



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA CIÊNCIAS DA TERRA E DA VIDA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Definição de reservatórios geológicos para
armazenamento de energia em ar comprimido e
sinergias com produção de energia

Luis Eliseu Cavaco

Orientação: Professor Júlio Carneiro

Mestrado em Energia e Ambiente

Dissertação

Évora, 2013

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao professor orientador Júlio Carneiro por toda a disponibilidade mostrada, ao João Carvalho pela disponibilização de dados geofísicos da sub-bacia de Arruda, bem como à comunidade do Quantum GIS que criou, mantém e atualiza um *software* de uso livre e ajuda a resolver todas as dificuldades que vão surgindo. Essa comunidade ganhou mais um membro.

Resumo

O interesse pelo armazenamento de energia tem vindo a crescer à medida que cada vez mais dependemos de eletricidade. A necessidade de diminuir as emissões de Gases com Efeito de Estufa e outros poluentes e a penetração das Fontes Renováveis de Energia no mix produtivo de eletricidade, estimulam o desenvolvimento do armazenamento de energia.

Neste trabalho foi verificada a compatibilidade geográfica entre as estruturas geológicas de Portugal com aptidão para um sistema de armazenamento de energia por ar comprimido (Compressed Air Energy Storage) e a produção de energia por fontes renováveis, utilizando o *software* Quantum GIS.

Da integração dos parâmetros avaliados foi obtida uma área a Norte de Rio Maior como localização adequada à instalação de uma central de CAES. A estrutura salífera identificada tem a profundidade e espessura necessárias para instalar cavidades com dimensão considerável e a sua constituição aparenta ser apta para a formação cavidades por dissolução.

Definition of geological reservoirs for compressed air energy storage and synergies with energy production

Abstract

The interest in energy storage is growing simultaneously with the increase on electricity dependency. The need to reduce Greenhouse Gases Emissions and other pollutants and the penetration of Renewable Energy Sources in electricity production mix, stimulate the development of energy storage.

This work focused on finding the geographical proximity between the geological structures in mainland Portugal suitable for storing compressed air and potential for energy production from renewable sources , determining the locations where it's viable to consider implementing the CAES technology, using the software Quantum GI

The integration of the evaluated parameters show an area to the north of the city of Rio Maior suitable for the installation of a CAES plant. The identified salt structure has the depth and thickness required for the installation of sizeable cavities and that its formation appears to be suitable for solution mining.

Índice

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	2
2.1.	TECNOLOGIA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM AR COMPRIMIDO.....	5
2.1.1.	FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE CAES	5
2.1.1.1.	SISTEMAS DE CAES AVANÇADOS.....	7
2.1.2.	RESERVATÓRIOS.....	9
2.1.3.	PERFORMANCE DE SISTEMAS DE CAES	13
2.2.	CENTRAIS DE CAES EXISTENTES E PROJETADAS.....	15
2.2.1.	Centrais existentes	15
2.2.2.	Centrais projetadas.....	20
2.2.3.	Projetos abandonados.....	24
2.3.	SISTEMAS DE CAES E REDES ELÉTRICAS	25
2.4.	SISTEMAS DE CAES E AS ENERGIAS RENOVÁVEIS	27
2.5.	TIPO DE RESERVATÓRIOS GEOLÓGICOS ADEQUADOS PARA A TECNOLOGIA CAES...28	
2.5.1.	ARMAZENAMENTO EM AQUÍFEROS DETRÍTICOS.....	29
2.5.2.	RESERVATÓRIOS EM ESTRUTURAS SALÍFERAS	35
2.5.3.	RESERVATÓRIOS EM ROCHA MACIÇA.....	38
2.6.	RISCOS GEOLÓGICOS DO CAES.....	39
2.7.	LEGISLAÇÃO PORTUGUESA APLICÁVEL AO CAES	40
3.	DEFINIÇÃO DAS ESTRUTURAS GEOLÓGICAS ADEQUADAS PARA CAES EM PORTUGAL CONTINENTAL	41
3.1.	METODOLOGIA E BASE DE DADOS	41
3.1.1.	DADOS DE IDENTIFICAÇÃO DE FORMAÇÕES GEOLÓGICAS ADEQUADAS AO ARMAZENAMENTO DE AR COMPRIMIDO ...	43
	ESTRUTURAS SALÍFERAS.....	46
3.1.2.	AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE SUPERFÍCIE DE TERRENO	47
3.1.3.	ZONAS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTES RENOVÁVEIS.....	50
4.	POTENCIAIS RESERVATÓRIOS GEOLÓGICOS IDENTIFICADOS.....	53
4.1.	SISTEMAS AQUÍFEROS DE PORTUGAL CONTINENTAL.....	53
4.1.1.	MACIÇO ANTIGO.....	57
4.1.2.	BACIA LUSITANIANA.....	58
4.1.2.1.	LOCALIZAÇÃO DE POTENCIAIS RESERVATÓRIOS NA FORMAÇÃO DO GRÉS INFERIOR	62
4.1.2.2.	FORMAÇÃO DA ABADIA	67
4.1.3.	BACIA DO ALGARVE	69
4.1.4.	BACIA Terciária do Tejo-Sado.....	72
4.2.	ESTRUTURAS SALÍFERAS	73
4.2.1.	FORMAÇÃO DAS MARGAS DE DAGORDA	74
4.2.2.	COMPLEXO MARGO CARBONATADO DE SILVES	76
4.2.3.	LOCALIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS SALÍFERAS.....	76

4.3.	RESERVATÓRIOS EM ROCHA MACIÇA.....	77
5.	SUPERFÍCIE DE TERRENO DISPONÍVEL PARA INSTALAÇÃO DE CENTRAL DE CAES...	77
5.1.	ANÁLISE ESPACIAL DA CORRESPONDÊNCIA ENTRE POTENCIAIS RESERVATÓRIOS E PRODUÇÃO DE ENERGIA.....	81
5.1.1.	POTENCIAL EÓLICO	81
5.1.2.	RADIAÇÃO SOLAR	82
5.1.3.	CENTRAIS ELECTROPRODUTORAS POR FER	83
5.1.4.	SINERGIAS ENTRE AS FER E AS ESTRUTURAS GEOLÓGICAS	83
5.2.	DETALHE SOBRE A ZONA DE RIO MAIOR.....	84
5.3.	CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DO DIAPIRO DE RIO MAIOR.....	85
5.4.	CARACTERIZAÇÃO LITOLÓGICA DO DIAPIRO	89
6.	CONCLUSÕES	93
7.	REFERÊNCIAS	95
8.	ANEXOS.....	I

Índice de Figuras

FIGURA 1 - DIFERENÇA NO PREÇO DA ELETRICIDADE PARA PERÍODOS DE PICO E VAZIO NO MERCADO SPOT ENTRE 1 E 29 DE FEVEREIRO DE 2012. (MIBEL, 2013)	2
FIGURA 2 - RELAÇÃO ENTRE A POTÊNCIA PRODUZIDA E TEMPO DE PRODUÇÃO PARA ALGUNS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA MAIS COMUNS (ESA, 2013)	3
FIGURA 3 - COMPRESSÃO, EXPANSÃO E PRESSÃO DO RESERVATÓRIO NA CENTRAL DE HUNTORF DURANTE UM DIA (CROTOGINO ET AL., 2001)	4
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DE UMA CENTRAL DE CAES CONVENCIONAL. (KHUSHNIR ET AL., 2012) ..	5
FIGURA 5 - POSSÍVEL CONFIGURAÇÃO DE UM SISTEMA DE AA CAES. (SUCCAR E WILLIAMS, 2008) ..	8
FIGURA 6 - A) MODOS DE OPERAÇÃO DA PRESSÃO DE SISTEMAS DE CAES, PRESSÃO VARIÁVEL NO RESERVATÓRIO; B) PRESSÃO CONSTANTE NO RESERVATÓRIO REGULADA POR UMA MASSA DE ÁGUA À SUPERFÍCIE (BBC, 1980)	10
FIGURA 7 - ENERGIA PRODUZIDA PARA TRÊS MODOS DE OPERAÇÃO RESERVATÓRIO (SUCCAR, 2011) ..	11
FIGURA 8 - RELAÇÃO ENTRE O VOLUME DO RESERVATÓRIO ADIMENSIONAL E A PRESSÃO DE ARMAZENAMENTO DE UM GÁS	12
FIGURA 9 - DIAGRAMA DO MODELO DE UM SISTEMA AA_CAES (STETA, 2010)	12
FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO DA CENTRAL DE CAES DE HUNTORF ORIGINAL COM DADOS DE OPERACIONAIS (BBC, 1980)	16
FIGURA 11 - CAVIDADES DA CENTRAL DE HUNTORF (CROTOGINO ET AL., 2001)	17
FIGURA 12 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CENTRAL DE MCINTOSH (POLLAK, 1994)	18
FIGURA 13 - REPRESENTAÇÃO DA CENTRAL DE YAKIMA MINERALS COM INTEGRAÇÃO DE ENERGIA GEOTÉRMICA.	22
FIGURA 14 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROJETO ADELE (ADELE, 2010)	23
FIGURA 15 - DIAGRAMA DE CARGAS TÍPICO DE UM SISTEMA CAES (KHUSHNIR ET AL., 2012)	25
FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM RESERVATÓRIO CAES EM AQUIFERO DETRÍTICO (KUSHNIR, 2012)	30
FIGURA 17 - DESENVOLVIMENTO DE UMA BOLHA DE AR NO AQUIFERO DE PITTSFIELD (WILES E MCCANN, 1983). AS CURVAS REPRESENTAM A POSIÇÃO DA INTERFACE AR-ÁGUA PARA DIFERENTES PERÍODOS DE TEMPO (EM DIAS)	30
FIGURA 18 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PARÂMETROS DE VOLUME E FECHAMENTO DE UMA ESTRUTURA AQUIFERA, MODIFICADO DE (SUCCAR E WILLIAMS 2008)	32
FIGURA 19 - CAVIDADE PARA ARMAZENAMENTO DE AR COMPRIMIDO EM ESTRUTURA SALÍFERA (KHUSHNIR ET AL. 2012)	36
FIGURA 20 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CAVIDADES DA CENTRAL DE HUNTORF EM 1984 E 2001. CROTOGINO ET AL., 2001)	ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.
FIGURA 21 - CAVIDADE EM ROCHA DURA COM PRESSÃO VARIÁVEL E PRESSÃO CONSTANTE KHUSHNIR ET AL. (2012)	39
FIGURA 22 - ESQUEMA DA METODOLOGIA UTILIZADA.	42
FIGURA 23 - MINAS SUBTERRÂNEAS ABANDONADAS EM PORTUGAL CONTINENTAL.	44
FIGURA 24 - SISTEMAS AQUIFEROS DE PORTUGAL CONTINENTAL SEGUNDO UNIDADE HIDROGEOLÓGICA (SNIRH, 2013)	45
FIGURA 25 - ESTRUTURAS SALÍFERAS EM PORTUGAL CONTINENTAL (PEREIRA ET AL., 2010)	46
FIGURA 26 - CAMADAS TRABALHADAS EM AMBIENTE SIG UTILIZANDO OS CRITÉRIOS PROPOSTOS POR MAYS ET AL. (2012) PARA PORTUGAL CONTINENTAL	48
FIGURA 27 - VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO EM PORTUGAL A 80 M DE ALTURA. (GEOPORTAL DO LNEG, 2013)	50
FIGURA 28 - RADIAÇÃO SOLAR ANUAL (kW.H/M ²) EM PORTUGAL CONTINENTAL (PVGIS, 2014) ..	51
FIGURA 29 - LOCALIZAÇÃO DOS CENTROS ELECTROPRODUTORES POR FONTE EÓLICA E FOTOVOLTAICA EM PORTUGAL.	52
FIGURA 30 - SINOPSE ESTRATIGRÁFICA DA BACIA LUSITANIANA (DPEP, 2014)	54
FIGURA 31 - ESTRATIGRAFIA DA BACIA ALGARVIA (TERRINHA, 1998)	56
FIGURA 32 - PERFIL GEOLÓGICO DA BACIA DO TEJO SE-NE (ALMEIDA ET AL., 2000)	57

