



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Metodologia para a localização de centrais nucleares

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Território e Gestão do Ambiente

Autor

Lígia Catarina Salgado Fernandes

Orientador

João António Duarte Zeferino (DEC/FCTUC)

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2016

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, professor João Zeferino, pela disponibilidade, pela paciência, pelos válidos conselhos, mas acima de tudo, por nunca me ter deixado desistir.

Aos meus amigos, de infância e da faculdade, um muito obrigado. A vocês, Catarina, Clarisse, Cristiana, Elisa, Daniela, David, Diana, Mariana e Rita um muito obrigado por todas as conversas, por todas as memórias e por todo o apoio. Aos meus meninos, Ivo, João, Pinheiro e Pires, um muito obrigado por serem o meu pilar, por me motivarem todos os dias e por terem tornado o caminho menos penoso.

Por fim, aos meus pais e irmãos, um muito obrigado por terem contribuído para o que sou hoje, por serem o meu maior motivo de orgulho, por nunca terem duvidado do meu valor e pelo apoio incondicional. O verdadeiro esforço foi vosso.

RESUMO

A energia é um elemento essencial para a satisfação das necessidades básicas humanas, para o desenvolvimento económico da sociedade e conseqüentemente para um aumento da qualidade de vida. Os combustíveis fósseis são o pilar do sector energético mundial, no entanto, devido à diminuição da sua disponibilidade e às variações dos seus preços, aliado à necessidade de cumprir o Protocolo de Quioto, fez muitos países, signatários do mesmo, começarem a apostar em formas diferentes de produção de energia, apostando na energia nuclear.

Apesar das vantagens da solução nuclear, existe algum criticismo devido aos seus potenciais malefícios. No entanto, a maioria dessas desvantagens podem ser evitadas através de um planeamento adequado para a sua localização.

A localização de uma central nuclear envolve um grande conjunto de locais alternativos – com diversos critérios de avaliação conflitantes e incomensuráveis – e está sujeita às preferências dos decisores envolvidos no processo de decisão, sendo por isso um problema de decisão espacial. Para resolução de problemas deste tipo é usada a Análise de Decisão Multicritério Espacial.

Nesta dissertação foi desenvolvida uma metodologia baseada na Análise de Decisão Multicritério Espacial para localização de centrais nucleares, através da articulação das potencialidades das ferramentas SIG (Sistemas de Informação Geográfica) e da Análise de Decisão Multicritério. De forma a demonstrar a aplicabilidade da metodologia, esta foi aplicada a um estudo de caso em Portugal Continental. Para que se conseguisse entender a influência dos pesos dos vários critérios na solução final, foi realizada uma análise de sensibilidade. Os resultados mostram que independentemente dos pesos atribuídos aos diferentes critérios, a melhor solução localiza-se sempre na mesma área.

Palavras-chave: Centrais Nucleares; Metodologia para a Localização; Energia; Análise de Decisão Multicritério; Sistemas de Informação Geográfica.

ABSTRACT

Energy is an essential element for the satisfaction of basic human needs, for economic development of society and hence to an increase in quality of life. Fossil fuels are the mainstay of the global energy sector, however due to decreased availability and to changes in their prices, coupled with the need to comply with the Kyoto Protocol, has made many countries, signatories of it, starting different ways of energy production, investing in nuclear energy.

Despite the advantages of nuclear solution, there is some criticism because of its potential harm. However, most of these disadvantages can be avoided through proper planning for nuclear power plants location.

The location of a nuclear power plant involves a wide range of alternative locations – with different conflicting and incommensurate evaluation criteria – and is subject to the preferences of decision-makers involved in decision-making. Therefore, it is a spatial decision problem. To solve such problems is used the Spatial Multicriteria Decision Analysis.

In this dissertation was developed a methodology based on Spatial Multicriteria Decision Analysis for sitting of nuclear power plants, through the articulation of GIS tools (Geographic Information Systems) and Multicriteria Decision Analysis. In order to demonstrate the applicability of the methodology, it was applied to a case study in Portugal. A sensitivity analysis was performed to understand the influence of the criterion weights in the final solution. The results show that regardless of the weights assigned to different criteria, the best solution is always located in the same area.

Keywords: Nuclear Power Plants; Methodology for Sitting Nuclear Power Plants; Multicriteria Decision Making; Geographic Information Systems.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ABREVIATURAS	viii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Motivação e Objetivos.....	2
1.3 Estrutura	5
2 ESTADO DA ARTE	6
2.1 Características das centrais nucleares.....	6
2.2 Vantagens e desvantagens da energia nuclear.....	8
2.3 O processo de localização de centrais nucleares	9
2.3.1 Pesquisa de um local	10
2.3.2 Seleção de um local	11
2.4 Critérios de seleção.....	11
2.4.1 Critérios de exclusão	12
2.4.2 Critérios de evasão.....	14
2.4.3 Critérios de aptidão.....	16
2.5 SIG.....	17
2.5.1 ArcGis.....	18
2.6 Análise de Decisão Multicritério (ADM).....	21
2.6.1 Métodos de análise de decisão multicritério (MADM).....	22
2.7 Análise de Decisão Multicritério Espacial (ADME).....	23
3 METODOLOGIA.....	25
3.1 ADME na localização de centrais nucleares.	26
3.1.1 Pesquisa de um local	27

3.1.2	Seleção de um local	27
3.2	Análise de sensibilidade	30
4	ESTUDO DE CASO	31
4.1	Pesquisa de um local	33
4.1.1	Proximidade a uma linha de água.....	33
4.1.2	Risco sísmico.....	34
4.1.3	População	36
4.1.4	Áreas ecológicas sensíveis	37
4.1.5	Resultados da pesquisa de um local	38
4.2	Seleção de um local	40
4.2.1	Proximidade à rede elétrica	40
4.2.2	Proximidade a uma linha de água.....	42
4.2.3	Densidades populacionais	43
4.2.4	Fronteiras internacionais.....	45
4.2.5	Suscetibilidade a cheias e inundações	46
4.2.6	Suscetibilidade a tsunamis.....	47
4.3	Resultados da seleção de um local	48
4.3.1	Caso 1	49
4.3.2	Caso 2	51
4.3.3	Caso 3	53
4.3.4	Discussão dos resultados	55
5	CONCLUSÃO.....	56
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Interface do ArcMap.....	19
Figura 4.1 - (A) Representação dos rios portugueses; (B) Representação do <i>Buffer</i> de 10km aos rios e aos oceanos portugueses.....	34
Figura 4.2 - (A) Representação da Intensidade macrossísmica; (B) Representação do resultado <i>select by attribute</i>	36
Figura 4.3 - (A) População residente em Portugal Continental; (B) Resultado do <i>Select by attribute</i>	37
Figura 4.4 - Representação das Áreas Protegidas de Portugal Continental.....	38
Figura 4.5 - Resultados da Pesquisa de um local	39
Figura 4.6 Representação dos valores dos atributos para a proximidade a uma rede elétrica.41	
Figura 4.7 - Representação dos valores dos atributos para a proximidade a uma linha de água	43
Figura 4.8 - Representação da padronização das densidades populacionais.....	44
Figura 4.9 Representação da padronização dos atributos para as fronteiras internacionais.....	45
Figura 4.10 - Representação da padronização dos atributos da suscetibilidade a cheias	46
Figura 4.11 - Representação dos pesos dos atributos da suscetibilidade a <i>tsunamis</i>	47
Figura 4.12 - Valores das alternativas para o Caso 1	50
Figura 4.13 - Valores das alternativas para o Caso 2	52
Figura 4.14 - Valores das alternativas para o Caso 3	54

ABREVIATURAS

ADM – Análise de Decisão Multicritério

ADME – Análise de Decisão Multicritério Espacial

CO₂ – dióxido de carbono

IAEA – Agência Internacional da Energia Atômica

INE – Instituto Nacional de Estatística

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

WLC – *Weighted Linear Combination*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A energia elétrica é indispensável para o desenvolvimento. É essencial para a satisfação das necessidades básicas humanas, para a evolução económica da sociedade e, conseqüentemente, para um aumento da qualidade de vida. Atualmente, 1,3 mil milhões de pessoas sofrem de falta de energia para a satisfação das suas atividades básicas (ONU, 2014). Além disso, à medida que a população aumenta e procura satisfazer os seus padrões de vida, devemos esperar que o consumo de energia aumente, no mínimo, para o dobro durante os próximos 50 anos (Rhodes & Beller, 1999).

Uma vez que os combustíveis fósseis são o alicerce do sector energético mundial e não se encontram dispersos de uma forma homogénea por todo mundo, os seus preços são influenciados por fatores políticos, económicos e ecológicos, tornando-os voláteis e elevados. Simultaneamente, de forma a combater as alterações climáticas, o sector da energia deve ser o mais independente possível das emissões de gases com efeito de estufa. Dados relativos ao ano 2011 mostram que as emissões de gases com efeito de estufa excederam em 45×10^6 toneladas de dióxido de carbono (CO_2) equivalente – o valor do ano 2009 – e o sector da produção de energia foi responsável por 69% dessas emissões (World Resources Institute *apud* Hong et al, 2014).

A sociedade defronta-se com o problema de não conseguir alcançar o equilíbrio ideal entre o ambiente, o crescimento económico e a produção de energia. Para que se consiga esse equilíbrio, serão necessárias fontes energéticas alternativas para tornar o sector energético livre das emissões de gases com efeito de estufa, assim como para ser produzida energia suficiente para a satisfação da procura por parte da população.

Surge a energia nuclear como uma nova força para o sector energético com baixa emissão de gases com efeito de estufa, tornando-a uma alternativa à mitigação das alterações climáticas e para a satisfação energética da população a preços competitivos. Apesar das vantagens da solução de energia nuclear, existe algum criticismo devido às suas potenciais desvantagens. No entanto a maioria dessas desvantagens podem ser evitadas através de um planeamento adequado da sua localização.

1.2 Motivação e Objetivos

Apesar das soluções energéticas atuais dependerem em demasia dos recursos fósseis, a energia nuclear tem renascido ao longo dos últimos anos.

No panorama político, existem preocupações quanto à segurança do abastecimento de combustíveis fósseis visto que a maior parte dos países fornecedores são países onde reina a instabilidade política, que usam os combustíveis fósseis como arma política, inflacionando os preços dos mesmos. A única forma de contornar esta situação será diversificar o modelo energético e valorizar as energias que não dependem da volatilidade política dos países fornecedores (Rodrigues & Azevedo, 2006). Estes factos tornam o uso de Urânio vantajoso pois este mineral é encontrado principalmente em países politicamente estáveis, tais como Austrália, o Canadá e o Brasil, garantindo o abastecimento do mesmo sem questões de instabilidade política ou hostilidade.

Quanto à questão social, nos últimos anos tem havido um grande aumento na procura energética, resultando na procura de fontes de energia alternativas tais como a energia nuclear e as renováveis. Energias renováveis como a energia solar e eólica, captam energia diretamente da natureza, mas também são limitadas por ela. A sua utilização é limitada a locais que dispõem destes recursos em abundância e sujeita à dependência que certos recursos têm com a sazonalidade. Para além disto, em geral as energias renováveis apenas são capazes de satisfazer uma parte da necessidade energética atual.

De todas estas questões que levaram ao renascimento da energia nuclear, aquela que pode ser considerada a mais importante e a que tem contribuído significativamente para o regresso do debate acerca do uso de energia nuclear são as alterações climáticas. Entre os muitos problemas ambientais que o mundo enfrenta no século XXI, combater as alterações climáticas continua a ser um dos principais desafios. A possibilidade das mudanças climáticas resultarem do aumento das emissões antropogénicas de gases com efeito de estufa, tem sido

uma grande preocupação nas últimas décadas (IAEA, 2013). Num relatório publicado pelo Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas, foi reconhecido academicamente que o aumento da temperatura terrestre deveria ser mantido 2°C abaixo das temperaturas da época pré-industrial e para que isso fosse conseguido, os níveis de emissões de gases com efeito de estufa deveriam ser estabilizados num valor abaixo das 450 ppm de CO₂ equivalente e as futuras emissões deveriam ser reduzidas para um valor entre 40 a 70% abaixo dos níveis emitidos em 2010 até 2050 (IPCC, 2015).

Para dar os primeiros passos na redução desta ameaça global, vários países assumiram um compromisso no âmbito do Protocolo de Quioto com o objetivo de reduzir as suas emissões de gases com efeito de estufa para, pelo menos, 5.2% abaixo dos níveis de 1990 (APA, 2015). Como já referido anteriormente, o sector da produção de energia é o sector com mais responsabilidade nas emissões de gases com efeito de estufa. Isto aliado à necessidade de cumprir o Protocolo de Quioto fez muitos países, signatários do mesmo, começarem a apostar em formas diferentes de produção de energia para além das convencionais, apostando em grande parte nas energias renováveis e uma pequena parte na energia nuclear. Países como a França, a Dinamarca, a Áustria e a Suécia assinaram o protocolo de Quioto e tanto a Áustria como a Dinamarca podem não conseguir cumprir com as metas acordadas nele, dado que são países que promovem ativamente as energias renováveis e tem poucas ou nenhuma centrais nucleares. Estes países não vão conseguir diminuir as suas emissões, pois apesar de investirem em energias que na teoria são baixas em emissões de CO₂, têm associado à maior parte delas o uso de biocombustíveis para se conseguir produzir energia. Pelo contrário a França e a Suécia tem uma grande capacidade nuclear em que 40 e 75% da energia é gerada através de centrais nucleares (Samseth, 2013).

Uma etapa importante no desenvolvimento de um projeto de energia nuclear é a seleção de um local adequado para estabelecer a central. Determinar o melhor local para albergar uma central nuclear é um problema geográfico com impactos sociais, ambientais e económicos. Segundo AELB (2011) a seleção do local é o resultado de um processo que garante a proteção adequada do pessoal que trabalha no local, do público e do ambiente contra os impactos da construção e operação da central nuclear. No passado, o principal critério era escolher áreas relativamente remotas ou rurais para minimizar o número de pessoas em risco em caso de uma fuga de radioatividade. Atualmente, a escolha dos locais para as instalações de energia nuclear envolve a consideração de vários critérios procurando a melhor opção nacional (IAEA, 2012).

Uma vez que Portugal não têm um programa de energia nuclear, vários problemas e desafios relacionados com a segurança da energia nuclear são inevitáveis. Desastres como *Chernobyl* e *Fukushima Daiichi* ainda estão presentes na memória das pessoas e o medo que ocorra um desastre nuclear aliado à falta de divulgação de informação, levam a que a população se torne reticente acerca desta forma de produção energética. Em termos ambientais, há a preocupação que um desastre nuclear possa ter efeitos nefastos nos ecossistemas que rodeiam a central ao longo de vários anos. A localização apropriada torna-se imperativa pois esta tem em conta princípios de segurança que adequadamente aplicados tornam as centrais muito seguras e eficazes para atender as necessidades energéticas da sociedade (IAEA, 2003b).

A localização de uma central nuclear é um problema de decisão espacial pois envolve um grande conjunto de locais alternativos, com múltiplos critérios de avaliação conflitantes e incomensuráveis, mas também os juízos de valor (preferências) dos decisores envolvidos no processo de decisão. Assim para muitos problemas de decisão espacial é usada a Análise de Decisão Multicritério Espacial (ADME) (Malczewski, 2006).

A ADME é uma congregação das ferramentas Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e da análise multicritério e segundo Sánchez-Lozano et al (2013), a combinação entre estes dois instrumentos permite a criação de uma ampla base cartográfica e alfanumérica que é utilizada por metodologias multicritério para simplificar e resolver problemas de planeamento do mundo real. Pode ser descrita como o processo que transforma e combina dados geográficos e juízos de valor (preferências) do decisor para obter informações para a tomada de decisão (Malczewski, 2006).

Esta dissertação tem como objetivo desenvolver uma metodologia de apoio à decisão na localização de centrais nucleares, que possa ser aplicada a diferentes casos de estudo, com diferentes importâncias atribuídas pelos decisores aos vários critérios envolvidos. Desta forma a metodologia pode funcionar como uma ferramenta de apoio à decisão para órgãos governamentais que venham a ter interesse na construção de uma central nuclear ou que tenham função de avaliar/ conceder a licença de instalação e operação de centrais nucleares.

1.3 Estrutura

Para além deste primeiro capítulo este trabalho divide-se em mais quatro capítulos. Num segundo capítulo, inicialmente pretende-se fazer uma descrição dos fundamentos teóricos sobre o funcionamento de uma central nuclear bem como uma breve análise sobre as vantagens e as desvantagens deste tipo de produção energética. Numa segunda parte é efetuada uma revisão bibliográfica sobre as metodologias existentes para a localização e os respetivos critérios utilizados para a localização de uma central nuclear, retratando as condicionantes a cumprir para a obtenção da melhor localização, e descrevendo a utilidade e a importância desses critérios para chegarmos à mesma. Numa última parte abordam-se os SIG e os métodos para a análise de decisão e a sua importância no processo de localização. No terceiro capítulo, é explicado de uma forma sucinta a metodologia a aplicar para se encontrar a melhor localização de uma central nuclear. São abordadas a ADME e a metodologia que será aplicada ao estudo de caso. No quarto capítulo, a metodologia descrita no capítulo anterior é aplicada a um caso de estudo, Portugal Continental. No último capítulo, é realizada uma conclusão sobre os resultados conseguidos e são sugeridos trabalhos futuros a serem desenvolvidos.

2 ESTADO DA ARTE

Vários países do mundo mostram um renovado interesse na energia nuclear, devido, principalmente, às políticas ambientais de apoio às tecnologias de baixo carbono e a razões estratégicas ligadas à redução da dependência dos combustíveis fósseis (Ahearne, 2011).

Atualmente existem 442 reatores nucleares dispersos por todo o mundo fornecendo 16% da energia elétrica mundial. Encontram-se 66 reatores em construção correspondendo a um crescimento de 15% em relação aos reatores existentes. Os Estados Unidos lideram com 99 reatores nucleares e de seguida França, Japão, Rússia, China e Coreia do Sul com 58, 48, 34, e 28 respetivamente (IAEA, 2015).

