

C&S SIG

Análise Multicritério e Análise de Percursos de Menor Custo Aplicadas ao Transporte de CO₂ no Mediterrâneo Ocidental

Paulo Alexandre Gonçalves Mesquita

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência e Sistemas de Informação Geográfica

Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação
da Universidade Nova de Lisboa

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO E ANÁLISE DE
PERCURSOS DE MENOR CUSTO APLICADAS AO
TRANSPORTE DE CO₂ NO MEDITERRÂNEO
OCIDENTAL**

Dissertação orientada por:

Professor Doutor Pedro da Costa Brito Cabral

Professor Doutor José Rafael Marques da Silva

Professor Doutor Júlio Ferreira Carneiro

Fevereiro 2013

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Pedro Cabral, José Rafael M. Silva e Júlio Carneio pela disponibilidade para orientar este trabalho e respectivas sugestões construtivas.

A todos os elementos do projecto COMET, particularmente ao Professor Júlio Carneiro, que directa ou indirectamente contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos os colegas de estudo e de trabalho, à família e a todos os amigos.

Análise multicritério e análise de percursos de menor custo aplicadas ao transporte de CO₂ no Mediterrâneo Ocidental

RESUMO

A tecnologia de captura e armazenamento de CO₂ (CCS) pode representar um dos principais papéis na mitigação de CO₂ atmosférico. Esta representa a captura do CO₂ em fontes estacionárias de emissão, como centrais eléctricas e instalações industriais, e o seu armazenamento em reservatórios geológicos. O transporte do CO₂ entre ambos os locais ocorreria sobretudo através de gasodutos dedicados.

Actualmente, alguns dos estudos de viabilidade económica e de optimização de infra-estruturas de CCS utilizam como *input* os custos de investimento de diferentes percursos de gasodutos candidatos a fazer parte da rede final, entre nós da possível rede de transporte. Posteriormente esses percursos são seleccionados para integrar a infra-estrutura final de forma a otimizar a mitigação de CO₂ ao longo do tempo da forma mais custo-efectiva.

Este trabalho ilustrou uma metodologia capaz de determinar percursos de gasodutos de CO₂ mais custo-efectivo e respectivos investimentos necessários para sua implementação na região do Mediterrâneo Ocidental através de análise multicritério e análise de percursos de menor custo. Foi utilizado um modelo linear para gerar uma superfície de custos capaz de identificar os custos de investimento, para cada célula, em função das características espaciais locais. Esta superfície, em conjunto com os hipotéticos nós da rede a conectar, foi utilizada por forma a avaliar a melhor localização, em função dos parâmetros utilizados, para construção dos gasodutos e respectivos custos de investimento finais.

Os resultados obtidos indicam que as técnicas utilizadas permitem atingir o objectivo proposto e que provavelmente será ainda possível inserir melhorias no modelo através do aumento da qualidade da informação espacial utilizada, aumento da resolução de trabalho e/ou refinamento dos valores de custo utilizados.

Multi-criteria analysis and least cost path analysis applied to CO₂ transport in the West Mediterranean region

ABSTRACT

Carbon capture and storage (CCS) technologies may pose a major role in atmospheric CO₂ mitigation. This group of technologies represent the capture of CO₂ emissions at stationary sources, such as power plants and industrial facilities and their storage in geological reservoirs. The transport of CO₂ would occur through dedicated pipelines connecting both regions.

Usually, economic viability and CCS infrastructure optimization studies use as input multiple candidate pipeline routes between nodes of a hypothetical transport network, with the nodes representing places where CO₂ is emitted and stored. In the end those pipeline routes are selected in a way that optimizes CO₂ mitigation through time in a cost-efficient way.

This study described a methodology that allows determining the most cost effective routes, and respective investment costs, between nodes in the West Mediterranean region through the usage of multi-criteria and least cost path analysis. A linear model was used to create a cost surface capable of identifying the investment costs, for each cell, accordingly to the local spatial characteristics. This surface, combined with the network nodes, was used to retrieve the best routes location, accordingly with the used parameters, to develop a CO₂ pipeline and respective investment costs.

The model results indicate that the proposed techniques allow achieving the objectives, but if needed the model can still be improved trough increase of spatial information quality, increase of the work resolution and/or refining the costing values.

PALAVRAS-CHAVE

Transporte de CO₂

Análise multicritério

Sistemas de informação geográfica

Análise de percursos de menor custo

KEYWORDS

CO₂ transport

Multi-criteria analysis

Geographical information systems

Least cost path analysis

ACRÓNIMOS

- BRGM** – *Bureau de Recherches Géologiques et Minières*
- CCS** – *Carbon Capture and Storage*
- DCW** – *Digital Chart of the World*
- EEA** – *European Environment Agency*
- EP** – Estradas de Portugal
- ESA** – *European Spatial Agency*
- ESRI** – *Environmental Systems Research Institute*
- EOR** – *Enhanced Oil Recovery*
- GADM** – *Global Administrative Areas*
- ICNB** – Instituto da Conservação da Natureza e da Biodiversidade
- IGME** – *Instituto Geológico y Minero de España*
- IGN** – Instituto Geográfico Nacional
- IPCC** – *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- ISR** – *Institut Scientifique de Rabat*
- LCPA** – *Least Cost Path Analysis*
- MCA** – *Multi-criteria Analysis*
- MCDA** – *Multi-criteria decision analysis*
- MDT** – Modelo Digital do Terreno
- ONHYM** – *Office National des Hydrocarbures et des Mines*
- REFER** – Rede Ferroviária Nacional
- REN** – Redes Energéticas Nacionais
- SIG** – Sistemas de Informação Geográfica
- SRCCR** – *Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage*
- SRTM** – *Shuttle Radar Topography Mission*

ÍNDICE DO TEXTO

AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT	v
PALAVRAS-CHAVE	vi
KEYWORDS.....	vi
ACRÓNIMOS.....	vii
ÍNDICE DE TABELAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
1 Introdução.....	1
1.1 Objectivo	2
1.2 Estrutura da Dissertação.....	2
2 Enquadramento tecnologias de CCS.....	4
2.1 Fontes Emissoras e Captura de CO ₂	5
2.2 Transporte de CO ₂	6
2.3 Armazenamento de CO ₂	9
2.4 Infra-estruturas de CCS.....	10
3 Metodologia.....	16
3.1 Métodos	16
3.2 Dados	20
4 Caso de Estudo no Mediterrâneo Ocidental.....	22
4.1 Área de Estudo	22
4.2 Definição de <i>Clusters</i>	24
4.2.1 <i>Clusters</i> de fontes de CO ₂	24
4.2.2 <i>Clusters</i> de injeção de CO ₂	27
4.2.3 <i>Hubs</i>	30
4.3 Superfície de Custo.....	33
4.3.1 Factores de custo	33
4.3.1.1 Factores de custo associados à ocupação e uso do solo.....	35
4.3.1.2 Factores de custo associados ao declive do terreno.....	41
4.3.1.3 Factores de custo associados a travessias de infra-estruturas.....	43
4.3.2 Modelo linear de integração	46
4.4 Percursos de Menor Custo.....	49
4.5 <i>ArcGIS Model Builder</i>	52
4.6 Análise e Discussão de Resultados	53
5 Conclusões	58
Referências Bibliográficas.....	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Fontes estacionárias de CO ₂ a nível mundial com emissões superiores a 0.1MtCO ₂ /Ano em 2001 (Fonte: IPCC,2005).	6
Tabela 2. Alguns estudos recentes relacionados com custos de infra-estruturas de CCS.	14
Tabela 3. Listagem de dados espaciais utilizados.	21
Tabela 4. Parâmetros do sistema de coordenadas utilizado.	23
Tabela 5. Estatísticas de emissão de CO ₂ para cada país.....	24
Tabela 6. Estatísticas de armazenamento de CO ₂ para cada país.....	29
Tabela 7. Factores de custo.....	34
Tabela 8. Classes originais GlobeCorine e respectivos factores de custo considerados.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Custos de transporte de CO ₂ por tonelada em função da distância a percorrer (Fonte: IPCC, 2005).	7
Figura 2. Mapa com as localizações de gasodutos de CO ₂ já existentes nos Estados Unidos da América (Fonte: IPCC,2005).	8
Figura 3. Gasodutos de transporte de CO ₂ em fase de desenvolvimento (Fonte: Global CCS Institute, 2012).	8
Figura 4. Opções de armazenamento geológico (Fonte: CO2CRC, 2008).	10
Figura 5. Redes baseadas em <i>hub</i> (em cima) e redes aperfeiçoadas (em baixo).	13
Figura 6. Diagrama com os elementos da metodologia.	19
Figura 7. Área de estudo.	23
Figura 8. Localização de fontes de CO ₂ e média anual das emissões de CO ₂ entre o período 2005 a 2009.	25
Figura 9. <i>Clusters</i> de fontes de CO ₂	27
Figura 10. Localização dos locais de injeção de CO ₂ considerados e respectivas capacidades.	28
Figura 11. <i>Clusters</i> de locais de injeção de CO ₂	30
Figura 12. <i>Hubs</i> de captura de CO ₂	31
Figura 13. <i>Hubs</i> de armazenamento de CO ₂	32
Figura 14. Distâncias de cada ponto ao respectivo <i>hub</i> . (Esquerda: fontes; Direita: locais de injeção).	33
Figura 15. Carta GlobeCorine com a legenda original.	37
Figura 16. Rios e massas de água de maiores dimensões.	39
Figura 17. Áreas protegidas consideradas.	40
Figura 18. Factores de custo associados à ocupação e uso do solo.	41
Figura 19. Factores de declive.	43
Figura 20. Infra-estruturas de transporte consideradas.	44
Figura 21. Gasodutos existentes.	46
Figura 22. Superfície de custo.	49
Figura 23. Superfície de custo acumulado.	50
Figura 24. Superfície de orientação de menor custo.	51
Figura 25. Rede hipotética de gasodutos para a área de estudo sobre a superfície de custo.	52
Figura 26. Esquema do modelo utilizado para gerar a superfície de custo e a rede primária de gasodutos.	53

1 INTRODUÇÃO

A captura e armazenamento de CO₂, *Carbon Capture and Storage* (CCS), representa o grupo de tecnologias cuja integração permite evitar que o CO₂ produzido em grandes fontes estacionárias, tais como centrais termoeléctricas, cimenteiras e refinarias, seja emitido para a atmosfera. Efectuando-se, em vez disso, o seu armazenamento em reservatórios geológicos.

As tecnologias de CCS são transversais a várias áreas do conhecimento, tais como a geologia e geofísica, a química, a economia e a engenharia. Na prática a materialização do conceito de CCS dá-se através do desenvolvimento de infra-estruturas de CCS que representam não só os elementos físicos necessários à captura, transporte e armazenamento de CO₂ como também contêm, inerentes ao conceito, o dimensionamento de forma eficiente da quantidade de CO₂ a capturar, o seu transporte da forma mais adequada e a escolha de locais geológicos com suficiência de capacidade de armazenamento relativamente ao CO₂ a armazenar anualmente para um dado período de tempo.

Embora existam outros tipos de meios de transporte de CO₂ a forma mais usual ocorre através de gasodutos e a optimização funcional e económica de uma infra-estrutura de CCS passa, a maior parte das vezes, pelo desenvolvimento de redes de gasodutos de transporte de CO₂ conectando as fontes emissoras aos locais de armazenamento. Uma das formas de otimizar as redes de gasodutos, sobretudo para transportes de maior distância, passa pelo agrupamento de fontes emissoras de CO₂ próximas entre si através de um *hub* centralizador de todo o fluxo de CO₂ que conecta a *hub* distribuidor de CO₂ que liga a locais de armazenamento próximos entre si. De forma a possibilitar a avaliação do investimento de construção de uma rede de gasodutos é necessário, num estado inicial de desenvolvimento, determinar quais os locais onde devem ser construídos os gasodutos e de que forma é que o terreno e as características geográficas influenciam esse investimento inicial.

1.1 Objectivo

O objectivo deste trabalho é a descrição de uma metodologia que permita determinar os percursos mais custo-eficientes para implementação de gasodutos de transporte de CO₂ entre quaisquer dois nós de uma hipotética infra-estrutura de CCS na região constituída pela Península Ibérica e Marrocos. A metodologia enunciada foi desenvolvida para aplicação no projecto COMET “*Integrated infrastructure for CO₂ transport and storage in the west Mediterranean*” para determinação de percursos de menor custo para construção de gasodutos de CO₂. Este projecto teve como objectivo a determinação de infra-estruturas de CCS optimizadas de forma funcional e económica para a mesma região de estudo levando em consideração a evolução de diferentes cenários económicos ao longo do tempo, até 2050.

No âmbito deste trabalho não será realizado o dimensionamento de uma infra-estrutura de CCS, mas de forma a ilustrar os procedimentos da metodologia será determinada uma rede primária de transporte de CO₂ hipotética conectando regiões produtoras de CO₂ a regiões de armazenamento, baseada em duas premissas simplificadoras. A primeira assume que os reservatórios de CO₂ terão capacidade ilimitada e a segunda que todas as fontes de CO₂ serão conectadas a um reservatório.

1.2 Estrutura da Dissertação

Este documento encontra-se organizado em cinco capítulos. Os dois primeiros têm uma função introdutória, no primeiro, onde se inclui esta secção, é apresentado o trabalho através de um enquadramento geral e são definidos os objectivos. O segundo, aborda a cadeia de tecnologias de CCS, descrevendo os seus constituintes e a sua integração em infra-estruturas de CCS, ilustrando também as dificuldades inerentes ao desenvolvimento de um rede de transporte de CO₂ custo-eficiente.

No terceiro e quarto capítulo são descritos, respectivamente, a metodologia e os procedimentos na sua aplicação no caso de estudo para gerar uma rede de gasodutos. O capítulo referente à metodologia fundamenta o recurso às técnicas de modelação geográfica utilizadas e descreve o conjunto de operações necessárias para avaliar os custos de investimento necessários à construção de gasodutos de transporte de CO₂. Este capítulo aborda também a informação geográfica utilizada. O caso de estudo abordado no quarto capítulo irá descrever a aplicação dos materiais e métodos ao caso de estudo, com os respectivos resultados e análise dos mesmos.

O último capítulo apresenta as conclusões gerais deste estudo.

2 ENQUADRAMENTO TECNOLOGIAS DE CCS

Em 2005 o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) publicou o *Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage* (SRCCR) cujo objectivo foi o de avaliar o estado do conhecimento, à época, sobre fontes emissoras de CO₂ e sistemas de captura, transporte e diversos mecanismos de armazenamento. Este relatório surgiu após o relatório *Climate Change 2001: Mitigation* que incidiu sobre a avaliação científica, técnica, ambiental, económica e social dos aspectos de CCS. Todos os temas relevantes e necessários ao desenvolvimento e implementação de estruturas de CCS foram abordados, tais como: a avaliação da maturidade tecnológica; potenciais tecno-económicos que contribuem para a mitigação das alterações climáticas e seus custos; definição de problemas legais e regulamentares; percepção pública; impactos ambientais; segurança; assuntos relacionados com a inventariação e contabilização da redução das emissões de gases com efeito de estufa. Este relatório representou uma das primeiras grandes compilações de informação relacionadas com CCS tendo sido o predecessor de outros relatórios e estudos.

Para além de CCS existem outras alternativas à mitigação das alterações climáticas tais como a optimização da eficiência energética, a migração para combustíveis com menor produção de CO₂, recurso a energia nuclear ou energia de fontes renováveis, o aperfeiçoamento de depósitos biológicos e a redução de outros gases de efeito de estufa que não o CO₂ (IPCC, 2005). De entre as várias opções disponíveis a redução das emissões de CO₂ via CCS é usualmente identificada como uma das opções mais promissoras no curto a médio prazo permitindo simultaneamente a mitigação do CO₂ atmosférico e a manutenção do uso de combustíveis fósseis, principalmente o carvão, enquanto permite o desenvolvimento de fontes de energia alternativas (MIT, 2007). Outra possível vantagem desta tecnologia seria que o recurso a CCS aumentaria os custos da energia gerada através de fontes produtoras de CO₂, potenciando assim a migração para tecnologias enérgicas mais limpas (Middleton & Bielicki, 2009).

Neste capítulo serão apresentadas as três componentes de CCS e a sua integração em infra-estruturas. As componentes de captura e armazenamento de CO₂ serão abordadas de forma introdutória para fornecer o enquadramento à componente de transporte, que será abordada de forma mais extensiva. Serão também apresentados alguns casos de estudo relacionados com o desenvolvimento de infra-estruturas de CCS, em particular o projecto COMET cuja metodologia de determinação de percursos é replicada neste estudo.