FIGURA 33- A) LOCALIZAÇÃO DAS SUB-BACIAS DE BOMBARRAL, TURCIFAL E ARRUDA E UNIDADES GEOLÓGICAS (CARVALHO 2013). B) COLUNA CRONOSTRATIGRÁFICA DA SUB-BACIA DE ARRUDA (KULLBERG <i>ET AL.</i> , 2006)	61
FIGURA 34 - A) AFLORAMENTO DE FORMAÇÕES CONTEMPORÂNEAS OU POSTERIORES AO CRETÁCICO INFERIOR; B) CLASSIFICAÇÃO DE ZONAS EM RELAÇÃO À PROFUNDIDADE DO GRÉS INFERIOR.	62
FIGURA 35 - A) TOPO DO CRETÁCICO MÉDIO (MOHAVE, 1995) COM A PRESENÇA DA ESTRUTURA ANTICLINAL. B) PERFIL SÍSMICO UTP81-8 INTERPRETADO POR DIAS (2005)	65
FIGURA 36 - ESTRUTURA ANTICLINAL REPRESENTADA COM BASE EM MOHAVE (1995).	66
FIGURA 37 - A) TOPO DA FORMAÇÃO DE SOBRAL, FREIXIAL E ARRANHÓ EM M B) TOPO DA FORMAÇÃO DA ABADIA EM MILISSEGUNDOS. C) PROFUNDIDADE DO TOPO DA FORMAÇÃO DE MONTEJUNTO	68
FIGURA 38 - COLUNA ESTRATIGRÁFICA DO CRETÁCICO INFERIOR NA BACIA DO ALGARVE (TERRINHA <i>ET AL.</i> , 2006)	69
FIGURA 39 - PERFIL GEOLÓGICO INTERPRETATIVO N-S DA CAMPINA DE FARO DEMOSTRANDO A EXISTÊNCIA DE FORMAÇÕES DO CRETÁCICO INFERIOR EM PROFUNDIDADE ADAPTADO DE SILVA <i>ET AL.</i> , 1986 EM ROSEIRO, 2009)	70
FIGURA 40 - A) ISOPACAS E B) PROFUNDIDADE DAS MARGAS DE DAGORDA (MOHAVE, 1996)	73
FIGURA 41 - RELAÇÃO ENTRE A PROFUNDIDADE ADEQUADAS PARA CAES EM RESERVATÓRIOS SALÍFEROS E OS DIAPIROS CARTOGRAFADOS	74
FIGURA 42 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS SALÍFERAS.	76
FIGURA 43 - A) SUPERFÍCIE DE SOLO QUE CUMPRE OS CRITÉRIOS DE DENSIDADE POPULACIONAL, DECLIVE, ÁREAS PROTEGIDAS, ÁREAS INUNDÁVEIS; B) ESTRUTURAS GEOLÓGICAS IDENTIFICADAS E RESPECTIVO BUFFER.	78
FIGURA 44 - SUPERFÍCIE DE SOLO DISPONÍVEL PARA A INSTALAÇÃO DE UMA CENTRAL DE CAES EM PORTUGAL CONTINENTAL E PORMENORES DAS ZONAS IDENTIFICADAS.	79
FIGURA 45 - SUPERFÍCIE DE TERRENO DISPONÍVEL NA ÁREA DO ANTICLINAL DO GRÉS INFERIOR.	80
FIGURA 46 - SINERGIAS ENTRE O POTENCIAL EÓLICO E A SUPERFÍCIE DE SOLO DISPONÍVEL.	81
FIGURA 47 - SINERGIAS ENTRE A RADIAÇÃO SOLAR E A SUPERFÍCIE DE SOLO DISPONÍVEL.	82
FIGURA 48 - A) CENTROS ELECTROPRODUTORES POR FER E SUPERFÍCIE DISPONÍVEL. B) PORMENOR DA REGIÃO OESTE	83
FIGURA 49 - ENQUADRAMENTO DA LOCALIZAÇÃO DE UMA POSSÍVEL CENTRAL DE CAES COM ARMAZENAMENTO DE AR COMPRIMIDO NO DIAPIRO DE RIO MAIOR,	85
FIGURA 50 - GEOLOGIA DA ZONA DO DIAPIRO DE RIO MAIOR. ADAPTADO DE CARVALHO (2013)	87
FIGURA 51 - FALHAS NA ZONA DE RIO MAIOR A) CARVALHO (2013) E B) FONSECA (1996);	88
FIGURA 52 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MODELO DE FORMAÇÃO DOS DIAPIROS DAS CALDAS DA RAINHA E DE RIO MAIOR (ZBYSZEWSKI (1959) EM FONSECA, 1996)	89
FIGURA 53 - LITOLOGIAS E PERCENTAGENS DE MATERIAL SOLÚVEL NAS SONDAJENS S1 E S2 NO DIAPIRO DE RIO MAIOR. EFETUADO COM BASE EM DADOS DE ZBYSZEWSKI (1961)	90
FIGURA 54 - ESTRUTURA DO TOPO DO TRIÁSSICO, BASE DA FORMAÇÃO DE DAGORDA	92

Índice de Tabelas

TABELA 1 - PERFORMANCE PARA SISTEMA DE CAES (SUCCAR E WILLIAMS, 2008)	14
TABELA 2 - COMPARAÇÃO PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO ENTRE AS DUAS CENTRAIS DE CAES EXISTENTES (STETA, 2010)	19
TABELA 3 - ALGUMAS CENTRAIS DE CAES PROJETADAS NOS E.U.A. (EPRI, 2013)	20
TABELA 4 - CUSTOS DA CAVIDADE SUBTERRÂNEA CONSOANTE O TIPO DE ESTRUTURA GEOLÓGICA E SEGUNDO DUAS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	28
TABELA 5 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS AQUÍFEROS PARA ARMAZENAR AR COMPRIMIDO (SUCCAR E WILLIAMS, 2008)	33
TABELA 6 - PROPRIEDADES DAS CAVIDADES PARA ARMAZENAR AR COMPRIMIDO. COMPILADO DE SWENSEN E POTASHNIK (1994) E (ALLEN, 1982)	35
TABELA 7 - AQUÍFEROS AVALIADOS	53
TABELA 8 - DESCRIÇÃO MARGAS DE DAGORDA EM VÁRIAS SONDAgens (CARVALHO, 2013)	75

Lista de acrónimos e abreviaturas

CAES - Compressed Air Energy Storage, Armazenamento de Energia por Ar Comprimido

PHB - Central Hidroelétrica com Bombagem

FER - Fontes Energia Renovável

GEE - Gases com Efeito de Estufa

TES - Thermal Energy Storage, Tecnologias de armazenamento de calor

CCGT - Combined Cycle Gas Turbine, Turbina a Gás de ciclo Combinado

EPRI - Electric and Power Research Institute

PNBEPH - Plano Nacional de Barragens Com Elevado Potencial Hidrelétrico

AA-CAES - Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage

$P_{\text{máx}}$ - Pressão máxima

$P_{\text{mín}}$ - Pressão mínima

E_T - Energia Produzida na turbina

E_F - Energia térmica do combustível

E_M - Energia entregue ao compressor

η_T - Eficiência da central electroprodutora

η_{NG} - Eficiência de uma central de gás natural;

$E_{T,rev}$ - Energia produzida por uma central de CAES

T_0 - Temperatura ambiente

$T_{\text{máx}}$ - Temperatura máxima

PCI - Poder Calorífico Inferior

1. Introdução

O interesse pelo armazenamento de energia tem vindo a crescer à medida que cada vez mais dependemos de energia elétrica. Fatores como a fiabilidade, eficiência e transmissão da eletricidade na rede, a necessidade de diminuir as emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE) e outros poluentes bem como a penetração das Fontes Renováveis de Energia no mix produtivo de eletricidade, estimulam o desenvolvimento do armazenamento de energia.

O armazenamento de energia por ar comprimido para a produção de eletricidade (Compressed Air Energy Storage - CAES) existe desde os anos 70, tendo sido inicialmente desenvolvida com o objetivo de armazenar a eletricidade barata produzida pelas centrais nucleares. Com o crescimento da produção elétrica por Fontes de Energia Renovável (FER) o interesse pelo CAES reapareceu com a finalidade de contrabalançar a intermitência e variabilidade das FER, permitindo armazenar a energia quando o recurso está disponível e produzir eletricidade quando é necessário.

Ainda assim as centrais de CAES convencionais necessitam de recorrer a combustíveis fósseis, normalmente gás natural, na fase de produção de eletricidade. Porém, as políticas de mitigação das alterações climáticas e a necessidade de diminuir a emissão de GEE e outros poluentes, originaram novos sistemas de CAES que não utilizem a combustão, tal como o projeto ADELE na Alemanha que pretende instalar uma central de CAES adiabática (ADELE, 2010).

Em Portugal a produção de eletricidade por FER, principalmente energia eólica, representa uma parte considerável da produção total de eletricidade (REN, 2013). O armazenamento de energia em grandes barragens através do sistema de produção hidroelétrica com bombagem (PHB), como definido no Plano Nacional de Grandes Barragens com Elevado Potencial hidroelétrico (PNBEPH, 2007) é a forma mais comum de armazenar energia em Portugal. As centrais de CAES apresentam uma alternativa a este tipo de armazenamento de energia.

Assim, nesta dissertação é discutida numa primeira secção a tecnologia de armazenamento de ar comprimido para a produção de energia e a sua relação com o armazenamento de energia, a rede elétrica e a produção de energia por fontes renováveis. São definidas as características necessárias de uma estrutura geológica para o armazenamento de ar e identificadas quais as estruturas geológicas de Portugal Continental que cumprem esses critérios. Finalmente, é apontada a complementaridade geográfica entre as estruturas identificadas e a produção de energia por FER, identificando quais as zonas onde é viável considerar a implementação de centrais de CAES.

2. Armazenamento de energia

A diferença de preços entre a energia barata produzida em períodos de pouco consumo e a energia mais cara produzida em períodos de pico criou a oportunidade para armazenar energia (Succar, 2011). Contudo as centrais a gás de ciclo combinado (CCGT) e a elevada capacidade produtiva instalada na rede elétrica, que constitui a reserva redundante, conduziram ao pouco interesse no armazenamento de energia.

Na figura 1 é visível a diferença entre o preço da eletricidade em períodos de vazio e pico no mercado *spot* português no mês de fevereiro de 2012 (MIBEL, 2013).

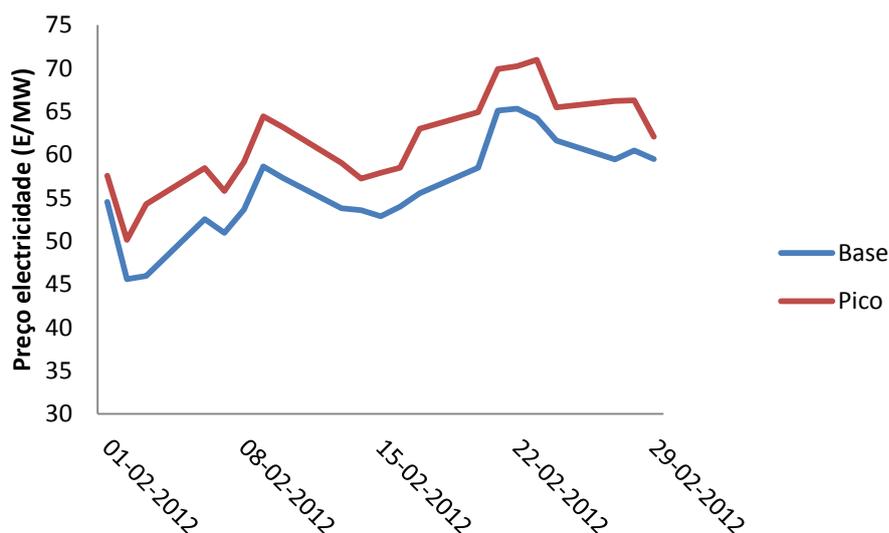


Figura 1 - Diferença no preço da eletricidade para períodos de pico e vazio no mercado *spot* entre 1 e 29 de Fevereiro de 2012. (MIBEL, 2013)

É esta diferença no preço da eletricidade que esteve na origem das centrais convencionais de CAES e que ainda pode representar um incentivo ao seu desenvolvimento.

O aumento do preço do gás natural, a qualidade da energia elétrica fornecida, a eficiência da rede elétrica, a necessidade de diminuir as emissões GEE e o aumento significativo da produção de energia por FER, principalmente energia eólica, fizeram do armazenamento de energia um tema de interesse.

Apesar do elevado número de tecnologias de armazenamento de energia que estão em desenvolvimento, atualmente apenas duas tecnologias permitem fornecer eletricidade a um nível de central electroprodutora, ou seja mais de 100MW durante várias horas (Figura 2); i) a produção hidroelétrica com bombagem (PHB) e ii) os sistemas de ar comprimido para armazenamento de energia ou seja CAES (Succar e Williams, 2008).