2.1 Características das centrais nucleares

Tal como as centrais elétricas convencionais que geram eletricidade a partir de energia térmica libertada pela queima de combustíveis fósseis, as centrais nucleares convertem a energia calorífica libertada pela fissão nuclear no reator em eletricidade. A energia calorífica é gerada quando um átomo de Urânio-235 (U-235) é atingido por um neutrão, quebrando-o, formando produtos da fissão e libertando neutrões que vão atingir outros átomos de U-235, mantendo uma reação em cadeia. Ao longo do reator existe um sistema onde está a circular água que vai aumentar a sua temperatura transformando-se em vapor devido ao calor libertado pelas reações de fissão. O vapor vai movimentar uma turbina que conseqüentemente produz energia elétrica.

Para que um reator nuclear esteja operacional são necessários três elementos: combustível, sistema de refrigeração e de um dispositivo de controlo. Neste momento, a maior parte dos reatores nucleares em operação, contém um quarto elemento: um moderador que é utilizado para controlar as reações de fissão dentro dos mesmos.

As centrais nucleares que estão em atividade hoje em dia foram maioritariamente construídas entre os anos 1960 e 1980 (WNA, 2015) e os reatores das mesmas são chamados reatores de Geração II dado que estes foram projetados a partir da informação existente dos reatores de Geração I usando conhecimento cedido devido aos avanços tecnológicos ao longo dos anos.

Existem vários tipos de reatores nucleares: *Pressurized Water Reactor* (PWR), *Boiling Water Reactor* (BWR), *Advanced Gas-cooled Reactor* (AGR), *Pressured heavy water reactors* (PHWR), *Advanced Boiling Water Reactor* (ABWR) e *Fast Breeder Reactor* (FBR). Todos têm em comum a produção de energia térmica que posteriormente pode ser transformada em energia elétrica distinguindo-os o *collant* (refrigerante), o tipo de moderador, e o tipo combustível usado.

Existem dois tipos de recursos naturais usados na produção de energia nuclear: o Urânio e o Tório, embora o Urânio seja o mais utilizado devido às reservas deste serem bastante abundantes não pondo em causa o seu esgotamento a curto-médio prazo. O Urânio é encontrado principalmente em países politicamente estáveis, tais como Austrália, o Canadá e o Brasil, garantindo o abastecimento do mesmo sem questões de instabilidade política ou hostilidade. Para além disso, é um combustível capaz de criar uma grande quantidade de energia a partir de uma pequena quantidade de combustível. A fissão de 1 grama de U-235 liberta 2.28×10^4 kWh de calor o que é equivalente ao calor de combustão de 3 toneladas de carvão (Hubbert, 1956).

A produção de resíduos radioativos é inevitável quando a energia é produzida pela forma nuclear. A IAEA define resíduos radioativos como os resíduos que contenham ou sejam contaminados com radionuclídeos em concentrações maiores que os níveis estabelecidos por um órgão regulador (IAEA, 2007). O volume de resíduos nucleares representa uma pequena parte comparando, por exemplo com os resíduos industriais. França contém 59 centrais nucleares e produz 1 kg por ano e por habitante, em que apenas 10 g é que representam lixos de alto nível radioativo e de longa vida, comparando com os 100 kg anuais de resíduos industriais e 2500 kg anuais de lixos domésticos (UE, 2007). Alguns destes resíduos são perigosos e necessitam que sejam manipulados com extremo cuidado, isolando-os da população e do ambiente em geral. Na sua composição estão presentes: urânio, plutónio e produtos da fissão. Uma “solução” a curto prazo é reprocessar o combustível usado retirando previamente os produtos da fissão (Ahearne, 2011).

2.2 Vantagens e desvantagens da energia nuclear

A energia nuclear é uma das alternativas energéticas mais debatidas do mundo. Discutem-se, principalmente, os problemas relacionados com a aceitação pública, localização da central e o facto da matéria-prima usada como combustível não ser renovável.

Como todas as formas de produção de energia, a energia nuclear apresenta vantagens e desvantagens como as descritas em seguida:

Vantagens:

- A energia nuclear tem potencial de gerar uma maior quantidade de eletricidade que os combustíveis fósseis, a obtida de uma forma mais eficiente do que nas centrais de carvão ou gás natural e a um custo mais baixo. Mesmo que o preço do Urânio natural aumente, o preço da energia nuclear mantém-se estável (UE, 2007);
- Os custos médios de produção da energia nuclear é 0.019\$USD por Quilowatt-hora, enquanto a energia produzida por gás natural custa 0.034\$USD por Quilowatt-hora. (Rhodes & Beller, 2011);
- A tecnologia usada nas centrais nucleares tem vindo a ser estudada há vários anos e já se encontra disponível para ser usada, logo não há necessidade de ser criada, desenvolvida e de aumentar o investimento nela. Os investimentos nas energias renováveis – hidrelétricas, solar, eólica, geotérmica e biomassa – são altos e as consequências ambientais do uso deste tipo de energia são na maior parte das vezes desconhecidas (Rhodes & Beller, 2011);
- É uma fonte ininterrupta de energia. Não depende das condições climáticas como a maior parte das energias renováveis, funcionando em qualquer tipo de condições climáticas;
- É menos perigosa para a saúde humana do que o uso de combustíveis fósseis. Não há poluição atmosférica associada à produção de energia pois não há libertação de gases para a atmosfera durante o processo. A energia nuclear é limpa, isto é, não produz emissões de dióxido de carbono. Este é um facto importante quando se discute a contribuição dos gases com efeito de estufa gerada pelo consumo de combustíveis fósseis para o aquecimento do planeta e para as mudanças climáticas (Rodrigues & Azevedo, 2006);
- Probabilidade de um acidente nuclear é muito pequena;
- Os resíduos radioativos podem ser geridos durante o tempo que são perigosos de forma a não causar nenhum problema para o ambiente ou para a saúde humana. Podem também ser diminuídos através do reprocessamento dos mesmos.

- Por cada gigawatt gerado o carvão mata 37 pessoas por ano, o petróleo 32, gás natural 2 e a energia nuclear 1 (Rhodes & Beller, 2011).

Desvantagens:

- É uma fonte de energia perigosa;
- A sua construção e o seu futuro desmantelamento são dispendiosos;
- A radiação causa impactes na saúde humana e no ambiente nas gerações atuais e futuras;
- Os acidentes que podem ocorrer são catastróficos. No entanto, a todas as outras formas de produção energética estão associados acidentes que matam centenas de pessoas. Os acidentes nucleares têm sido poucos e com pequenas dimensões comparando com as outras formas de produção de energia (Rhodes & Beller, 2011);
- Os lixos radioativos poerão incentivar a produção de armas nucleares. Apesar de o combustível usado nas centrais nucleares não pode ser diretamente usado para fazer armas nucleares (Ahearne, 2011);
- Podem ser um alvo para terroristas.

2.3 O processo de localização de centrais nucleares

A localização, conceção, construção, operação e desmantelamento são as cinco fases principais durante o tempo de vida útil de uma central nuclear. A fase de seleção do local apropriado para a construção de uma central nuclear é o primeiro passo de um longo processo de identificação, quantificação e caracterização de um local para a construção e operação de uma central nuclear (Rizzo et al, 2015).

O processo de localização bem realizado vai garantir que é selecionado o local ideal, tendo em conta a segurança, fatores ambientais, técnicos, económicos e sociais. Antigamente, os lugares selecionados para albergar uma central nuclear eram, geralmente, escolhidos pela sua localização remota ou rural, de forma a minimizar o número de pessoas em risco caso acontecesse algum fenómeno de fuga de radioatividade. Ultimamente tem havido uma evolução nos métodos de localização de potenciais locais para a construção de centrais nucleares, a Agência Internacional da Energia Atómica (IAEA, sigla em Inglês), publicou vários guias com critérios de seleção e com indicações para a localização de locais. Esses guias têm como alvo os países que tenham interesse na construção de centrais nucleares. Dessa forma estes adotam normas de segurança para aplicar nos seus regulamentos nacionais, pois as normas alusivas tanto à energia nuclear como à segurança da radiação é uma responsabilidade nacional (IAEA, 2012).

Encontrar os locais mais adequados para uma central nuclear, envolve a avaliação de uma grande área e de um grande número de critérios. Devido às grandes quantidades de informação que são necessárias para avaliar um local, a IAEA (2012) sugere que o método para a seleção do local seja realizado em várias etapas. Em particular, são consideradas:

- 1- Pesquisa de um local;
- 2- Seleção de um local;
- 3- Caracterização do local;
- 4- Fase pré-operacional;
- 5- Fase operacional.

O processo de localização para uma instalação nuclear consiste nas duas primeiras fases, nas quais esta dissertação será focada. Ambas dizem respeito a um problema de decisão espacial requerendo o uso de ferramentas SIG e de análise de decisão multicritério, que serão expostas mais à frente nesta dissertação.

As atividades de localização devem começar cedo na primeira fase, sendo que é nesta etapa que se identifica a área de interesse para a localização da central. Essa área denomina-se Região de Interesse e é nesta área que se realizará uma análise precoce para demonstrar que existem alguns locais potenciais para uma central nuclear. A Região de Interesse pode ser um País inteiro ou uma parte do mesmo. Na segunda fase terá de ser efetuada a triagem e a análise da classificação de modo a sejam selecionados os locais mais adequados.

2.3.1 Pesquisa de um local

A primeira fase denominada pesquisa de um local envolve a investigação de regiões ou de locais potenciais e a rejeição de outros que não são adequados após uma análise de despistagem. A análise das áreas é realizada através do uso de critérios de exclusão que são usados para eliminar as zonas onde não é viável a construção de uma central nuclear, diminuindo de forma significativa os locais que necessitam de uma investigação mais minuciosa.

Exemplos de critérios que serão frequentemente usados nesta fase são: água para o arrefecimento dos reatores, sismicidade, dados populacionais e reservas naturais. No final desta fase são obtidos os locais candidatos à construção da central.

2.3.2 Seleção de um local

Esta fase pode ser dividida em duas etapas, uma primeira denominada análise de despistagem adicional (triagem), seguida por uma análise de classificação. A análise de despistagem adicional consiste em eliminar alguns dos locais selecionados na fase anterior. A triagem é efetuada iterativamente aplicando critérios refinados até que um número apropriado de locais candidatos possa ser identificado.

O propósito da análise de classificação é identificar e classificar um pequeno número de locais através de estudos mais detalhados. É realizada através da aplicação de uma série de critérios de aptidão com base em dados publicados e informações adquiridas através de estudos.

Há duas partes importantes para a análise de classificação, em primeiro lugar temos que definir a lista de critérios que serão usados e, em segundo lugar, pontuar os locais tendo em conta esses critérios. O resultado desta fase é uma lista constituída por todos os locais candidatos que são classificados tendo em conta o desempenho global relativamente aos critérios de aptidão.

2.4 Critérios de seleção

A IAEA publicou uma lista de critérios baseada na experiência dos países que já realizaram estudos de implantação de centrais nucleares. No entanto, cada país tem de desenvolver a sua própria lista nacional de critérios, pois alguns dos critérios enumerados pela IAEA podem não ser relevantes e é possível que o país tenha alguns critérios nacionais específicos que não estão incluídos na lista publicada (IAEA, 2012).

Os critérios de seleção, tendo em conta os atributos do local, fornecem a base sobre a qual as decisões vão ser tomadas. São usados para avaliar questões específicas relacionadas com o local, perigos e outras considerações que sejam pertinentes analisar e investigar (AELB, 2011).

Segundo Rizzo et al (2015), na metodologia sugerida pela IAEA são aplicados critérios de aptidão, exclusão e evasão aos locais a selecionar. Esta abordagem foi concebida para satisfazer as exigências ambientais, de segurança e nucleares, de forma a garantir que o local escolhido é o mais adequado para o projeto.

2.4.1 Critérios de exclusão

Os critérios de exclusão incluem não só as fraquezas inerentes às características do local, mas também à viabilidade de soluções de engenharia para compensar essas deficiências, seja através de desenhos ou através de medidas de proteção ao local. Devem ser estabelecidos e usados na fase de pesquisa de um local. A seleção de um local através de critérios de exclusão permite que as características desfavoráveis dos locais sejam excluídas de uma análise mais aprofundada (IAEA, 2015).

Proximidade a uma linha de água

Geralmente as áreas de interesse para localizar uma central nuclear são rodeadas de rios, lagos ou por zonas costeiras. A disponibilidade de água é um dos requisitos tecnológicos de uma central nuclear, dado que uma central nuclear requer fontes de água confiáveis pois esta é usada para a condensação do vapor, como água de serviço, para o sistema de arrefecimento do reator e para outras funções. Em zonas onde a água é escassa, a recirculação da água de arrefecimento quente através de torres de arrefecimento ou lagoas artificiais tem sido praticada (AELB, 2011).

Devem ser assegurados sistemas altamente confiáveis de fontes de abastecimento de água mesmo quando há a ocorrência de fenómenos naturais e acidentes no local. O fornecimento de água deve ser considerado para toda a vida útil do empreendimento (AELB, 2011).

As características das linhas de água que estão adjacentes à central terão que ser estudadas, para se compreender o comportamento das mesmas de modo a que se possa fazer uma previsão dos impactes caso haja um acidente nuclear.

População

A proximidade de aglomerados populacionais é uma das principais preocupações. Nos inícios da era nuclear, os países localizavam as suas centrais em zonas com densidades populacionais baixas e a empresa que detinha os direitos da central teria que construir uma zona de exclusão em redor do empreendimento onde ninguém poderia habitar. Nos últimos tempos, com a evolução dos sistemas de segurança, as centrais nucleares podem ser construídas em qualquer local mas devem ser preferencialmente localizadas em áreas pouco povoadas e distantes de grandes centros populacionais (IAEA, 2003a).

A distância a áreas densamente povoadas é necessária para minimizar a complexidade associada ao planeamento de emergência (Macintosh, 2007). As áreas admitidas para

construção não podem conter tal população ou centros populacionais que tornaria impossível a aplicação eficaz de medidas de emergência (STUK, 2000). Estabelece-se um limite de 25 mil habitantes para as áreas circundantes às centrais nucleares (AELB, 2011).

De forma a minimizar riscos na saúde e na segurança é geralmente requerido que se construa uma zona de segurança em torno da central nuclear (Macintosh,2007). A área de segurança deve ter tal dimensão, que um indivíduo que esteja localizado em qualquer ponto deste limite, passado duas horas da libertação de produtos da fissão no ar, ele não seja atingido com uma radiação maior que 25 rem (IAEA, 2003a). Nessa zona a entidade responsável pela central nuclear tem autoridade total para determinar todas as atividades lá exercidas e a remoção de pessoas e bens (AELB, 2011).

Se a densidade populacional de um local proposto excede as 200 pessoas por km², devem ser reconsiderados outros locais alternativos em que esta seja mais baixa. No entanto há outros fatores que devem ser reconsiderados, tais como o meio ambiente e a segurança, o que pode resultar na seleção de um local com uma maior densidade populacional (AELB, 2011).

Características sísmicas

A análise sísmológica do local irá demonstrar a aptidão do mesmo para a construção do local dado o seu historial sísmico.

O movimento de terra e estabilidade da superfície é importante para avaliar os eventos externos e possíveis riscos relacionados com as condições sísmológicas e geológicas. A sismicidade é um dos fatores mais importante na escolha de um local para a uma central nuclear. Um sismo poderá provocar danos no funcionamento dos sistemas como nas “barreiras” de segurança criadas para garantir a segurança da central.

O potencial sísmológico de uma determinada área deve ser determinado a partir de registos sísmológicos e a partir do estudo da natureza sísmo tectónica da mesma (AELB, 2011).

Apesar da recomendação para a construção da central nuclear numa área que seja sísmicamente estável, a sua construção pode ser feita em áreas que não o sejam mas isto trará mais custos tanto na construção como na operação. Veja-se o caso do Japão, situado numa das zonas sísmologicamente mais ativas do planeta (Anel de fogo do Pacífico) e no entanto tem 48 reatores nucleares e 2 em atual construção.

Áreas ecológicas sensíveis

As centrais nucleares devem ser localizadas longe de áreas ecologicamente sensíveis para a minimização de possíveis impactos ambientais. Estas áreas incluem: viveiros importantes para as espécies migratórias, áreas de apoio a espécies ameaçadas ou comunidades ecológicas de importância nacional ou internacional, parques e reservas naturais (Macintosh, 2007).

Características do solo

A construção de uma central nuclear envolve edifícios de grande porte exigindo uma base sólida para a sua fundação. Áreas em que a fundação é pobre devem ser evitadas sendo prudente selecionar locais com rochas estáveis ou solos sólidos. Será necessária uma investigação geológica e geotécnica detalhada será necessária para determinar as propriedades de engenharia estáticas e dinâmicas do material subjacente ao local (AELB, 2011).

É necessário evitar áreas onde haja atividade vulcânica, áreas com falhas evidentes na superfície, áreas onde há instabilidade de taludes, tais como deslizamento de terras e rochas, causadas por fortes chuvas e áreas onde se faz a exploração de recursos no presente, áreas de colapso potencial, por exemplo, áreas ricas em calcário ou outras formações solúveis

De realçar que alguns atributos relativos a estes critérios de exclusão, também são usados para a avaliação de locais para a implantação na fase de seleção do local (IAEA, 2015).

2.4.2 Critérios de evasão

Estes critérios são usados para identificar as áreas mais favoráveis para a construção da central. A aplicação dos critérios de evasão ajuda a garantir que a identificação dos locais mais adequados é eficaz (IAEA, 2012).

Hidrologia

As características hidrológicas da região devem ser examinadas de forma a determinar a sua natureza, especialmente se essa água é usada para abastecimento humano ou para irrigação da região. É necessário, também, estudar a quantidade existente e a direção do seu fluxo.