2.1 Fontes Emissoras e Captura de CO₂

O processo de captura de CO₂ dá-se junto das fontes produtoras e emissoras de CO₂ e tem como principal objectivo a produção de um fluxo concentrado de CO₂ a altas pressões que possa ser facilmente transportado e injectado no subsolo. A principal razão para a necessidade de se isolar o CO₂ dos restantes resíduos gasosos é a diminuição do volume de material a transportar otimizando assim a eficiência económica e energética (IPCC, 2005). De entre os diferentes tipos de produtores de CO₂ o sector energético e o sector de produção de cimento são aqueles que apresentam maior número de fontes e maior volume de CO₂ emitido. A Tabela 1 mostra que o uso de combustíveis fósseis associado ao desenvolvimento energético era, de entre as fontes fixas de emissão, o maior contribuidor em 2001 de CO₂ atmosférico com cerca de 78% do total de emissões provenientes de cerca de 62% do total de fontes. O sector de produção de cimento surge em segundo lugar em ambas as contabilizações com diferença bastante elevada, onde os restantes sectores são as refinarias, a indústria do ferro e do aço, a indústria petroquímica e o processamento de gás e petróleo.

Processo	Número de Fontes	Emissões (MtCO ₂ /Ano)
Combustíveis fósseis		
Energia	4,941	10,539
Produção de cimento	1,175	932
Refinarias	638	798
Indústria do ferro e do aço	269	646
Indústria petroquímica	470	379
Processamento de gás e petróleo	N/A	50
Outras fontes	90	33
Biomassa		
Bioetanol e bioenergia	303	91
Total	7,887	13,466

Tabela 1. Fontes estacionárias de CO₂ a nível mundial com emissões superiores a 0.1MtCO₂/Ano em 2001 (Fonte: IPCC,2005).

A captura de CO₂ já ocorre actualmente sobretudo de forma relacionada com processamento de gases e processos industriais de produção de CO₂ de elevada pureza, começa também a ser utilizada, de forma demonstrativa, no sector energético (Global CCS Institute, 2012).

2.2 Transporte de CO₂

A componente de transporte representa na cadeia de CCS a ligação entre locais de produção de CO₂ e as instalações de injeção em reservatórios geológicos subterrâneos. De entre as opções de transporte disponíveis, o transporte via gasodutos, marítimos (*offshore*) e terrestres (*onshore*), e o transporte através de navios são aqueles que se revelam mais adequados, sobretudo do ponto de vista económico (IPCC, 2005). Ambos os tipos de transporte são bastante utilizados pelo sector dos hidrocarbonetos, e é da experiência deste sector na construção de gasodutos, com tecnologias bastante maduras na actualidade, que o transporte de CO₂ tem beneficiado mais, sobretudo quando o volume de CO₂ a transportar é elevado. Relativamente ao transporte de pequenas quantidades de CO₂ é usual que este se processe por via rodoviária ou ferroviária, mas estes métodos de transporte apresentam custos, por tonelada de CO₂ transportado, mais elevados (Global CCS Institute, 2012).

A Figura 1 mostra os custos destes métodos de transporte em função da distância onde é visível que para transportes até cerca de 1000 Km as opções mais atractivas serão os dois tipos de gasodutos disponíveis.

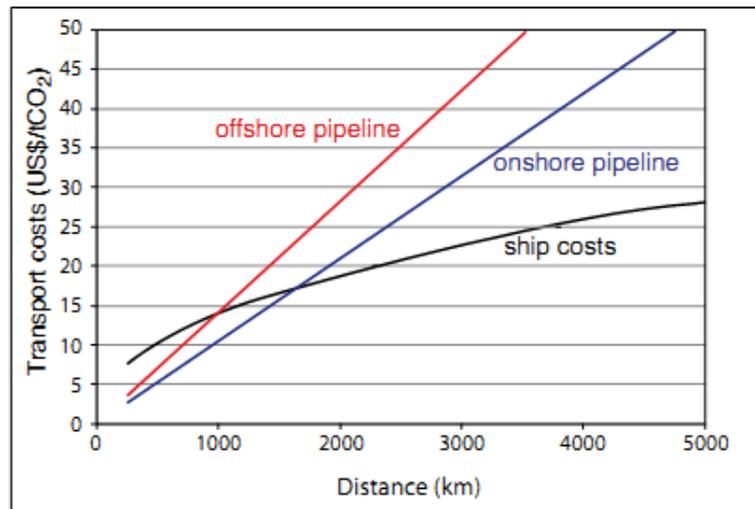


Figura 1. Custos de transporte de CO₂ por tonelada em função da distância a percorrer (Fonte: IPCC, 2005).

A construção representa a maior fatia de custo associada ao transporte de CO₂ através de gasodutos, pois questões relacionadas com a manutenção do sistema têm um peso económico muito menor (Anderson & Newell, 2004).

O transporte de CO₂ já ocorre desde os anos 80, sobretudo via gasoduto no caso do transporte de grandes volumes de CO₂ (IPCC, 2005) (Global CCS Institute, 2012). A Figura 2 mostra alguns dos gasodutos de transporte de CO₂ já existentes nos Estados Unidos da América, que conta com cerca de 6500 Km divididos por 36 gasodutos sobretudo para usos relacionados com EOR, *Enhanced Oil Recovery*, que representa a injeção de CO₂ em reservatórios de petróleo envelhecidos incrementando a recuperação do petróleo por via do aumento da sua mobilidade e pressão (Global CCS Institute, 2012). No entanto, o CO₂ actualmente transportado tem origens naturais em vez de ser proveniente de captura de CO₂ (Global CCS Institute, 2012).

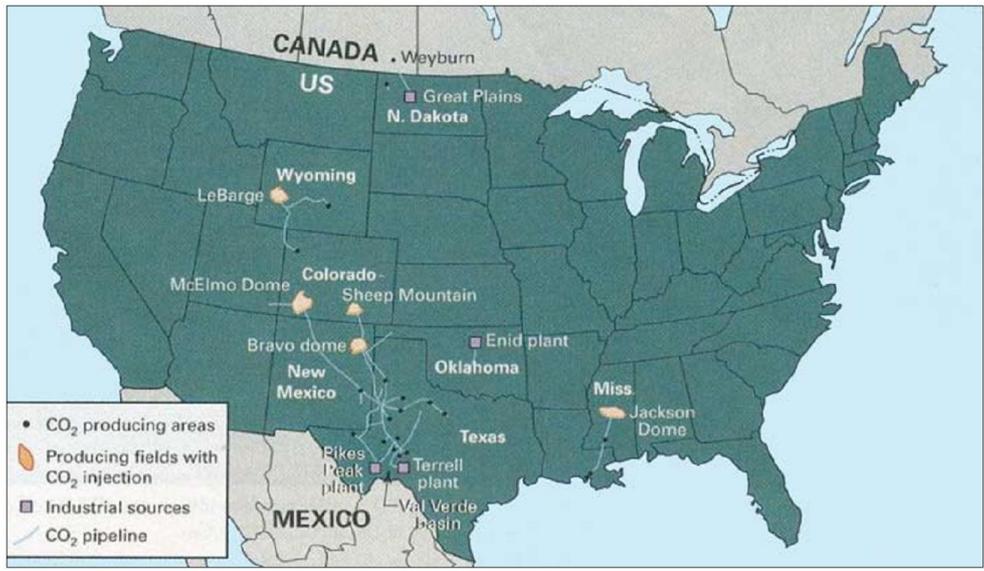


Figura 2. Mapa com as localizações de gasodutos de CO₂ já existentes nos Estados Unidos da América (Fonte: IPCC,2005).

Para além dos gasodutos já em operação, existem correntemente cerca de 9000 Km em desenvolvimento em várias partes do mundo. As suas distribuições e extensões podem ser consultadas na Figura 3.

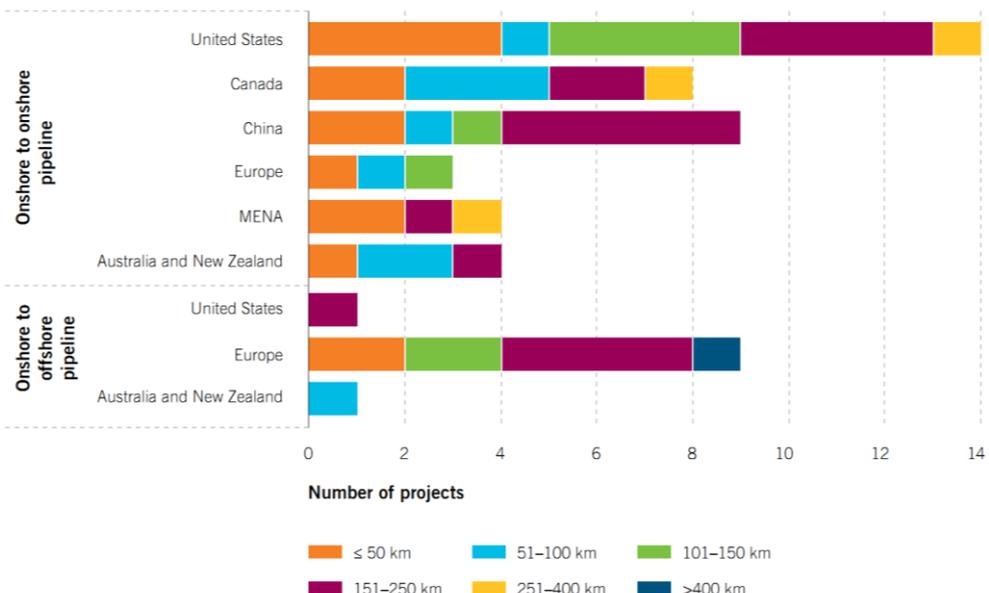


Figura 3. Gasodutos de transporte de CO₂ em fase de desenvolvimento (Fonte: Global CCS Institute, 2012).

Também na Europa existe já alguma experiência de transporte de CO₂ através de gasodutos, concretamente nos projectos Snhovit (Koeijer, 2008), em que um gasoduto submarino transporta CO₂ de uma central de processamento de gás Norueguesa até um local de injeção no mar do Norte, e no projecto Paul-Lacq (Aimard, 2010), no sul de França, em que um gasoduto *onshore* foi construído para transportar o CO₂ separado de uma exploração e gás natural até a um local de armazenamento num campo de gás natural esgotado. Embora de extensão muito menor do que os gasodutos existentes nos EUA, os casos europeus foram especificamente construídos tendo por motivação a mitigação das emissões de CO₂.

2.3 Armazenamento de CO₂

O processo de armazenamento de CO₂ passa pela sua injeção a partir de um ponto à superfície terrestre em reservatórios geológicos profundos, tais como reservatórios de gás e petróleo, aquíferos salinos profundos, e depósitos de carvão inacessíveis (IPCC, 2005), (Anderson & Newell, 2004). A Figura 4 ilustra as opções de armazenamento geológico em reservatórios de gás e petróleo esgotados, armazenamento de CO₂ via EOR, em reservatórios salinos de elevada profundidade e em depósitos de carvão.

No seguimento do actual uso dos sistemas de transporte de CO₂, particularmente o de EOR, também a injeção já ocorre sendo um dos resultados a retenção permanente do CO₂.

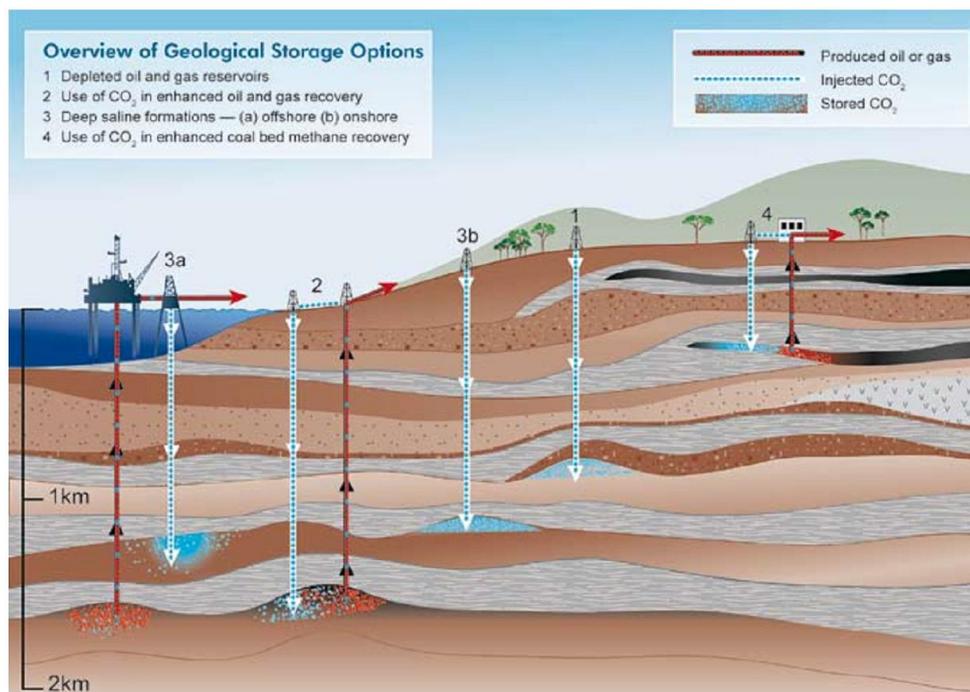


Figura 4. Opções de armazenamento geológico (Fonte: CO2CRC, 2008).

2.4 Infra-estruturas de CCS

Uma infra-estrutura de CCS inclui as três componentes atrás descritas de forma integrada e dimensionada nas várias etapas. O desenvolvimento de uma infra-estrutura de CCS é um desafio complexo, que se serve de várias áreas do conhecimento incluindo a análise e modelação espacial, Middleton & Bielicki (2009) referem que modelar uma infra-estrutura de CCS deve considerar e integrar em simultâneo sete decisões chave:

- Quanto CO₂ deve ser capturado?
- Em que locais?
- Onde construir os gasodutos?
- Qual o seu tamanho?
- Que reservatórios devem armazenar o CO₂?
- Quanto CO₂ deve ser injectado?
- Como distribuir o CO₂ de fontes dispersas através da rede de gasodutos até aos reservatórios?

As respostas a estas questões embora possam ser determinadas sequencialmente não são independentes de factores externos nem independentes entre si. Definir quanto CO₂ deve ser capturado é dependente, por exemplo, do propósito dessa captura e do resultado que se pretende. Por outro lado, dizer em que fontes se deve realizar a captura de CO₂ não pode ser apenas determinado com base no total de emissões das fontes seleccionadas devido a questões relacionadas com transporte e armazenamento. Poderá ser mais custo eficiente, capturar uma determinada quantidade de CO₂ de várias locais emissores e distribuir para vários locais de armazenamento do que capturar a mesma quantidade de CO₂ apenas de uma fonte e transportar para armazenamento no local mais próximo de capacidade adequada para o período de tempo desejado. Existe ainda a possibilidade de ser mais eficiente canalizar até um local de armazenamento sem capacidade de armazenamento para todo o período de tempo pretendido e quando este se esgotar, desenvolver outra ligação até a outro local de armazenamento. O número de opções e o grau de complexidade das mesmas será dependente, entre outros factores, das localizações das fontes emissoras de CO₂, da localização dos locais de injeção de CO₂, da quantidade de CO₂ a armazenar e do período em que se pretende que esse armazenamento ocorra.

Das decisões necessárias ao desenvolvimento de uma infra-estrutura de CCS identificadas previamente, a terceira questão representa o objecto de estudo deste trabalho. A resposta a esta questão pode ser obtida directamente através de SIG, na medida em que trata de aplicações imediatas de técnicas existentes. Middleton & Bielicki (2009) referem ainda que os locais de construção para uma rede realista de gasodutos se tem revelado um desafio, alguns estudos partiram de aproximações grosseiras aos custos de transporte, e por vezes esses custos nem chegaram a ser considerados nas avaliações das infra-estruturas. Alguns exemplos seriam casos onde foram assumidas ligações em linha recta conectando os diferentes nós da rede de transporte, considerando o custo em função da

distância apenas, ou onde fontes individuais foram conectadas directamente a locais de injeção individuais. Esta aproximação pode ser no caso de uma proximidade muito elevada entre o ponto de partida e o ponto de destino, dificilmente o será quando a distancia a percorrer é mais elevada.

Existem três tipos possíveis de organização de uma rede de transporte de CO₂. Para além das ligações de ponto-para-ponto onde fontes individuais de CO₂ se conectam directamente a locais de injeção de CO₂ individuais existem ainda as redes baseadas em *hubs* e as redes de transporte aperfeiçoadas (Broek, et al., 2010). Estes dois últimos tipos utilizam ambos o conceito de *cluster*, onde fontes de CO₂ ou locais de injeção de CO₂ próximos entre si são agrupados, conectando-se a um *hub*, actuando estes como locais de recolha e distribuição de CO₂, permitindo assim conexões indirectas entre fontes e depósitos individuais. A principal diferença entre ambos tipos de rede é que no primeiro caso, *hubs* de *clusters* de fontes conectam-se a *hubs* de *clusters* de locais de injeção e no segundo caso existe ainda a possibilidade de *hubs* de fontes se conectarem entre si, o mesmo se aplicando a conexões entre *hubs* de locais de injeção (Figura 5). Broek, et al., (2010) refere que as três formas de organização de rede podem ser desenvolvidas de forma sequencial numa infra-estrutura de CCS. No estado de demonstração utilizar-se-ia o método de ponto-para-ponto, numa segunda fase representada pelo estado de comercialização inicial utilizar-se-ia uma rede baseada em *hubs* e finalmente, no estado comercial, uma rede aperfeiçoada. O recurso a este tipo de técnica de agrupamento de fontes emissoras e de locais de armazenamento de CO₂ permite minimizar os custos de uma infra-estrutura de CCS, quando comparado com ligações directas entre fontes e locais de injeção (Global CCS Institute, 2012).