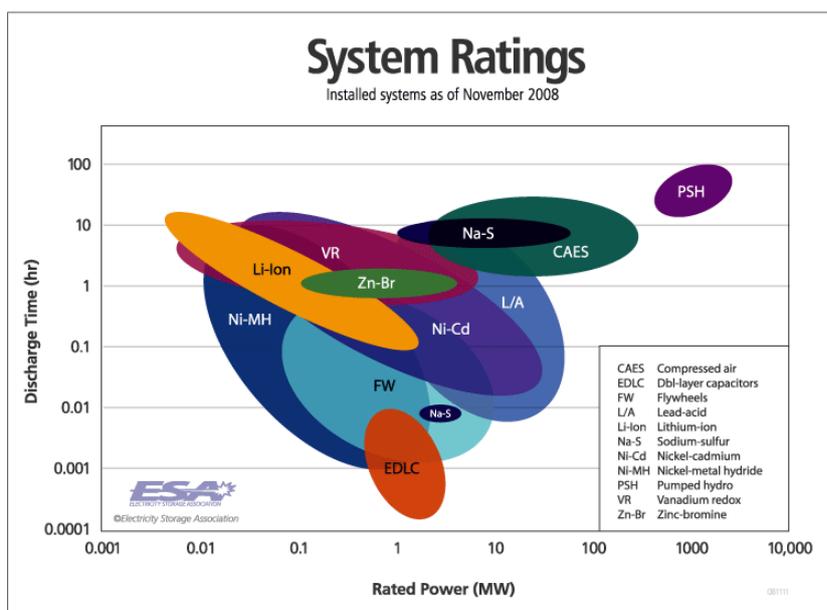


Figura 2 - Relação entre a potência produzida e tempo de produção para alguns sistemas de armazenamento de energia mais comuns (ESA, 2013).

A tecnologia de armazenamento de energia por PHB apresenta grande maturidade, com início em 1890 e acentuado crescimento desde 1950 com o desenvolvimento das máquinas reversíveis e constitui o sistema de armazenamento de energia mais utilizado mundialmente com cerca de 100 GW instalados. O CAES constitui a única alternativa ao PHB para armazenar de energia, demonstrado na figura 2, sendo a potência produzida e tempos de produção ligeiramente inferiores no CAES.

Em Portugal existem 11 aproveitamentos hidroelétricos que podem realizar a bombagem (EDP, 2013) e 7 outros em desenvolvimento que fazem parte do PNBEPH (2007). Neste plano é destacada a complementaridade entre o armazenamento de energia e a energia eólica, evidenciando a vantagem de armazenar energia produzida por fontes renováveis.

O CAES já mostrou ser adequado para fornecer eletricidade durante os picos de consumo, apresentando alguns benefícios sobre os centros electroprodutores de arranque rápido, como as centrais de CCGT. A figura 3 mostra o funcionamento diário de uma central de CAES na Alemanha, com a compressão em períodos de vazio e a produção em períodos de pico.

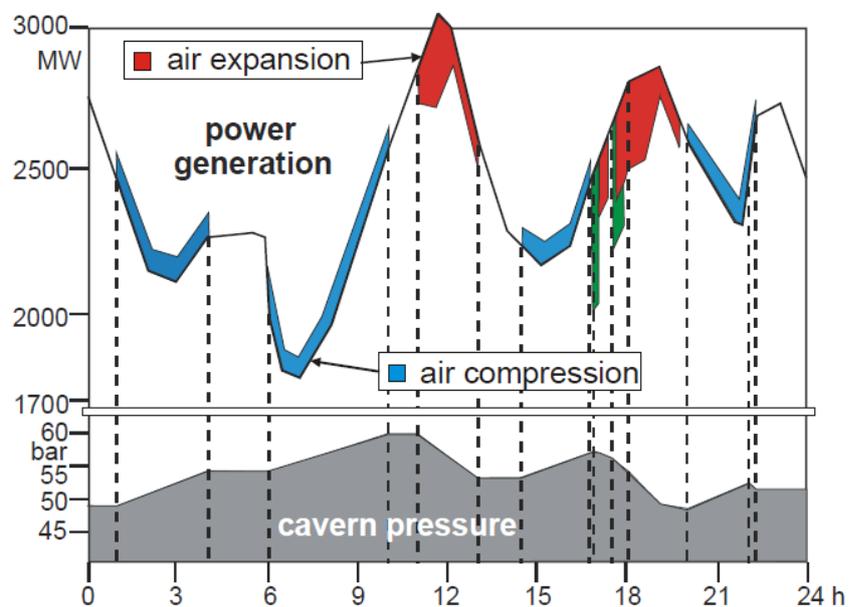


Figura 3 - Compressão, expansão e pressão do reservatório na central de Huntorf durante um dia (Crotogino et al., 2001).

2.1. Tecnologia de Armazenamento de Energia em Ar Comprimido

Nos sistemas de armazenamento de energia por ar comprimido o ar é comprimido e armazenado num reservatório para ser posteriormente expandido através de uma turbina e produzir eletricidade.

O conceito de CAES foi desenvolvido nos anos 70 e atualmente existem duas centrais de CAES, as centrais de Huntorf, na Alemanha, e McIntosh, nos Estados Unidos da América, que estão em funcionamento desde o seu comissionamento em 1978 e 1991, respetivamente. Estas centrais providenciam várias outras funções de gestão da rede elétrica como reserva energética circulante, gestão de cargas, controlo da frequência e do fator de capacidade.

2.1.1. Funcionamento de um Sistema de CAES

Um sistema de CAES (Figura 4) é constituído pelos compressores, turbinas a gás, o motor/gerador, que podem operar no mesmo eixo, e um reservatório que normalmente e no âmbito deste trabalho é uma estrutura geológica subterrânea. A energia da rede elétrica alimenta compressores e comprime o ar atmosférico que é arrefecido até à temperatura ambiente do reservatório e injetado num reservatório geológico subterrâneo através dos furos de injeção/captação. No processo de expansão o ar é libertado do reservatório e aquecido, através da combustão nos sistemas convencionais e expandido numa turbina para produzir eletricidade.

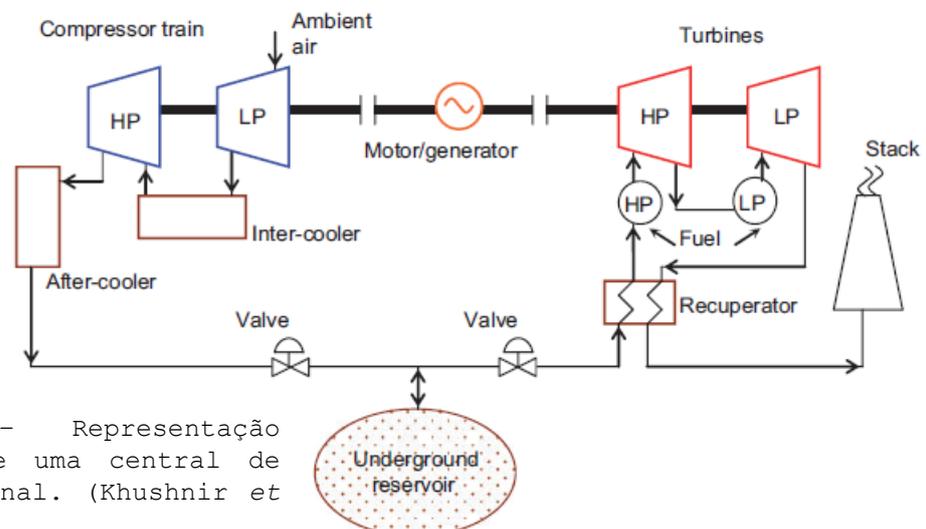


Figura 4 - Representação esquemática de uma central de CAES convencional. (Khushnir et al. 2012)

Em sistemas de CAES convencionais, no momento de expansão é utilizada a combustão para aquecer o ar e assim aumentar a produção elétrica e prevenir que as baixas temperaturas criadas pela expansão possam causar danos na turbina. O processo de combustão permite que a energia produzida seja entre 30 a 35% superior à energia consumida durante a compressão (Herman, et al., 2003). A expansão do ar à temperatura ambiente necessitaria de um fluxo de ar muito maior para atingir a mesma produção o que aumentaria as necessidades de energia no processo de compressão. Normalmente é utilizado gás natural como combustível, contudo várias outras fontes de calor podem ser utilizadas para aquecer o ar comprimido (Kim et al., 2012).

O funcionamento de uma central de CAES convencional não difere muito de uma central de turbina a gás, sendo a principal diferença a compressão e a expansão ocorrerem em momentos diferentes. Embora as centrais CCGT sejam mais eficientes para a produção de energia elétrica, uma central de CAES convencional apresenta algumas vantagens sobre as centrais de CCGT.

Tal como a possibilitando que a totalidade da energia produzida na turbina seja fornecida à rede elétrica (Succar e Williams, 2008). Nas centrais de CCGT cerca de 2/3 da produção de energia pela turbina é utilizada na compressão do ar, enquanto nas centrais de CAES a totalidade da energia produzida na turbina é fornecida à rede elétrica.

O rápido arranque das centrais de CAES também representa uma vantagem. As centrais de Huntorf e McIntosh podem entrar em produção de emergência em 5 minutos, enquanto o arranque normal demora 10 a 12 minutos, sendo o arranque 30% da carga máxima por minuto (Herman et al., 2003). A central de Huntorf demora 20 minutos a passar do processo de compressão para a produção (Crotogino et al., 2001).

As centrais de CAES convencionais utilizam menos quantidade de combustível devido à compressão estar dissociada da expansão, considerando apenas o combustível utilizado durante a expansão. A taxa de calor na central de Huntorf é de 5879 kJ/kWh e na de McIntosh de 4330 kJ/kWh enquanto numa central convencional de CCGT está entre 9000- 9500 kJ/kWh.

Diferentes configurações podem ser aplicadas aos sistemas de CAES, dependendo de condições específicas do reservatório, das exigências de operação e dos custos. A central de CAES de Huntorf segue um ciclo convencional de uma turbina a gás. Na central de McIntosh foi adicionada a recuperação do calor rejeitado para pré-aquecer o ar comprimido permitindo uma redução de 25% no consumo de combustível.

Várias outras configurações foram propostas, como a utilização do ciclo combinado, ou a humidificação do ar comprimido antes de ser aquecido (Gyuk, 2003), que conduzem à possibilidade de aumentar a energia produzida por unidade de volume armazenado e assim exigir menores volumes de armazenamento. Schainker *et al.* (2008) compararam performances e custos de diferentes configurações de sistemas CAES, indicando que as configurações de CAES com um custo específico inferior são as que se aproximam às CCGT, enquanto o CAES Adiabático tem um custo específico superior.

2.1.1.1. Sistemas de CAES Avançados

Porém a necessidade de diminuir as emissões de GEE e o aumento dos preços dos combustíveis fósseis, especialmente gás natural levaram ao desenvolvimento de sistemas de CAES que não requerem a queima de combustível.

No CAES adiabático (Advance Adiabatic Compressed Air Energy System: AA-CAES), como apresentado na Figura 5, o ar atmosférico é comprimido por uma bateria de compressores, o calor produzido ao longo da compressão é armazenado num reservatório próprio e utilizado na fase de descarga para aquecer o ar proveniente do reservatório antes da expansão na turbina.

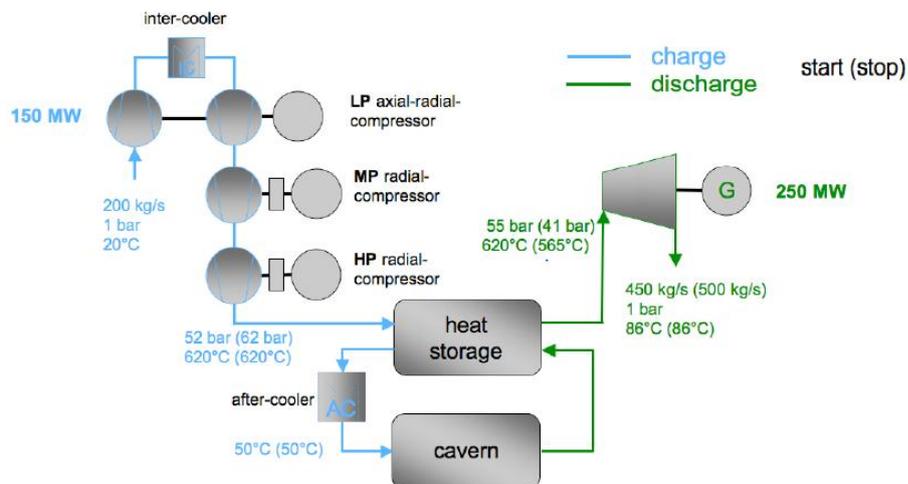


Figura 5 - Possível configuração de um sistema de AA CAES. (Succar e Williams, 2008).

Este tipo de sistema CAES pode atingir uma eficiência global de 70% (Succar e Williams, 2008) e foi recentemente descrito como um sistema economicamente viável devido ao avanço nas tecnologias de armazenamento de calor (Thermal Energy Storage - TES), nos compressores e turbinas (Succar e Williams, 2008)

Esta tecnologia requer o maior desenvolvimento de mecanismos que permitam uma compressão adiabática e da tecnologia de armazenamento de calor (Kim *et al.*, 2012). Existem várias tecnologias que permitem armazenar calor podendo ser distinguidas pelo tipo de material que armazena o calor, tais como: materiais sólidos como pedras, cerâmicas, betão ou fluidos como sal fundido ou óleo mineral.