Dois requisitos principais terão que ser descritos: inundações e qualidade da água. A área de estudo deve ser avaliada para determinar o potencial de inundações devido a uma ou mais causas naturais tais como o escoamento resultante de precipitação, derretimento de neve, maré alta maré de tempestade, ondas e vento que podem afetar a segurança da instalação. (IAEA, 2003a). O passo inicial é fazer uma análise de mapas topográficos e delimitar as zonas que serão propensas a cheias. (AELB, 2011). De seguida deve-se analisar todos os dados

históricos tanto meteorológicos como hidrológicos (IAEA, 2003c). Deve ser realizada uma investigação das capacidades de dispersão e diluição e vias potenciais de contaminação do ambiente de águas subterrâneas em condições de funcionamento e de acidentes em relação ao presente e às futuras utilizações de fontes de água (AELB,2011).

Os locais preferíveis serão aqueles em que o impacto na qualidade da água será mínimo (IAEA, 2003a).

Considerações atmosféricas

Apesar da dispersão atmosférica que poderá ocorrer no local normalmente não ser um fator crítico na seleção do local dado que as estruturas e as componentes de segurança são projetadas para suportar condições atmosféricas extremas, as características atmosféricas são uma consideração importante na fase de seleção pois avaliam a dispersão de efluentes radioativos que podem ser libertados devido a acidentes nucleares ou durante a rotina da central nuclear (ALEB, 2011).

Existem duas principais considerações atmosféricas a ter em conta. A primeira são condições meteorológicas extremas, eventos que podem afetar o funcionamento seguro e eficiente da central nuclear, como por exemplo ciclones e inundações. A segunda consideração é a forma como as condições atmosféricas podem afetar a dispersão de material radioativo e de outros poluentes a partir do normal funcionamento da central ou aquando de um acidente nuclear. Por exemplo ventos dominantes, fatores topográficos que influenciem o clima local (colinas e vales) e risco de nebulização do local e formação de gelo devido à libertação de vapor de água (Macintosh, 2007).

Para determinar as condições atmosféricas de um local serão apenas necessários dados atmosféricos disponíveis da área (AELB, 2011). A escolha de locais com baixo risco de eventos climáticos extremos e dispersão da poluição é preferível (Macintosh, 2007).

Risco na segurança

Ao localizar centrais nucleares a entidade responsável pelo projeto procurará minimizar o risco de danos intencionais e não intencionais no empreendimento. Os fatores suscetíveis e a ter em conta são: proximidade a uma infraestrutura de transporte relevante (por exemplo aeroportos), instalações industriais que funcionem com materiais perigosos e instalações militares (Macintosh, 2007).

Fronteiras internacionais

Um acidente numa central pode levar a consequências que se podem propagar por muitos quilómetros. Construir uma central junto de uma fronteira com outro país levanta o problema de criar tratados adequados com o país vizinho. Apesar de tudo, existe um tratado internacional em que todos os países que possuem centrais nucleares deverão notificar os países com quem fazem fronteira no caso de um acidente nuclear.

Mesmo assim a possibilidade de construção de uma central nuclear nestes locais é viável desde que esta se encontre a uma distância acordada entre os países. Basri & Ramli (2012) sugerem que a distância entre fronteiras internacionais não deve ser menor que 50km.

2.4.3 Critérios de aptidão

Os critérios de aptidão são aqueles que descrevem os potenciais atributos ambientais, socioeconômicos ou estratégicos de um local (Rizzo et al, 2015). É necessário construir uma lista de critérios de tal forma que possam ser marcados, pesados e classificados de forma adequada (IAEA, 2012). Estes critérios são aplicados com a finalidade de determinar os melhores locais entre os locais aceitáveis.

Aproximação razoável a uma rede elétrica principal

De forma a manter os sistemas de segurança ativos, em caso de ocorrência de um evento que origine um *shut-down* do reator, é necessário um sistema alternativo confiável que forneça eletricidade à central. Além disso, a central produz energia elétrica que posteriormente é transferida para uma rede elétrica para ser distribuída. Quanto maior a distância maior são os custos de ligação à rede.

Acessos

O local tem que ser dotado de bons acessos. Para o bom funcionamento de uma central nuclear esta tem que ser dotada de mão-de-obra qualificada e competente que se desloca todos os dias para o local, para além disso, os equipamentos necessários para a sua construção são de natureza pesada e precisam de ser transportados para o local selecionado. Os bons acessos são necessários também para o transporte de combustível nuclear e para que no caso de ocorrência de um desastre nuclear a evacuação seja feita de uma forma mais rápida.

Fatores económicos

A construção de centrais nucleares poderá ter um impacto substancial na economia e da zona envolvente. Impactos potenciais económicos negativos incluem o risco de contaminação para as indústrias primárias próximas como por exemplo na agricultura e na pesca, a perda de clientes para indústrias próximas como por exemplo no turismo e redução no preço dos imóveis locais (Clark et al, 1997).

Estes impactos negativos devem ser pesados contra potenciais efeitos económicos positivos, incluindo oportunidades de emprego e fornecimento de energia confiável (Macintosh, 2007).

2.5 SIG

As tecnologias SIG podem ser consideradas como um banco de dados digital, com finalidades específicas, em que um sistema de coordenadas espacial comum é o principal meio de armazenar e de aceder a dados e informações (Martins et al, 2011). Possuem a capacidade para produzir, armazenar, analisar e visualizar dados espaciais, que tem grande potencial para lidar com questões de ordenamento do território e oferece um suporte para a tomada de decisão (Zhang et al, 2012). Estas são bastante utilizadas na análise de problemas que possuem uma grande componente espacial, pois são as mais adequadas para lidar com uma ampla gama de critérios com diferentes fontes e escalas temporais/espaciais (Chen & Khan et al, 2010). A vantagem desta ferramenta é a possibilidade de criar mapas, modelar, questionar e analisar grandes quantidades de dados armazenados num único banco de dados (Foote & Lynch, 1999).

Existem dois tipos de possíveis representações em SIG, por dados *raster* ou por dados *vector*. Os modelos *raster* são representados por uma malha ou grade de retângulos, todas com o mesmo tamanho. Cada elemento é chamado de *pixel* ou célula e contém a informação e a localização geográfica que lhe são atribuídas. Num modelo *vector*, as características geográficas em SIG são expressas como vetores, mantendo as características geométricas das Figuras. São usados para definir limites e geometrias, e conseqüentemente as geometrias espaciais. Os elementos *vector* têm associado a si informações do banco de dados. Os elementos geométricos usados são pontos, linhas, e polígonos (Sanchez-Lozano et al, 2013).

Segundo Bosque-Sendra et al (2000), os SIG apresentam algumas dificuldades para se tornar o instrumento ideal para a resolução de todo o tipo de problemas espaciais. Estas dificuldades surgem por parte de duas fontes: a deficiência nos métodos analíticos que são normalmente integrados num SIG e das ferramentas que normalmente constituem um SIG devido ao facto de serem muito genéricas e não especializadas.

As operações ou funções de análise integradas nos SIG permitem ao utilizador combinar dados espaciais (mapas) diferentes para obter um novo conjunto de resultados (mapas). Podem ser distinguidas duas categorias de operações ou funções em SIG: funções fundamentais (ou base) e avançadas. Esta classificação baseia-se na medida em que estas podem ser utilizadas em diferentes tipos de análises espaciais, incluindo a análise de decisão espacial. As funções fundamentais são operações geométricas de baixo nível que podem ser pensadas como ferramentas simples que constroem relacionamentos entre objetos espaciais. Exemplos dessas funções são: operações de *overlay*, de medida e conexão. As funções avançadas são aquelas que fornecem capacidade de manipulação estatística e matemática com base em modelos teóricos (Malczewski, 1999).

A escolha do local para uma central nuclear requer a análise simultânea de um conjunto de diversos parâmetros (Alonso, 2012). Os dados necessários para a avaliação dos critérios são organizados no *software* SIG por mapas temáticos separados em camadas (*layer*). Uma camada é um conjunto de dados que descrevem uma única característica de cada localização dentro de uma área geográfica limitada (Martins, 2011). Isto ilustra o grande potencial oferecido pelas ferramentas SIG para manipular informação geográfica através da sua interface e para sustentar um Sistema de Apoio à Decisão, (Sanchez-Lozano et al, 2013) pois é possível combinar e, simultaneamente avaliar os critérios que são a base da tomada de decisões (Barredo, 2005).

2.5.1 ArcGis

O ArcGis é um pacote de *Softwares* SIG produzido pela ESRI (*Environmental Systems Research Institute*). Segundo Sanchez-Lozano et al (2013), um *Software* GIS organiza os dados geográficos de modo a que a pessoa que lê um mapa possa selecionar os dados necessários para um projeto ou tarefa em particular.

Existe uma extensa lista de conceitos importantes para a compreensão e funcionamento em ArcGis, neste trabalho apenas nos iremos focar seguintes conceitos: *shapefile*, *layer* e tabela de atributos. Entende-se por *shapefile* como um tipo de arquivo que guarda informações

geográficas em forma de vetores. As *layers* são as estruturas que nos permitem visualizar os conjuntos de dados em forma de mapas no interior do ArcMap. A tabela de atributos, como o nome indica, é constituída por colunas e linhas. O seu conjunto das colunas e linhas formam um banco de dados acerca de uma *shapefile*.

A estrutura do ArcGis é composta por um conjunto variado de aplicações integradas no entanto, nesta dissertação, vamo-nos focar apenas no ArcMap, ArcCatalog e o ArcToolbox. O ArcMap é a principal aplicação do ArcGis e permite visualizar, criar e editar mapas, consultar atributos, analisar relações espaciais e apresentar o *layout* final de cada mapa. A *interface* do ArcMap, como se pode ver na Figura 2.1, tem duas seções principais: do lado esquerdo da mesma, a tabela de conteúdos, onde estão representadas as *layers* do projeto e que permite ao utilizador adicionar informações aos mapas temáticos (Sanchez-Lozano et al, 2013) e do lado direito, o *data layout* onde são apresentados os mapas.

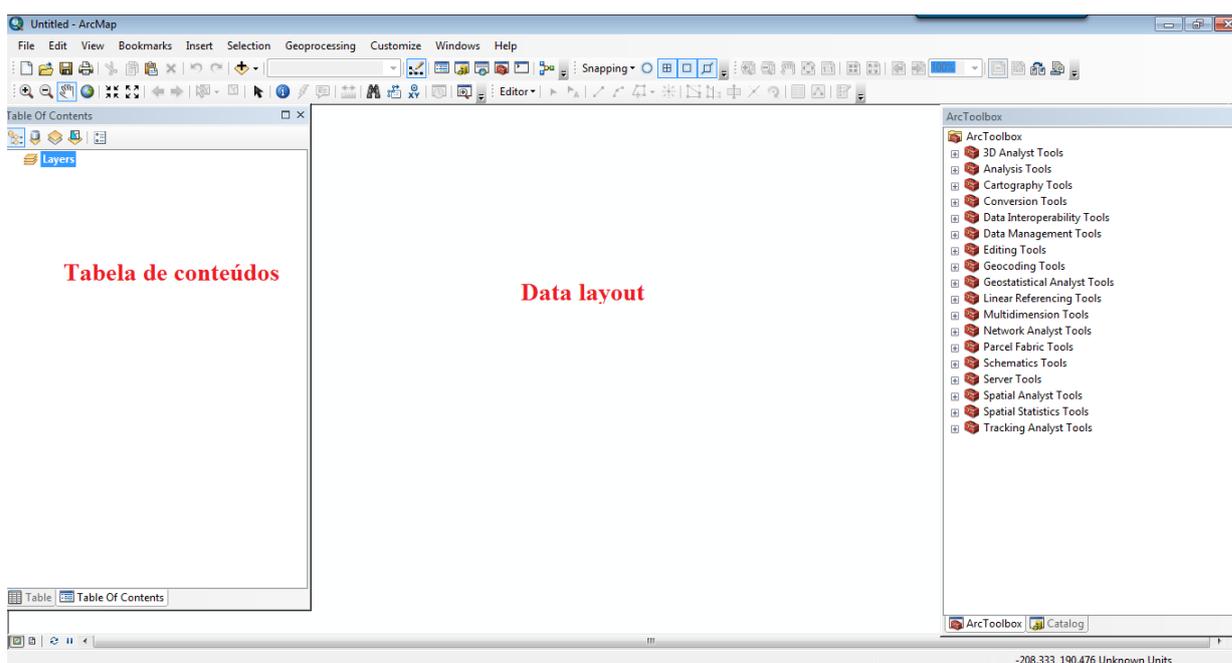


Figura 2.1 - Interface do ArcMap

O ArcCatalog organiza e gere os dados geográficos contidos no computador ou noutras fontes e permite ao utilizador procurar e visualizar dados no ArcMap. Pode ser acedido dentro do ArcMap ou através do Menu Iniciar do computador. O acesso ao ArcToolBox é executado dentro do ArcMap. O ArcToolbox contém diversas ferramentas que permitem a realização de uma série de operações mais elaboradas com os dados geográficos (Silva, 2010).

Apesar do ArcToolBox conter a uma enorme variedade de ferramentas, apenas nos iremos focar nas funções de *Overlay*, *Select by attribute* e *buffer*. O conjunto de ferramentas de *Overlay*¹ são constituídas por outras ferramentas que tem como objetivos principais combinar, apagar, modificar ou atualizar as características espaciais de duas *shapefiles*, originando uma nova *shapefile*. Existem seis tipos de ferramentas de *overlay*, nesta dissertação apenas nos iremos focar nas funções de *Intersect* e *Update*. A ferramenta *Update*² usa duas *shapefiles* para o cálculo da interseção geométrica: uma de entrada e outra de atualização. Esta ferramenta atualiza os atributos e a geometria da *shapefile* de entrada tendo em conta os atributos e a geometria da *shapefile* de atualização. A função *Intersect* reúne as informações de duas *shapefiles* em que o seu limite é o espaço de interseção entre os arquivos. Outras funções importantes de mencionar são as funções de *buffer* e de *select by attribute*.

As ferramentas *buffer*³ criam novas formas a partir de pontos, linhas ou polígonos previamente selecionados, a uma distância predefinida pelo utilizador, originando uma nova *shapefile* com o resultado final do *buffer*. O *select by attribute*⁴ é um método de seleção em que o utilizador, através da aplicação de funções matemáticas, escolhe as propriedades de uma *shapefile* que pretende identificar.

As ferramentas SIG fornecem um conjunto de métodos e procedimentos para computadorizar dados geográficos e obter informações para a tomada de decisão. No entanto as capacidades das ferramentas SIG são muito limitadas em termos de armazenamento e análise de dados sobre as preferências do decisor. Estas capacidades são melhoradas pela integração das técnicas de análise multicritério ao *software* SIG (Malczewski, 1999).

¹ ESRI - <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/analysis/an-overview-of-the-overlay-toolset.htm>

² ESRI - <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/analysis/update.htm>

³ ESRI- <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/analysis-toolbox/buffer.htm>

⁴ ESRI- <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/map/working-with-layers/using-select-by-attributes.htm>

2.6 Análise de Decisão Multicritério (ADM)

O planeamento do uso do solo, como qualquer outro problema de decisão espacial envolve, normalmente, um grande conjunto de alternativas viáveis e critérios de avaliação múltiplos, incomensuráveis e divergentes entre si (Loken, 2007).

Bogetoft & Pruzan (1997) descrevem análise multicritério como um termo genérico para todos os métodos que existem para ajudar as pessoas a tomar decisões de acordo com as suas preferências, nos casos em que existe mais do que um critério conflituante.

Apesar de existir uma vasta gama de termos associados à ADM, nesta dissertação optamos pela descrição da nomenclatura mais frequentemente usada:

- Critérios: são os constituintes base do processo de avaliação.
- Atributos: são conhecidos como os parâmetros de desempenho, fatores, características e propriedades;
- Objetivos: indica o que pretendemos atingir;
- Pesos: valores das prioridades atribuídas aos critérios de avaliação, indicativos da sua importância em relação a outros critérios que estão em consideração no problema. Quanto mais alto o valor do peso mais importante é o critério para o problema;
- Matriz de decisão: uma matriz decisão D_{mn} diz respeito a m alternativas cada uma com n atributos em que os seus elementos são os desempenhos de cada alternativa segundo cada critério ou atributo (Rodrigues, 2007).

Várias técnicas de análise multicritério oferecem um método estruturado para avaliar alternativas e selecionar a melhor alternativa de acordo com as prioridades do decisor tendo em conta um número de critérios relevantes (Zhang et al, 2012). Por outras palavras, esta ferramenta parte problemas complexos em fragmentos menores, ajudando assim o decisor a organizar e a sintetizar a informação para que se sintam mais confiantes e confortáveis com as decisões tomadas e sintam que todos os critérios importantes foram contabilizados (Loken,2007).

A ADM é uma ferramenta que incorpora juízos de valor dos decisores individuais ou de várias partes interessadas, com a finalidade de chegar a decisões ótimas (Hermann et al, 2007).

Tal como na maior parte dos problemas de otimização, na análise multicritério, não é de esperar que todos os critérios principais sejam otimizados ao mesmo tempo. Os critérios são antagónicos e a melhor opção para um conduz a um agravamento de um outro. Assim, é necessária uma ferramenta cientificamente certificada para apoiar a seleção mais adequada entre as alternativas avaliadas com base num conjunto de critérios. Esta ferramenta é considerada como processo de otimização multicritério (análise multicritério), ou numa perspetiva mais ampla, tomada de decisão multicritério. A decisão sobre uso da ferramenta multicritério adequada é um desafio por si mesmo. Em primeiro lugar, o problema precisa ser definido claramente, as alternativas identificadas, determinadas as pessoas envolvidas na tomada de decisão e os critérios de avaliação que serão selecionados. Em seguida, a avaliação pode ser feita usando o método de análise multicritério mais apropriado que deve agregar o desempenho de cada alternativa, com ou sem ponderação dos critérios de seleção (Vucijak et al, 2015).