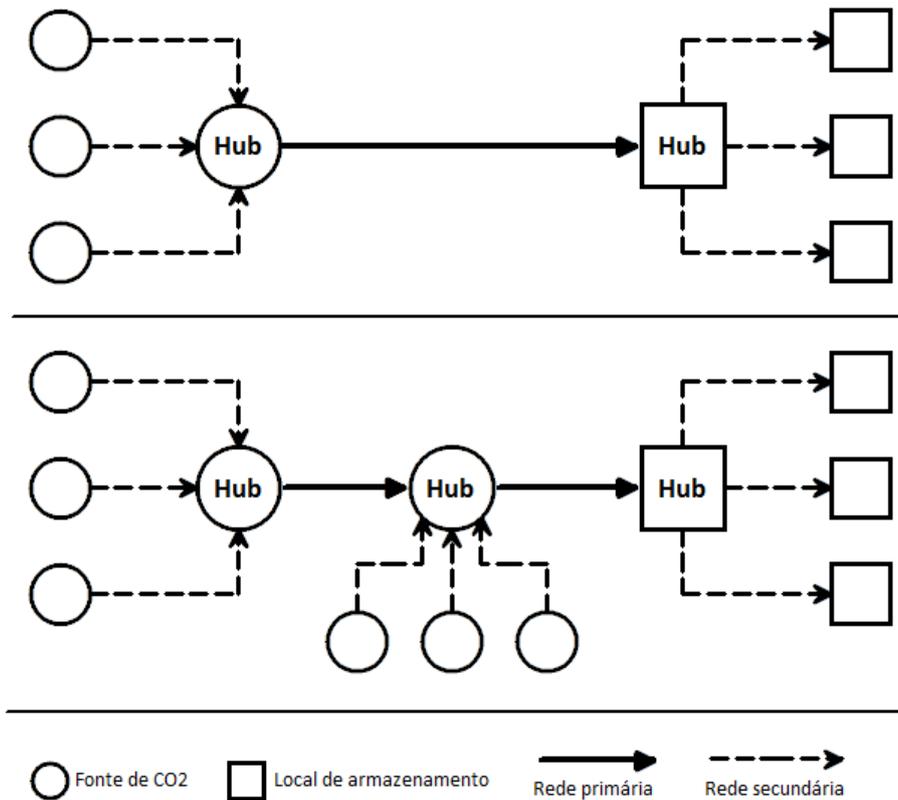


Figura 5. Redes baseadas em *hub* (em cima) e redes aperfeiçoadas (em baixo).

O recurso a *hubs* e *clusters* aumenta a complexidade no desenvolvimento de uma rede de transporte eficiente gerando quatro questões de índole espacial: Como definir os *clusters*; onde colocar os *hubs*; onde construir os gasodutos primários e onde construir os gasodutos secundários. Neste cenário, a posição do *hub* irá ter influencia quer nas redes secundárias quer nas redes primárias, fazendo a conexão entre ambas.

Os custos de transporte englobam os custos relacionados com a construção, e com a operação e manutenção dos gasodutos. Por sua vez, os custos de construção incluem o custo do material e do equipamento utilizado e os custos da instalação do gasoduto (Serpa, et al., 2011). Usualmente nos estudos para determinar o investimento necessário para a componente de transporte de uma cadeia CCS são utilizadas soluções que consideram todos estes elementos.

A Tabela 2 resume alguns estudos actuais relacionados com infra-estruturas CCS e mostra que a tendência é a de incorporar de forma mais detalhada nos modelos de decisão os custos associados ao transporte de CO₂ via gasoduto, independentemente de a proporção do custo de transporte no custo total de uma cadeia de CCS ser bastante pequena. Broek, et al., (2010) identificaram que o custo de transporte e armazenamento representa cerca de 25 a 40 por cento do custo total de uma infra-estrutura de CCS, e o Global CCS Institute (2012) refere que o custo apenas do transporte de CO₂ poderá rondar os 2 a 5 por cento do custo total.

Local	Resolução MCA LCPA Clusters	Referência	Descrição
China	90 m Sim Sim n/d	(Chen, et al., 2009)	Desenvolve um método, baseado em análise espacial de diferentes critérios a levar em consideração na construção de cenários de CCS, aplicado a casos de estudo reais na província de Hebei.
Holanda	100 m Sim Sim Sim	(Broek, et al., 2010)	Desenvolve uma <i>toolbox</i> para ArcGIS que integra SIG's e funções de determinação de percursos com MARKAL, um modelo energético <i>bottom-up</i> baseado em modelação linear.
Europa	n/d Sim Sim Sim	(Morbee, et al., 2012)	Descreve o modelo <i>InfraCCS</i> capaz de determinar a extensão provável e o custo da rede de transporte de CO ₂ de menor custo à escala Europeia para o período de 2015 a 2050.
Estados Unidos da América	1000 m Sim Sim Sim	(Middleton & Bielicki, 2009)	Introduz o modelo <i>SimCCS</i> capaz de gerar um sistema de CCS de forma completamente integrada e de minimização de custos. O modelo é capaz de definir onde e quanto CO ₂ é capturado e armazenado e onde devem ser construídos e conectados os gasodutos de diferentes tamanhos de forma a minimizar os custos combinados de sequestro de CO ₂ .

Tabela 2. Alguns estudos recentes relacionados com custos de infra-estruturas de CCS.

Para além destes estudos encontra-se actualmente no seu estado final o projecto COMET, financiado pelo 7º Programa-quadro da Comissão Europeia, com o principal objectivo estudar a viabilidade tecno-económica de uma infra-estrutura integrada de CCS na região do mediterrâneo conjuntamente para Espanha, Marrocos e Portugal. O estudo de viabilidade incorporou diferentes cenários de desenvolvimento do sistema energético entre 2010 e 2050, a localização e desenvolvimento das maiores fontes emissoras de CO₂ e a disponibilidade potencial de locais de armazenamento geológicos em cada um dos países considerados (COMET, s.d.). A metodologia apresentada neste estudo foi implementada de forma mais extensa neste projecto e este foi também a principal fonte dos dados utilizados.

Embora ainda não existam infra-estruturas dedicadas de CCS em estado operacional, as componentes captura, transporte e armazenamento já ocorrem, sobretudo relacionadas com a indústria dos hidrocarbonetos. Esta ocorrência indicia ser viável, do ponto de vista técnico, a implementação de infra-estruturas de CCS. Para além das características técnicas e sua operacionalização existe ainda a componente económica. Devido à elevada complexidade associada ao desenho de uma infra-estrutura de CCS, pautada pela existência de elevado número de variáveis, não é linear a aferição de custos. Por esta razão os estudos actuais relacionados com CCS têm dado destaque à minimização de custos, que entre outros factores é dependente da localização dos gasodutos. O capítulo seguinte irá descrever uma metodologia desenvolvida com o intuito de minimizar esses custos, em função do local de passagem do gasoduto.

3 METODOLOGIA

A secção anterior introduziu as componentes de CCS, a sua integração em infra-estruturas de CCS e algumas das necessidades e dificuldades na sua implementação, mais particularmente a necessidade de avaliar os custos de construção de gasodutos em função da sua localização. Nesta secção será definida a metodologia utilizada neste estudo para determinar os percursos de gasodutos de transporte de CO₂, através da minimização dos seus custos de construção. Serão abordados os tipos de modelação geográfica realizados e a informação espacial utilizada.

3.1 Métodos

O cumprimento dos objectivos deste trabalho encontra resposta em procedimentos de análise espacial e técnicas de modelação geográfica. O desafio de determinar qual o percurso mais custo-eficiente de uma dada estrutura linear é usualmente abordado através de análise multicritério, *Multi Criteria Analysis* (MCA) ou *Multicriteria Decision Analysis* (MCDA), e pela análise de percursos de menor custo, *Least Cost Path Analysis* (LCPA). Dos estudos apresentados no capítulo anterior todos recorreram em alguma extensão a estas duas técnicas de modelação.

LCPA permite descobrir quais os percursos mais custo-eficientes entre dois pontos sobre uma superfície de custo (Bagli, et al., 2011). O estudo deste tipo de problemas antecede os SIG modernos podendo recuar até 1957 (Atkinson, et al., 2005), mas é com estes que o seu uso se operacionaliza no decorrer das duas últimas décadas, encontrando-se actualmente disponível na maioria dos *softwares* de SIG comerciais (Bagli, et al., 2011). A superfície de custo é um mapa no formato raster onde cada célula toma o valor do custo do seu atravessamento em relação aos critérios considerados, como por exemplo a topografia do terreno. Atkinson (2005) identifica as etapas básicas para se obter o caminho de menor

custo sobre uma superfície adaptadas de outro estudo, estas encontra-se resumidas de seguida:

- Criação de uma superfície de fricção para cada um dos critérios de avaliação, cada célula dessa superfície representara o custo relativo do seu atravessamento;
- As várias superfícies de fricção são combinadas de forma ponderada resultando assim numa superfície com o custo de passagem total para cada uma das células da superfície final;
- Uma função conecta pontos de partida e pontos de chegada através da superfície de custo sendo o resultado uma superfície com o custo cumulativo em cada célula desde a partida até à chegada;
- O caminho de menor custo cumulativo é traçado sobre a grelha de custos acumulados entre a partida e o destino.

O processo de análise multicritério baseada em SIG é uma ferramenta com potencialidades de previsão espacial (Adiat, et al., 2012) que fornece um conjunto de técnicas e procedimentos para estruturar problemas de decisão e desenhar, avaliar e ordenar as soluções alternativas (Malczewski, 2006). Este tipo de análise permite a combinação de informação geográfica e respectiva avaliação de custos em função dessa informação de forma a obter informação útil a um processo de decisão.

A superfície de custo sobre a qual o processo de LCPA actua é usualmente construída com recurso a MCA, onde diversos critérios são combinados simulando os custos de uma dada realidade espacial. Dado que frequentemente são vários os factores capazes de influenciar o custo de construção de uma dada estrutura linear, o processo de LCPA tende a ser utilizado de forma combinada com MCA. Atkinson, et al., (2005) utiliza este conjunto de técnicas para determinar a melhor localização para uma estrada no Árctico. Bagli, et al., (2011) recorre também a esta combinação para determinar os melhores percursos para

implementar linhas eléctricas, para além destas aplicações este conjunto de técnicas também é usual na determinação de traçados de gasodutos ou oleodutos.

O diagrama da Figura 6 representa as etapas da metodologia utilizada neste trabalho para obter a hipotética rede primária de gasodutos.

A primeira etapa consiste no desenvolvimento de *clusters* e respectivos *hubs* através de análise espacial. Neste passo a distribuição espacial das fontes emissoras de CO₂ e dos possíveis locais de injeção são analisados com o intuito de definir agrupamentos lógicos, para cada um deles, baseados na distância dos pontos seus constituinte. Para cada um dos *clusters* resultantes é também determinada a localização espacial de um *hub* que terá como função a centralização do fluxo de CO₂ de todos os pontos constituintes desse *hub*.

A criação de diferentes superfícies de factores de custo é a segunda etapa. As superfícies de custo são uma medida dependente das diferentes características geográficas existentes em cada célula e relativa a um custo base definido para certas características geográficas *standard*. Sempre que as características geográficas, numa dada célula, difiram das características *standard* o valor dos factores de custo será diferente da unidade, representando esta a equivalência ao custo base. Cada uma destas superfícies representa uma variável espacial diferente avaliada em função da sua influência no custo de construção de um gasoduto.

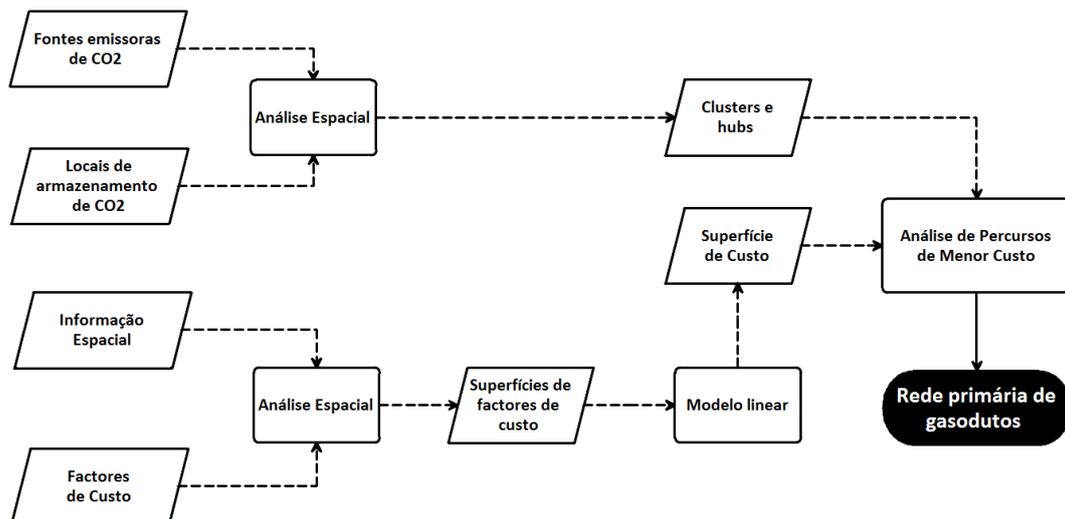


Figura 6. Diagrama com os elementos da metodologia.

Na terceira etapa a superfície de custo é gerada através de um modelo linear de investimento, que representa o processo de análise multicritério, e combina as diferentes superfícies de custo de forma ponderada. No final, o custo de investimento para cada célula integra os custos das diferentes propriedades espaciais da mesma. O modelo linear utilizado que permite determinar o investimento total em cada uma das células da superfície de custo foi adaptado do estudo de (Broek, et al., 2010) e encontra-se representado pela Equação 1.

$$I = B_c \cdot F_a \cdot F_b \cdot F_c \dots F_n \cdot D \cdot L \quad 1$$

Onde **I** representa o custo total de investimento de construção de um segmento de gasoduto numa determinada célula; **B_c** representa o custo base associado às características espaciais *standard*; **F_{a...n}** representa os diferentes factores de custo; **D** o diâmetro do gasoduto e **L** a distância atravessa da pelo gasoduto dentro da célula.

Na última etapa através da análise de caminhos de menor de custo os *hubs* de armazenamento são utilizados como ponto de destino e os *hubs* de regiões de emissão são considerados como pontos de partida.

3.2 Dados

A compilação de dados base foi um processo dificultado pela configuração administrativa da área de estudo que é constituída por três países divididos por dois continentes. Os vários tipos de dados necessários combinados com as diferentes configurações administrativas resultaram no recurso a diversas fontes de informação com escalas diferentes entre temas e países. A Tabela 3 lista os temas base, que representam o ponto de partida para gerar as diferentes superfícies de factores de custo, e as respectivas fontes de informação e escalas.

Os dados para Portugal foram, para a maior parte dos temas, obtidos directamente a partir de fontes oficiais e de forma geral com escalas bastante elevadas e qualidade adequada à resolução de trabalho utilizada neste estudo. A maior parte dos dados para Espanha e Marrocos foram obtidos através de agentes intermediários em cada país, no caso de Espanha o IGME (*Instituto Geológico e Minero de España*) e Marrocos ISR (*Institut Scientifique de Rabat*). Os dados de Espanha foram obtidos, de forma geral, com uma escala menor do que os dados para Portugal no entanto bastante adequada à escala deste estudo. Os dados para Marrocos foram mais difíceis de obter devido à inexistência de muitos dos temas a uma escala nacional, razão pela qual foram utilizados temas com escalas muito pequenas em alguns casos e de qualidade difícil de apurar.

A maior parte dos temas originais não continha metadados o que em conjunto com o recurso a instituições intermediárias dificultou a avaliação das respectivas escalas. Nestes casos, os temas foram sobrepostos com imagens aéreas e de satélite disponíveis online e as suas escalas foram avaliadas visualmente.