A empresa SustainX's (2013) desenvolveu um sistema de CAES isotérmico que também não requer a utilização de combustível, minimizando o trabalho na compressão e maximizando o trabalho da expansão. A compressão e expansão são realizadas em cilindros pneumáticos onde as trocas de calor são efetuadas pela pulverização com água do ar comprimido permitindo armazenar o ar à temperatura ambiente e tornando o sistema isotérmico.

Neste tipo de sistema CAES o volume de ar comprimido armazenado deve ser sensivelmente o dobro dos outros sistemas de CAES (Kim *et al.*, 2012), contudo podem ser utilizadas pressões mais elevadas para compensar o volume necessário. Assim o CAES isotérmico projetado pela SustainX's (2013) utiliza reservatórios tubulares à superfície.

2.1.2. Reservatórios

Os reservatórios dos sistemas de CAES podem constar de formações geológicas ou reservatórios à superfície que são normalmente constituídos por tubagens de alta pressão, como os utilizados pela empresa SustainX. Como é necessário construir e operar um reservatório artificial sobre pressão, os sistemas à superfície tendem a ter maiores custos. O presente trabalho incide sobre os reservatórios subterrâneos em formações geológicas.

A viabilidade de uma central de CAES depende da correta integração entre o reservatório e os equipamentos de superfície. Para definir uma estrutura geológica como adequada ao armazenamento de energia por ar comprimido é necessário prever o comportamento da pressão e temperatura durante os ciclos de compressão, produção e armazenamento.

Os sistemas de CAES podem ser operados em diferentes modos de pressão na formação geológica utilizada como reservatório (Figura 6), a pressão pode variar ou ser mantida constante. Nos reservatórios com pressão variável o volume do reservatório é constante e a pressão vai variando consoante a injeção ou extração de ar comprimido. As duas centrais em atividade (Huntorf e McIntosh) utilizam outro modo de operação onde a pressão do reservatório varia com a quantidade de ar armazenado, mas a pressão de entrada na turbina é mantida constante. A pressão na cavidade será entre o máximo fornecido pelo compressor e o mínimo definido pela turbina. O valor da pressão fixo de saída do reservatório permite um rendimento ótimo da turbina mantendo a frequência desejada. Este modo de operação requer que o volume do reservatório seja maior para compensar as perdas de pressão causadas pela regulação da pressão.

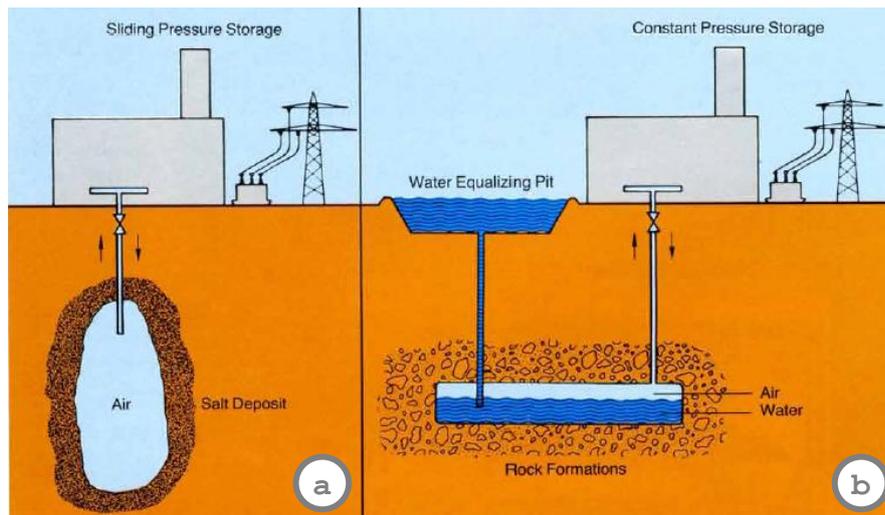


Figura 6 - a) Modos de operação da pressão de sistemas de CAES, pressão variável no reservatório; b) pressão constante no reservatório regulada por uma massa de água à superfície (BBC, 1980).

Outro modo de operação (Figura 6b) idealizado para diminuir o volume do reservatório e melhorar a eficiência do sistema permitindo assim diminuir custos, é a operação com pressão constante e volume variável. Neste modo de operação é utilizada uma coluna de água que flui entre um reservatório à superfície e o reservatório subterrâneo. Quando a pressão na cavidade aumenta, o ar desloca a água para os reservatórios à superfície, quando a pressão da cavidade diminui a água dos reservatórios à superfície desce para a cavidade mantendo a pressão constante nos reservatórios. Na condução de ligação entre reservatórios podem ocorrer instabilidades no escoamento da água como o "efeito champanhe".

A Figura 7 relaciona a densidade energética E_T/V_s , energia produzida por unidade de volume de ar comprimido armazenado, com a pressão de armazenamento superior (P_{s2}) e nos casos de pressão variável no reservatório a proporção entre a pressão de armazenamento superior e pressão de armazenamento inferior (P_{s2}/P_{s1}), para três modos de operação do sistema CAES reservatório a pressão constante (caso 1), reservatório a pressão variável (caso 2), reservatório com pressão variável mas pressão de entrada na turbina constante (caso 3).

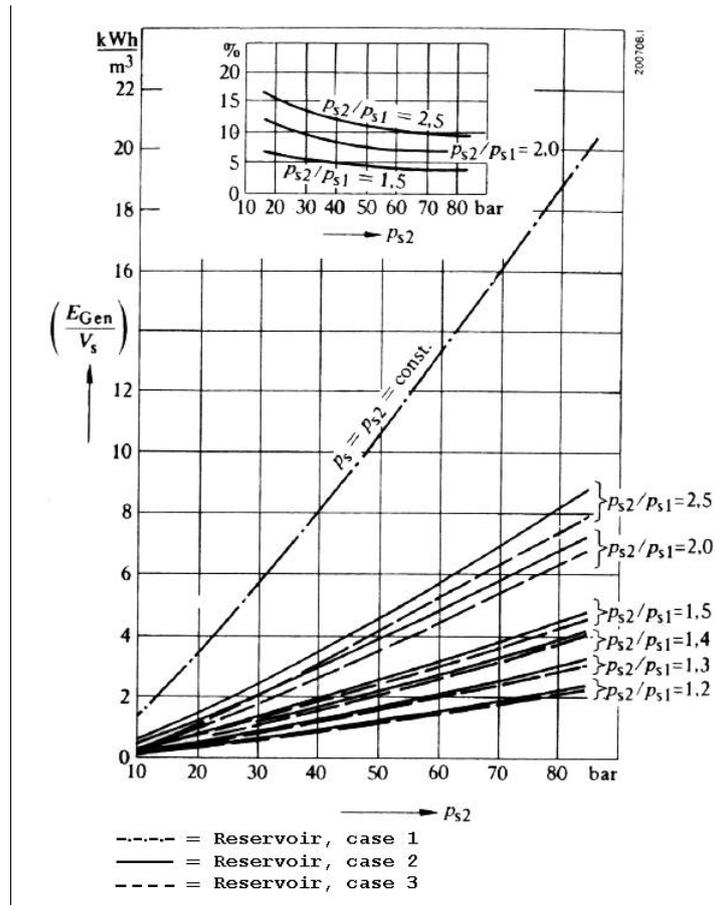


Figura 7 - Energia produzida por unidade de volume para três modos de operação do reservatório (Succar, 2011).

Da imagem é possível verificar que o modo de operação com pressão constante é o que requer um volume menor para a mesma produção. A diferença na densidade energética entre operar com a pressão de entrada na turbina fixa ou variável é reduzida, mas os benefícios de operar com pressão de entrada na turbina fixa são maiores, pelo que as centrais de CAES existentes operam deste modo.

Khushnir *et al.* (2012) mostra que para a relação entre a pressão máxima ($P_{máx}$) e a mínima ($P_{mín}$) inferior a 1,2 o volume do reservatório é menor mas é necessário mais trabalho do compressor e os consequentes custos. Por outro lado para valores superiores a 1,8 a diminuição de P_{max}/P_{min} não afecta significativamente o volume do reservatório mas reduz o trabalho de compressão figura 8.

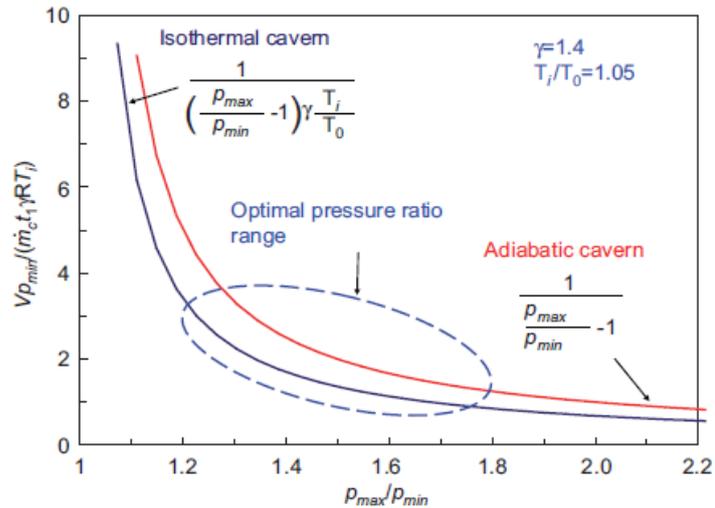


Figura 8 - Relação entre o volume do reservatório adimensional e a pressão de armazenamento de um gás ideal (Kushnir *et al.*, 2012).

Existem vários modelos desenvolvidos com base nas equações de conservação da massa e da energia, que permitem prever as condições termodinâmicas no reservatório de CAES. Steta (2010) modelou um sistema de AA-CAES esquematizado no diagrama da Figura 9, Raju e Khaitan (2012) efetuaram um modelo para uma central de CAES convencional e validaram o modelo com informação da central de Huntorf. Kushnir *et al.* (2012) apresentam uma revisão de alguns modelos teóricos termodinâmicos apresentados para sistemas de CAES em reservatórios detríticos e em cavidades salíferas.

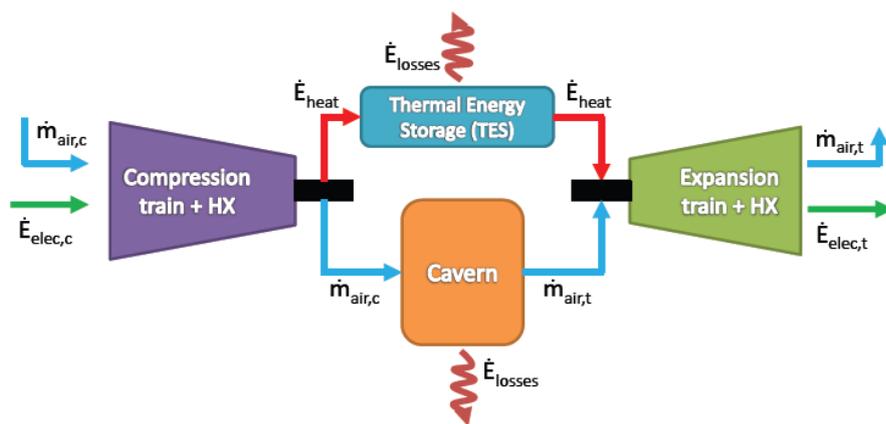


Figura 9 - Diagrama do modelo de um sistema AA_CAES (Steta, 2010).

2.1.3. Performance de sistemas de CAES

A eficiência máxima teórica de um sistema de CAES é a relação entre o trabalho máximo que pode ser extraído de uma unidade de ar armazenado a uma determinada pressão e temperatura, com o trabalho necessário para comprimir o ar atmosférico até à pressão determinada.

Para avaliar a performance de uma central de CAES existem vários índices descritos, contudo não existe um índice aceite globalmente devido à existência de duas entradas de energia bastante distintas: a energia elétrica utilizada para a compressão e a energia térmica utilizada para aquecer o ar na expansão, e a dificuldade de relacionar essas formas de energia (Succar e Williams, 2008). Assim para avaliar um sistema de CAES são utilizados índices que melhor descrevam o se pretende avaliar.

Para comparar sistemas CAES com centrais térmicas podem ser utilizados vários indicadores: *i*) a taxa de calor (*Heat Rate*), que relaciona o combustível consumido por unidade de eletricidade produzida, *ii*) a relação entre a energia elétrica consumida e a produzida para avaliar o processo de armazenamento (*Charging Energy Rate*), *iii*) a eficiência global (*Round Trip Efficiency*) como sendo a relação entre a entrada de energia e a produção elétrica. Para avaliar um sistema CAES do ponto de vista do armazenamento de energia pode ser empregue a densidade energética (E_t/V_s) que relaciona quantidade de energia armazenada e o volume ocupado pelo sistema CAES.

Succar e Williams (2008) compilaram os valores indicados na tabela 1 para vários índices de performance de uma central de CAES convencional.