Segundo Keeney et al (2013), em geral, os problemas de análise multicritério envolvem seis características em comum:

- Uma meta ou um conjunto de metas que o decisor pretende alcançar;
- O decisor ou um grupo de decisores envolvidos no processo de tomada de decisão com as suas preferências em relação a critérios de avaliação;
- Um conjunto de critérios de avaliação;
- Um conjunto de alternativas de decisão;
- Um conjunto de variáveis não controláveis (independentes) ou ambientes de decisão;
- Um conjunto de resultados ou consequências associadas a cada par de alternativas e atributos

2.6.1 Métodos de análise de decisão multicritério (MADM)

Ao longo dos anos têm vindo a ser propostos dezenas de métodos de análise multicritério. Segundo Hobbs & Meier (1994), os métodos diferem em numerosas áreas: fundo teórico, o tipo de perguntas e o tipo de resultados. Alguns métodos foram criados especialmente para a resolução de um problema específico e não são úteis para a resolução de outros tipos de problemas, enquanto outros métodos são mais universais e podem ser aplicados em diversas áreas distintas. A ideia principal de todos os métodos é simplificar o processo de decisão para o decisor (Loken, 2007).

Na escolha de um MADM, há muitos aspetos a ter em conta. Diferentes métodos são suscetíveis de dar resultados diferentes, portanto um método que reflita os “valores reais” do

decisor da melhor maneira possível, deve ser o escolhido. Além disso o método deve ser fácil de usar e deve fornecer aos decisores todas as informações que eles necessitem para a tomada de decisão e deve ser compatível com os dados recolhidos (Hobbs & Horn, 1997).

Segundo Loken (2007), não podemos concluir que um método é melhor que outro para o processo de localização. No entanto, uma boa alternativa será aplicar mais do que um método, em combinação ou em paralelo, de forma que se possa fazer uso dos pontos fortes de ambos. Assim, o decisor obtém uma base mais ampla para a tomada de decisão.

Os métodos de análise de decisão multicritério mais utilizadas incluem o AHP (*Analytical Hierarchy Process*), ANP (*Analytical Network Process*), MAUT (*Multiattribute Utility Theory*), PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*), ELECTRE (*Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*), o SMART (*Simple Multi-Attribute Rating Technique*), MOLP (*Multi-objective Linear Programming*), TOPSIS (*Technique for Order Preference with Similarity to Ideal Solution*) WLC (*Weighted Linear Combination*) e outras formas de programação linear (Vucijak et al, 2015).

2.7 Análise de Decisão Multicritério Espacial (ADME)

Ainda na década de 60, através do arquiteto McHarg a análise multicritério espacial começou a ter um lugar de destaque como uma metodologia para a resolução da problemática do uso do solo. McHarg (1969) usou uma técnica de sobreposição de transparências manual em que cada camada representava um determinado critério, dividindo a informação em áreas boas e áreas más. As áreas boas eram deixadas transparentes, enquanto as áreas menos favoráveis eram escurecidas. Por fim, eram tiradas cópias às transparências sobrepostas de modo a obter um mapa final em que as áreas mais claras eram representativas dos melhores locais.

A análise multicritério espacial pode ser pensada como um processo que combina e transforma dados espaciais numa decisão (Abudeif et al, 2015). A principal vantagem em incorporar as técnicas de análise multicritério com as ferramentas SIG é a possibilidade dos decisores inserirem juízos de valor (as suas preferências no que diz respeito a critérios e/ou a alternativas de avaliação) nos processos de tomada de decisão baseada em SIG, e receber feedback sobre as suas implicações para a avaliação de políticas. Este feedback aumenta a confiança dos decisores nos resultados obtidos (Malczewski, 2006).

Duas considerações de extrema importância na análise de decisão multicritério espacial são as capacidades que o *Software SIG* usado tem para adquirir dados, armazenamento, recuperação, manipulação e análise, bem como a capacidade da ADME para combinar os dados geográficos e as preferências dos decisores de todas as alternativas num único valor dimensional (Malczewski, 2004).

Cada etapa da análise multicritério espacial envolve tanto as metodologias SIG como “Multicritério”, diferindo entre si no grau em que estas duas metodologias são utilizadas. Nas etapas iniciais, as metodologias SIG têm maior importância, enquanto nas últimas etapas as metodologias “Multicritério” desempenham o papel principal (Martins, 2009)

A ADME pode ser implementada em modelos *Raster* e *Vector* (Abudeif et al, 2015). Nesta dissertação será adotado o modelo *Vector* pois este modelo representa o mundo real de uma forma mais aproximada.

3 METODOLOGIA

Existem vários fatores que tornam a localização de uma central nuclear um problema complexo como por exemplo a grande quantidade e a diversidade de critérios que terão de ser considerados neste tipo de análise, e por sua vez a variedade e o número de dados e informações que serão geridos no processo.

O problema de seleção de um local possui uma forte componente espacial devido ao facto de envolver um variado conjunto de locais alternativos em que os critérios de avaliação das alternativas podem ser representados na forma de mapas (Martins et al, 2011).

Malczewski (1999) sugere que, apesar das ferramentas SIG e os métodos de decisão multicritério constituírem duas áreas distintas de pesquisa, ambos sejam combinados para a resolução de problemas com forte componente espacial.

As ferramentas SIG são extraordinariamente uteis na manipulação de dados geográficos, pois estas conseguem resolver uma infinidade de problemas envolvendo dados espaciais. No entanto, na maioria das ferramentas SIG, as habilidades de análise espacial de dados, são baseadas em funções de *overlay* e *buffer* e estas funções identificam apenas as áreas que satisfazem simultaneamente todos os critérios (áreas viáveis), não identificando as áreas mais promissoras para o projeto (Carver, 1991). Para lidar com estes critérios que muitas vezes são conflituantes, deve ser integrado às ferramentas SIG um modelo de análise multicritério para a tomada de decisão, com a finalidade de fornecer uma ferramenta poderosa com o objetivo de avaliar a aptidão dos locais para a construção de empreendimentos (Latinopoulos, 2015).

3.1 ADME na localização de centrais nucleares.

A ADME na localização de centrais nucleares tem dois focos principais: um primeiro com o objetivo de eliminar as áreas onde existem obstruções à construção da central nuclear, que será denominado “pesquisa de um local”. Um segundo, designado “seleção de um local”, em que se pretende avaliar todas as áreas resultantes da fase anterior, encontrando dentro desse espaço de resultados, as áreas mais adequadas para a construção de uma central nuclear. Para atingir essa meta serão incorporadas as técnicas de análise multicritério no ArcMap e usadas as ferramentas da *toolbox* do mesmo.

Para se iniciar o processo de localização, será necessário definir os vários critérios de avaliação a utilizar. Segundo Malczweski (1999), podem se distinguir duas tendências para a definição dos critérios de avaliação: o problema pode ser descrito de maneira completa ou simplificada. A diferença entre estas duas tendências encontra-se no número de critérios envolvidos e na quantidade de informação disponível para a avaliação de cada critério. Nesta dissertação optou-se por uma descrição simplificada dos critérios de avaliação. No entanto temos consciência que a quantificação de alguns critérios seria importante para o processo de localização, contudo alguns dados encontrados acerca de vários critérios eram de fraca qualidade.

Os critérios de avaliação estão associados a entidades geográficas e podem ser representados na forma de mapas. Estes mapas devem integrar toda a informação relevante para a análise territorial. Existem dois tipos de mapas de critérios: os mapas de critérios de avaliação e os mapas de restrições. Os mapas de critérios de avaliação representam a distribuição espacial de um atributo (Martins, 2009). Já as restrições, segundo Keeney et al (1993), são limitações impostas pela natureza ou pelos seres humanos (através de leis, normas, etc.) que não permitem que certas ações sejam realizadas. Estas restrições representam limitações impostas ao espaço de decisão e vão determinar o conjunto das alternativas viáveis. Em termos de SIG, as restrições, são usadas para eliminar do processo de decisão pontos, linhas, polígonos e/ou *layers* caracterizadas por determinados atributos e/ou valores (Martins, 2009).

O conjunto de critérios de avaliação para um problema de decisão particular pode ser obtido através de uma revisão bibliográfica, de estudos analíticos e também através de opiniões de peritos (Keeney et al, 1993). Podem também ser obtidos através de estudos relevantes e documentos de agências ou órgãos governamentais que são utilizados como guias para a seleção de critérios de um problema em particular (Malczewski, 1999). Quando os dados obtidos forem de fraca qualidade ou se houver falta de dados, esses critérios não poderão ser

utilizados. Se não forem encontrados dados em formato que possa ser lido pelo ArcMap, terão que ser passados para um formato compatível com o mesmo.

No caso concreto da localização de centrais nucleares, o conjunto de critérios utilizados são baseados na bibliografia publicada pela IAEA, tal como os referenciados na secção 2.4 desta dissertação.

3.1.1 Pesquisa de um local

Nesta fase são utilizadas apenas ferramentas GIS para a entrada, transformação, armazenamento e manipulação dos dados de mapas digitais relevantes para a resolução do problema (Carver, 1991).

O primeiro passo desta etapa será definir os critérios de avaliação que serão utilizados e associá-los a mapas que possam ser representados em ArcMap. Segundo Abudeif et al (2015), esta etapa do processo de localização baseia-se na filosofia dos critérios de exclusão.

Os mapas de critérios de exclusão, deverão ser representados como *shapefiles* no *ArcMap*. E em seguida através das extensões de *geoprocessing* e *select by* presentes no *toolbox* do *ArcMap*, são realizadas funções de *buffer* e *select by attribute* aos diferentes mapas de critérios impondo algumas restrições, resultando novos mapas representativos desses critérios. Quando a todas as *shapefiles* já tiverem sido aplicadas as restrições é aplicada uma função *Intersect* com todas elas, originando o resultado final da pesquisa de um local.

Segundo Carver (1991), no final da pesquisa de um local, todas as áreas obtidas, são o resultado do cumprimento de todos os critérios em simultâneo e não há nada que informe o decisor qual é o melhor local dentro de todas as alternativas resultantes.

3.1.2 Seleção de um local

Esta segunda fase tem como objetivo uma análise mais detalhada das alternativas geradas na etapa anterior com a finalidade de classificar as áreas obtidas na pesquisa de um local.

Esta etapa pode ser dividida em três partes: uma primeira em que se recorre à bibliografia para a definição dos critérios que serão utilizados, uma segunda em que há uma articulação entre os mapas de critérios definidos com uma técnica de análise multicritério e uma parte final em que todos os mapas utilizados são unificados através da função *Update* presente na *toolbox* do

ArcMap. Os critérios utilizados nesta fase, ao contrário dos usados na pesquisa de um local, são ponderados de acordo com o seu nível de percepção de importância (Carver, 1991).

Como já referido anteriormente, existe uma grande variedade de métodos de análise multicritério. Nesta dissertação será adotado método WLC (*Weighted Linear Combination* ou método da soma ponderada, em português), pois segundo IAEA (2003a), este método pode ser executado utilizando qualquer sistema SIG que tenha capacidades de *overlay* e que permita que as *shapefiles* relativas aos critérios de avaliação sejam combinadas com o objetivo de chegar a um mapa final.

O WLC baseia-se no conceito de uma média ponderada em que os critérios são padronizados para um intervalo numérico comum e combinados, posteriormente, por meio de uma média ponderada (Abudeif et al, 2015). Para além da necessidade de padronização dos critérios, este método, necessita que sejam atribuídos pesos (ou coeficientes de ponderação) aos diferentes atributos do problema. O valor de cada alternativa corresponde ao somatório dos produtos de cada um dos valores dos seus atributos pelos respetivos pesos (Rodrigues, 2007).

Em SIG, a aplicação deste método baseia-se, numa primeira fase, na padronização dos atributos de cada *shapefile* e numa segunda fase na atribuição de pesos que cada mapa de critério terá.

O mapa de aptidão com todas as alternativas resulta desse somatório e é dado pela seguinte equação:

$$S_j = \sum_{i=1}^n W_i \times x_{ij} \quad (3.1)$$

Em que S_j representa o valor da alternativa j , w_i é o peso do critério i e x_{ij} é o valor da alternativa j no critério i (Abudeif et al, 2015). A alternativa j que tiver a melhor pontuação, ou seja, aquela que tiver o valor de S_j mais alto, será a melhor alternativa.

Normalização dos atributos

Devido ao facto dos mapas de critério serem incomensuráveis, uma vez que os atributos são medidos em diferentes unidades, é necessário que sejam padronizados antes da aplicação do WLC (Martins, 2009; Abudeif et al, 2015).

Existem diversos métodos para a normalização de atributos, Eastman (1997) sugere que a padronização dos critérios, nestes casos, seja realizada através de uma função de atribuição de valores do intervalo 0-1 em que o maior valor da escala é atribuído ao melhor caso. Nesta dissertação será adotado o método da razão das diferenças, pois com esta normalização obtém-se valores distribuídos entre no intervalo de 0 a 1, sendo os valores extremos deste intervalo sempre obtidos (Rodrigues, 2007).

Assim, o método da razão das diferenças para um critério benefício é dado por:

$$R_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (3.2)$$

Para um critério custo:

$$R_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (3.3)$$

Após a realização da padronização de cada atributo, recorrendo ao ArcMap, na tabela de atributos correspondente à *shapefile* desse mapa de critério serão adicionados os valores padronizados.

Todas as *shapefiles* representativas dos mapas de critérios de avaliação são, nesta fase, unificadas no ArcMap com o mapa resultante da pesquisa de um local, através de função *Update*.

Pesos dos critérios

São propostos diversos métodos para o desenvolvimento de pesos na literatura, Malczewski (1999), sugere quatro técnicas principais para a atribuição de pesos:

- Métodos de determinação direta de pesos: Cada critério em análise é classificado na ordem de preferências do decisor;
- Métodos de notação: exigem a estimativa de pesos na base de uma escala predeterminada;

- Métodos de comparação em pares: envolvem a comparação de pares para criar uma matriz de relação;
- Métodos de análise *trade-off*: fazem a análise de compromisso entre pares de alternativas.

Estes métodos diferem entre si no grau de dificuldade de aplicação, na precisão, no grau de compreensão por parte dos envolvidos e na fundamentação teórica que está por trás de cada método. Outra característica importante na escolha de um método para a atribuição de pesos é a forma como o método pode ser incorporado à análise de decisão baseada em SIG (Martins, 2009). Neste trabalho será aplicado um método de determinação direta de pesos, mais especificamente o método da pontuação.

Segundo Rodrigues (2007), o método da pontuação é um método muito utilizado em planejamento espacial e consiste em distribuir 100 pontos por todos os critérios, de acordo com a importância que lhes é atribuída. Os 100 pontos têm que ser, obrigatoriamente, distribuídos na sua totalidade.

Distribuídos os pontos pelos diferentes critérios, será acrescentada uma nova coluna à tabela de atributos do mapa anterior. Nessa coluna, será aplicado o método WLC obtendo assim o valor final para cada alternativa e conseqüentemente o mapa final da seleção de um local.

3.2 Análise de sensibilidade

O objetivo da ADM é combinar as informações de vários critérios para formar uma matriz de decisão enquanto os SIG são mais adequados para o tratamento de diferentes critérios em diferentes escalas espaciais. A aplicação destas duas ferramentas em simultâneo envolve um conjunto de critérios de avaliação representados como *layers* num ambiente SIG. O processo de *overlay* entre as diferentes *layers* representativas de mapas de critérios é realizado de acordo com os valores dos atributos e das preferências dos decisores. Portanto, para além da seleção dos critérios, os pesos dos mesmos terão impacto nos resultados finais. A incerteza nestes casos pode derivar de diferentes fontes: dos dados originais, dos critérios escolhidos, do processamento de dados e dos pesos dos critérios. Os pesos dos critérios, na maior parte as vezes são o maior contribuinte para a controvérsia e incerteza. A análise de sensibilidade pode ajudar a reduzir esta incerteza ilustrando o impacto da introdução de alterações específicas em parâmetros de entrada nos resultados de saída. Uma das alterações mais comum é mudar os valores dos pesos dos critérios (Chen & Khan et al, 2010).

4 ESTUDO DE CASO

O objetivo desta dissertação é aplicar uma metodologia para encontrar as áreas onde a construção de uma central nuclear é possível. Para esse efeito foi escolhido como estudo de caso Portugal Continental.

O território Português situa-se no extremo Sudoeste da Europa, sendo constituído por uma enorme orla costeira a Oeste e a Sul. Tem uma área de 92 090 km² e 10 562 178 habitantes (Dados Instituto Nacional de Estatística¹. Apresenta um alongamento na direção Norte-Sul em cerca de 560 km e uma extensão máxima de Oeste-Este em cerca de 220 Km, apresentando uma forma sensivelmente retangular.

O sistema energético português ainda é muito dependente dos combustíveis fósseis. Segundo Ribeiro et al (2013), a eletricidade em Portugal é produzida principalmente por energia térmica, hídrica e eólica sendo a energia térmica principalmente fornecida pelo carvão e turbina a gás de ciclo combinado.

Como já se referiu anteriormente na secção 1.2, inerente ao consumo de combustíveis fósseis estão associadas as emissões de gases com efeito de estufa. O sector da produção de energia é o sector que mais contribui para a emissão de gases com efeito de estufa e o facto de Portugal ser um país signatário do protocolo de Quioto, adicionar a energia nuclear ao sistema energético português torna-se uma opção pertinente a fim de diminuir o peso deste sector nas emissões de gases com efeito de estufa, fazendo com que as metas acordadas internacionalmente sejam mais facilmente alcançadas.

¹ http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSO S&xpgid=censos2011_apresentacao

Outro problema associado ao consumo de combustíveis fósseis é a volatilidade dos seus preços. Portugal não possui qualquer reserva de combustível fóssil, ao invés detém reservas naturais de Urânio (combustível usado nas centrais nucleares), garantindo assim a independência relativamente ao fornecimento deste tipo de combustível.

Além e todas as vantagens mencionadas anteriormente, no atual contexto de crise económica, uma central nuclear em Portugal iria fazer com que os preços da energia baixassem e tornassem a economia portuguesa mais competitiva. Para além disto, a construção e o funcionamento da central nuclear iriam criar novos postos de trabalho.