Informação	País	Fonte	Escala/Resolução	Sistema de Projecção	Formato
Estradas	Pt	Estradas de Portugal	+1:25000	Datum 73 Hayford Gauss IPCC	SHP
	Sp	IGME	+1:250000	ED 1950 UTM Zone 30N	SHP
	Mo	ISR	-	WGS84	SHP
Caminhos-de-ferro	Pt	REFER	+1:25000	Datum 73 Hayford Gauss IPCC	SHP
	Sp	IGN	1:200000	ETRS89	SHP
	Mo	ISR	1:1000000	WGS 84	SHP
Áreas Protegidas	Pt	ICNB	-	Lisboa Hayford Gauss IGeoE	SHP
	Sp	Europarc	>1:50000	UTM 30	SHP
	Mo	ISR	-	MAROC_ZONE_I	SHP
Alta Velocidade	Sp	IGME	+1:50000	WGS84	KML
Gasodutos	Pt	REN	+1:25000	Datum 73 Hayford Gauss IPCC	DXF
	Sp	IGME	+1:1000000	-	PDF
	Mo	ISR	-	-	IMG
Rios/Massas de Água	Pt	ESRI	1:250000	WGS84	SHP
	Pt (Alqueva)	DCW	1:1000000	WGS84	SHP
	Sp	ESRI	1:250000	WGS84	SHP
	Mo (Rios)	Natural Earth	1:30000000	WGS84	SHP
	Mo (Massas de água)	ISR	-	MAROC_ZONE_I	SHP
Ocupação	-	ESA	~300 m	WGS84	Raster
Hipsometria	-	SRTM 90	~90 m	WGS84	Raster
Limites dos países	-	GADM		WGS84	SHP

Tabela 3. Listagem de dados espaciais utilizados.

4 CASO DE ESTUDO NO MEDITERRÂNEO OCIDENTAL

Neste capítulo serão demonstradas as etapas realizadas até à obtenção de uma rede primária de gasodutos de transporte de CO₂ para a área de estudo. Partindo da metodologia definida no capítulo anterior serão abordados a definição de *clusters* e respectivos *hubs*, o modelo linear utilizado para gerar a superfície de custo e a utilização da técnica de análise de percursos de menor custo.

4.1 Área de Estudo

A área de trabalho utilizada compreende toda a Península Ibérica e parte de Marrocos que se encontra delimitado a sul pelo paralelo N29º. Este limite foi definido devido à inexistência de fontes de CO₂ ou de potenciais locais de armazenamento a sul deste limite. A inclusão de Marrocos no estudo relaciona-se com a proximidade geográfica e com a já existência de gasodutos a fazer a ligação à Península Ibérica. As ilhas Baleares foram descartadas logo à partida dado que não contêm fontes significativas de CO₂, nem se encontram entre dois nós hipoteticamente conectáveis. Ilhas de menor dimensão existentes ao longo das linhas de costa foram mantidas.



Figura 7. Área de estudo.

O sistema de projecção utilizado foi adoptado do projecto COMET que por sua vez foi desenvolvido pelo BRGM (*Bureau de Recherches Géologiques et Minières*) especificamente para área de estudo em questão (Tabela 4).

Falso Este	500000.000000
Falso Norte	300000.000000
Meridiano central	-5.400000
Standard Parallel 1:	33.300000
Factor de escala	0.999626
Latitude de origem	33.300000
Unidade linear	metro
Sistema de coordenadas geográficas	GCS_Meridich_Degree

Tabela 4. Parâmetros do sistema de coordenadas utilizado.

A resolução espacial utilizada para desenvolver a superfície de custos e determinar os percursos mais custo-eficientes foi 300 m.

4.2 Definição de *Clusters*

Como já foi referido o recurso a *clusters* permite gerar redes de transporte mais eficientes do ponto de vista económico. Nesta secção será realizada a descrição dos critérios utilizados para criar *clusters* de fontes estacionárias de CO₂ e de pontos de locais de injeção. Será também abordado o método de definição dos respectivos *hubs*.

4.2.1 CLUSTERS DE FONTES DE CO₂

A inventariação das fontes produtoras de CO₂ da área de estudo foi realizada pelo projecto COMET (Boavida & Sardinha, 2011), em que para além das respectivas localizações foram também recolhidos os valores das emissões de CO₂ para o período de 2005 a 2009. No total foram identificadas 285 grandes fontes estacionárias de CO₂. A Tabela 5 mostra a sua distribuição pelos três países e respectivas médias de emissões anuais, onde podemos verificar que a grande maioria do número de fontes e das emissões se encontra em Espanha, cerca de 78% e 73% respectivamente.

País	Número de fontes	Emissões de CO ₂ (Mt CO ₂ /year)			
		Média	Mínimo	Máximo	Total
Marrocos	29	1.0	0.05	5.9	27.9
Portugal	35	0.8	0.07	7.4	28.1
Espanha	221	0.7	0.1	7.6	153.0

Tabela 5. Estatísticas de emissão de CO₂ para cada país.

O mapa da Figura 8 mostra a localização das fontes e respectivas emissões, dele podemos observar que, tal como seria de esperar, as fontes de CO₂ ocorrem muitas vezes associadas aos maiores centros urbanos, justo à costa e/ou próximas de grandes rios. A zona que sobressai com maior densidade de fontes é a região Norte de Espanha e a zona com maior volume de emissões de CO₂ o Noroeste de Espanha.

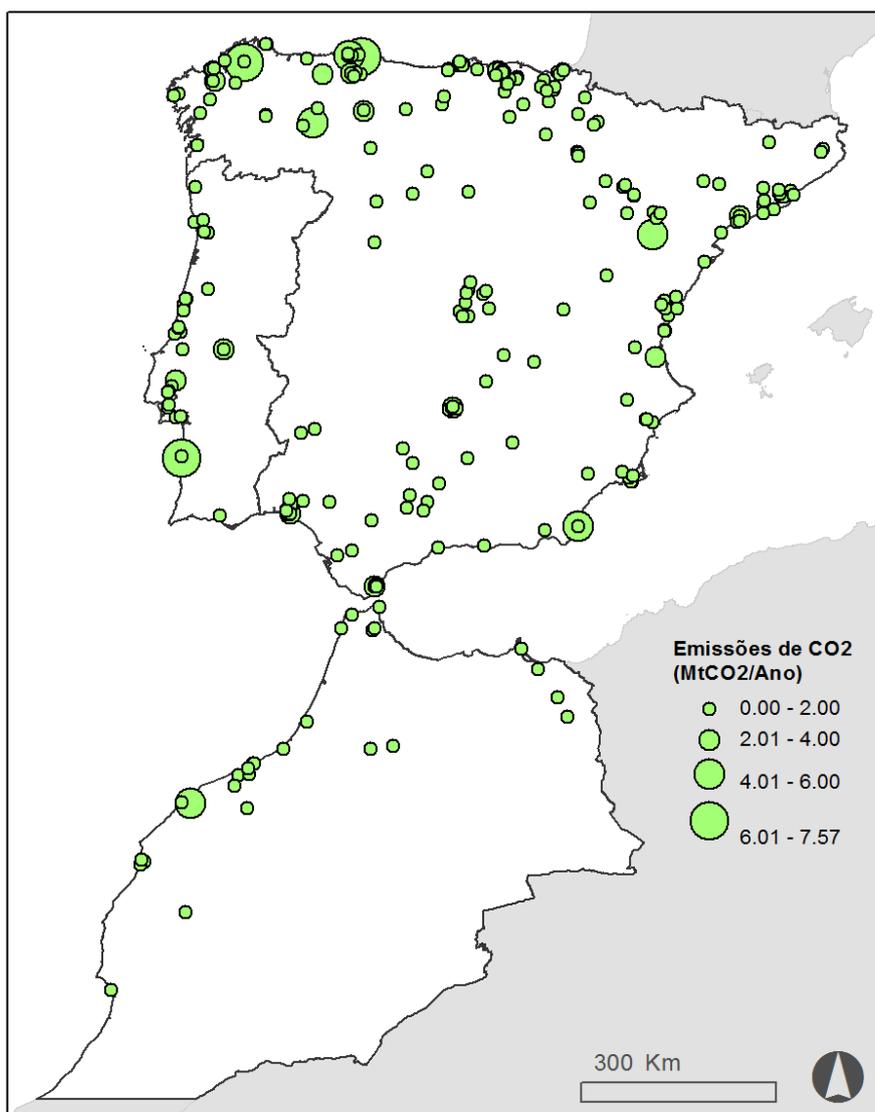


Figura 8. Localização de fontes de CO₂ e média anual das emissões de CO₂ entre o período 2005 a 2009.

O agrupamento de fontes de CO₂ em *clusters* foi realizado manualmente com base em três critérios:

- 1) Distâncias entre fontes – Os *clusters* devem agrupar fontes próximas entre si e estas devem manter uma distribuição homogénea em cada *cluster*;
- 2) Direcções dos percursos de menor custo – Foram realizados alguns ensaios sobre uma superfície de custo provisória conectando fontes individuais a locais de injeção individuais e conectando fontes

individuais a *hubs* de locais de injeção. A união ou não destes percursos levando a um mesmo destino foi levada em consideração em alguns casos;

- 3) Barreiras geográficas e infra-estruturas – Foi realizada uma análise dentro aos *clusters* aparentemente mais problemáticos por forma a determinar a existência de eventuais barreiras, declives muito elevados, áreas protegidas, rios importantes e infra-estruturas de transporte. Este critério foi incorporado para minimizar possíveis futuros problemas na conexão das fontes de cada *cluster* ao respectivo *hub*.

Dos três critérios descritos, o primeiro foi aquele que teve maior importância dado que uma distribuição muito desequilibrada das fontes dentro de um mesmo *cluster* pode trazer alguns problemas no desenho das redes secundárias.

O segundo critério, embora tenha menor importância, foi o ponto de partida para a definição de *clusters*. Foram determinados percursos a partir de todas as fontes individuais até aos locais de injeção individuais mais próximos e até aos *hubs* de armazenamento mais próximos. Esta análise pretendeu inferir quais as fontes individuais que produziam percursos até aos mesmos destinos e se os traçados se uniam em certo ponto do percurso. Para além de permitir determinar a agregação de fontes de CO₂ em função do destino os percursos também teriam a potencialidade de identificar barreiras geográficas, que à partida teriam custos mais elevados.

O terceiro critério, foi aplicado em alguns *clusters*, na existência de barreiras de custo entre fontes de um mesmo *cluster* hipotético esse *cluster* seria dividido por forma a evitar custos mais elevados com a rede secundária de gasodutos.

Resultaram deste processo 55 *clusters*, 23 fontes mantiveram-se isoladas mas para efeitos da análise foram considerados como *clusters* de uma fonte. O mapa da Figura 9 mostra os *clusters* de fontes a considerar na análise.

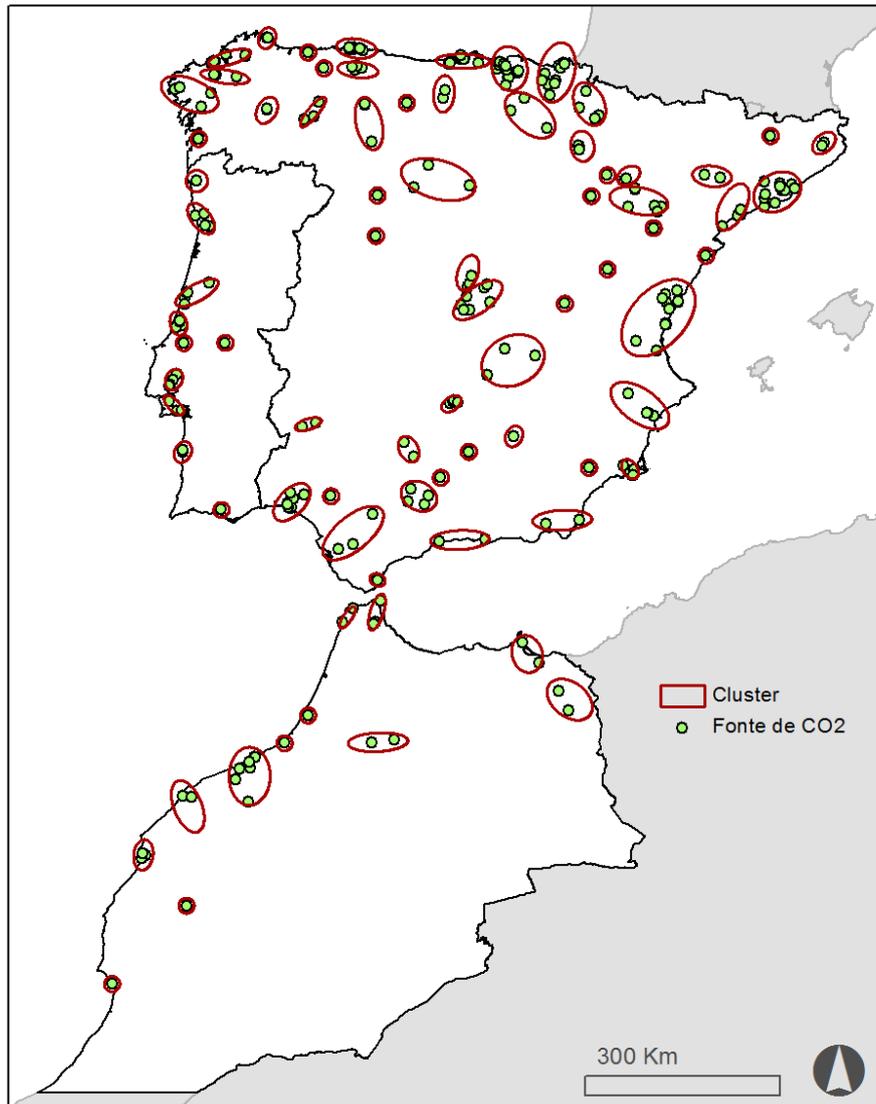


Figura 9. *Clusters* de fontes de CO₂.

4.2.2 CLUSTERS DE INJEÇÃO DE CO₂

O inventário de possíveis locais de injeção foi também recolhido no âmbito do projecto COMET (Martínez & Carneiro, 2011). Um local ou ponto de injeção representa o ponto na superfície terrestre onde o CO₂ pode ser injectado no reservatório geológico em profundidade. Na base dados do projecto COMET

o ponto de injeção foi considerado como a localização um furo já existente ou, na inexistência deste o centróide do polígono que define os limites das bacias ou estruturas sedimentares. A Tabela 6 contém as distribuições dos locais por cada país e respectivas capacidades totais de armazenamento, Espanha têm cerca de 73% da capacidade disponível considerada e Portugal 23%. Marrocos tem uma capacidade muito reduzida em relação ao total que é cerca de 30 Gt mas as suas capacidade de armazenamento *offshore* não foram contabilizadas no projecto COMET. O mapa da Figura 10 mostra a localização, capacidades e respectivas bacias ou estruturas sedimentares dos locais de injeção considerados.

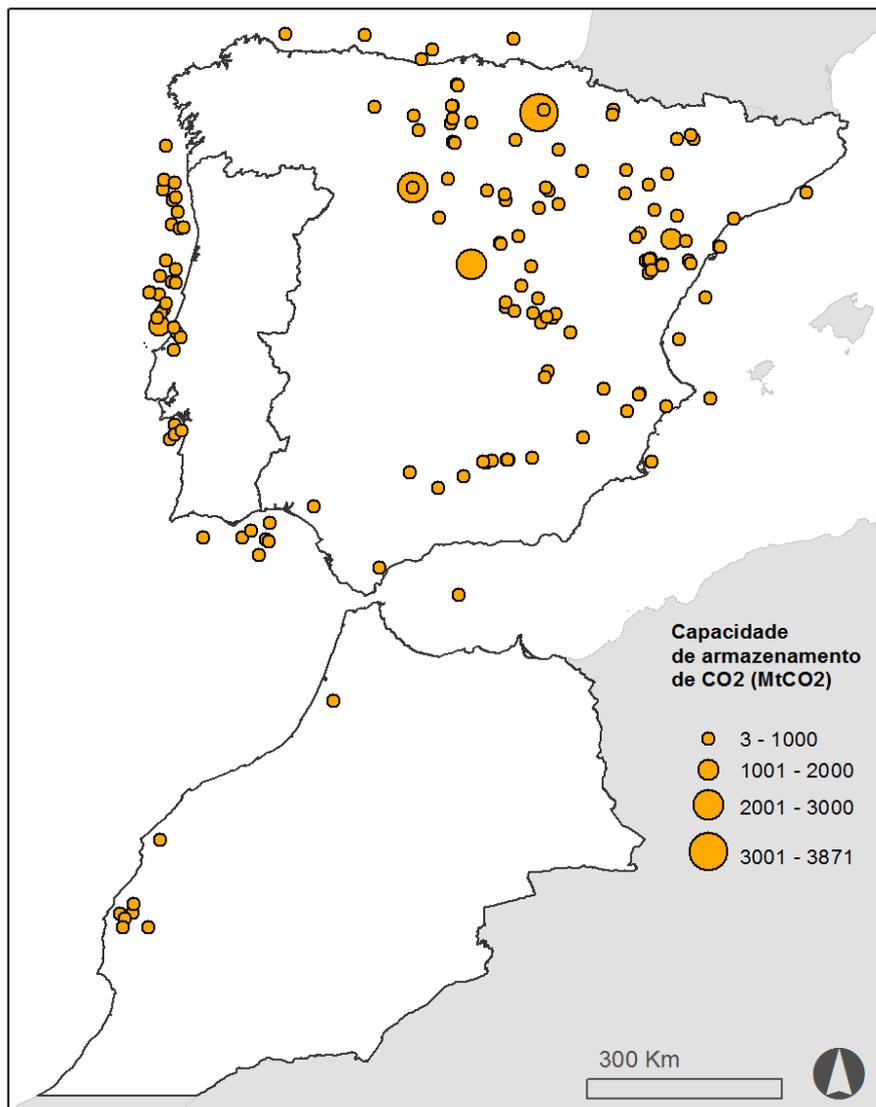


Figura 10. Localização dos locais de injeção de CO₂ considerados e respectivas capacidades.