Tabela 1 - Performance para sistema de CAES (Succar e Williams, 2008).

Índice	Definição	Com recuperador de Calor	Sem Recuperador de calor
Taxa de calor	$HR = E_T/E_F$	6000-5000 KJ/kWh (60%-65%)	4500-4200 KJ/kWh (80%-85%)
Taxa de carga elétrica	$CER = E_T/E_M$	1.2-1.4	1.4-1.6
Eficiência energética primaria	$\eta_{PE} = \frac{E_T}{E_M/\eta_T + E_F}$	CAES carregado de uma central nuclear $\eta_T = 33\%$	
		24,5%	29,7%
		CAES carregado de uma central de gás ($\eta_T = 42\%$)	
		28,2%	34,4%
		CAES carregado de central de carvão ($\eta_T = 35\%$)	
-	42% a 47%		
Eficiência Global	$\eta_{RT1} = \frac{E_T}{E_M + \eta_{NG}E_F}$	4220 KJ PCI/kWh; CER=1,5; $\eta_{NG}=47,6$	
		81,7%	
	$\eta_{RT2} = \frac{E_T - \eta_{NG}E_F}{E_M}$	66,3%	
Eficiência da segunda lei	$\eta_{II} = \frac{E_T}{E_{T,rev}}$	$T_0 = 15^\circ\text{C}; T_{max} = 900^\circ\text{C}; P_s = 20\text{bar};$	
		58,7%	68,3%

E_T - Energia Produzida na turbina E_F - Energia termica com combustível; E_M - Energia entregue ao compressor; η_T - Eficiencia da central electroprodutora; η_{NG} - Eficiência de uma central de gás natural; $E_{T,rev}$ - $E_{T,rev} = E_M + E_F - T_0 \times E_F/T_{max}$ energia produzida por uma central de CAES ideal a trabalhar entre T_0 e T_{max} .

A taxa de recarga elétrica é superior à unidade devido à entrada de energia proveniente da combustão sendo difícil a sua comparação com outros sistemas de armazenamento. A eficiência global de um sistema CAES, dependendo do índice utilizado, é comparável aos valores de eficiência global indicados para a tecnologia de PHB, entre 75 a 85%.

Elmegaarda e Brixb (2011) indicam que o melhor índice para avaliar um sistema de CAES é a eficiência do armazenamento obtida através da definição da eficiência exergetica dos três componentes de um ciclo de CAES: compressão, armazenamento e produção.

Estes autores apontam eficiências de armazenamento de 29 e 36% para as centrais de Huntorf e McIntosh respectivamente e para um sistema de AA-CAES indicam um valor entre 70% e 80%, valor que também é apresentado para o projeto ADELE (ADELE, 2010).

2.2. Centrais de CAES existentes e projetadas

Atualmente existem duas centrais de CAES em funcionamento mas nos últimos anos são vários os projetos propostos e em estudo para a implementação de centrais de CAES, principalmente nos Estados Unidos da América.

2.2.1. Centrais existentes

Central de Huntorf

A primeira central produtora de eletricidade utilizando a tecnologia do CAES foi construída em Huntorf, perto da cidade de Bremen na Alemanha pela ABB, começando a funcionar em 1978 e explorada pela E.ON Kraftwerke GmbH. A central construída com uma potência de 290 MW e tem atualmente 321MW, com o propósito inicial de possibilitar o arranque das centrais nucleares em condições de falta de eletricidade na rede elétrica e armazenar a energia produzida durante o vazio pelas centrais a carvão e nucleares.

Durante os períodos de baixo consumo o motor/gerador utiliza a eletricidade da rede para comprimir o ar atmosférico e efetuar o armazenamento subterrâneo. Na central de Huntorf existem dois compressores, um axial de baixa pressão e um centrífugo de alta pressão. O processo de compressão é acompanhado por permutadores de calor que arrefecem o ar comprimido até 50°C. A fase de compressão demora cerca de 8h e a pressão máxima na cavidade é de 7,2MPa. Em períodos de pico de consumo elétrico a energia armazenada é utilizada para fornecer a turbina a gás com o ar comprimido. A central de Huntorf demora 6 minutos a atingir a sua produção nominal.

O fluxo de ar chega à câmara de combustão com uma pressão de 4,2 MPa, é aquecido pela combustão de gás natural que se expande na turbina de alta pressão. Os gases de combustão são reaquecidos numa segunda câmara de combustão e expandidos na turbina de baixa pressão até à pressão atmosférica. A taxa máxima de descarga é 1,0MPa/h durante 2 horas, o que origina a uma variação máxima na pressão e 2 MPa e uma pressão mínima de 4,6 MPa no reservatório. Na figura 10 é demonstrada a configuração original da central de CAES de Huntorf.

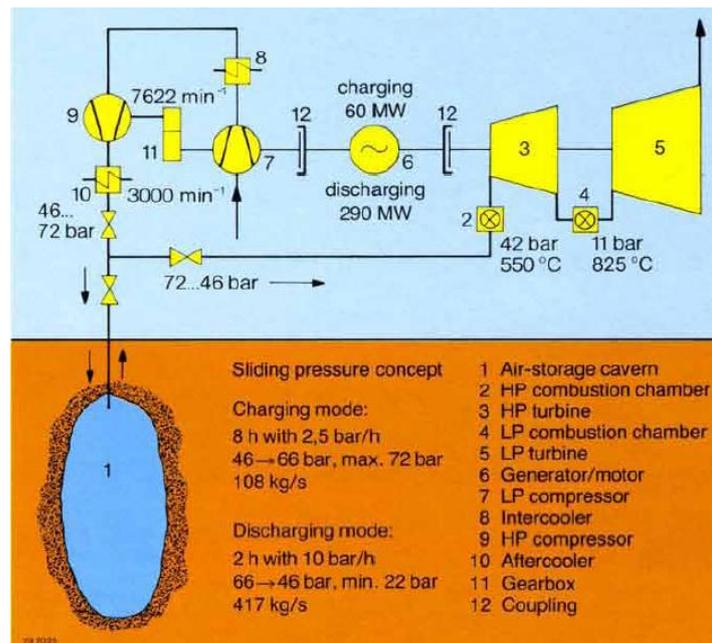


Figura 10 - Representação esquemática da central de CAES de Huntorf original com dados de operacionais (BBC, 1980)

Na central de Huntorf não existe recuperação do calor dos gases de escape para pré-aquecimento do ar, de modo a manter a central o mais simples possível, e a pressão de trabalho da turbina de alta pressão é bastante elevada para as turbinas a gás convencionais. A empresa construtora BBC desenvolveu uma turbina a gás com base nos princípios de funcionamento de uma turbina a vapor, com elevada pressão e temperatura mais baixa.

O ar é armazenado em duas cavidades geológicas, com um volume total de 310 000m³, que foram criadas num domo salino (Figura 11). A estrutura salina em Huntorf está 500m abaixo da superfície, o que permitiu a escavação por processo de lixiviação de duas cavidades com a forma cilíndrica com 40m de diâmetro e 150 de altura, que comportam uma pressão máxima de 7,2 MPa.

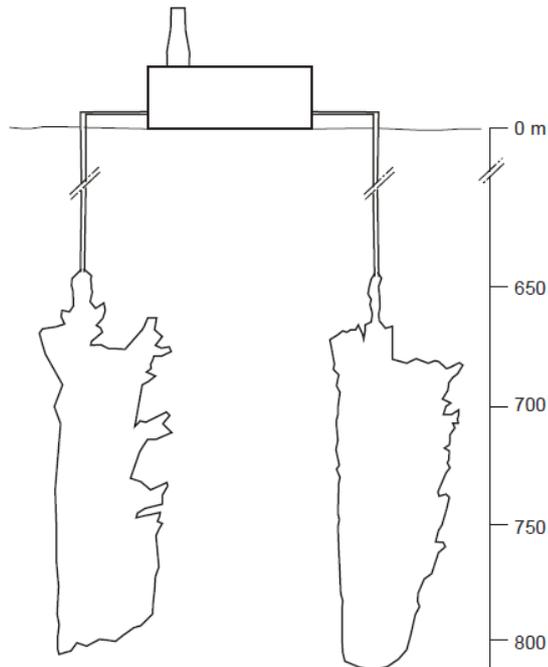


Figura 11 - Cavidades da central de Huntorf (Crotogino et al., 2001)

As tubagens das captações têm diâmetro de 20"/21" e um revestimento exterior de 24 1/2". Foram adotadas medidas para prevenir a entrada de sal no fluxo de ar comprimido para a turbina (Crotogino et al., 2001).

As tubagens de produção iniciais eram de aço, mas durante os primeiros meses de funcionamento começaram a ocorrer problemas de corrosão, pelo que foram substituídas por plástico reforçado com fibra de vidro. Passados 20 anos voltaram a ocorrer problemas com as tubagens produtivas.

Foram construídas duas cavidades para assegurar redundância durante a manutenção, pois o arranque do compressor requer pelo menos 1,3MPa na cavidade. Assim é mais fácil a pressurização de uma cavidade, após esta estar à pressão atmosférica, pela transferência de ar comprimido entre cavidades.

Recentemente foi criado um reservatório subterrâneo para armazenar o gás natural que alimenta diretamente a central. Desde 2006 que a central possui 321MW de capacidade instalada e está totalmente automatizada.

O reservatório foi criado numa estrutura salífera pelo processo de lixiviação, tem um volume de 580000m³, a uma profundidade entre 457 a 719m. A pressão no reservatório varia entre 4,5 e 7,4MPa.

O furo de captação e injeção tem 473m de profundidade, com 16 polegadas de diâmetro. Foram implementadas medidas para prevenir a entrada de sal no fluxo de ar.

Na Tabela 2 são apresentadas as principais características das centrais de Huntorf e McIntosh para comparação.

Tabela 2 - Comparação princípios de operação entre as duas centrais de CAES existentes (Steta, 2010).

	Huntorf	McIntosh
Promotor	Brown-Boveri (ABB)	Dresser - Rand
Investimento (\$2002)	116M(400/kWe)	45.1M(410/kWe)
Entrada em Funcionamento	Dezembro 1978	Junho de 1991
Produção		
Turbina (MW)	290	110
Compressor (MW)	60	55
Tempo de Produção (h)	3	26
Compressão/produção	4	1.6
Reservatório		
Número de Cavernas	2	1
Geologia	Cavidade Salina	Cavidade Salina
Volume da cavidade (m³)	310000	560000
Combustível	Gás	Gás/Fuel Óleo
Fluxos de ar		
Fluxo de ar Compressão (kg/s)	108	94
Fluxo de ar expansão (kg/s)	417	157
Turbina de Alta pressão		
Pressão entrada (bar)	46	43
Temperatura entrada (°C)	537	537
Turbina de Baixa pressão		
Pressão entrada (bar)	11	15
Temperatura entrada (°C)	871	871
Taxa de calor (kJ/kWh PCS)	5870	4330
Disponibilidade	90%	95%
Fiabilidade no arranque	99%	99%
Consumo/produção elétrico	0,82 KW _{in} /kW _{out}	0,75 KW _{in} /kW _{out}

Os parâmetros de operação destas duas centrais são muito semelhantes, sendo de destacar a elevada fiabilidade no arranque e a disponibilidade que estas centrais dispõem. As maiores diferenças são o volume das cavidades e a taxa de calor inferior na central de McIntosh, devida à existência de um recuperador de calor.

2.2.2. Centrais projetadas

Existem vários projetos que pretendem implementar centrais CAES, principalmente nos Estados Unidos da América. Na tabela 3 são apresentados alguns dos projetos em desenvolvimento.

Tabela 3 - Algumas centrais de CAES projetadas nos E.U.A. (EPRI, 2013).

Promotor	Tipo de armazenamento
Austin energy	Cavidade Salina
Dakota Salts	Cavidade Salina
First Energy	Mina subterrânea de calcário
KCP&L	Aquífero poroso/Antigo reservatório de gás
NPPD	Aquífero poroso/Antigo reservatório de gás
NYPA	Estrutura salina, aquífero poroso e superfície
NYSEG	Estrutura salina
NYSERDA	Estrutura salina, aquífero poroso e superfície
PG&E	Aquífero poroso/Antigo reservatório de gás
SMUD	Aquífero poroso/Antigo reservatório de gás
Tri-State	Aquífero poroso/Antigo reservatório de gás
Xcel	Aquífero poroso/Antigo reservatório de gás

Norton

A central CAES de Norton, no estado do Ohio, EUA, é um projeto da FirstEnergy que pretende converter uma mina subterrânea abandonada de calcário em reservatório de ar comprimido, possibilitando uma potência de 800 MW com possível expansão para 2700MW. A mina dispõe de 9600000 m³ para armazenamento e pode suportar pressões entre 5,5 e 11MPa. O desenho da central será semelhante ao da central de McIntosh.