A diferença entre a opção de implementar ou não uma central nuclear pode estar no adequado planeamento para a localização da mesma. Esse é também o primeiro passo num projeto de energia nuclear, encontrar um local para albergar a central nuclear. Para alcançarmos isso é necessário a aplicação das duas fases da ADME descritas nas secções 3.1.1 e 3.1.2 respetivamente.

Estas duas fases têm em comum a definição de critérios de avaliação, como já foi referido anteriormente, nesta dissertação optou-se por uma descrição simplificada dos mesmos, devido ao facto da informação relativa a certos critérios ser escassa ou de baixa qualidade. Deste modo, os critérios que serão utilizados na pesquisa de um local são: proximidade a uma linha de água, risco sísmico, população residente e áreas ecológicas sensíveis.

Na seleção de um local serão usados os seguintes critérios: proximidade à rede elétrica, densidades populacionais, proximidade a uma linha de água, fronteiras internacionais, suscetibilidade a cheias e suscetibilidade a *tsunamis*.

Os dados referentes à população e densidades populacionais foram obtidos em formato compatível com o ArcMap através dos dados fornecidos pelo INE. Os dados relativos aos restantes critérios não foram encontrados em formatos compatíveis com o ArcMap, deste modo, tiveram ser desenhados com base em cartas geográficas encontradas.

4.1 Pesquisa de um local

Previamente à inserção dos mapas de critérios no ArcMap terão de ser definidos os critérios que serão usados nesta fase. O conjunto de critérios utilizados foi selecionado através de uma ampla revisão da literatura disponível sobre o tema devido ao facto de Portugal não possuir um programa de energia nuclear. Foram usados, nesta fase, todos os critérios de exclusão descritos na secção 2.4.1 desta dissertação exceto o critério do uso do solo pois os dados encontrados par este critério eram demasiado detalhados e morosos neste contexto de estudo de caso académico.

4.1.1 Proximidade a uma linha de água

Como já foi referenciado anteriormente na secção 2.4.1 desta dissertação, um dos requisitos tecnológicos de uma central nuclear é a necessidade de água. A disponibilidade de água pode ser satisfeita por rios, lagos e também pela água salgada proveniente dos oceanos.

A rede hidrográfica portuguesa é composta por rios inteiramente portugueses e por rios que tem a sua nascente em território internacional mas que desaguam em território nacional. Portugal é também é caracterizado por uma extensa orla costeira, desde a costa da algarvia (ponto mais a Sul), até à foz do rio Minho (ponto mais a norte).

Como se pode verificar na Figura 4.1 (A) foi criado um mapa, recorrendo ao ArcMap, representativo de todas as linhas de água de Portugal Continental. A esse mapa inicial foi adicionado um *buffer* de 10km a toda a orla costeira portuguesa bem como a todos os rios. O mapa da Figura 4.1 (B) ilustra o *buffer* realizado. Apesar de na literatura não ser feita qualquer menção acerca da distância máxima a que a linha de água tem que estar da central nuclear, admitimos que uma distância superior a 10km seja inaceitável entre uma linha de água e a central nuclear.

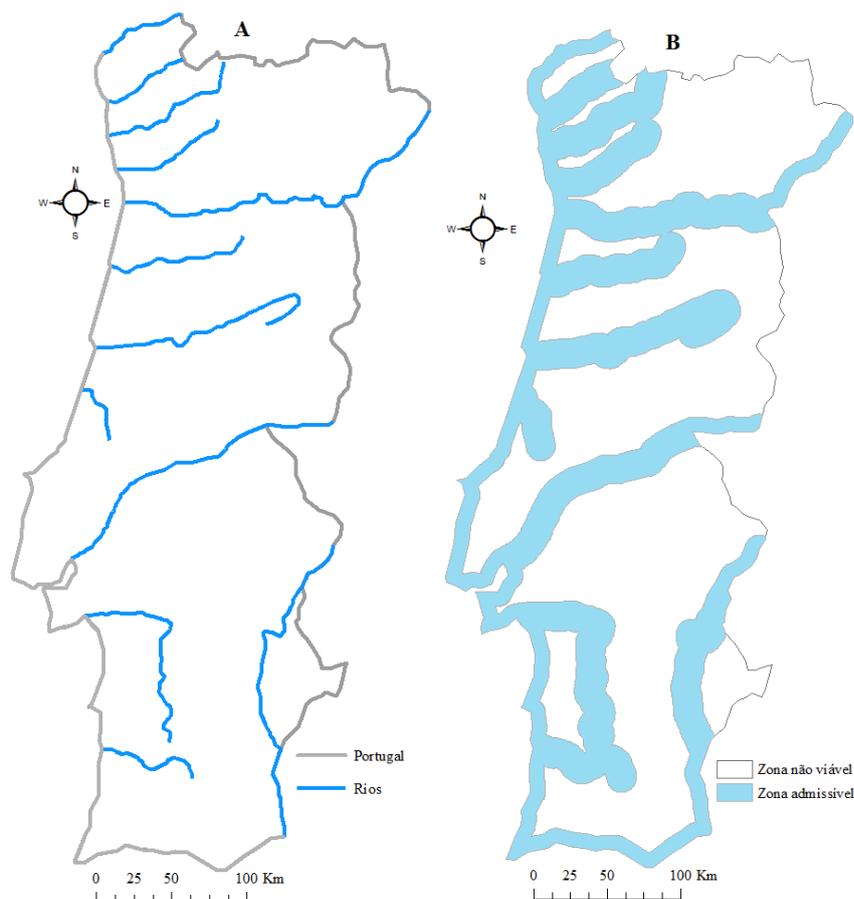


Figura 4.1 - (A) Representação dos rios portugueses; (B) Representação do *Buffer* de 10km aos rios e aos oceanos portugueses

4.1.2 Risco sísmico

Os sismos geralmente ocorrem em zonas com movimentos de placas tectónicas ou de zonas intraplaca. Entende-se por risco sísmico como a descrição probabilística das consequências para a sociedade da ocorrência de sismos e a perceção dos seus efeitos por parte da mesma.

Segundo AELB (2011), o potencial sismológico de uma determinada área deve ser determinado a partir de registos sismológicos e a partir do estudo da natureza sismo tectónica da mesma. Já ocorreram diversos fenómenos de origem sísmica em Portugal Continental no entanto, o único fenómeno que valerá a pena mencionar devido às proporções catastróficas resultantes, será o terramoto de 1755 a que se seguiu de um *tsunami* e devastou a zona de Lisboa, Setúbal e parte do litoral Algarvio. Os sismólogos acreditam que o sismo teve uma intensidade de 8.7 na escala de Richter que se limita até 9.

Foi elaborado um mapa representativo do risco sísmico que se encontra na Figura 4.2 (A). Este mapa representa as regiões de Portugal Continental classificadas com suscetibilidade elevada a sismos e distribuem-se maioritariamente pelos distritos de Faro (todo o Barlavento e a faixa Sul do Sotavento), Beja (faixa litoral), Setúbal (todo o Norte e a metade Oeste), Lisboa (toda a metade Este e uma estreita faixa litoral a Sul) e ainda o de Santarém (Centro e Sudoeste) (Autoridade Nacional de Proteção Civil, 2014). A escala usada para a representação o risco sísmico, foi a escala de Mercalli Modificada.

A IAEA (1984) sugere que se devem evitar zonas que já foram afetadas no passado por fenómenos sísmicos de elevadas intensidades. Devido a isto, reconhecemos que excluir as zonas de Portugal Continental correspondentes será a decisão mais acertada. Ao mapa de risco sísmico representado na Figura 4.2 (A) através da ferramenta *select by attribute*, selecionamos as zonas com risco sísmico menor e igual a 8, eliminando assim, as regiões em que essa condição não se cumpria e como resultado obtivemos o mapa que se apresenta na Figura 4.2 (B). A zona que se encontra a branco na Figura 4.2 (B) corresponde à zona onde a condição não é cumprida e conseqüentemente foi eliminada. É este mapa que será usado para a interceção final da pesquisa de um local.

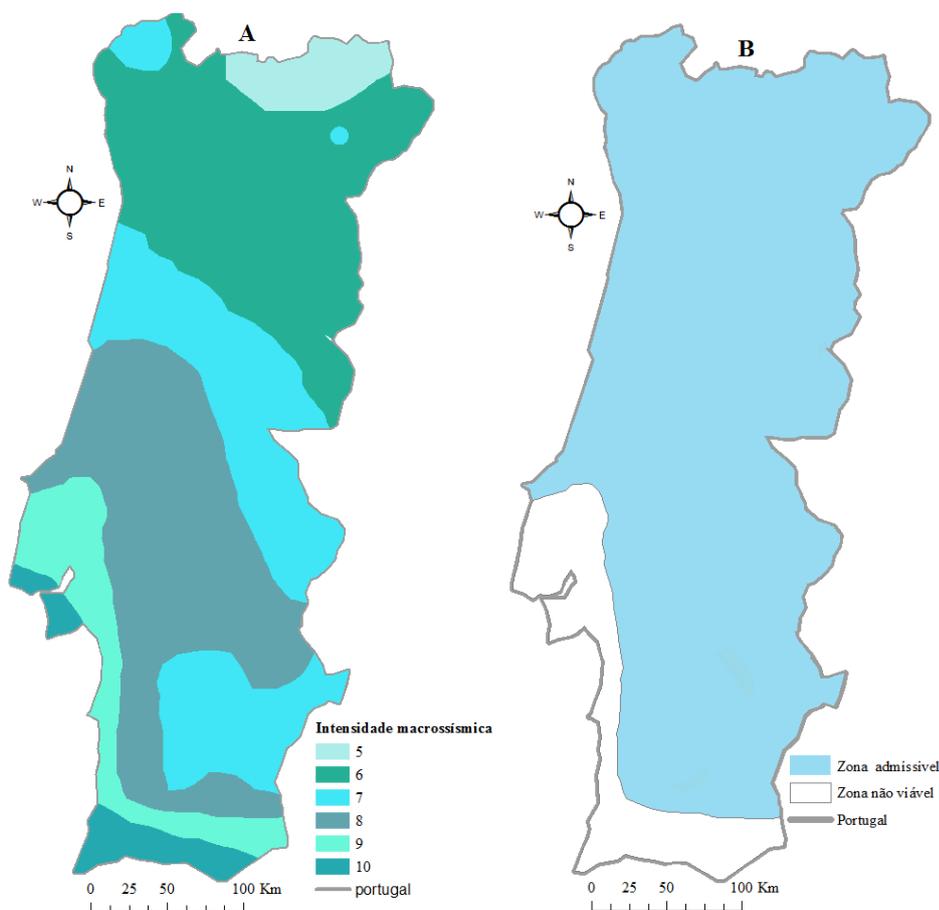


Figura 4.2 - (A) Representação da Intensidade macrossísmica; (B) Representação do resultado *select by attribute*

4.1.3 População

A população de Portugal Continental tem tendência a crescer na zona do litoral e diminuir na zona do interior. A maior parte da população total de Portugal Continental reside nos nove distritos do litoral, sendo que a máxima concentração de população está nas duas principais áreas metropolitanas do país (Lisboa e Porto) (Autoridade Nacional de Proteção Civil, 2014).

Para a representação da população residente em cada município de Portugal Continental, usamos a *shapefile* que nos é fornecida na página do INE e que se encontra na Figura 4.3 (A). Esta contém as fronteiras políticas de cada município, dados relativos ao número de habitantes de cada município, bem como as suas respetivas áreas.

Tendo em conta que o número máximo de habitantes em torno de uma central nuclear não poderá exceder as 25 mil pessoas como já referenciamos anteriormente na seção 2.4.1, à

shapefile que nos é fornecida pelo INE aplicamos a ferramenta *Select by attribute*, excluindo todos os municípios com populações maiores que 25 mil habitantes. O mapa da Figura 4.3 (B) é representativo dessa condição.

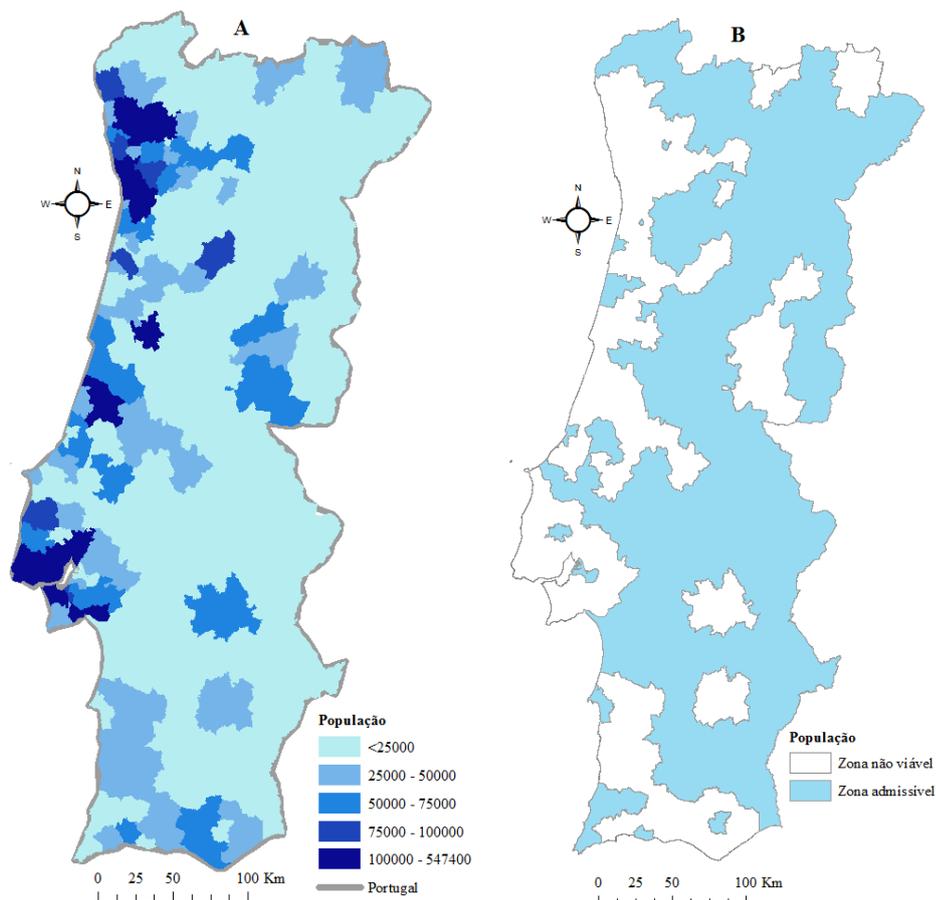


Figura 4.3 - (A) População residente em Portugal Continental; (B) Resultado do *Select by attribute*

4.1.4 Áreas ecológicas sensíveis

Segundo AELB (2011), na pesquisa de um local é recorrente identificar e excluir todas as áreas protegidas, particularmente aquelas áreas declaradas dentro de definição de convenção sobre a diversidade biológica e da União Internacional para a conservação da natureza.

As centrais nucleares devem ser localizadas longe de áreas ecologicamente sensíveis para a minimização de possíveis impactes ambientais. O mapa da Figura 4.4 (A) representa a localização de todas as áreas protegidas portuguesas. Mas como já se referiu anteriormente, estas áreas terão que ser excluídas do processo de localização. O mapa apresentado na Figura

4.4 (B) tem por base o mapa já referido anteriormente em que as áreas protegidas foram apagadas no ArcMap através da função *Erase*. Este último mapa usado para a interceção final da pesquisa de um local.

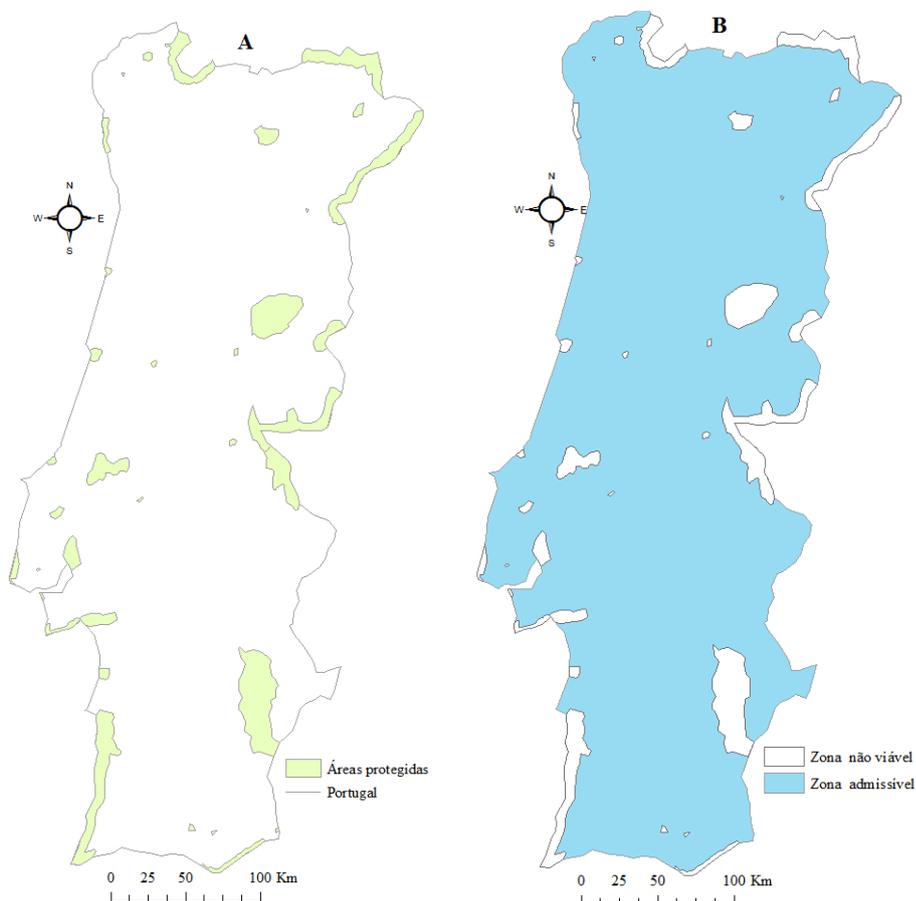


Figura 4.4 - Representação das Áreas Protegidas de Portugal Continental

4.1.5 Resultados da pesquisa de um local

Depois da introdução inicial dos dados como *shapefiles* no ArcMap, e da imposição de determinadas condições já justificadas, recorrendo à função *Intersect*, intercetamos as várias *shapefiles* para obter o resultado final da pesquisa de um local. Este resultado excluiu as áreas onde é inviável a construção de centrais nucleares.