País	Número de pontos de injeção	Capacidade de armazenamento (Mt CO ₂)			
		Média	Mínimo	Máximo	Total
Marrocos	9	46.3	3.8	81.1	416.6
Portugal	36	207.5	5.0	1024.0	7469.0
Espanha	118	184.5	3.4	3871.1	21776.1

Tabela 6. Estatísticas de armazenamento de CO₂ para cada país.

Na definição de *clusters* de locais de injeção foram também utilizados três critérios:

- 1) Continuidade da bacia ou estrutura geológica – múltiplos pontos de injeção pertencentes à mesma bacia sedimentar, fazendo com que exista a possibilidade do CO₂ injectado se espalhe ao longo de diferentes locais de injeção, foram incluídos num mesmo *cluster*;
- 2) Distância entre locais de injeção – a distância entre pontos de um mesmo *cluster* foi considerada, sem no entanto nenhum valor constante ter sido imposto. Este critério permite que pontos de uma mesma bacia/estrutura geológica constituam diferentes *clusters* quando muito distantes entre si;
- 3) Localização *onshore* ou *offshore* dos pontos de injeção – devido aos custos bastante diferentes entre o armazenamento *onshore* ou *offshore*, não se recorreu a *clusters* de pontos mistos *onshore/offshore*, mesmo quando existe continuidade geológica entre eles.

Foram obtidos 29 *clusters* de locais de injeção, ilustrados na Figura 11, enquanto 14 dos pontos foram mantidos isolados, mas tratados como *clusters* de um só ponto.

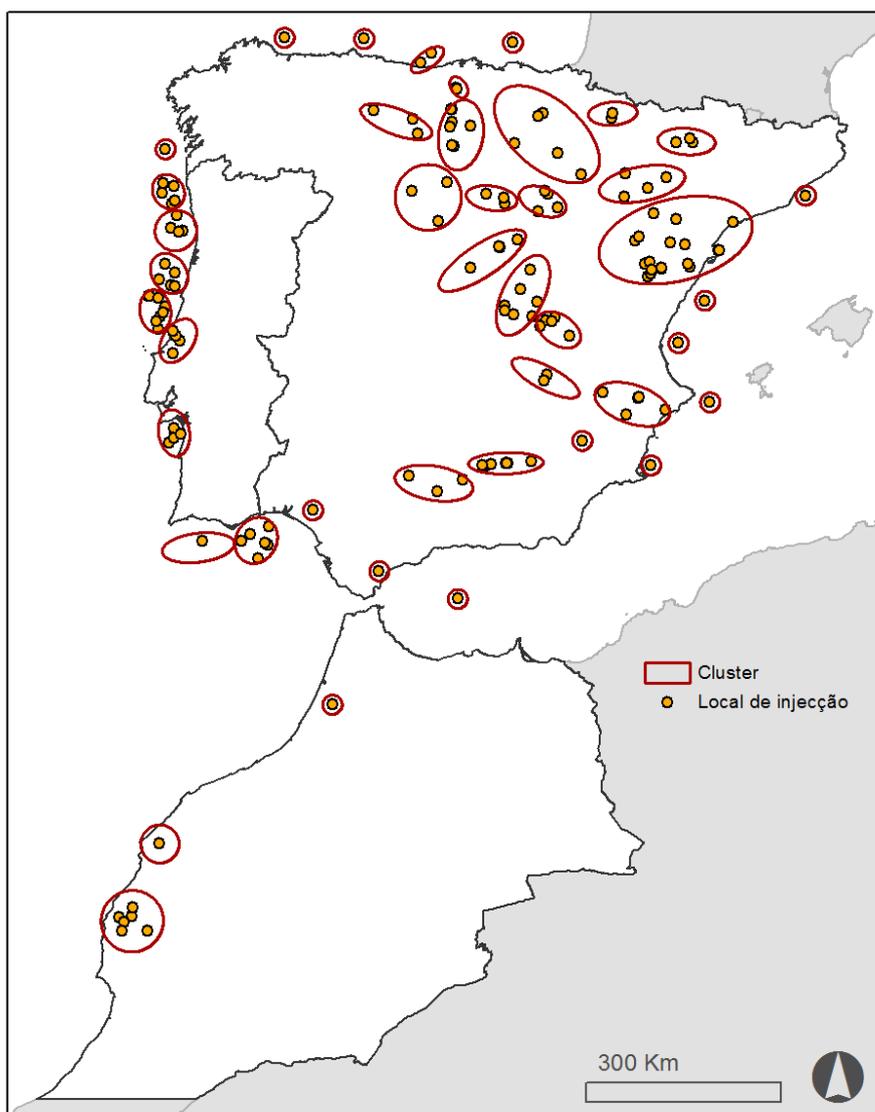


Figura 11. Clusters de locais de injeção de CO₂.

4.2.3 HUBS

De forma idêntica ao que foi feito pelo estudo de Broek, et al., (2010) a posição dos *hubs* para cada *cluster* foi obtida através da determinação do centro médio dos pontos constituintes desse *cluster* ponderando pela produção de CO₂, no caso de *clusters* de fontes, ou pela capacidade de armazenamento de CO₂, no caso de clusters de locais de injeção. A ferramenta *Mean Center* da extensão *Spatial Statistics* do ArcGIS foi utilizada para este propósito. No caso de fontes de CO₂ ou locais de injeção e CO₂ não enquadrados em *clusters* o *hub* utilizado na análise corresponde à posição do respectivo ponto.

Esta abordagem permite aproximar os *hubs* às fontes de cada *cluster* com mais produção de CO₂ e aos locais de injeção com mais capacidade de armazenamento fazendo com que o diâmetro dos gasodutos secundários com maior fluxo de CO₂ seja mais curto, traduzindo-se em benefícios económicos (Broek, et al., 2010). Os *hubs* definidos para cada caso encontram-se nas Figuras 12 e 13.

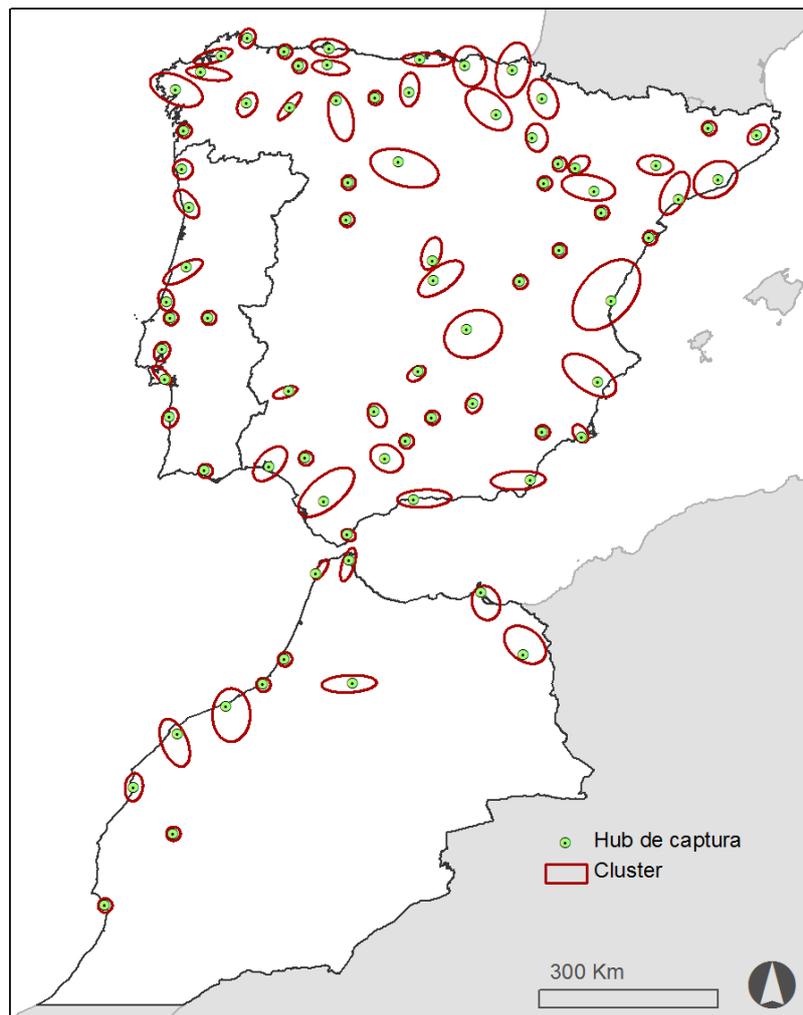


Figura 12. Hubs de captura de CO₂.

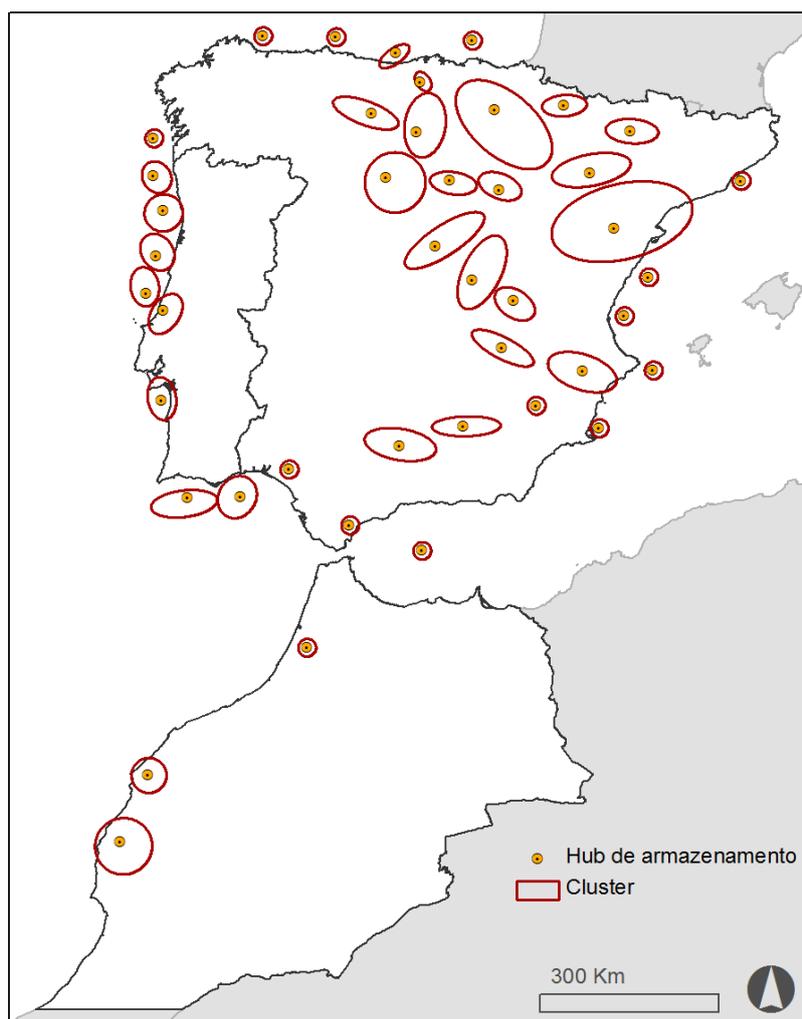


Figura 13. Hubs de armazenamento de CO₂.

A Figura 14 mostra as distâncias de cada ponto ao respectivo *hub* onde se pode ver que existe uma maior afastamento no caso dos *clusters* do que nos clusters de locais de injeção. A diferença entre ambos os tipos de *clusters* está provavelmente relacionada com o maior número de fontes de CO₂ do que de locais de injeção e também se relaciona possivelmente com a maior subjectividade na marcação de *clusters* de fontes.

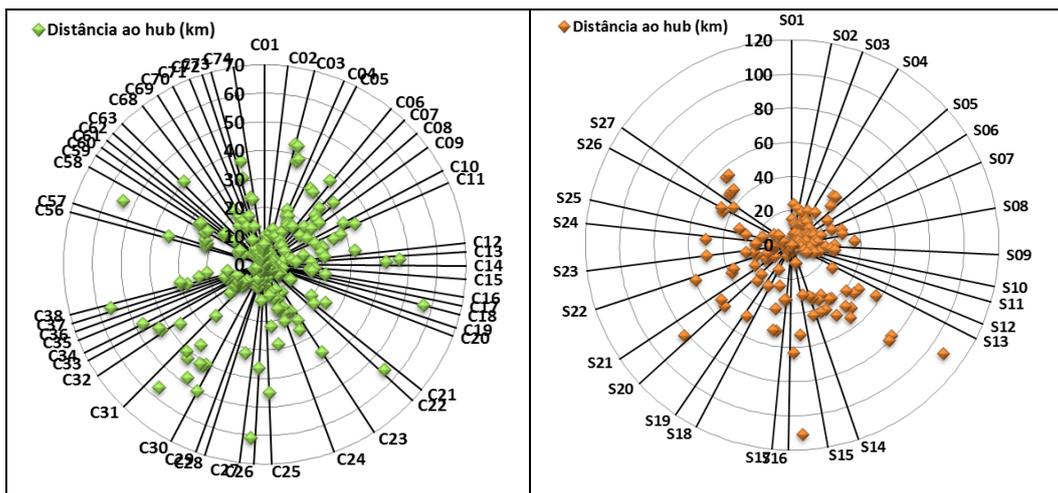


Figura 14. Distâncias de cada ponto ao respectivo *hub*. (Esquerda: fontes; Direita: locais de injeção).

4.3 Superfície de Custo

O desenvolvimento da superfície de custo necessita de três elementos base, informação espacial, factores de custo e um modelo de integração. Os factores de custo utilizados nesta etapa foram seleccionados de acordo com a experiência de outros estudos relacionados com transporte de CO₂, particularmente o estudo de (Chen, et al., 2009) na província de Hebei, China e o estudo de (Broek, et al., 2010) na Holanda, com este último a ser mais relevante. Ambos utilizam modelos lineares para gerar uma superfície de custos que permita a obtenção dos percursos mais custo-efectivos adaptados a respectiva realidade espacial local. No caso de estudo na China o declive foi um dos factores considerados ao passo que no estudo holandês essa variável não foi considerada

4.3.1 FACTORES DE CUSTO

Os factores de custo considerados dividem-se por quatro grupos relacionados com: ocupação e uso do solo; infra-estruturas de transporte; corredores e declive. Para cada um destes grupos foi criada uma superfície onde cada célula toma o valor do respectivo custo. A Tabela 7 mostra os quatro factores de custo considerados, as classes que os constituem e os respectivos

pesos que representam a sua influência nos custos de construção de um gasoduto.

Factores de Custo		
Designação	Descrição	Valor
Ocupação e uso do solo (F_{lu})	Áreas despovoadas	1
	Zonas urbanas e associadas	1.8
	Áreas protegidas	10
	Áreas agrícolas	1.1
	Floresta	1.3
	Zonas sem vegetação	1.1
	Regularmente inundáveis	1.2
	Corpos de água	4
Infra-estruturas de transporte (F_{ci})	Estradas	3
	Caminhos-de-ferro	3
	Caminhos-de-ferro de alta velocidade	3
Corredores (F_c)	Inexistência <i>offshore</i>	3
	Existência <i>offshore</i>	2.7
	Existência <i>onshore</i>	0.9
	Inexistência <i>onshore</i>	1.0
Declive (F_s)	<10%	1
	10-20%	1.1
	20-30%	1.2
	30-70%	3
	>70%	9
Custo base (B_c)	€2010/(m*m)	1357 €

Tabela 7. Factores de custo.

Os diferentes pesos de cada factor traduzem, em função da realidade espacial, a variação de custo relativamente a um valor base de custo. Este valor representa o custo em euros (2010) de se construir um metro de gasoduto com um metro de diâmetro, numa zona despovoadas, sem atravessar nenhuma infra-estrutura de transporte, sem corredores pré-existentes e com um declive abaixo de 10%. Assim, segundo a Tabela 7, o custo de passar sobre um corpo de água é 4 vezes superior ao de atravessar uma zona despovoadas e portanto, tomando em consideração apenas os factores relacionados ocupação e uso do solo, o custo seria quatro vezes superior ao do custo base.