Dakota Salts

A empresa mineira Dakota Salts pretende aproveitar a produção eólica do Dakota do Norte e as minas de sal e de compostos de potássio já existentes na região para desenvolver uma central de CAES (Dakota Salts,2011).

SMUD (Sacramento Municipal Utilities Distric)

A SMUD está a avaliar dois locais para a implementação de um reservatório de ar comprimido no estado da Califórnia, EUA., um reservatório de gás natural explorado e um aquífero de água não potável. É pretendido criar um reservatório que permita o armazenamento sazonal de energia, produzindo 250MW durante 160 a 240h.

Texas Dispatachable Wind

Este projeto, promovido pela General Compression, constituído por uma turbina eólica, um sistema de compressão de ar, uma cavidade de armazenamento será implementado no oeste do Texas e terá a capacidade de produzir 2MW durante 250h. Esta central não utilizará combustíveis fósseis, utilizando água para armazenar a energia térmica.

Matagorda

A APEX Matagorda Energy Center, LCC pretende construir uma central de CAES com a capacidade de 317 MW durante 100 horas, no estado do Texas (APEX, 2012). O reservatório será criado por dissolução de uma formação salina, conhecida por Domo de Markham. Será utilizado gás natural como combustível, o equipamento de compressão e expansão será fornecido pela Dresser-Rand. É pretendido que a central tenha um bom comportamento a cargas parciais.

Neste estado do Texas tem existido um grande crescimento da produção de energia eólica que tem sobrecarregado a rede elétrica existente (Succar e Williams, 2008) e a central de Matagorda pretende auxiliar a produção de energia eólica permitindo o armazenamento quando há vento e a geração quando não há.

Pacific Northwest region

O Pacific Northwest National Laboratory (McGrail *et al.*, 2013) analisou a potencialidade de implementar uma central de CAES na região para armazenar a energia produzida pelo vento num reservatório poroso. Determinou dois locais com as características necessárias para armazenar ar comprimido para a produção de energia. O local de Columbia Hill onde é possível implementar uma central de CAES convencional com 177MW de potência com armazenamento numa estrutura anticlinal de um aquífero poroso. O segundo local identificado, designado por Yakima Minerals, conjuga uma central de CAES com a energia geotérmica e o calor produzido durante a compressão para aquecer o ar comprimido, não sendo utilizado a queima de combustíveis (Figura 13). O ar será armazenado num anticlinal profundo com elevada permeabilidade.

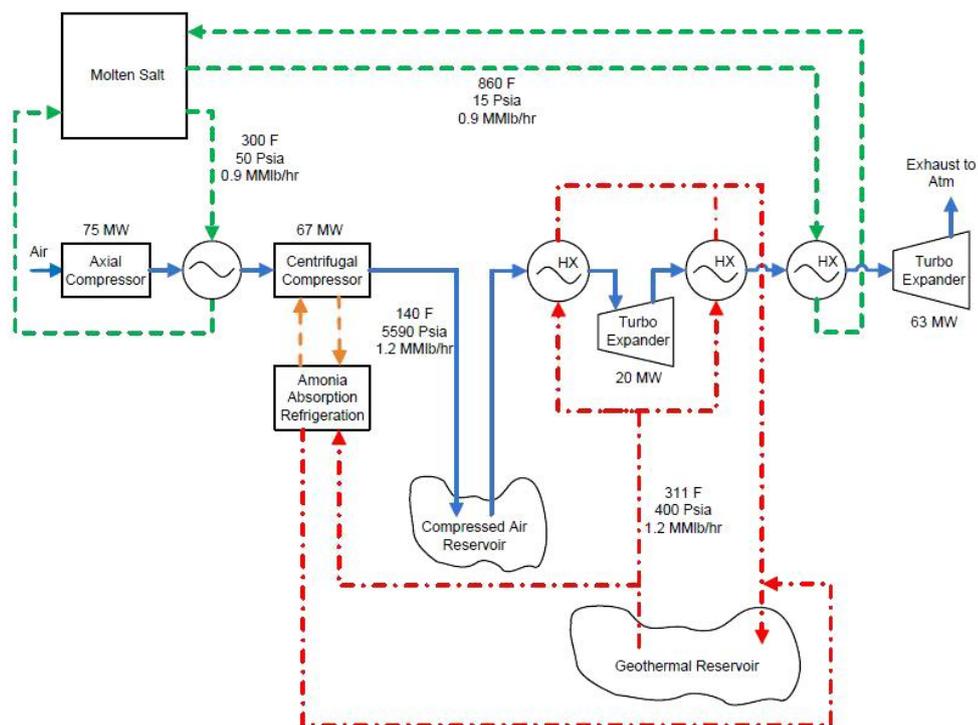


Figura 13 - Representação esquemática da central de Yakima Minerals com integração de energia geotérmica (McGrail, 2013).

ADELE - adiabatic compressed air energy storage (CAES) for electricity supply.

Projeto iniciado em 2010 para construir uma central AA-CAES (Advanced Adiabatic) na Alemanha, promovido pela RWE Power em parceria com a General Electric e outras empresas.

Este projeto pretende implementar a primeira central de AA-CAES em que o calor produzido durante a compressão será armazenado e posteriormente utilizado no processo de expansão (Figura 14). O ar será comprimido até 10 MPa atingindo uma temperatura superior a 600°C, e posteriormente ficando o calor armazenado no reservatório de energia térmica e o ar comprimido armazenado em cavidades salinas a uma pressão de 7MPa. Durante a fase de produção o ar que sai do reservatório é aquecido recorrendo à energia térmica armazenada e é expandido na turbina com 90MW de potência.

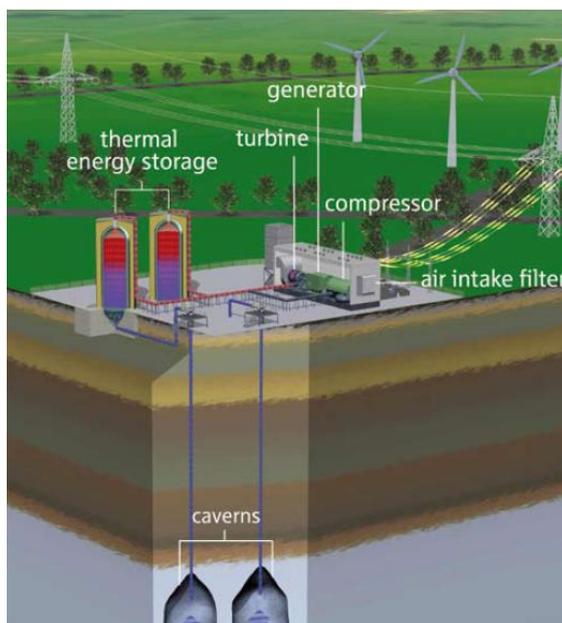


Figura 14 - Representação esquemática do Projeto ADELE (ADELE, 2010)

Sunagawa Coal Mine

Este projeto experimental de uma central piloto de CAES a funcionar desde 1990, com uma potência de 2MW, utiliza como reservatório de ar comprimido uma antiga mina de carvão subterrânea na cidade de Kami-sunagawa no Japão. O ar é armazenado num túnel com 57m de comprimento e 5,8 m de diâmetro, impermeabilizado por uma espessura de 0,6m de betão e geotêxtil.

2.2.3. Projetos abandonados

NYSEG

Neste projeto a NYSEG, subsidiária da Iberdrola, pretendia implementar uma central de CAES de 150MW durante 10h na cidade de Reading, no estado de Nova-York (NYSEG, 2011). A cavidade de armazenamento seria desenvolvida numa estrutura salina localizada a 730m de profundidade (NYSEG, 2011).

Esta central de CAES faria de um projeto de demonstração de redes elétricas inteligentes no estado de Nova York (DOE, 2013)

Após os estudos realizados a companhia promotora decidiu abandonar o projeto devido aos custos da construção da cavidade, às condições do mercado energético e ao baixo custo da eletricidade produzidas nas centrais a gás natural (NYSEG, 2011).

Iowa Stored Energy Park

O Iowa Stored Energy Park foi um projeto de 270 MW proposto para a região de Des Moines e deveria estar em funcionamento em 2015 (Schulte *et al.*, 2012). Esta central seria inovadora e única por utilizar um aquífero poroso como reservatório de ar comprimido associado à produção de energia eólica (Succar e Williams, 2008).

Foram analisadas várias estruturas geológicas no estado de Iowa contudo, a estrutura que nos estudo prévios pareceu mais favorável não se revelou adequada para a implementação do projeto. A baixa porosidade e permeabilidade do aquífero identificado, assim como a sua pressão ser inferior à necessária para operar uma central de 135MW foram as principais dificuldades encontradas, tendo o projeto sido abandonado devido a limitações geológicas (Schulte *et al.*, 2012).

2.3. Sistemas de CAES e redes elétricas

Os sistemas de CAES permitem uma melhor gestão das cargas da rede elétrica através da alteração de cargas pelo armazenamento de energia em períodos de vazio e fornecimento em períodos de pico (Figura 15), e da regulação da frequência através do funcionamento a carga parcial.

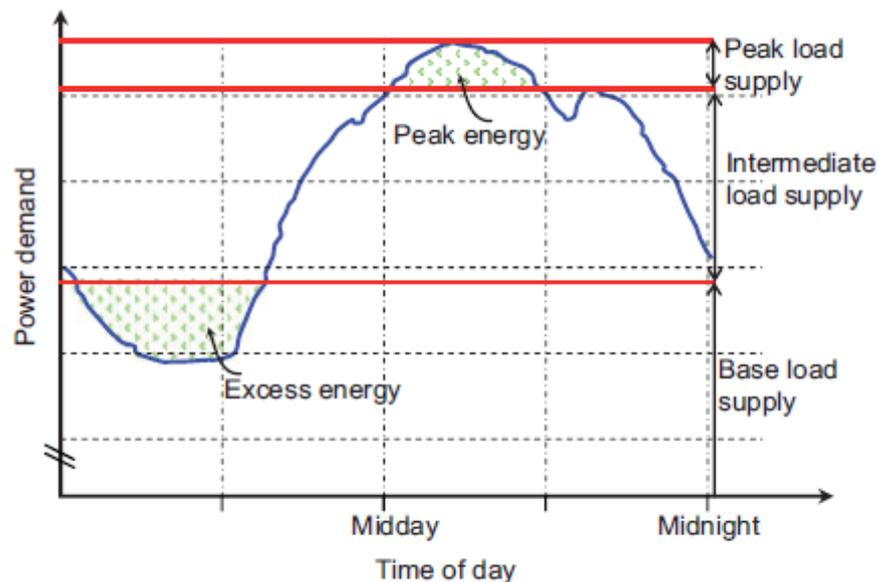


Figura 15 - Diagrama de cargas típico de um sistema CAES (Khushnir *et al.*, 2012).

O relatório de Gyuk (2003) indica como os sistemas de CAES podem interagir com a rede elétrica, de salientar:

- ▶ Funcionamento como condensador síncrono para corrigir o fator de potência, quando o compressor e a turbina estão desengrenados e o motor/gerador está sincronizado com a rede elétrica;
- ▶ A entrada em produção rápida e a elevada eficiência a carga parcial permite o funcionamento como reserva energética circulante. A possibilidade do compressor colocar e retirar cargas da rede duplica essa capacidade;
- ▶ Reserva suplementar de energia pela produção elétrica da turbina. A possibilidade do compressor colocar e retirar cargas da rede duplica essa capacidade;
- ▶ Gestão entre a eletricidade de pico e de vazio;
- ▶ Absorver a energia em excesso na rede através do funcionamento do compressor em períodos onde o consumo diminui rapidamente.

As redes elétricas tendem a ser cada vez mais inteligentes, existindo vários projetos em todo o mundo de redes elétricas inteligentes. Esta inovação das redes elétricas possibilita a melhor gestão de todos os componentes da rede e a introdução de um sistema de armazenamento de energia na rede favorece o seu desempenho e o próprio sistema de armazenamento de energia.

Outro contributo que o sistema CAES pode dar para o bom funcionamento da rede elétrica é o potencial de prevenir o congestionamento na transmissão de eletricidade. Assim um sistema de CAES pode armazenar a energia quando a rede elétrica está congestionada e fornecer a energia quando a rede está disponível.

Como o vento ou o sol são um recurso regional, quando está disponível num local muito provavelmente também está disponível em todos os locais próximos sendo a produção dessa região elevada, o que pode causar problemas de congestionamento da rede elétrica. A implantação das centrais de CAES perto dos centros produtores de energia por FER permite de um modo mais eficiente armazenar energia quando o recurso está disponível e fornecer energia quando o recurso renovável não está disponível.

2.4. Sistemas de CAES e as energias renováveis

A produção de eletricidade por FER - eólica, solar, marítima e de fio-de-água - só é possível quando o recurso está disponível e muitas vezes a produção está desfasada do consumo. Esta variabilidade e intermitência características são grandes obstáculos à maior produção de energia elétrica por fontes renováveis. A possibilidade de armazenar energia permite ultrapassar esses obstáculos.