O mapa da Figura 4.5 representa o resultado final da pesquisa de um local em que as áreas representadas são aquelas onde é viável a construção de uma central nuclear. Note-se que todas as áreas resultantes estão perto de uma linha de água (10km). As áreas protegidas que se

encontravam dentro do espaço de resultados possíveis, como era de esperar, não se encontram na solução final. Isto pode ser observado em várias zonas, destacando a zona Vale do Guadiana onde isto se verifica com facilidade. As zonas costeiras são eliminadas quase na sua totalidade, restando apenas algumas zonas no centro e norte do país, pois nessas zonas a população é menor ou igual a 25 mil habitantes. As zonas costeiras do Sul de Portugal são excluídas devido à restrição do risco sísmico não ser cumprida para estas zonas.

É sobre este mapa que será criada a matriz de decisão para a análise multicritério que será realizada na fase de seleção de um local.

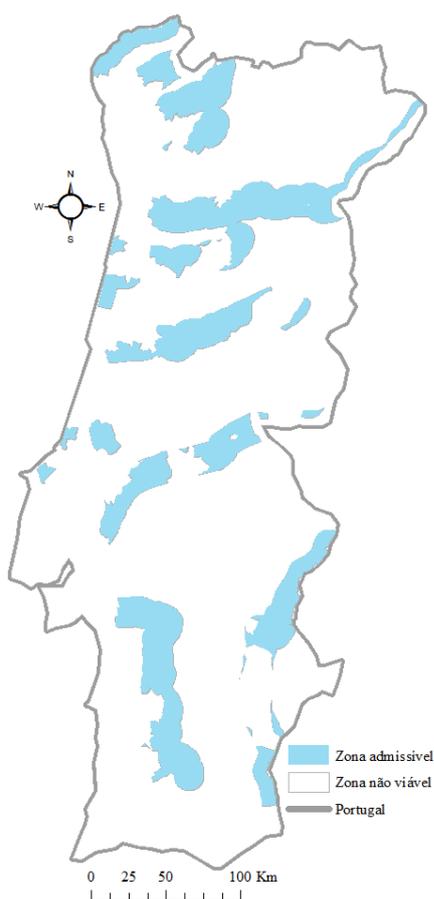


Figura 4.5 - Resultados da Pesquisa de um local

4.2 Seleção de um local

As áreas resultantes da pesquisa de um local terão que ser analisadas com mais pormenor. Serão aplicados alguns dos critérios de evasão e aptidão descritos nas secções 2.4.2 e 2.4.3 desta dissertação bem como alguns critérios de exclusão que, segundo AELB (2011), podem funcionar tanto como critérios de exclusão como de evasão.

Esta fase divide-se em 3 etapas: uma primeira em que são definidos os critérios a utilizar. Numa segunda fase, esses critérios são articulados com uma técnica de análise multicritério e uma etapa final em que são unificados entre si e posteriormente com a *shapefile* resultante da pesquisa de um local.

4.2.1 Proximidade à rede elétrica

A rede nacional de transporte de eletricidade portuguesa é constituída por diferentes troços com diferentes capacidades de transporte de energia elétrica. Tendo em conta que uma central nuclear produz uma quantidade enorme de energia e não querendo sobrecarregar a rede, decidimos seleccionar aquelas com maior capacidade. Dado isto, fizemos um *select by attribute* à rede, seleccionando as redes com 400kv de tensão.

A rede portuguesa de transporte de eletricidade está interligada com a rede espanhola em diversos pontos. Tanto o Douro internacional como o Tejo internacional existe uma linha de alta tensão. Esta linha terá capacidade de transportar energia elétrica que os consumidores espanhóis poderão comprar ao nosso país.

De seguida realizamos três *buffers*: um a 5km da rede, outro com 10km da rede e, por fim, um a 20km da rede. Devido ao facto de na literatura não se especificarem valores para a distância entre a rede elétrica e a central nuclear, entendemos que as distâncias mencionadas são adequadas em termos de variação de custos para a ligação. A cada *shapefile* representativa dos diferentes *buffers*, foi adicionado, na tabela de atributos os valores dos atributos padronizados.

Padronização dos atributos

Para a padronização dos atributos foi usado o método da razão das diferenças aplicando a equação (3.3). Entenda-se que quanto mais perto a central nuclear estiver da rede elétrica, melhor. Para a aplicação da fórmula matemática já referida, foi necessário saber os valores de x_{ij} que teriam de ser atribuídos a cada *buffer*. Esses valores foram calculados através das

médias das distâncias entre os *buffers*. Entre 0-5 km a média será de 2.5 km. Entre 5-10 km a média será de 7.5km. Entre 10-20 km a média será de 15km. Para a situação de mais de 20 km atribuímos uma média de 30km. Aplicando a equação (3.3) para um exemplo, neste caso o *buffer* entre 5-10km obtivemos:

$$R = \frac{30 - 7.5}{30 - 2.5} = 0.82$$

O processo é realizado para as restantes médias e os valores obtidos serão adicionados à tabela de atributos que representa cada *buffer*. Por fim, recorrendo à função *Update* unimos as diferentes *shapefiles* dos diferentes *buffers* obtendo o resultado final para este critério que se encontra na Figura 4.6. Como se pode verificar na Figura o maior valor foi atribuído ao *buffer* que se encontra mais próximo de uma linha elétrica, e os seus valores vão baixando tendo em conta a distância à rede elétrica. Os valores representados neste mapa correspondem aos valores padronizados previamente.

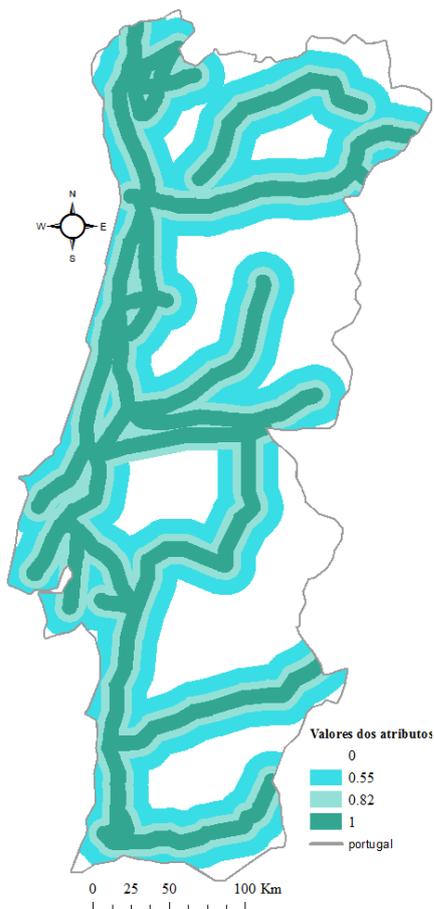


Figura 4.6 Representação dos valores dos atributos para a proximidade a uma rede elétrica

4.2.2 Proximidade a uma linha de água

A água é fundamental para o funcionamento de uma central nuclear. Uma central nuclear é sempre localizada perto de uma linha de água, sendo esta um lago, rio ou o oceano. Como já foi referido anteriormente, Portugal é constituído uma por imensa orla costeira e por um grande conjunto de rios.

Para determinar a proximidade a uma linha de água, em que a linha de água pode ser um rio ou o oceano, à *shapefile* já usada na pesquisa de um local, foram realizados 3 *buffers*: um a 2 km, outro a 5km e por fim um a 10km. À tabela de atributos de cada *buffer* foi adicionada uma nova coluna com o objetivo de serem lá colocados os valores padronizados para os atributos. O processo de padronização dos atributos é análogo ao que foi realizado para a proximidade a uma rede elétrica (seção 4.2.1 desta dissertação). Numa primeira instância foram calculadas as médias das distâncias para que conseguíssemos obter os valores para x_{ij} e de seguida foi aplicada a equação (3.3), obtendo assim os valores padronizados para os atributos. Numa segunda fase foi aplicada a função *Update* entre os vários *buffers* resultando a Figura 4.7. Como se pode verificar os valores mais altos para os atributos são aqueles que se encontram mais próximos de uma linha de água baixando consoante a distância à linha de água.

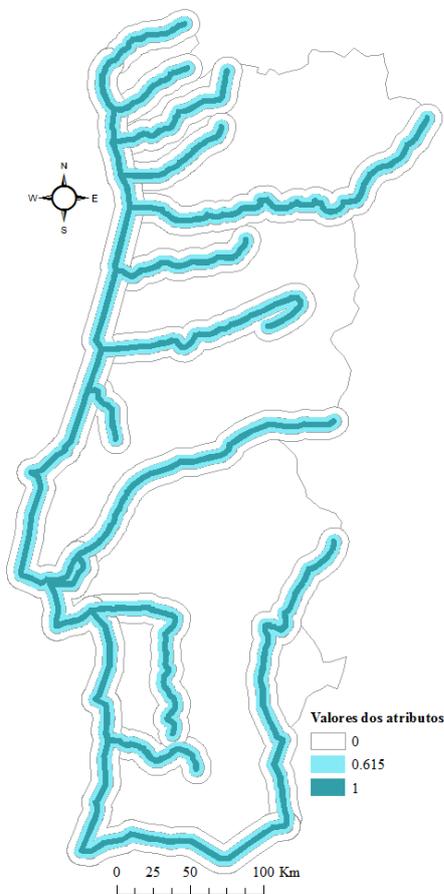


Figura 4.7 - Representação dos valores dos atributos para a proximidade a uma linha de água

4.2.3 Densidades populacionais

As centrais nucleares devem ser localizadas longe de centros densamente povoados. Áreas de baixa densidade populacional são geralmente as escolhidas. Se a densidade populacional de um local proposto, excede as 200 pessoas por km² terá de ser escolhido outro local em que as densidades populacionais sejam mais baixas (ALEB, 2011).

A *shapefile* usada foi a que resultou da análise à população da pesquisa de um local. Na tabela de atributos correspondente são-nos fornecidos os valores para das áreas de cada município bem como as habitantes dos mesmos. Aplicando a equação (4.1), determinamos as densidades populacionais para cada município.

$$Densidade = \frac{População (hab)}{Área (km^2)} \quad (4.1)$$

Seguidamente foi realizado um *select by attribute* impondo que as densidades populacionais não poderiam exceder os 200 habitantes/km². Neste caso, nenhuma das densidades populacionais excede esse valor.

Padronização dos atributos

Para a padronização dos atributos foi usado o método da razão das diferenças aplicando a equação (3.3). Entenda-se que o valor padronizado será maior para os casos em que as densidades populacionais são mais baixas. Através de uma análise aos valores das densidades populacionais foram demarcados todos os valores para x_{ij} . De seguida foi aplicada a equação (3.3) para todas as densidades populacionais, adicionando os valores obtidos a uma nova coluna na tabela de atributos.

O mapa apresentado na Figura 4.8 indica os diferentes valores padronizados para as diferentes densidades populacionais. As cores mais escuras correspondem aos maiores pesos o que significa que estes serão os locais com as menores densidades populacionais.

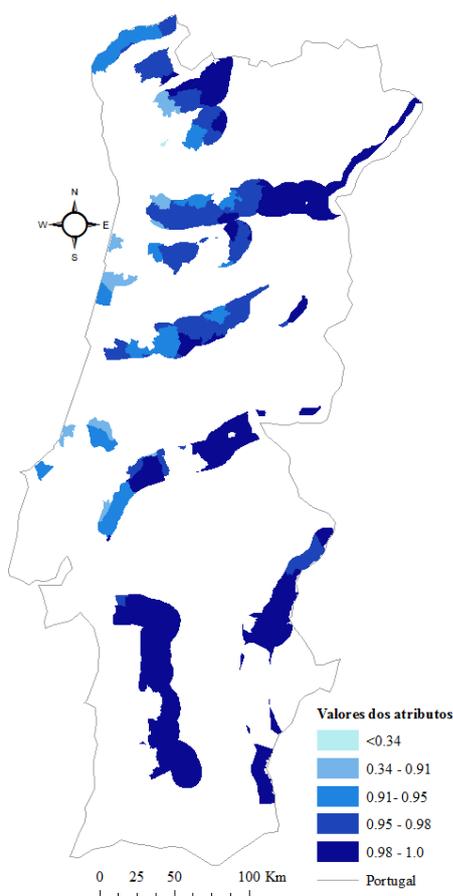


Figura 4.8 - Representação da padronização das densidades populacionais

4.2.4 Fronteiras internacionais

É possível a construção de uma central nuclear junto de fronteiras internacionais preferencialmente a uma distância de 50 km (valor sugerido por Basri & Ramli, 2012). Deste modo, elaboramos um mapa de Portugal Continental em que fizemos um *buffer* com 50 km em volta de todas as fronteiras internacionais portuguesas.

Na Figura 4.9 estão representados os valores padronizados para as fronteiras internacionais. Ao *buffer* de 50 km foi atribuído o menor valor, ou seja, o valor de 0, enquanto ao resto do território português foi-lhe atribuído o valor de 1. Isto deve-se ao facto da situação mais desfavorável para a construção da central, neste caso, ser aquela que se encontra dentro dos 50 km da fronteira.

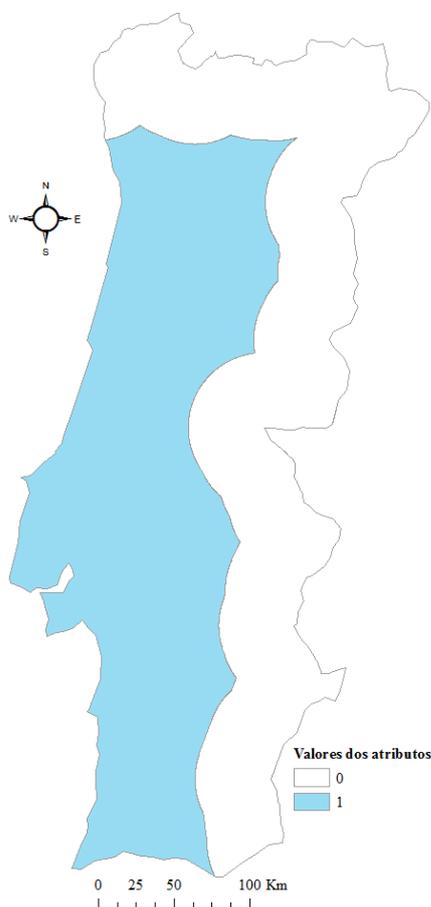


Figura 4.9 Representação da padronização dos atributos para as fronteiras internacionais

4.2.5 Suscetibilidade a cheias e inundações

As centrais nucleares exigem grandes quantidades de água para fins de arrefecimento e são, portanto, convenientemente localizadas em zonas costeiras ou em locais do interior perto de um reservatório de água ou um rio. É, portanto, imperativo que seja avaliada a segurança da central nuclear contra as inundações (Sourav et al, 2005).

A fase inicial passa por uma análise de mapas topográficos e uma delimitação as zonas que serão propensas a cheias. (AELB, 2011). Segundo a Autoridade Nacional de Proteção Civil (2014), em Portugal Continental as regiões com maior suscetibilidade à ocorrência de cheias são as zonas dos vales dos rios Sado, Tejo (Lezíria do Ribatejo), Mondego, o estuário do Vouga (Ria de Aveiro) e a foz do Rio Douro. Isto pode ser verificado na Figura 4.10. Na mesma Figura também podem ser observados os valores padronizados para os atributos. Segundo IAEA (1984), as áreas sujeitas a altos níveis de inundação são rejeitadas. Devido a isto decidimos outorgar o valor 0 para as zonas onde a suscetibilidade é elevada e para o resto do país será de 1.

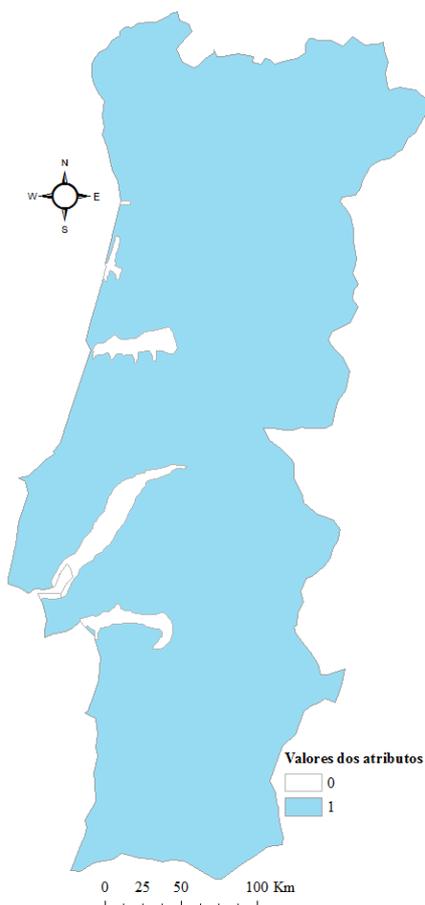


Figura 4.10 - Representação da padronização dos atributos da suscetibilidade a cheias

4.2.6 Suscetibilidade a *tsunamis*

Os tsunamis podem provocar grandes estragos quando atingem as zonas costeiras dependendo da intensidade com que alcancem a costa, sendo que em Portugal Continental é mais provável que atinjam a costa Sul e Sudoeste dada a atividade sísmica associada (Autoridade Nacional de Proteção Civil, 2014). Estes factos podem ser verificados na Figura 4.11. Às zonas em que a suscetibilidade de ocorrência de *tsunamis* é elevada foi atribuído o valor de 0 aos seus atributos, enquanto ao resto do país foi atribuído o valor 1. Estes valores podem ser observados na mesma Figura.