O valor dos factores de terreno e do custo base costumam ser baseados em consultas no sector dos gasodutos, discussões realizadas com agentes interessados e baseados em factores utilizados em situações análogas, tais como redes de gasodutos de gás natural e redes eléctricas. Os factores de custo utilizados para este trabalho foram definidos no âmbito do projecto COMET (Broek, 2013) seguindo três passos:

- Um inventário com factores de terreno e custos base utilizados em modelos de construção de gasodutos foi retirado da literatura existente;
- Foram realizados questionários a companhias com experiência no sector dos gasodutos em Espanha, Portugal e Marrocos. O questionário incluiu questões relacionadas com os métodos de cálculos e de distribuição e custos pelos diferentes componentes de construção (trabalho, materiais, equipamento entre outros). Foram também realizadas questões acerca do intervalo de valores para os factores de terreno e custos base;
- Discussões entre diferentes parceiros com experiência em SIG resultou numa lista final com um custo base de construção e factores de terreno.

4.3.1.1 Factores de custo associados à ocupação e uso do solo

Informação acerca da ocupação e uso do solo é relevante dado que os custos de construção variam consoante as classes existentes no terreno, construir um troço de gasoduto numa zona de agricultura é uma tarefa mais fácil, e logo mais económica, do que construir um troço equivalente numa zona urbana, dado que para esta última podem existir constrangimentos do ponto de vista do planeamento, legais, de segurança e técnicos (Serpa, et al., 2011).

A criação da superfície com os custos relativos à ocupação e uso do solo recorreu a três tipos diferentes de informação espacial. O uso de diferentes fontes de informação deveu-se à inexistência de um mapa que permitisse retirar todas as classes, deste grupo, descritas na Tabela 8 Assim, a base desta superfície foi a carta GlobeCorine¹ 2009 (ESA, 2011) à qual foi adicionada informação sobre rios e massas de água de maior dimensão e áreas protegidas. Estas três componentes encontram-se seguidamente descritas.

GLOBECORINE

A carta GlobeCorine 2009 produzida pela Agência Espacial Europeia (ESA), tem uma resolução espacial de 300 m e foi gerada automaticamente a partir de informação adquirida pelo sensor MERIS do satélite ENVISAT entre Janeiro e Dezembro focado na Europa e na bacia do Mediterrâneo (Defourny, et al., 2010).

Esta fonte de informação foi utilizada em detrimento de outras, como a carta Corine Land Cover produzida pela Agencia Europeia do Ambiente (EEA), devido à inclusão dos três países da área de estudo num mesmo mapa, e consequentemente com a mesma nomenclatura de classes. Outros factores também importantes são o menor número de classes, quando comparada com a carta GlobeCorine, mantendo estas no entanto elevada relevância nos custos de construção de gasodutos.

O mapa da Figura 15 representa a carta GlobeCorine para a área de estudo e respectivas classes, a equivalência entre as classes originais e as classes utilizadas na superfície encontra-se na Tabela 8.

¹ © ESA 2010 and Université Catholique de Louvain



Figura 15. Carta GlobeCorine com a legenda original.

Código	Classes GlobeCorine	Nova Classe
10	Urban and associated areas	Zonas urbanas e associadas
20	Rainfield cropland	Áreas agrícolas
30	Irrigated cropland	Áreas agrícolas
40	Forest	Floresta
50	Heathland and sclerophyllous vegetation	Áreas despovoadas
60	Grassland	Áreas despovoadas
70	Sparsely vegetated area	Áreas despovoadas
80	Vegetated low-lying areas on regularly flooded soil	Regularmente inundável
90	Bare areas	Zonas sem vegetação
100	Complex cropland	Áreas agrícolas
110	Mosaic cropland / natural vegetation	Áreas agrícolas
120	Mosaic of natural vegetation	Áreas despovoadas
200	Water bodies	Corpos de água
210	Permanent snow and ice	Inexistente na área de estudo
230	No data	-

Tabela 8. Classes originais GlobeCorine e respectivos factores de custo considerados.

RIOS E MASSAS DE ÁGUA

A carta GlobeCorine inclui uma classe referente à existência de água, mas esta é uma classe inconsistente. Em alguns casos, provavelmente relacionado secções menos largas dos rios, não existe continuidade nas células identificadas como água, e noutras situações mais a montante, os rios chegam a desaparecer completamente, mesmo os de maiores dimensões como é o caso do rio Tejo. Esta inconsistência encontra-se certamente relacionada com a resolução espacial de 300 metros da carta, demasiado pequena para detectar troços de água mais estreitos. Por forma a colmatar esta falha da carta GlobeCorine, foram recolhidas informações sobre os maiores rios e corpos de água existentes na área de trabalho. Devido à inexistência de uma única fonte capaz de fornecer esta informação foram recolhidos elementos de três fontes diferentes: a informação sobre os rios e grandes massas de água da Península Ibérica foi obtida a partir de informação espacial da ESRI para a Europa enquanto os rios de Marrocos foram obtidos do website *Natural Earth* (Natural earth, 2012) as massas de água para este último foram fornecidas pelo ISR (*Université de Rabat*). Todos os elementos considerados estão representados na Figura 16.

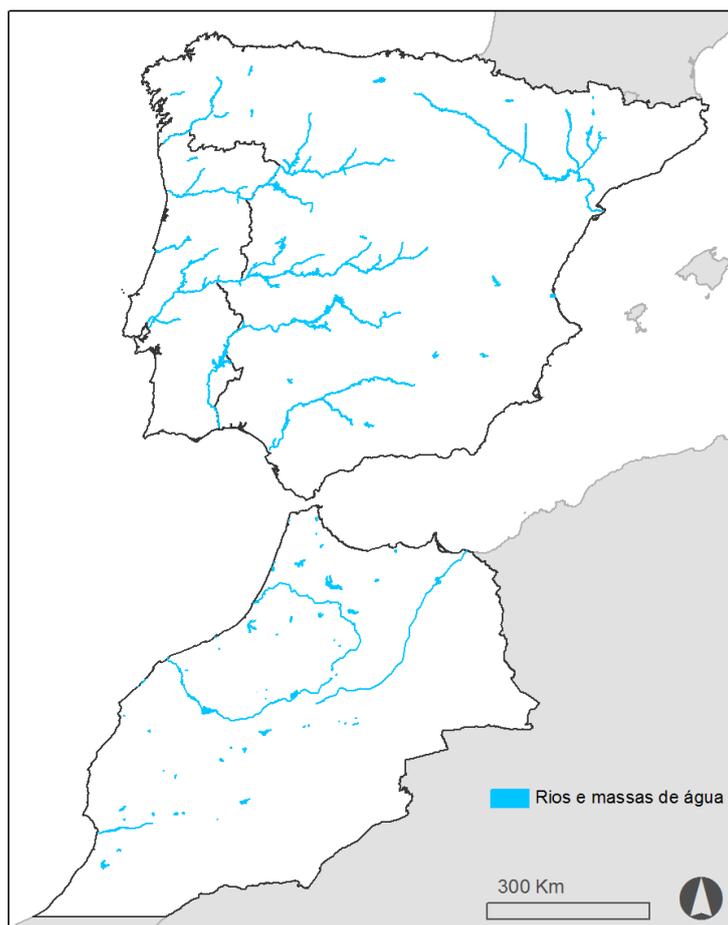


Figura 16. Rios e massas de água de maiores dimensões.

ÁREAS PROTEGIDAS

As áreas protegidas existentes foram também recolhidas partir de diferentes fontes de informação para cada país. A informação de Portugal foi obtida a partir do Instituto de Conservação da Natureza e Biodiversidade (ICNB, 2011), a informação de Espanha foi recolhida a partir da federação Europarc (Europarc Spain, 2011), a informação para Marrocos foi digitalizada pelo ISR. O mapa da Figura 17 representa todas as áreas protegidas consideradas.

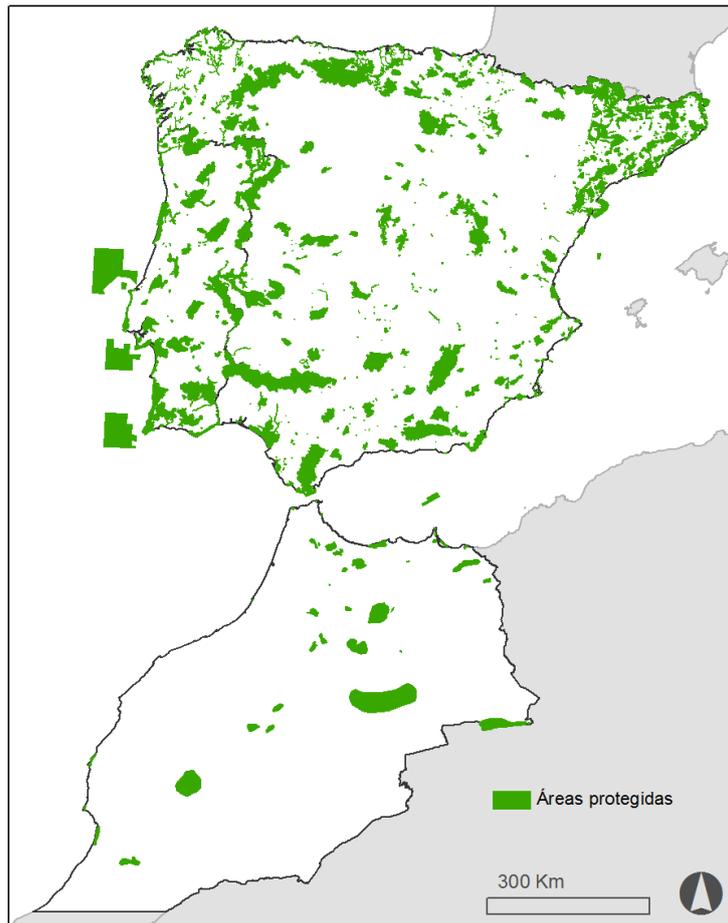


Figura 17. Áreas protegidas consideradas.

A Figura 18 contém o mapa com a integração destes três temas com as respectivas classes e pesos considerados. A obtenção desta superfície foi conseguida através da sobreposição sucessiva dos diferentes temas considerados por ordem do aumento do respectivo peso da classe. Partindo da carta GlobeCorine às células correspondentes a água do tema rios e massas de água foi atribuído o valor 4. À superfície resultante foi então adicionada informação sobre as áreas protegidas, através de igual método, as células pertencentes a áreas protegidas tomariam o valor 10.

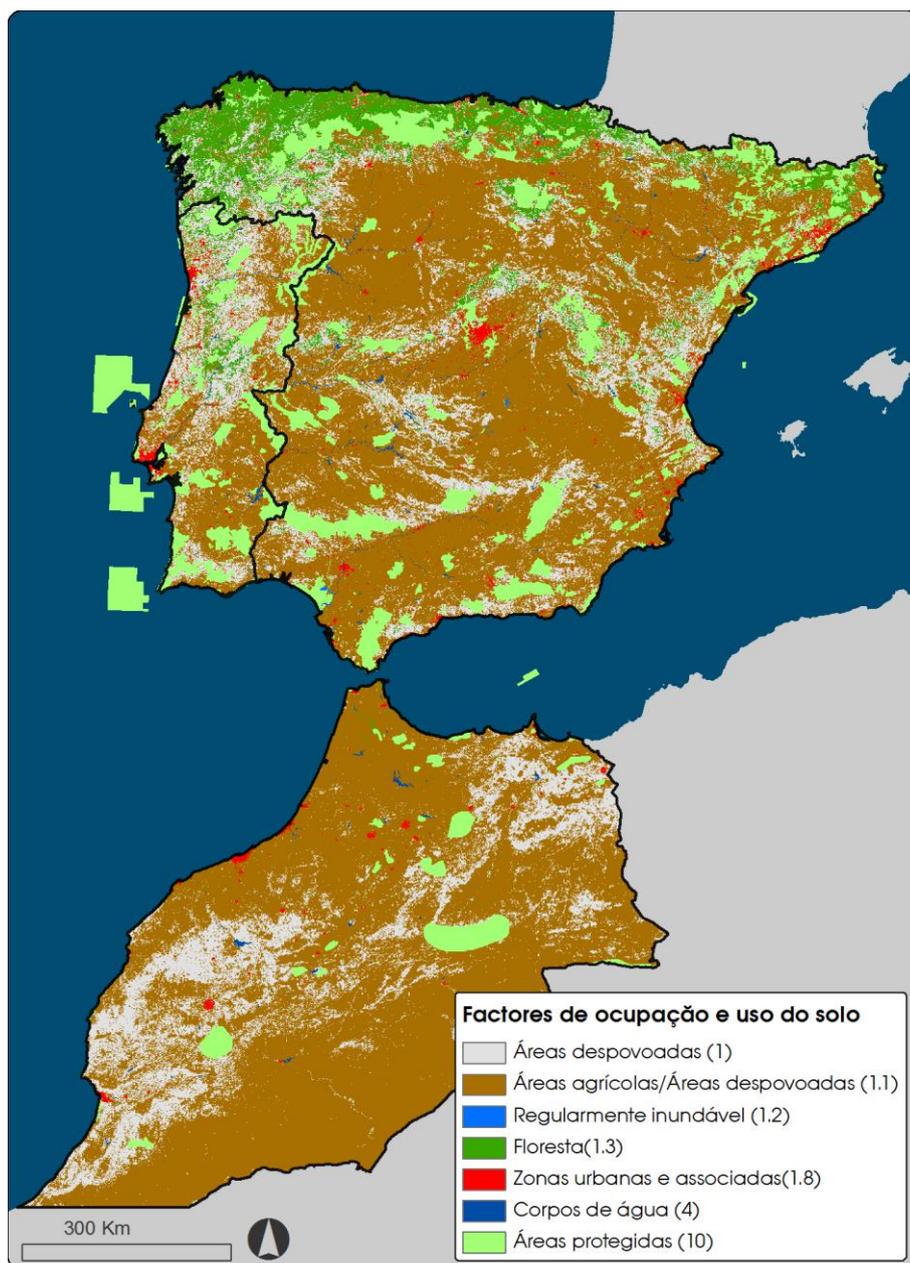


Figura 18. Factores de custo associados à ocupação e uso do solo.

4.3.1.2 Factores de custo associados ao declive do terreno

O declive tem influência nos custos de construção de gasodutos de forma proporcional, com o aumento de declive aumenta também o custo devido à dificuldade acrescida de colocação dos troços, sobretudo em declives muito sinuosos (Serpa, et al., 2011).

A fonte de elevação utilizada para gerar o declive foi o modelo digital de terreno (MDT) resultante da missão SRTM, *Shuttle Radar Topography Mission*, esta foi uma missão conjunta do NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*) e da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Este MDT, com uma resolução espacial próxima de 90 m pode ser obtido a partir do recurso web (<http://srtm.csi.cgiar.org>).

A superfície de declive foi obtida através da ferramenta *slope* da extensão *spatial analyst* do ArcGIS 10 que derivou o declive, em percentagem, para células de 300 m, que foram depois classificadas de acordo com os valores da Tabela 7, a Figura 19 mostra a superfície resultante.



Figura 19. Factores de declive.

4.3.1.3 Factores de custo associados a travessias de infra-estruturas

As infra-estruturas de transporte constituídas por estradas, auto-estradas, caminhos-de-ferro e caminhos-de-ferro de alta-velocidade foram recolhidas à escala nacional de cada país, a partir de fontes internas dos mesmos. Este tipo de estruturas lineares tem a potencialidade de afectar a construção de gasodutos e podem ser considerados grandes obstáculos no percurso do mesmo (Serpa, et al.,

2011) aumentando o seu custo. O mapa da Figura 20 mostra todas as infra-estruturas consideradas.



Figura 20. Infra-estruturas de transporte consideradas.

As fontes de informação para esta superfície variaram consoante o tipo de infra-estrutura e país. Informação para Portugal foi fornecida pelas Estradas de Portugal (EP), e pela Rede Ferroviária Nacional (REFER) respectivamente para estradas e caminhos-de-ferro. Para os restantes países a informação foi fornecida

por instituições parceiras, assim, IGME (*Instituto Geológico y Minero de España*) e o ISR forneceram respectivamente as informações para Espanha e Marrocos. A rede de alta-velocidade planeada para Portugal chegou a ser considerada, mas foi removida devido à baixa probabilidade de ser concretizada nos próximos anos. Factores de custo associados à existência de corredores

Este conjunto de factores pretendem reflectir a diminuição de custos que ocorre quando se constrói um gasoduto no corredor de um gasoduto já existente. Esta diminuição nos custos ocorre dado que são zonas já estudadas e com direitos de propriedade adquiridos. Estes factores distinguem entre corredores de gasodutos *onshore* e *offshore*, o primeiro tipo representa gasodutos construídos em terra e o segundo tipo gasodutos construídos no oceano. O mapa da Figura 21 mostra a rede de gasodutos já existentes considerada.