Existem vários estudos que demonstram a complementaridade entre a produção de energia por Fontes Renováveis e o CAES. Succar (2008) indica que a CAES tem várias características necessárias para transformar a energia eólica na base de produção de eletricidade. Destacando a rapidez no arranque, entre 10 a 12 minutos, e a eficiência a cargas parciais, a central de McIntosh tem uma taxa de calor de 4330 kJ/kWh (PCI) com a carga total de 4750 kJ/kWh (PCI) para uma carga de 20% (Succar, 2011) como características adequadas para os sistemas de CAES para armazenar a energia eólica.

Em Simmons *et al.* (2010) foram avaliados vários cenários de utilização de um sistema de CAES aliado à produção de energia fotovoltaica, demonstrando que um sistema de CAES associado a uma central fotovoltaica traz benefícios económicos, tanto para um armazenamento diário como sazonal da energia.

Na produção elétrica com uma contribuição considerável de energia eólica, como é o caso de Portugal, para compensar diferenças entre a geração e o consumo, existe uma reserva redundante de energia, a capacidade instalada é superior ao consumo. Esta reserva redundante de energia é constituída pelos centros electroprodutores de arranque rápido - centrais a gás natural, centrais hidroelétricas - que são colocadas ou retiradas de produção quando existem diferenças entre o consumo e a produção.

Segundo a ERSE (2012), em Portugal, no ano de 2011, a potência instalada foi de 18905 MW e a potência máxima anual foi de 9192MW, assim 51% da capacidade instalada não é utilizada. O armazenamento de energia permite diminuir a reserva redundante de energia.

2.5. Tipo de reservatórios geológicos adequados para a tecnologia CAES

A principal motivação para utilizar formações geológicas como reservatórios de sistemas de CAES é a possibilidade de armazenar grandes quantidades de ar comprimido a baixo custo.

O reduzido impacto na paisagem, a área de superfície de solo necessária também representam mais-valias para utilizar estruturas geológicas.

O volume, pressão, profundidade, porosidade, permeabilidade e confinamento das formações geológicas subterrâneas representam condicionamentos importantes para o armazenamento de ar comprimido. As formações adequadas para o armazenamento subterrâneo de ar comprimido são, de acordo com vários autores, divididas em três categorias: estruturas salíferas, aquíferos detríticos e rocha maciça.

Na tabela 4 são apresentados os custos de desenvolvimento do reservatório subterrâneo para um sistema CAES consoante o tipo de formação geológica. O reservatório em aquíferos é aquele que tem menores custos mas requer estudos detalhados das condições geológicas do aquífero. A formação de cavidades em formações salinas possui custos relativamente reduzidos e é uma técnica bastante utilizada, o que torna este tipo de formações geológicas os mais atrativos para os sistemas de CAES.

Tabela 4 - Custos da cavidade subterrânea consoante o tipo de estrutura geológica e segundo duas referências bibliográficas.

	Custo estimado	
	Gyuk (2003)	Succar and Williams (2008)
Cavidade salina mineração por dissolução	\$1/kWh	\$2/kWh
Rocha sólida Escavada e minas existentes	\$30/kWh	\$30/kWh
Aquífero	\$0,1/kWh	\$0,11/kWh
Minas de calcário ou carvão abandonadas	\$10/kWh	

O armazenamento de ar comprimido em estruturas geológicas subterrâneas requer condições muito semelhantes ao armazenamento subterrâneo de gás natural. O conhecimento e experiência adquirida para o armazenamento de gás natural pode ser transferido para os sistemas de CAES.

As principais diferenças entre o armazenamento geológico de gás natural e ar comprimido são as características físicas e químicas entre o ar e o gás natural, a introdução de oxigênio no aquífero que conduz à ocorrência de oxidação, a sazonalidade do armazenamento de gás natural por contraponto ao armazenamento de ar comprimido que pode ter ciclos diários com conseqüentes condições de pressão, temperatura e humidade a sofrerem alterações mais frequentes (Allen *et al.*, 1983).

2.5.1. Armazenamento em aquíferos detríticos

O armazenamento em rochas sedimentares detríticas representa a solução menos dispendiosa para armazenar ar comprimido (tabela 4) e estas formações são muito frequentes, o que torna este tipo de reservatório bastante interessante para CAES. Contudo, devido à proteção de aquíferos de água potável, as formações sedimentares que podem ser utilizadas são reservatórios esgotados de gás natural e petróleo ou aquíferos de água não potável (Swensen e Potashnik, 1994).

De notar que neste trabalho a designação de aquíferos detríticos é referida a formações geológicas que possuem porosidade intergranular.

As estruturas adequadas em aquíferos detríticos devem conter um reservatório permeável (o aquífero), uma camada superior impermeável com uma estrutura confinante que impeça a movimentação do ar (o selante ou *caprock*). Estas estruturas são semelhantes às estruturas (armadilhas) onde se encontram hidrocarbonetos aprisionados, tais como domos, descontinuidades, discordâncias, anticlinais e falhas. Segundo Allen *et al.* (1983) as estruturas mais adequadas para armazenar ar comprimido são anticlinais como ilustrado na Figura 16.

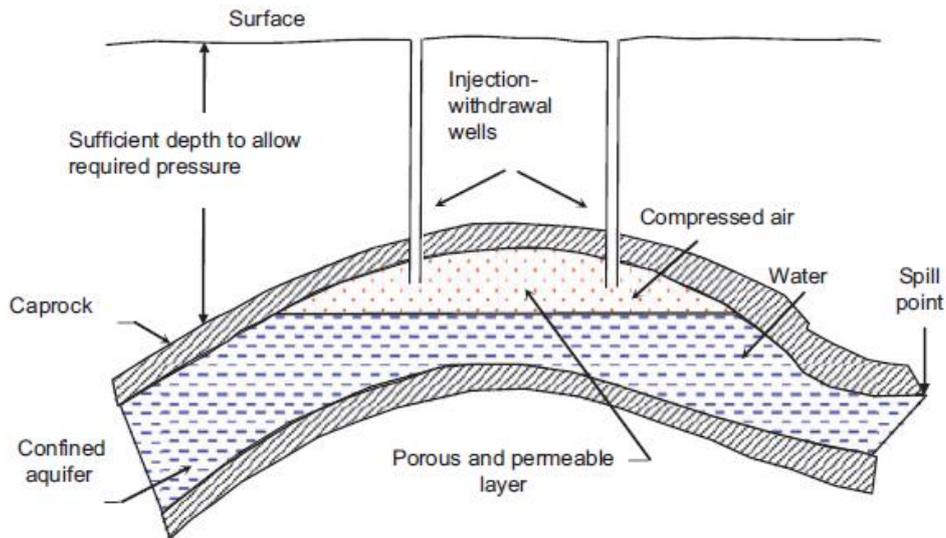


Figura 16 - Representação esquemática de um reservatório CAES em aquífero detrítico (Kushnir, 2012)

Neste tipo de formações é criada uma bolha de ar através da injeção de ar a uma pressão superior à pressão hidrostática original, o que provoca o deslocamento da água subterrânea. Wiles e McCann (1983) no seu relatório sobre a utilização do aquífero de Pittsfield (Ilinóis, EUA) para o armazenamento de ar comprimido modelaram o desenvolvimento de uma bolha de ar.

A Figura 17 mostra a progressão da fronteira entre o ar e a água durante o período de injeção de ar comprimido que durou 60 dias consecutivos.

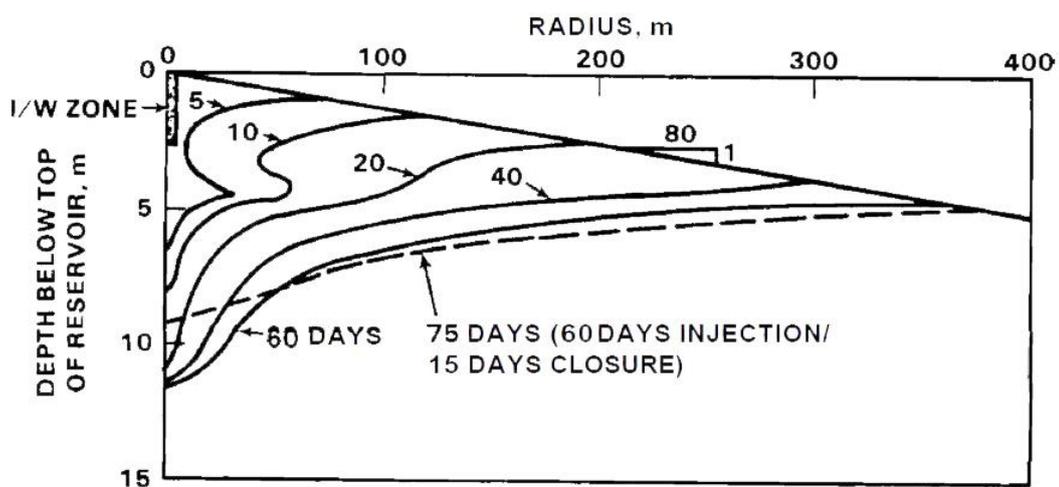


Figura 17 - Desenvolvimento de uma bolha de ar no aquífero de Pittsfield (Wiles e McCann, 1983). As curvas representam a posição da interface ar-água para diferentes períodos de tempo (em dias).

No início da injeção de ar comprimido a bolha de ar tem uma forma esférica, com uma acentuada componente vertical. Com o passar do tempo essa componente vertical diminui à medida que as pressões se equilibram, tornando a bolha bastante achatada. A irregularidade verificada durante os primeiros dias é devida à existência de uma camada mais permeável. Wiles e McCann também verificaram que o crescimento da bolha de ar é função da permeabilidade horizontal. Na tabela 5 é possível verificar os valores de permeabilidade de aquíferos detríticos adequadas para CAES.

Na Figura 17 é possível verificar a estabilização da pressão para longos períodos de tempo (linha a tracejado) que representa o funcionamento do aquífero como reservatório em pressão constante e volume variável para longos períodos de tempo, e como reservatório a pressão variável para períodos curtos (Allen et al., 1983).

Considerando o reservatório subterrâneo, a pressão da bolha de ar deverá ser igual à pressão hidrostática original acrescida de 50% da pressão limite da camada superior impermeável ou igual a 12kPa/m de profundidade (Allen et al., 1983). Esta característica é específica do armazenamento de ar comprimido em aquíferos e condiciona o funcionamento de todo o sistema de CAES pois a pressão da bolha de ar também deve estar compreendida entre a pressão máxima fornecida pelo compressor e a pressão mínima necessária na turbina.

No processo de extração de ar, Wiles e McCann(1983) indicam que a que entrada de água na captação, quer seja água residual ou proveniente da zona saturada, define em grande medida o fluxo de extração, sendo necessários fluxos de ar reduzidos para a sua prevenção.

A permeabilidade do aquífero determina os fluxos de ar e água no reservatório, sendo uma das características mais importantes na caracterização do aquífero. São favoráveis aquíferos com elevada permeabilidade que permita o menor número possível de furos e elevado fluxo de ar.

A porosidade do aquífero representa o volume disponível para armazenar o ar. Succar e Williams (2008) indicam que o aquífero deve ter um volume de vazios acima do nível mínimo (V_R) igual ou superior ao volume necessário para o sistema CAES operar (V_S). O nível mínimo corresponde ao volume de vazios do volume da estrutura aquífera que está confinado, obtido pela área em planta do limite de confinamento e da espessura total da formação aquífera (H) (figura 18).

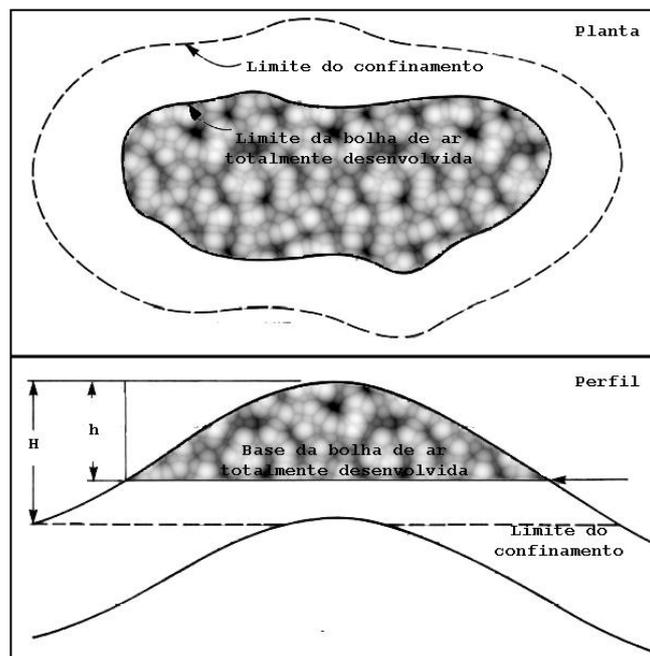


Figura 18 - Representação esquemática dos parâmetros de volume e fechamento de uma estrutura aquífera, modificado de (Succar e Williams 2008).