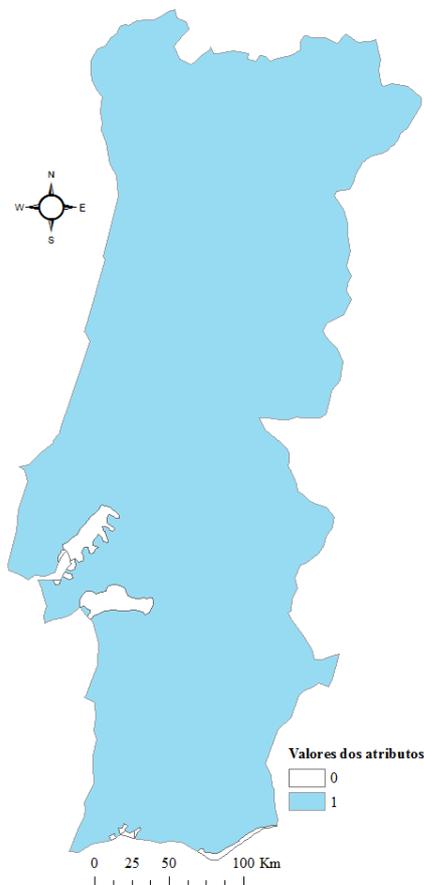


Figura 4.11 - Representação dos pesos dos atributos da suscetibilidade a *tsunamis*

4.3 Resultados da seleção de um local

Os mapas de critérios de evasão são unificados entre si e posteriormente são unidos com o mapa resultante da pesquisa de um local através da função *Update*. A tabela de atributos resultante desta fase corresponde à matriz decisão.

Em seguida, foram definidos os pesos dados aos critérios de decisão através do método da pontuação. A distribuição dos valores dos pesos pelos vários critérios foi dada tendo em conta a percepção da sua importância para o processo de localização por parte do autor desta dissertação. Aplicando a equação (3.1), obtivemos o mapa de aptidão com o *ranking* das diferentes alternativas.

Para que se possa entender a forma como os pesos dos critérios influenciam a aptidão de um local para albergar a central nuclear, foi realizada uma análise de sensibilidade atribuindo três séries de pesos diferentes para os vários critérios, como se pode visualizar na Tabela 4.1. O Caso 1 e Caso 2 apresentam pesos maiores para alguns critérios em particular enquanto no Caso 3 os pesos são distribuídos por todos os critérios de uma forma mais equilibrada.

Os resultados para cada caso, bem como as justificações dos pesos dados são descritos em seguida.

Tabela 4.1 - Pesos atribuídos para os diferentes critérios

	Caso1	Caso2	Caso3
Densidades populacionais	35	10	20
Fronteiras internacionais	25	10	15
Suscetibilidade a tsunamis	10	10	15
Suscetibilidades a inundações	10	10	15
Proximidade a uma linha de água	10	35	20
Proximidade a uma rede elétrica	10	25	15
Total	100	100	100

4.3.1 Caso 1

Do conjunto de critérios usados para a seleção do local, foi assumido, para este caso, que as densidades populacionais seria o critério mais importante. Reconhece-se que quando se fala de um projeto de energia nuclear, a primeira tendência é pensar em desastres nucleares. De forma a aumentar a aceitação e a confiança pública e diminuir a complexidade do planeamento de emergência, foi-lhe atribuído 35 pontos dos 100 possíveis. Entende-se que a localização de uma central nuclear perto de uma fronteira internacional possa trazer problemas políticos aos países com intenção de construção de uma central nuclear. Devido a este facto, foi-lhe atribuído 25 pontos dos 100 possíveis. Aos restantes critérios foi outorgado, a cada um, o valor de 10 pontos em 100 possíveis para que se entendesse como é que os dois critérios com maior peso iriam influenciar os resultados das alternativas. A atribuição dos valores para esta série de pesos foi baseada na perceção de importância para o processo de localização por parte do autor desta dissertação, no entanto poderiam ter sido atribuídos outros exemplos, desse modo são atribuídas mais duas séries de pesos aos critérios (Caso 2 e Caso 3). Os valores dos critérios para as 3 diferentes séries são apresentados na tabela 4.1.

Na Figura 4.12 encontra-se o mapa de aptidão, com o ranking das diferentes alternativas. Os critérios das densidades populacionais e das fronteiras internacionais foram aqueles em que foi atribuído o maior peso. Sendo assim, seria de esperar que as melhores alternativas se localizassem em zonas com densidades populacionais baixas e para além dos 50 km às fronteiras internacionais, como pode ser verificado no mapa.

Visualizando o mapa percebe-se que as melhores soluções se encontram em determinadas zonas do Vale do Douro, Vale do Sado, Vale do Lis e do Mondego, Vale do Vouga e nas zonas costeiras do Norte e Centro, pois nestas zonas, os valores dos atributos para todos os critérios com mais peso atribuído, apresentam valores máximos. Podemos também verificar, que as alternativas que se situam dentro dos 50 km de distância às fronteiras internacionais são aquelas que apresentam os piores resultados. Dentro do ArcMap é possível saber que a melhor solução obteve um valor de aptidão 99.92 e se situa na zona do vale do Sado.

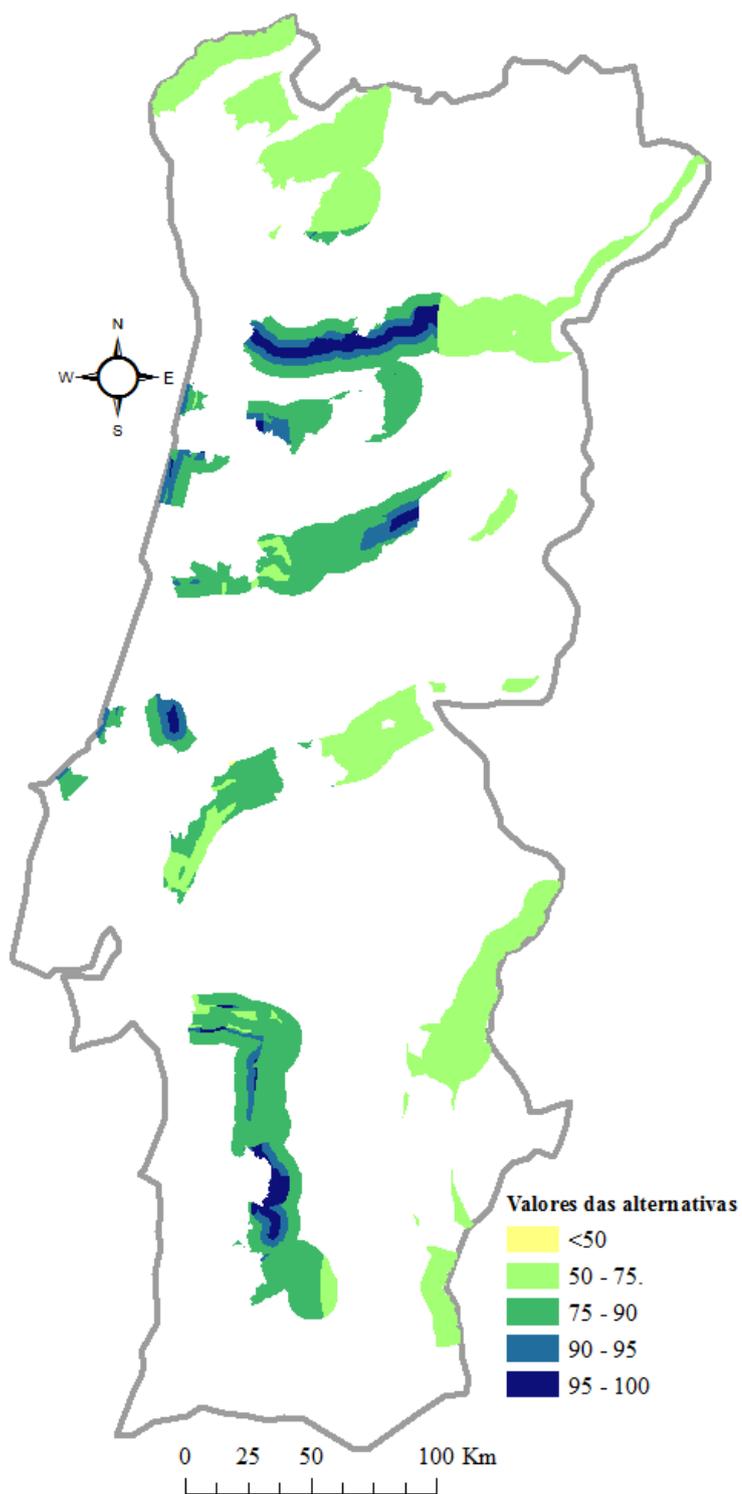


Figura 4.12 - Valores das alternativas para o Caso 1

4.3.2 Caso 2

Para este caso foram atribuídos os seguintes pesos aos critérios: densidades populacionais 10 pontos, fronteiras internacionais 10 pontos, suscetibilidade a *tsunamis* 10 pontos, suscetibilidade a cheias 10 pontos, proximidade a uma linha de água 35 pontos e proximidade a uma rede elétrica principal 25 pontos, como referido na tabela 4.1.

Tendo em conta esta nova série de pesos, será de esperar que as alternativas que se situem nas zonas caracterizadas pelos maiores valores dos atributos da proximidade a uma linha de água e da proximidade a uma rede elétrica principal sejam as melhores soluções. Recorrendo à Figura 4.13 podemos verificar que isso realmente ocorre. Observando-se no vale Oeste do Douro, na parte superior, correspondente à margem direita, os resultados das alternativas são melhores do que os da parte inferior. Isto é devido ao facto da alternativa da parte superior se situar na zona em que o valor do atributo para a proximidade a uma rede elétrica principal é máximo, enquanto na parte inferior esse valor é mínimo. De uma forma geral as alternativas que estão contidas nos 50 km da fronteira são aquelas que apresentam as piores soluções. Isto é devido ao facto de nestas zonas os valores para os atributos dos critérios com mais peso (proximidade a uma linha de água e proximidade a uma linha elétrica) apresentarem valores mínimos.

Após a visualização do mapa percebe-se que as melhores soluções se encontram no Vale do Douro, Vale do Sado, Vale do Lis e do Mondego, Vale do Vouga e nas zonas costeiras do Norte e Centro, pois nestas zonas, os valores dos atributos para todos os critérios com mais peso atribuído, apresentam valores máximos. Neste caso, a melhor alternativa obteve o valor de 99.98 e localiza-se novamente no Vale do Sado.

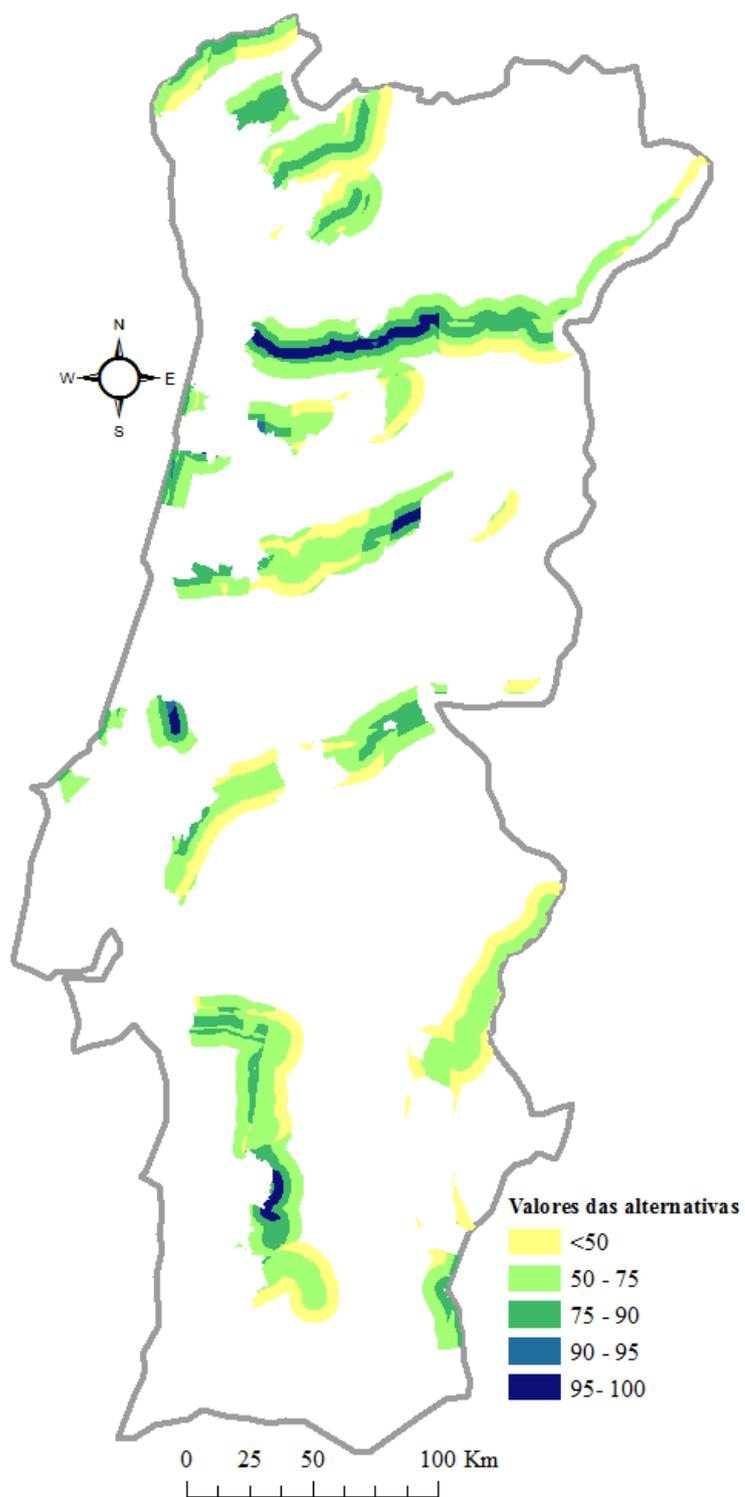


Figura 4.13 - Valores das alternativas para o Caso 2

4.3.3 Caso 3

Neste caso foram atribuídos os seguintes pesos: densidades populacionais 20 pontos, fronteiras internacionais 15 pontos, suscetibilidade a *tsunamis* 15 pontos, suscetibilidade a cheias 15 pontos, proximidade a uma linha de água 20 pontos e proximidade a uma rede elétrica principal 15 pontos, como pode ser verificado na tabela 4.1.

Tendo em conta esta nova série de valores, como os critérios que tem mais peso são o da proximidade a uma linha de água e as densidades populacionais, será de esperar que as zonas caracterizadas pelos altos valores dos atributos desses critérios, apresentem as melhores soluções. Na Figura 4.14 isso pode ser verificado ao longo do vale do Douro, parte Vale do Sado, parte do vale do Mondego parte do Vale do Lis e parte do vale do Lima. Estes locais têm em comum o facto de serem os mais próximos de uma linha de água e com densidades populacionais baixas. O mesmo já não acontece no vale do Guadiana, apesar de esta zona apresentar valores máximos no que respeita ao atributo proximidade a uma linha de água e densidades populacionais, situa-se numa zona que está distanciada de uma rede elétrica e é caracterizada pela proximidade a uma fronteira internacional.

Visualizando o mapa percebe-se que as melhores soluções se encontram em determinadas zonas do Vale do Douro, Vale do Sado, Vale do Lis e do Mondego, Vale do Vouga e nas zonas costeiras do Norte e Centro, pois nestas zonas, os valores dos atributos para todos os critérios com mais peso atribuído, apresentam valores máximos. Neste caso, uma vez mais, pode ser verificado que a melhor alternativa se situa no Vale do Sado e obteve um valor de 99.96.