A informação sobre a rede de gasodutos já existente em Portugal foi fornecida pela Redes Energéticas Nacionais (REN), para Espanha foi digitalizada a partir de um mapa fornecido pelo IGME e para Marrocos foi digitalizada a partir de diferentes mapas fornecidos pelo ISR e ONHYM. Embora para Marrocos, devido à impossibilidade de aceder a informação já vectorizada tenha sido imperativa a digitalização dos mapas fornecidos, para Espanha existia informação vectorial, mas com uma precisão bastante reduzida, assim optou-se por digitalizar também esta informação devido ao maior detalhe do mapa fornecido no formato PFD.



Figura 21. Gasodutos existentes.

4.3.2 MODELO LINEAR DE INTEGRAÇÃO

O modelo linear utilizado para determinar o investimento total foi adaptado do estudo de Broek, et al., 2010. A Equação 2 representa o custo de investimento para cada uma das células da superfície de custo.

$$I = B_c \cdot F_c \cdot F_s [F_{LU} \cdot (1-0.1N) + (0.1N \cdot F_{CI})] \cdot D \cdot L \quad 2$$

Onde: I = Custo de investimento do gasoduto (€)

B_c = Custo base (€/m.m)

F_{LU} = Factor de custo associado ao atravessamento de diferentes tipos de ocupação de solo

F_c = Factor de custo referente ao uso de corredores já existentes

F_s = Factor de custo referente ao declive do terreno

F_{CI} = Factor de custo referente ao cruzamento de infra-estruturas de transporte

N = Número de estruturas de transporte por célula

D = Diâmetro do gasoduto (m)

L = Comprimento do gasoduto (m)

A aplicação desta equação na criação da superfície de custo foi realizada através de álgebra de mapas onde as variáveis L e D são excluídas. A variável L é integrada directamente pela ferramenta de determinação de percursos levando em consideração a distância percorrida dentro da célula (ESRI, 2011c) e o diâmetro considerado é 1 m. Significando portanto que o resultado obtido, para cada célula, representa o custo de construção de uma secção de um metro de um gasoduto com um metro de diâmetro. O custo de investimento total do gasoduto é dado pelo somatório dos custos em cada célula.

Esta expressão, multiplica os diferentes factores intrínsecos a cada célula pelo custo base por forma a obter o custo do seu atravessamento. No caso dos factores relacionados com o atravessamento de infra-estruturas de transporte foi feita uma alteração em relação ao caso de estudo Holandês. Dado que a resolução da análise é 300 m, valor bastante superior à largura de uma estrada ou caminho-de-ferro, estes factores não foram multiplicados pelos restantes custos, o que implicaria que a sua influência iria ocorrer em toda a célula, para em vez disso serem ponderados em função do número de infra-estruturas (N) existentes em cada célula. Assim, o custo das infra-estruturas contará apenas 10%, por cada elemento existente na célula, e a restante proporção do custo será avaliada em função dos factores de ocupação e uso do solo. Por exemplo o custo total numa célula com 2 estradas, avaliado pela componente entre parenteses rectos da

equação (2), e com uma ocupação da classe Floresta, será avaliada como 20% devido às estradas e 80% devido à floresta. Esta adaptação não foi realizada em células correspondentes a áreas protegidas dado que a diferença nos factores de custo faria com que se desse uma diminuição do custo nas células de áreas protegidas onde ocorrem infra-estruturas de transporte, indo contra a função restritiva do elevado valor atribuído a estas áreas.

A Figura 22 contém a superfície de custos final com a região de Madrid ampliada no canto inferior direito. Os custos obtidos variam entre 1221€/m.m e 122,130€/m.m. O primeiro valor corresponde à construção num corredor de um outro gasoduto já existente, que é avaliado com 90% do custo base, quando não existe a interferência de outros factores. O valor mais elevado encontra-se associado a células localizadas dentro de uma área protegida, com declive acima de 70%, sem cruzar nenhuma infra-estrutura de transporte e sem seguir o percurso de um gasoduto já existente :

$$I_{\text{célula}} = B_C \cdot F_C \cdot F_S \cdot F_{Lu} = 1357 \cdot 1 \cdot 10 \cdot 9 = 122,130 \text{ €/m.m}$$

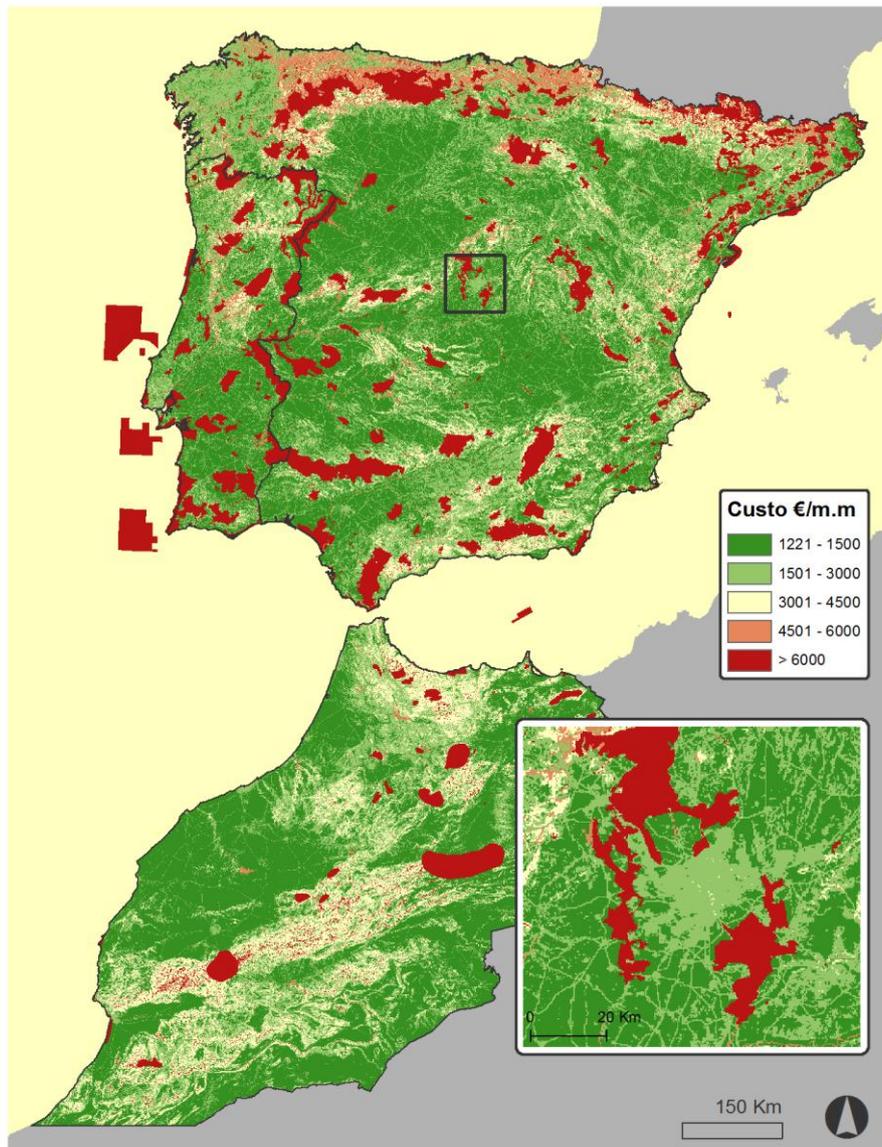


Figura 22. Superfície de custo.

4.4 Percursos de Menor Custo

A determinação dos percursos de menor custo foi realizada através das ferramentas de distância presentes na extensão do *Spatial Analyst* do ArcGIS 10. No âmbito deste trabalho e para ilustrar a técnica de LCPA utilizada foi determinada uma rede primária de gasodutos que conecta todos os *hubs* de fontes emissoras ao *hub* de armazenamento mais custo-eficiente sobre a superfície de custo

A superfície de custo é depois utilizada em conjunto com as localizações dos *hubs* de armazenamento para determinar a superfície de custos cumulativos e a superfície *cost backlink*. A superfície de custos cumulativos, Figura 23, indica para cada célula o custo até ao *hub* de armazenamento mais próximo (ESRI, 2011a).

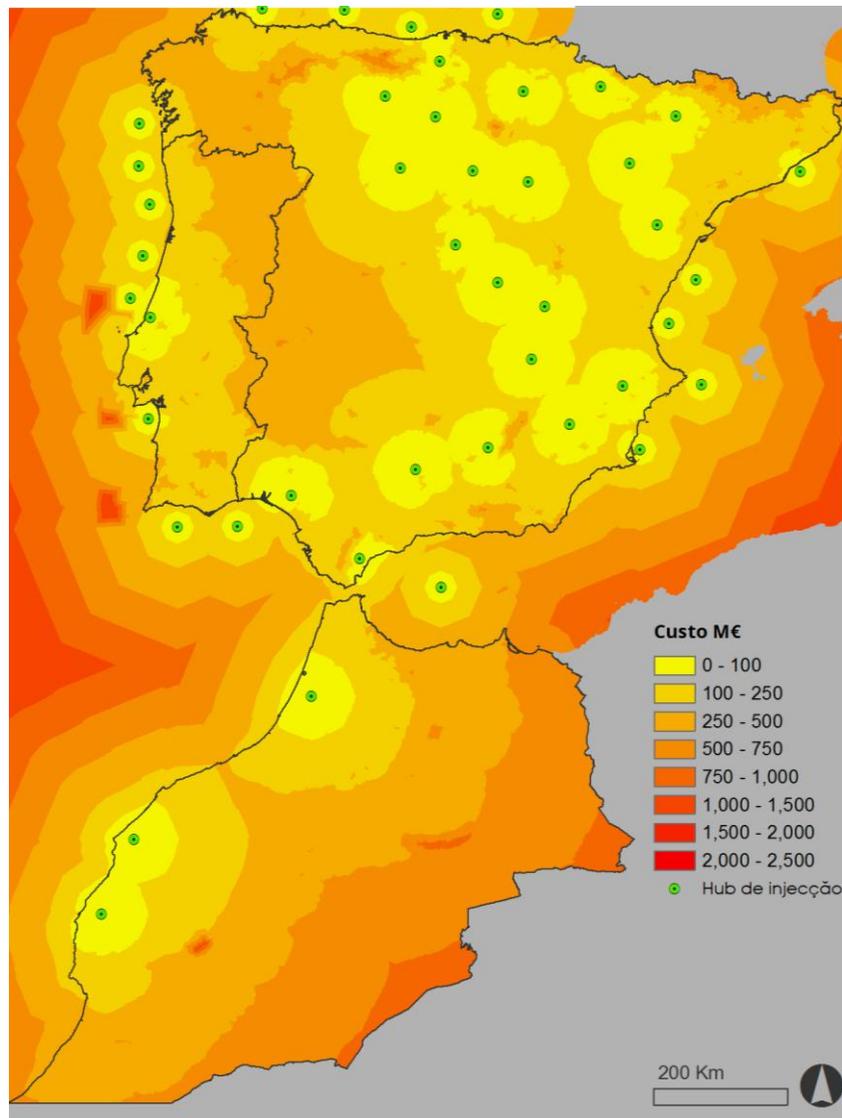


Figura 23. Superfície de custo acumulado.

A superfície de orientação de menor custo Figura 24 é uma superfície onde o valor de cada célula indica a direcção da célula de menor custo cumulativo até ao destino (ESRI, 2011b), neste caso os *hubs* de armazenamento. Esta superfície

toma valores entre 0 e 8, onde o valor 0 representa o destino e cada um dos valores de 1 a 8 uma direcção, como ilustrado na legenda da Figura 24.

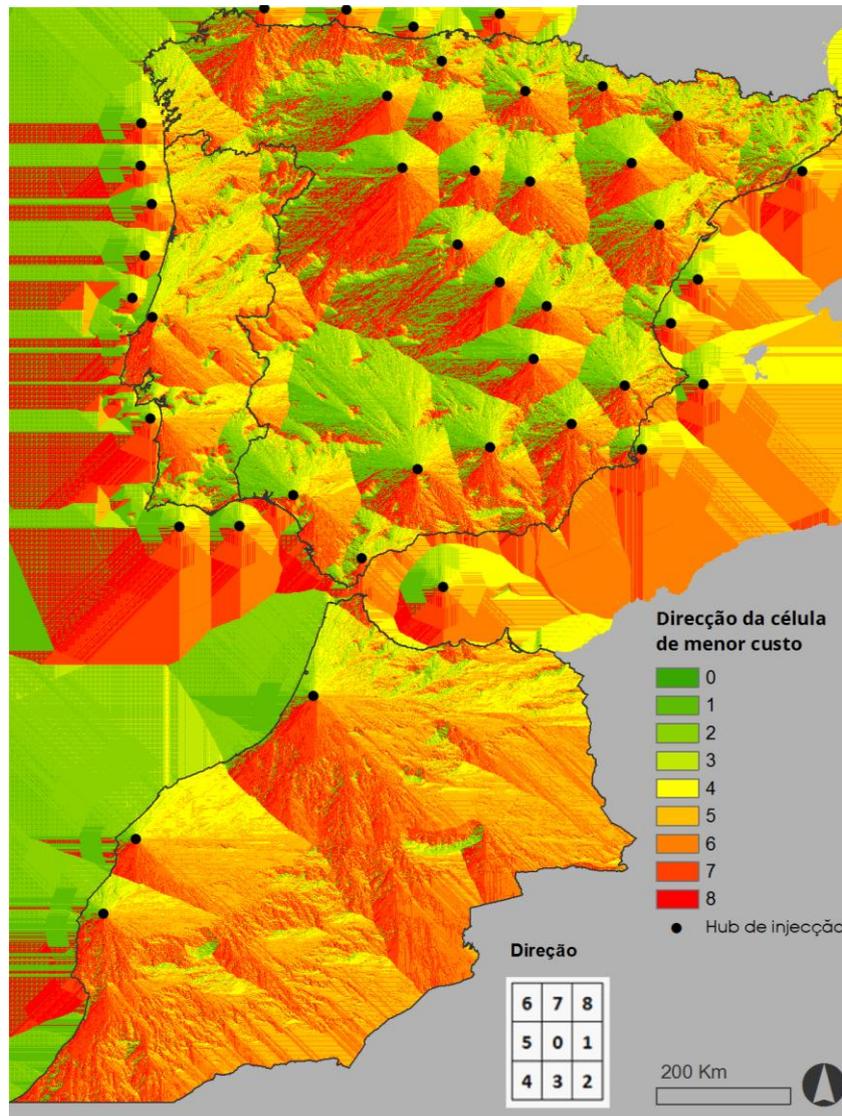


Figura 24. Superfície de orientação de menor custo.

Depois deste passo a ferramenta *cost path* irá gerar os percursos mais custo-efectivos, segundo os paramentos adoptados, com base nas duas superfícies anteriormente descritas e com base nos pontos de partida, neste caso *hubs* de emissão de CO₂.

A Figura 25 mostra o resultado para uma rede primária de transporte de CO₂ hipotética onde todos os *hubs* de emissões ligam ao *hub* de armazenamento

mais próximo sem levar em consideração dimensionamentos das capacidades ao longo do tempo nem a sua eficácia económica.

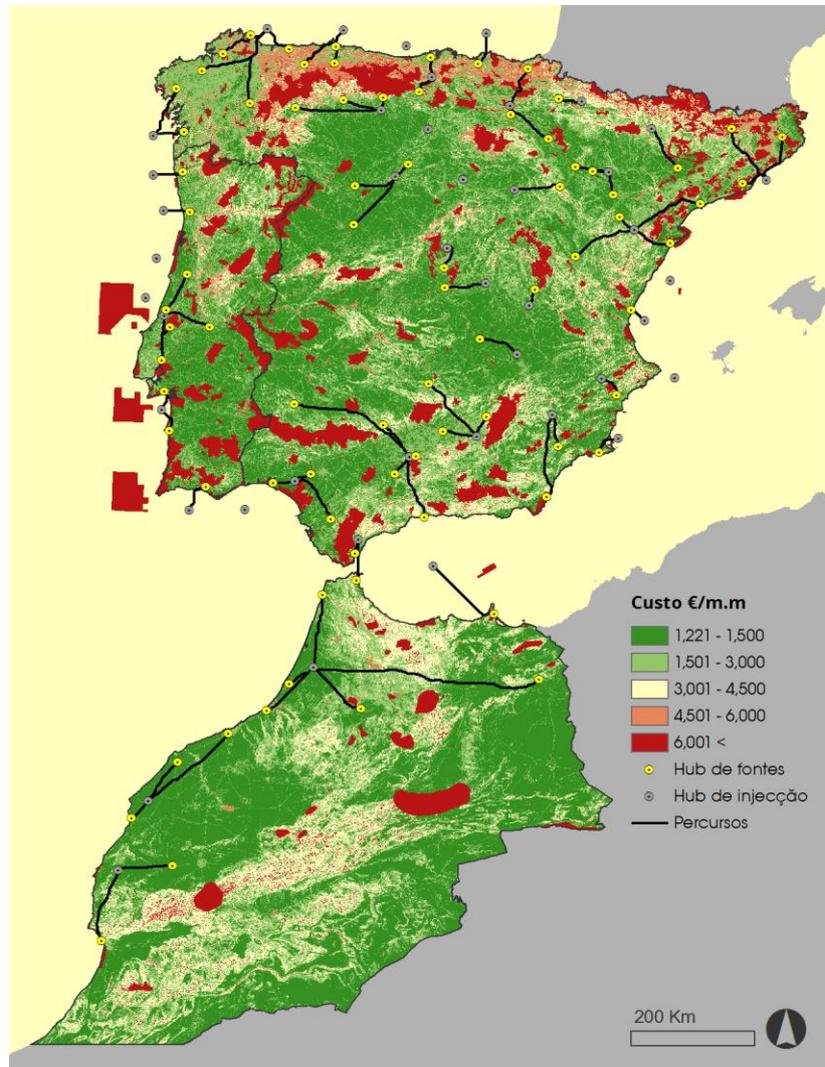


Figura 25. Rede hipotética de gasodutos para a área de estudo sobre a superfície de custo.

