiar os ficheiros:

1. Abra o QGIS (ou reinicie a aplicação se já estiver aberta);
2. No menu principal, aceda a **Plugins** → **Manage and Install Plugins...**;
3. Na janela de gestão de *plugins*, selecione a aba **Installed**;
4. Localize o *plugin* **LeastCostPipeline** na lista;
5. Ative a caixa de seleção ao lado do nome do *plugin*;
6. Clique em **Close**.

A.4 Verificação da instalação

Independentemente do método de instalação utilizado, para verificar que o *plugin* foi corretamente instalado e que todas as dependências estão disponíveis:

1. Clique no ícone do *plugin* na barra de ferramentas do QGIS ou aceda a **Plugins** → **Least Cost Pipeline**;
2. A janela principal do *plugin* deverá abrir sem mensagens de erro;
3. Verifique que todos os separadores estão visíveis: *Land Use*, *Slope*, *Crossings*, *Corridors*, *Aux*, *LCP* e *Price Estimation*.

Se a instalação for bem-sucedida, deverá surgir um novo ícone na barra de ferramentas do QGIS e uma nova entrada no menu **Plugins**.

A.5 Resolução de problemas comuns

O *plugin* não aparece na lista de *plugins* instalados:

- Verifique que o ficheiro ZIP foi corretamente instalado ou que a pasta foi copiada para o diretório correto;
- Confirme que o ficheiro `metadata.txt` existe dentro da pasta do *plugin*;
- Reinicie o QGIS completamente.

Erro ao ativar o *plugin*:

- Verifique que está a utilizar QGIS 3.0 ou superior;
- Confirme que o provedor GRASS GIS está ativo em **Settings** → **Options** → **Processing** → **Providers**;
- Consulte a consola Python do QGIS (**Plugins** → **Python Console**) para mensagens de erro detalhadas.

Algoritmos de caminho de menor custo falham:

- Assegure que o GRASS GIS está corretamente configurado no QGIS;
- Em sistemas Windows, pode ser necessário adicionar manualmente o caminho para os executáveis do GRASS nas definições de processamento do QGIS.

A.6 Desinstalação

Para remover o *plugin*:

1. Aceda a **Plugins** → **Manage and Install Plugins...**;
2. Na aba **Installed**, localize **LeastCostPipeline**;
3. Clique em **Uninstall Plugin**.

O QGIS removerá automaticamente todos os ficheiros do *plugin*.