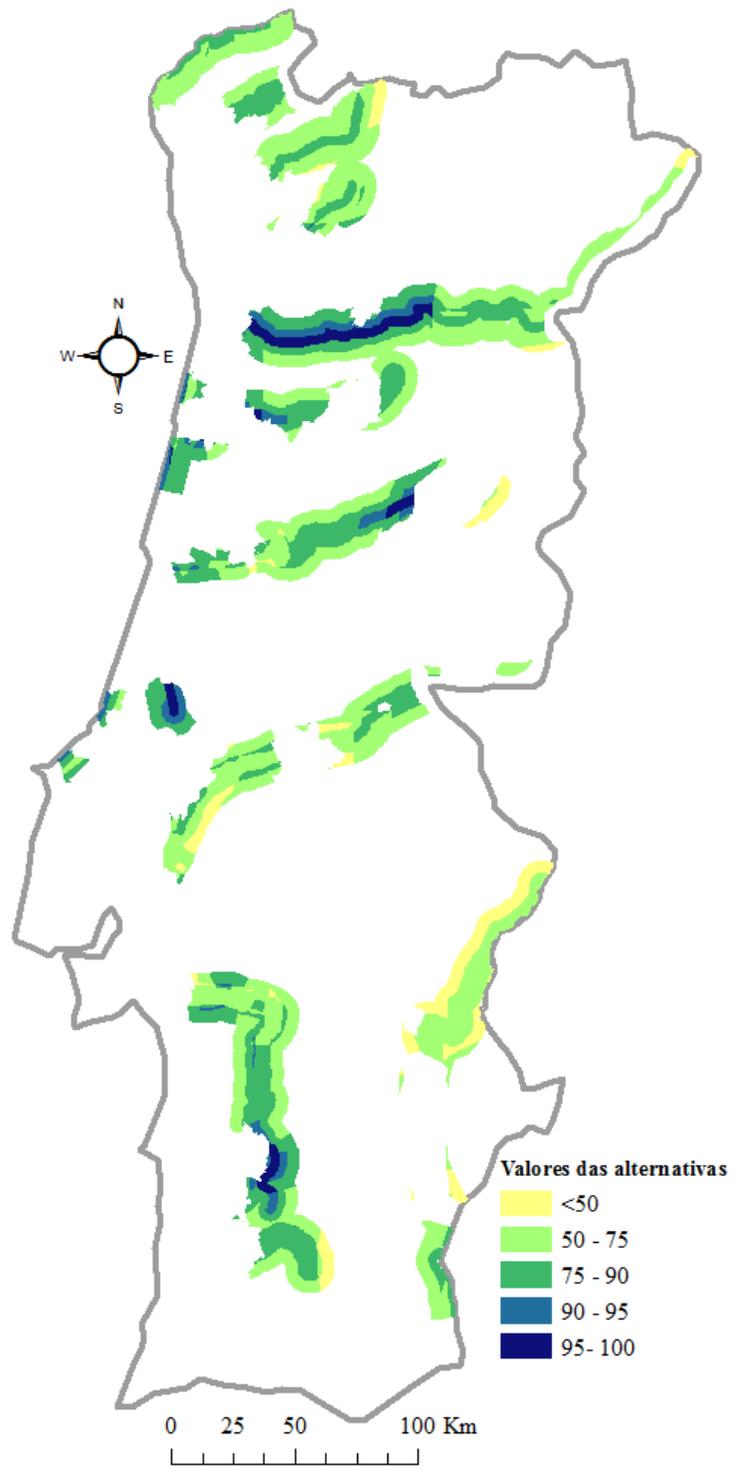


Figura 4.14 - Valores das alternativas para o Caso 3

4.3.4 Discussão dos resultados

No Caso 1 é possível verificar que as piores alternativas se localizam nas zonas em que os valores dos atributos para as fronteiras internacionais são mais baixos. No Caso 2, de uma forma geral, as zonas contidas nos 50 km da fronteira, também são aquelas em que os resultados das alternativas são piores. Apesar disso, no Sudeste do Vale do Guadiana e numa parte do Vale do Minho, algumas zonas apresentam valores para as alternativas muito próximos dos máximos, isto deve-se aos altos valores dos atributos para os critérios proximidade a uma linha de água e proximidade a uma rede elétrica principal. No Caso 2 as piores alternativas apresentam valores mais baixos que as do Caso 1, no entanto é possível verificar que as melhores alternativas se situam nas mesmas zonas tanto num caso como noutro.

Visualizando os resultados do Caso 2 e do Caso 3 podemos verificar que o critério da distância a uma linha de água foi um dos critérios com mais peso nos dois casos pois as zonas mais próximas a uma linha de água são aquelas que apresentam as melhores soluções em ambos os casos. Verifica-se também, no Caso 2, que as zonas mais afastadas às linhas de água são aquelas que apresentam os piores resultados. No entanto no Caso 3 isso já não acontece, pois as zonas que apresentam os piores resultados são aquelas em que os critérios das densidades populacionais, da proximidade a uma linha de água e da proximidade a uma rede elétrica apresentam os valores mais baixos para os seus atributos. Isto pode ser verificado fazendo uma comparação entre a zona mais afastada da linha de água no Vale do Cávado do Caso 2 com a do Caso 3, uma vez que esta é uma boa solução para o Caso 3 e uma má solução para o Caso 2.

Comparando o Caso 1 com o Caso 3 volta a ser possível verificar que a proximidade a uma linha de água é um dos critérios com maior peso no Caso 3. Note-se a zona do Guadiana em que para o Caso 1, devido ao facto de esta se situar dentro dos 50 km de distância à fronteira, apresenta um mau resultado em toda a sua extensão. No entanto no Caso 3, apenas a zona mais distante da linha de água é que apresenta o pior valor.

5 CONCLUSÃO

No momento atual em que o mundo se encontra, reduzir as emissões de gases com efeito de estufa é imperativo. O sector com mais peso nestas emissões é o sector da produção energética e agregar a energia nuclear a um sistema energético pode desempenhar um papel fundamental nessa redução. Existem vantagens mas também possíveis malefícios devidos à produção de energia através de centrais nucleares. No entanto, a maioria dessas desvantagens podem ser precavidadas através de um planeamento adequado da localização das centrais nucleares.

A seleção do melhor local para albergar a central nuclear é a primeira fase do tempo de vida do projeto. Esta fase envolve o estudo dos locais alternativos através de critérios de avaliação conflitantes e incomensuráveis, e os juízos de valor dos decisores que estão envolvidos no processo de decisão.

A ADME pode ser definida como o processo que incorpora os juízos de valor dos decisores numa ferramenta SIG, transformando dados espaciais numa decisão. A ADME na localização de centrais nucleares tem dois focos principais: a pesquisa de um local e a seleção de um local. A fase de pesquisa de um local envolve a investigação de regiões ou de locais potenciais e a rejeição de outros que não são adequados. A análise das áreas é realizada através do uso de critérios de exclusão que são usados para eliminar as zonas onde não é viável a construção de uma central nuclear, diminuindo de forma significativa os locais que necessitam de uma investigação mais minuciosa. Na fase de seleção de um local, aos resultados obtidos na fase anterior da ADME, são aplicados critérios (evasão e aptidão) mais refinados para que se encontrar os locais mais adequados. Para que se possa demonstrar a aplicabilidade da ADME, esta foi aplicada a um estudo de caso, Portugal Continental.

Na fase de pesquisa de um local foram usados os seguintes critérios: proximidade a uma linha de água, risco sísmico, população e áreas ecologicamente sensíveis. Nesta fase todos os critérios foram cumpridos simultaneamente e os resultados obtidos demonstram esse facto. Todas as áreas resultantes encontram-se perto de uma linha de água, e fora de áreas ecológicas sensíveis, tendo sido eliminadas as zonas em que a população excede o valor limite e as zonas em que o risco sísmico é superior a um certo nível. Sobre o mapa resultante desta

fase foi criada a matriz de decisão usada na análise multicritério realizada na fase de seleção de um local.

A fase de seleção de um local dividiu-se em três etapas: inicialmente foram definidos os critérios a utilizar. Numa segunda fase, esses critérios foram articulados com uma técnica de análise multicritério. Por fim em que foram unificados entre si e com a *shapefile* resultante da pesquisa de um local. Nesta fase os critérios utilizados foram: proximidade à rede elétrica, proximidade a uma linha de água, densidades populacionais, fronteiras internacionais, suscetibilidade a cheias e suscetibilidade a *tsunamis*. Devido ao facto dos critérios usados nesta fase terem que ser ponderados tendo em conta a perceção da sua importância por parte dos decisores, foi usado WLC como método de análise multicritério. Dado que esses critérios se referem a diferentes gamas de valores com diferentes significados, foi efetuada uma normalização dos seus atributos através do método da razão das diferenças. Para que se pudesse entender a forma como os pesos dos critérios influenciam a aptidão de um local para albergar a central nuclear, foi realizada uma análise de sensibilidade atribuindo três séries de pesos para os diferentes, resultando em três casos: Caso 1, Caso 2 e Caso 3.

No Caso 1, as densidades populacionais e as fronteiras internacionais foram os critérios aos quais foram atribuídos os maiores pesos. Podemos verificar que as alternativas com melhores resultados se situam no Vale do Douro, no Vale do Sado no Vale do Lis e Vale do Vouga ou seja, nas zonas em que os atributos tanto para as densidades populacionais como para as fronteiras internacionais apresentavam os maiores valores. Verificamos também que a alternativa com o melhor resultado se situava no Vale do Sado.

No Caso 2, foram atribuídos diferentes pesos dos aplicados no caso 1. Neste caso, a proximidade à rede elétrica e a proximidade a uma linha de água são aqueles critérios aos quais foram atribuídos os maiores valores. Podemos verificar que as melhores soluções se verificavam nas zonas em que os valores para os atributos tanto da proximidade a uma linha de água como da proximidade a uma linha elétrica eram máximos. Verificamos que melhor alternativa se volta a localizar no Vale do Sado.

No Caso 3, foi atribuída uma nova série de pesos aos critérios. Neste caso, a proximidade a uma linha de água e as densidades populacionais são os critérios com maior peso. Podemos verificar, que de uma forma geral, as alternativas com o melhor resultado são aquelas que, simultaneamente tem o maior valor para os atributos da proximidade a uma linha de água e densidades populacionais. À exceção da zona vale do Guadiana pois apesar de esta zona

apresentar valor máximo para os dois critérios mencionados anteriormente situa-se numa zona caracterizada pela proximidade à fronteira internacional e também derivado do facto do valor do atributo correspondente à rede elétrica ser baixo. Voltamos a verificar que melhor alternativa se volta a localizar no Vale do Sado.

Através da análise de sensibilidade aos três mapas obtidos podemos concluir que independentemente dos pesos dados aos critérios, as melhores soluções não variam as suas localizações. Localizando-se nos três casos no Vale do Douro, no Vale do Sado e na zona costeira do norte e centro. Concluímos, também que a melhor alternativa se situa sempre no Vale do Sado. Isto deve-se ao facto, de nestas áreas, os valores dos atributos para todos critérios apresentarem valores máximos.

Note-se que um estudo que havia sido realizado na década de 70 para a implementação de uma central nuclear em Portugal Continental havia dado como resultado para a construção de uma central nuclear a localidade de Ferrel, perto de Peniche. Com aplicação da metodologia assente nesta dissertação, podemos verificar que Ferrel é uma das alternativas que aparece com um bom resultado nos três casos apresentados.

No decorrer deste estudo foram encontradas algumas limitações. A informação acerca da localização de centrais é escassa e muitas vezes parte dessa informação entrou em desuso. Notou-se também a falta de dados relativos a critérios de avaliação em formatos compatíveis com os SIG.

Em trabalhos futuros, poderá ser aplicado um método de análise de decisão multicritério mais especializado, usando outras abordagens para a definição dos pesos dos diferentes critérios bem como outro método para normalização dos atributos. No estudo de caso utilizado não foram considerados alguns potenciais critérios devido à falta de dados disponíveis e ao grau de detalhe proposto para este tipo de estudo académico. No entanto, a metodologia descrita nesta dissertação pode facilmente fazer uso de mais critérios, quer na fase de pesquisa de local como na fase de seleção de local. Além disso, uma fase posterior ao estudo de caso realizado poderia consistir num estudo mais pormenorizado às alternativas obtidas, para que se definissem de forma mais detalhada as melhores soluções.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abudeif, A., Abdul, A. & Farrag, A.(2015), Multicriteria decision analysis based in analytic hierarchy process in GIS environment for siting nuclear power plant in Egypt. *Annals of energy*, 75, 682-692.
- AELB - Atomic Energy Licensing Board (2011), *Guideline for site selection for nuclear power plant*.
- Ahearne, J. (2011), *Prospects for nuclear energy*. *Energy Economics*, 33, 573-580.
- Alonso, A. (2012), *Site selection and evaluation for nuclear power plants (NPPs)*, Woodhead Publishing Limited, 18, 599-620.
- APA - Agência Portuguesa do Ambiente - <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=81&sub2ref=119&sub3ref=500> visitado em 04/04/2015.
- Autoridade Nacional de Proteção Civil. (2014), *Avaliação Nacional de Risco*.
- Barredo, J. & Delgado, M. (2005), *Sistemas de información Geográfica y evaluación multicritério en la ordenación del território*. Editorial Madrid.
- Basri, N & Ramli, A. (2012), *Selection of a possible candidate area for nuclear power plant in Johor, Malaysia*. *Journal of nuclear and related technologies*.
- Bogetoft, P. & Pruzan, P. (1997), *Planning with multiple criteria: investigation, communication and choice*. Copenhagen Business School Press.
- Bosque-Sendra, & j. Gómez-Delgado, M. (2000), *Hacia un sistema de ayuda a la decisión espacial para la localización de equipamentos*. *Estudios Geográficos* ,567-598.
- Carver, S. (1991), *Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems*. *International Journal of Geographical Information systems*, 5, 321-339.
- Chen, Y, Yu, J & Khan, S. (2010), *Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation*. *Environmental Modelling & Software*, 25, 1582-1591.
- Clark, D.E., Michelbrink, L., Allison, T., Metz, W.C. (1997). *Nuclear power plants and residential housing prices*. *Growth and change*. 28, 496-519.
- ESRI - <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/map/working-with-layers/using-select-by-attributes.htm> , visitado em 14/04/2016.

- ESRI - <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/analysis/update.htm>, visitado em 14/04/2016.
- ESRI - <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/analysis-toolbox/buffer.htm>, visitado em 14/04/2016.
- EU - European Union (2007), The sustainable nuclear energy platform, a vision report. European Commission, Bruxelas.
- Foote & Lynch - http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/intro/intro_f.html, visitado em 19/03/2015.
- Hermann, B., Kroeze, C. & Jawjit, W. (2007), Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performance indicators. 15, 1787–1796.
- Hobbs, B., Horn, G. (1997), Building public confidence in energy planning: a multimethod MCDM approach to demand-side planning at BC gas. *Energy policy*, 25, 357-375.
- Hobbs, B. & Meier, P. (1994), Multicriteria methods for resource planning: an experimental comparison. *IEEE Transactions on power Systems*, 9, 1811-1817.
- Hong, S., Bradshaw, C.J.A. & Brook, B. (2014), South Korean energy scenarios show how nuclear power can reduce future energy and environmental costs. *Energy policy*, 74, 569-578.
- Hubbert, M. (1956). Nuclear energy and the fossil fuel. 56, Houston, Texas.
- IAEA - International Atomic Energy Agency <https://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx> , visitado em 11/03/2015.
- IAEA - international Atomic Energy Agency . (2015). Site survey and site selection for nuclear installations. IAEA, Specific Safety Guide No SSG-35 Viena, Austria.
- IAEA - International Atomic Energy Agency. (1984) Site survey for nuclear power plants. IAEA, Safety Guides No50-SG-S9, Viena, Austria.
- IAEA - International Atomic Energy Agency. (2003a) Site evolution for nuclear installations. IAEA, Viena, Austria.
- IAEA - International Atomic Energy Agency. (2003b) Site evaluation for nuclear installations safety, Safety requirements, Safety standards series, IAEA, Viena, Austria.
- IAEA - International Atomic Energy Agency (2003c) Floods and hazards for nuclear power plants on coastal and river sites. Safety guide. IAEA, Viena, Austria.
- IAEA - International Atomic energy Agency. (2007) Milestones in the development of a national infrastructure for nuclear power plant. IAEA, Viena, Austria.
- IAEA - International Atomic energy Agency. (2012) Managing Siting activities for nuclear power plants. IAEA, Viena, Austria.

- INE - Instituto Nacional de Estatística - http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSO_S&xpgid=censos2011_apresentacao, visitado em 22/04/2015.
- INE - Instituto Nacional de Estatística- <http://mapas.ine.pt/download/index2011.phtml>, visitado em 09/03/2016.
- Keeney, R. & Raiffa, H. (1993), *Decisions with Multiple Objectives – Preferences and Value Tradeoffs*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Latinopoulos, D., Kechagia, K. (2015), A Gis-Based multi-criteria evaluation for wind farm site selection. A regional scale application in Greece. *Renewable Energy*, 78, 550-560.
- Loken, E. (2007), Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 11, 1584-1595.
- Macintosh, A. (2007). *Siting Nuclear Power Plants in Australia Where would they go?.* Australia Institute for a just sustainable, peaceful future.
- Malczewski J. (1999), *GIS and Multicriteria decision analysis*. New York: J. Wiley & Sons.
- Malczewski, J. (2004). GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning*, 62, 3–65.
- Malczewski, J. (2006), GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20, 703-726.
- Martins, V. (2009) *Metodologia baseada em sistema de informação geográfica e análise multicritério para a seleção de áreas para a construção de um repositório para combustível nuclear usado*. Tese de doutoramento. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto Luiz Coimbra de pós graduação e pesquisa.
- Martins, V., Cunha, T., Filho, F. & Lapa, C. (2011), Site selection process for new nuclear power plants - A method to support decision making and public participation – 2011 International Nuclear Atlantic Conference- INAC 2011.
- McHarg, I. (1969), *Design with nature*. Wiley, New York.
- ONU. (2014) *The United Nations World Water Development Report 2014. Water and Energy*, 1.
- Rhodes, R. & Beller, D. (2000), The need for nuclear power. *Foreign Affairs*, 79, nº.1, Washington, United States.
- Ribeiro, F., Ferreira, P., Araújo, M. (2013), Evaluating future scenarios for the power generation sector using a Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) tool: The Portuguese case, *Energy*, 52, 126-136.
- Rizzo, P., Dubinsky, M., et al. (2015), Site selection for nuclear power plants. 2015 International Nuclear Atlantic Conference- INAC2015.

- Rodrigues, J.M.C. (2007), Gestão de empreendimentos a componentes de gestão da engenharia. Ediliber, Coimbra Portugal.
- Rodrigues, J.N. & Azevedo, V. (2006), Nuclear o debate sobre o novo modelo energético em Portugal. Centro Atlântico, Vila Nova de Famalicão, Portugal.
- Samseth, J. Will the introduction of renewable energy in Europe lead to CO2 reduction without nuclear energy?. *Environmental Development*, 6, 130-132.
- Sánchez-Lozano, J., Teruel-Solano, J., Terruel-Solano, j., Soto-Elvira, P. & Garcia-Cascales, M. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain, *Renewable and sustainable energy reviews*, 544-556.
- Sourav, A., Shylamoni, P. & Rashan,D. (2005), Monograph on Siting of Nuclear Power Plant. Atomic Agency Regulatory Board, India.
- Vucijak, B., Kurtagic, S. & Silajdzic, I. (2015), Multicriteria decision making in selecting best solid waste management scenario: a municipal case study from Bosnia and Herzegovina. *Journal of cleaner production* XXX, 1-9.
- WNA - World Nuclear Association <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Nuclear-Power-Reactors/>, visitado em 29/03/2015.
- Zhang, Y., Li, A. & Fung, T. (2012), Using GIS and Multi-Criteria decision Analysis for conflict resolution in land use planning. *Procedia Environmental Sciences* 13, 2264-2273.