4.5 ArcGIS Model Builder

As operações descritas nas duas secções anteriores, referentes à construção da superfície de custos e obtenção dos percursos mais custo-efectivos, podem ser realizadas de forma integrada através da ferramenta *Model Builder* do ArcGIS 10, a Figura 26 ilustra um modelo gerado nessa ferramenta, onde a partir das quatro superfícies de custo se obtêm os percursos de gasodutos, neste caso referentes a

uma rede primária simplificada. As quatro superfícies de custos foram combinadas através de álgebra mapas segundo a expressão 3.

$$= 1357 * \%Fc\% * \%Fs\% * (\text{Con} (\%Flu\% == 10, 10, (\%Flu\% * (1 - (0.1 * \%N\%)))) + (0.3 * \%N\%)) \quad 3$$

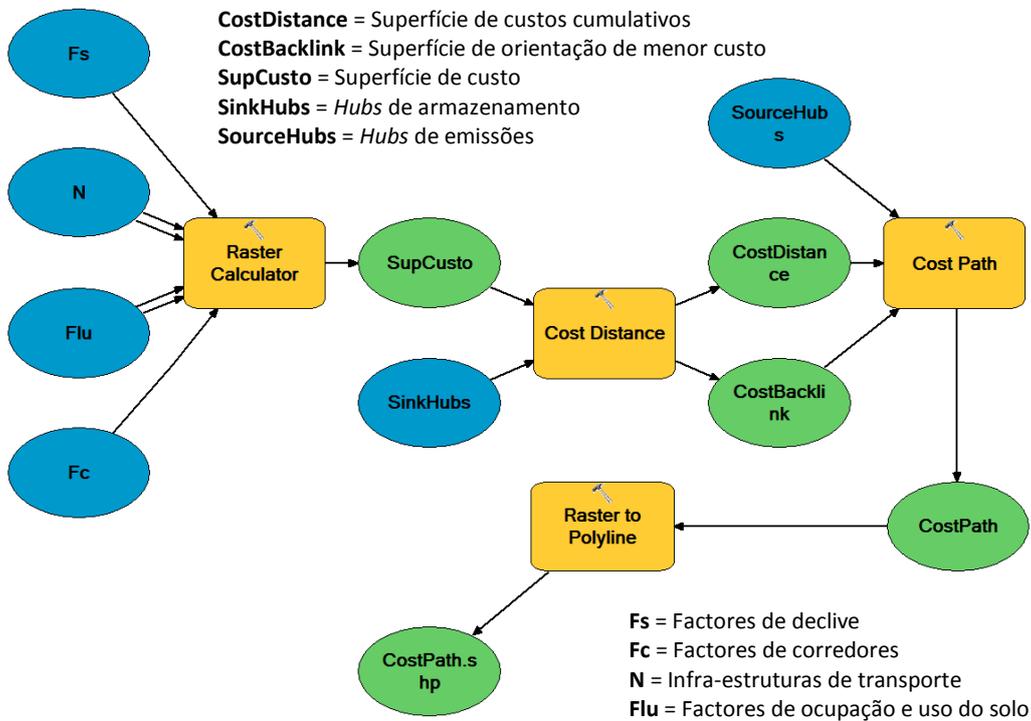


Figura 26. Esquema do modelo utilizado para gerar a superfície de custo e a rede primária de gasodutos.

4.6 Análise e Discussão de Resultados

Embora a rede primária seja o resultado final da metodologia testada, a importância dos outputs das diferentes etapas do processo de modelação é bastante maior, os *clusters*, o levantamento de fontes de informação espacial, o modelo linear, os factores de custo e a superfície de custo representam aspectos que poderão ter importância para estudos futuros nesta região. Nesta secção será feita uma análise dos resultados obtidos.

As necessidades de informação espacial para concretizar este modelo foram difíceis de cumprir devido às particularidades administrativas da área de trabalho. Para a região da Península Ibérica foi possível garantir informação de qualidade, adequada à resolução de trabalho, no entanto o mesmo não se pode dizer de Marrocos onde a dificuldade de acesso e a qualidade da informação se revelaram um potencial problema. Por outro lado a informação com mais influência nas avaliações foram a carta GlobeCorine e o declive e estas são as únicas com influência em todas as células da superfície de custo, o que permite partir do princípio que embora na região de Marrocos a avaliação de custos e de percursos esteja sujeita a maior probabilidade de ocorrência de erros, ou pelo menos que não sejam consistentes com as avaliações da Península Ibérica, é possível que a influência dos restantes elementos seja tangencial não invalidando os resultados.

A definição de *clusters* foi realizada com base na mais completa base de dados existente para área de estudo, quer de fontes emissoras de CO₂ quer de locais de injeção e representam uma tentativa de gerar *clusters* coerentes com o intuito de serem utilizados numa infra-estrutura de CCS especificamente para área em questão. O impacto da definição dos *clusters* no custo final de uma infra-estrutura é dependente da distribuição interna dos pontos que o constituem, da localização dos *hubs*, mas também da actividade dos mesmos dentro da infra-estrutura, alguns pontos podem ser utilizados e outros não. Face a estes factos é difícil avaliar qualitativamente os *clusters* determinados, no entanto é possível identificar alguns casos onde possivelmente a redução do tamanho dos *clusters* possa trazer benefícios de desenho a uma eventual infra-estrutura de CCS, sobretudo quando possa ocorrer sobreposição, ou proximidades muito elevadas, entre *clusters* de emissões e *clusters* de armazenamento.

O posicionamento dos *hubs* em cada *cluster* deve também ser realizado tendo em vista o seu impacto no investimento total, e portanto a sua eficiência económica será sempre dependente do dimensionamento da infra-estrutura de

transporte. Uma melhoria a incluir no método utilizado neste estudo para determinar os *hubs* é a limitação das áreas onde estes podem ser alocados de forma a evitar que fiquem colocados em zonas com custos elevados como áreas protegidas e provavelmente massas de água. Outro aspecto a levar em consideração é a possibilidade de se conseguir diminuir os custos da rede de transporte, após sua determinação, realocando o *hub* em função das ligações activas. Naturalmente que seleccionar certos percursos porque são mais custo-efectivos do que outros com base num determinado *hub* e depois alterar esse *hub* fará com que o paradigma seja diferente e portanto perdem-se as garantias que, seguindo o mesmo modelo, não existam outros percursos mais custo-efectivos tendo em conta a nova localização do *hub*. Esta situação repetir-se-ia sempre que se ajustasse o *hub* em função do conjunto de redes mais custo efectivo. O recurso a iterações com diferentes cenários de *clusters*, nos casos mais dúbios, e da posição dos *hubs* poderá permitir uma maior certeza na altura de determinar os percursos que exijam menor investimento.

O mais importante output deste estudo foi a superfície de custos, esta é a ferramenta que permite a avaliação do investimento necessário à construção de um gasoduto de acordo com o terreno. O modelo linear proposto permite incorporar, em certa medida, os elementos das infra-estruturas de transporte já existentes de forma a que não seja necessário considerar toda uma célula como pertencente ou não a uma infra-estrutura de transporte e permite também a consideração e múltiplas travessias numa mesma célula. No entanto, algumas conclusões podem ser retiradas em relação à consideração de 10% como a influência de cada travessia na determinação do custo para cada célula. Esta proporção significa que quando uma estrutura linear cruza uma célula a sua influência será em função da distância de atravessamento da célula o que significa que uma mesma infra-estrutura de transporte poderá ser considerada com uma largura variável de 30 m a 42 m. Por outro lado, ao se mesclar o custo de atravessar uma infra-estrutura de transporte no custo final da célula irá

permitir que sempre que um gasoduto atravessasse uma célula seja considerado o custo de atravessamento da infra-estrutura de transporte o que pode não ocorrer, porque numa distância de 300 metros é possível coexistirem diferentes estruturas lineares deste género sem que se cruzem. Ambas as situações apresentadas têm a capacidade de influenciar a avaliação do investimento necessário à construção de um gasoduto no entanto dificilmente terão a capacidade de alterar a rota do gasoduto devido ao seu carácter pontual. Estes factos aliados à pouca frequência de células com mais de uma infra-estrutura de transporte por célula, na escala do trabalho, talvez justifiquem a simplificação do modelo linear, sem prejuízos significativos para as avaliações e custos.

A validação dos custos de investimento obtidos ou até do posicionamento dos traçados não é possível, dado que não existem gasodutos de transporte de CO₂ já construídos na área de estudo, impossibilitando a comparação de valores. É no entanto possível fazer uma avaliação qualitativa do efeito que os factores de custo utilizados têm nos percursos obtidos. Uma das notas possível de se retirar acerca do efeito dos corredores já existentes é que o seu baixo valor, que teria como propósito fazer com que os percursos obtidos seguissem a mesma trajectória, não funciona particularmente bem. Relativamente às áreas protegidas o valor utilizado, artificialmente elevado, permite forçar os percursos a contornar as mesmas na maioria das vezes e quando atravessadas será pelas zonas mais estreitas, neste caso, o custo de investimento resultante será deturpado em função da distância de atravessamento. A solução para evitar esta situação passaria por avaliar detalhadamente os custos de construção em áreas ambientais ou utilizar uma perspectiva de benefício ambiental através da interdição de utilizar áreas protegidas como pontos de passagem de gasodutos. Neste ultimo caso teria de se tomar atenção à possibilidade de alguns pontos ficarem colocados dentro destas áreas interditas. A quantificação monetária do impacto da interdição à passagem das áreas protegidas poderia ser realizada testando os mesmos cenários de ligações em ambos os tipos de modelo. Os factores de custo

utilizados para os declives mais elevados tiveram como propósito fazer com que as rotas resultantes não cruzassem zonas com geologia superficial que impossibilitasse a construção de um gasoduto. Na maioria dos percursos obtidos verifica-se a elevada influência do declive, forçando as rotas a contornar essas zonas mais declivosas, mas em alguns casos as rotas atravessaram zonas de declive elevado.

5 CONCLUSÕES

Neste estudo foi apresentado um modelo capaz de determinar os percursos mais custo efectivo para construção de gasodutos de transporte de CO₂ na península ibérica e Marrocos. As técnicas utilizadas são de uso frequente em estudos de desenvolvimento de outras estruturas lineares e passaram neste caso pelo recurso a análise multicritério e a análise de percursos de menor custo. Um modelo linear foi utilizado para integrar diferentes critérios espaciais gerando uma superfície de custo que permite a avaliação dos custos de investimento relacionados com a realidade espacial de um dado local.

Os custos de investimento obtidos são na maioria inferiores a 1500 €/m.m traduzindo que na área de estudo em questão as características espaciais favorecem os factores de custo menos elevados e conseqüentemente talvez seja possível simplificar o modelo linear utilizado. Existe também a possibilidade de o modelo utilizado introduzir erros de avaliação de custos relativamente a áreas protegidas, declives elevados e travessias de infra-estruturas de transporte, no entanto estas seriam situações de ocorrência menor dado que estas áreas são na sua maioria contornadas não influenciando de forma directa os custos de investimento.

As técnicas utilizadas mostraram estar adequadas ao objectivo, de numa primeira fase, determinar os locais mais indicados à construção de gasodutos de CO₂ e respectivos custos de investimento. Embora essa adequação exista é no entanto possível inserir alterações no modelo, sobretudo através de três vias diferentes: aumentando a qualidade da informação espacial utilizada; alterando a resolução de trabalho e alterando os factores de custo e/ou respectivos valores. Estas alterações traduzem que o modelo testado é bastante flexível e adaptável a diferentes paradigmas espaciais ou necessidades de avaliação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adiat, K., Nawawi, M. & Abdullah, K., 2012. Assessing the accuracy of GIS-based elementary multi criteria decision analysis as a spatial prediction tool - A case of predicting potential zones of sustainable groundwater resources. *Journal of Hydrology*, Volume 440-441, pp. 75-89.
- Aimard, N., 2010. The experience of Lacq industrial CCS reference project. Apresentação: Carbon Sequestration Leadership Forum. Lacq, França.
- Anderson, S. & Newell, R., 2004. Prospects for Carbon Capture and Storage Technologies. *Annual reviews*, Issue 29, pp. 109-142.
- Atkinson, D. M., Deadman, P., Dudycha, D. & Traynor, S., 2005. Multi-criteria evaluation and least cost path analysis for an arctic all-weather road. *Applied Geography*, Volume 25, pp. 287-307.
- Bagli, D., Geneletti, D. & Orsi, F., 2011. Routing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria to minimise environmental impacts. *Environmental Impact Assessment Review*, Volume 31, pp. 234-239.
- Boavida, D. & Sardinha, M., 2011. *Database of CO₂ point sources*. Relatório 2.3 do projecto COMET FP7.
- Broek, M. v. d., 2013. Report with selection of most promising CCS infrastructure options. Relatório 6.4 do projecto COMET FP7.
- Broek, M. v. d. et al., 2010. Designing a cost-effective CO₂ storage infrastructure using a GIS based linear optimization energy model. *Environmental Modelling & Software*.
- Chen, W. et al., 2009. CCS scenarios optimization by spatial multi-criteria analysis: Application to multiple source sink matching in Hebei province. *International Journal of Greenhouse Gas Control*.
- CO2CRC, 2008. *Storage Capacity Estimation, Site Selection and Characterisation for CO₂ Storage Projects*, Canberra: Research Center for Greenhouse Gas Technologies.
- COMET, s.d. *COMET CO₂ Transport and Storage*. [Online] (URL: <http://comet.lneg.pt>, Acedido em Dezembro de 2012).
- Defourny, P., Bontemps, S. & van Bogaert, E., 2010. *GLOBECORINE 2009 Product Description Manual*.

- ESA, 2011. *ESA Data User Element*. [Online]
(URL: <http://due.esrin.esa.int/globcorine/>, Acedido em Novembro de 2011).
- ESRI, 2011a. *ArcGIS Resource Center*. [Online]
(URL:
http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/Cost_Distance/009z00000018000000/, Acedido em Janeiro de 2013).
- ESRI, 2011b. *ArcGIS Resource Center*. [Online]
(URL:
http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/Cost_Back_Link/009z00000017000000/, Acedido em Janeiro de 2013).
- ESRI, 2011c. *ArcGIS Resource Center*. [Online]
(URL:
http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/Cost_Path/009z00000019000000/, Acedido em Janeiro de 2013).
- Europarc Spain, 2011. [Online]
(URL: <http://www.redeuroparc.org/descargas.jsp>, Acedido em Maio de 2011).
- Global CCS Institute, 2012. *The Global Status of CCS:2012*, Camberra, Australia.
- ICNB, 2011. *Instituto de Conservação da Natureza e Biodiversidade*. [Online]
(URL: <http://portal.icnb.pt/ICNPportal/vPT2007/>, Acedido em Julho 2011).
- IPCC, 2005. *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]*, s.l.: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp..
- Koeijer, G., 2008. Snohvit LNG plant and CO₂ transport R&D. Apresentação: Gassnova CO₂ transport workshop. Porsgrunn.
- Malczewski, J., 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), pp. 703-726.
- Martínez, R. & Carneiro, J., 2011. *Database of CO₂ sinks*. Relatório 3.1 do projecto COMET FP7.
- Middleton, R. & Bielicki, J. M., 2009. A scalable infrastructure model for carbon capture and storage: SimCCS. *Energy Policy*, Issue 37, pp. 1052-1060.
- MIT, 2007. *The Future of Coal: Options for a Carbon-Constrained World.*, Cambridge: MA Massachusetts Institute of Technology.

Morbee, J., Serpa, J. & Tzimas, E., 2012. Optimized deployment of a European CO2 transport network. *International Journal of Greenhouse Control*, Issue 7, pp. 48-61.

Natural earth, 2012. *Natural Earth*. [Online]
(URL: <http://www.naturalearthdata.com/>, Acedido em Maio 2012).

Serpa, J., Morbee, J. & Tzimas, E., 2011. *Technical and Economic Characteristics of a CO2 Transmission Pipeline Infrastructure*, s.l.: JRC European Commission.

C& SIG