Esta relação entre (V_R/V_S) é apresentada na tabela 5, onde também são categorizadas algumas propriedades que indicam a aptidão de um aquífero para um sistema de CAES.

O grau de confinamento da estrutura anticlinal é obtido pela relação entre a espessura total da formação aquífera (H) e a espessura da bolha de ar totalmente desenvolvida (h). Este parâmetro é utilizado para avaliar o número de furos necessários para que o fluxo de ar ocorra sem perturbações de entrada de água nas captações. A sua relação ideal ocorre quando a bolha de ar totalmente desenvolvida utiliza a espessura total da formação aquífera ($h/H=1$)

Tabela 5 - Principais características dos aquíferos para armazenar ar comprimido (Succar e Williams, 2008)

Avaliação	1 Não usável	2 Marginal	3 Suficiente	4 Bom	5 Excelente
Permeabilidade (md)	<100	100-200	200-300	300-500	>500
Porosidade (%)	z7	7-10	10-13	13-16	>16
Volume Útil do reservatório (V_R/V_S)	<0,5		0,5-0,8 ou >3,0	0,8-1,0 ou 1,2-3,0	1,0-1,2
Grau de fechamento (h/H)	<0,5		0,5-0,74	0,75 - 0,95	0,95-1,0
Profundidade do topo do reservatório	<137 ou >760	140-170	170-260 ou 670-760	260-430 ou 550-670	430-550
Pressão do reservatório (bar)	<13 ou >69	13-15	15-23 ou 61-69	23-39 ou 50-61	39-50
Tipo de reservatório	Muito descon- tinuo	Argilitos dolomites	Domos Argilitos dolomites	Leques fluviais arenitos	Camadas de Arenitos
Hidrocarbonetos residuais	>5%		1-5%		<1%
Fugas na camada impermeável	Fugas eviden- tes	Sem informaç ão	Sem fugas comprovadas com testes de bombeamento		
Permeabilidade camada superior (md)			>10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	
Pressão limite camada superior (bar)			11-55	>55	
Espessura da camada impermeável (m)			<6		>6

A profundidade do aquífero determina a sua pressão hidrostática, que deve ainda ser a suficiente para permitir funcionamento das turbomáquinas. Quanto mais profundo for o aquífero maior poderá ser a pressão do reservatório, mas também mais elevados serão os custos na perfuração e as perdas de energia ao longo dos furos.

No caso da utilização de reservatórios de petróleo ou gás natural esgotados o volume de hidrocarbonetos num reservatório tem que ser reduzido de modo a evitar perigos de explosão.

A camada impermeável (selante ou *caprock*) não deve permitir as fugas de ar do reservatório, não devendo assim possuir falhas permeáveis. Note-se que nas camadas selantes argilosas podem surgir fendas por dessecação e as alterações de temperatura também podem provocar fugas de ar.

A pressão limite da camada superior indica a pressão máxima que a camada impermeável consegue suportar sem que exista a transmissão de fluido através dela e é um dos parâmetros determinantes da pressão a atingir no reservatório. Segundo Allen *et al.* (1983) as formações geológicas que possuem maiores pressões limite são *shales* e camadas carbonatadas que podem apresentar valores de 20 MPa. Allen *et al.* (1983) indica ainda que uma camada impermeável espessa sobreposta por outras camadas impermeáveis traduz um complexo de armazenamento bastante desejável.

Adicionalmente à tabela 6, Allen *et al.* (1983) indica uma espessura mínima de 10m para camada geológica do reservatório.

Segundo o relatório de Schulte *et al.* (2012) os principais desafios para utilizar um aquífero poroso como reservatório de ar comprimido são: *i*) conjugar os ciclos de pressão no reservatório com os requisitos das turbomáquinas; *ii*) a capacidade da bolha transmitir o ar (permeabilidade); *iii*) a rarefação do oxigénio; *iv*) questões de oxidação; *v*) a integridade da camada selante, e *vi*) a sua integridade estrutural na presença de falhas.

Apesar dos estudos sobre o armazenamento de ar comprimido em aquíferos e dos paralelismos com o armazenamento de gás natural, ainda não foi comprovado que as formações porosas possam servir de reservatório (Gyuk, 2003). O projeto do Iowa Energy Park que pretendia realizar um sistema de CAES com um reservatório detrítico foi abandonado devido à baixa permeabilidade do aquífero identificado (Schulte *et al.*, 2012).

2.5.2. Reservatórios em estruturas salíferas

As duas centrais de CAES existentes utilizam cavidades em formações salíferas para armazenar o ar comprimido. As cavidades que funcionam como reservatório podem ser minas de sal-gema esgotadas ou escavadas através do processo de dissolução com água.

Neste trabalho foi adotada a nomenclatura de estrutura salífera para as formações geológicas que possuem uma elevada concentração de sal-gema, quer tenham a forma de diapiros, domos ou camadas.

Este tipo de formações salíferas tem características intrínsecas que as tornam ótimas para armazenar ar comprimido tais como a viscosidade, que as tornam praticamente impermeáveis ao ar, a elevada resistência compressiva, enquanto as propriedades plásticas permitem a recuperação de pequenos danos e que seja facilmente escavada (Allen, 1982).

A estrutura salífera deve ter espessura, diâmetro e ser profunda o suficiente para sustentar a cavidade com as especificidades pretendidas. A tabela 6 reúne algumas das características principais para a instalação de um reservatório de ar comprimido em estruturas salíferas.

Tabela 6 - Propriedades das cavidades para armazenar ar comprimido. Compilado de Swensen e Potashnik (1994) e (Allen, 1982)

Propriedades da cavidade	Valores desejáveis
Profundidade (m)	183 - 914
Profundidade Máxima (m)	1500
Distância entre a parede da cavidade e o limite da estrutura geológica (m)	100 a 150 ou triplo do diâmetro da cavidade
Espessura acima do topo da cavidade	150m ou maior que 2,5 vezes o vão suspenso da cavidade
Vão suspenso máximo (m)	60
Relação altura diâmetro	<5

A Figura 19 ilustra um reservatório de ar comprimido numa estrutura salífera com a forma padrão de uma cavidade formada por dissolução. A existência de uma camada insolúvel sobrejacente à formação salífera é desejável.

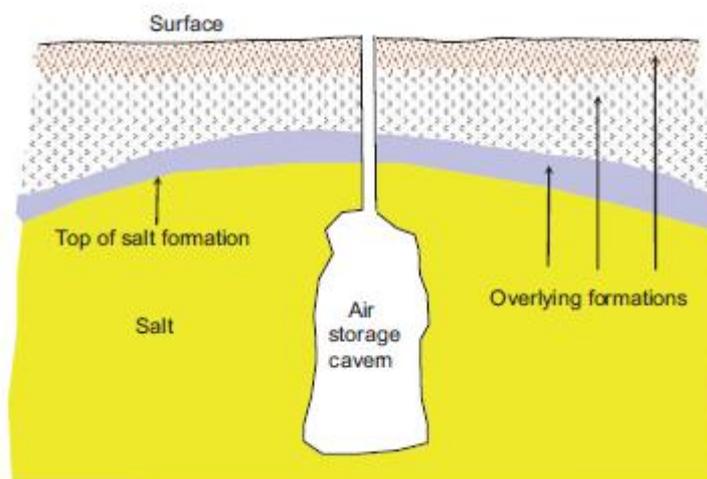


Figura 19 - Cavidade para armazenamento de ar comprimido em estrutura salífera (Khushnir et al.2012)

A pressão no reservatório deverá estar situada entre a pressão máxima fornecida pelo compressor e a pressão mínima determinada pela turbina, e deve ser conjugada com a profundidade. Para esta última, pode ser utilizada a relação de 16,39kPa por metro de profundidade para estruturas salíferas homogêneas e 10,6kPa/m de profundidade para estruturas não homogêneas (Allen et al., 1982).

A temperatura do ar pode causar problemas de estabilidade na estrutura salina, pelo que a temperatura de entrada de ar deve ser inferior a 80°C (Allen et al., 1982).

A cavidade pode ser formada pelo processo de mineração por dissolução em que a água é bombeada para o interior da formação salina, dissolve a rocha salina e é retirada como salmoura. Neste processo a formação salina tem que conter um mínimo de 60% de sal e será necessário um volume de água de 7 a 10 vezes o volume da cavidade (Swensen e Potashnik, 1994). Allen et al. (1982) indicam um conteúdo de 95% de halite como ideal para a mineração por dissolução e segundo EPRI (1994) a formação salina deve ter um conteúdo mínimo de 60% de sal ao longo da espessura da cavidade.

A rejeição da salmoura resultante do processo de dissolução é uma questão importante na criação da cavidade e pode ter custos consideráveis. A solução pode ser a descarga no oceano, o seu aproveitamento na produção de sal e a injeção em aquíferos salinos profundos, sendo esta última a mais frequente (Swensen e Potashnik, 1994) e a penúltima a desejável.

Os equipamentos da central de CAES, tal como a turbina, são bastante sensíveis à presença de partículas de sal no fluxo de ar comprimido que pode originar a corrosão (Crotofino *et al.*, 2001) e alterar as condições da combustão. Devem ser tomadas medidas especiais para prevenir a entrada de partículas de sal no sistema de CAES e proteger os equipamentos de recolha de ar.

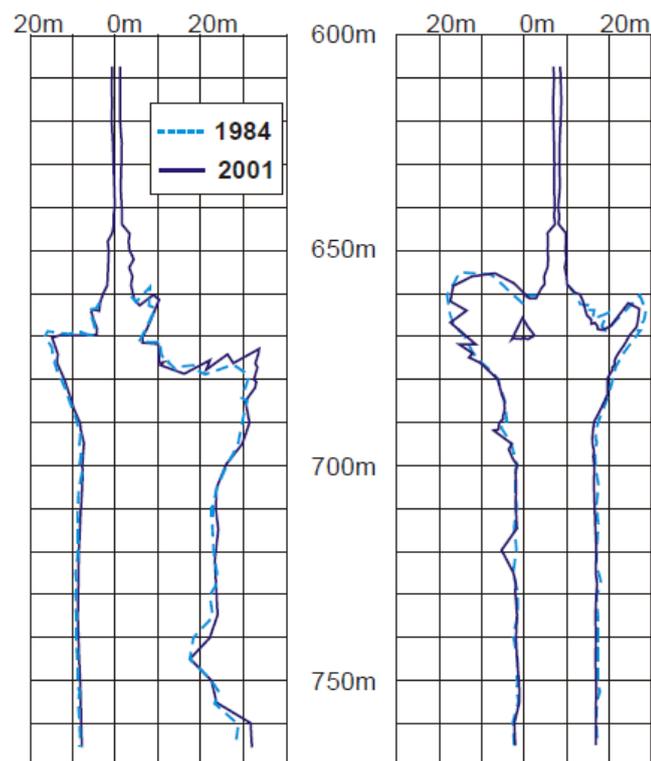


Figura 20 - Comparação entre as cavidades da central de Huntorf em 1984 e 2001. (Crotofino *et al.*, 2001)

A adequação de estruturas salíferas para armazenar ar comprimido é comprovado pela sua aplicação nas duas centrais de CAES operacionais. A Figura 20 mostra que não se verificaram praticamente alterações nas condições originais das cavidades da central CAES de Huntorf após 20 anos de trabalho (Crotogino *et al.*, 2001).

As cavidades em formações salíferas também são amplamente utilizadas no armazenamento de gás natural, a Europa possui cerca de 9×10^6 m³ de gás natural armazenado em cavidades formadas em estruturas salíferas (Gillhaus, 2007). Em Portugal também são utilizadas cavidades salinas para o armazenamento de gás natural na estrutura salífera situado em Carriço. Dadas as semelhanças entre o armazenamento de gás natural e o de ar comprimido, principalmente na formação do reservatório, é possível transferir as técnicas e tecnologias desenvolvidas para o CAES.

2.5.3. Reservatórios em rocha maciça

As rochas mais adequadas para armazenamento de ar comprimido em cavidades em rocha maciça são os granitos ou granodioritos, quartzitos, gnaisse, dolomitos e calcários (Allen, 1982a).

O armazenamento de ar comprimido pode ser efetuado em minas subterrâneas encerradas ou em cavidades formadas para esse fim. A escavação de uma cavidade em rocha dura é uma solução bastante dispendiosa (Swensen e Potashnik, 1994), tal como a conversão de uma mina abandonada para reservatório de ar comprimido, pois provavelmente terá que ser impermeabilizada.

Para formar uma cavidade destinada ao armazenamento de ar as rochas devem ser competentes, homogêneas, possuir elevada força estrutural e estabilidade. Estruturalmente não podem existir dobras, fraturas ou falhas nas rochas que impeçam a formação da cavidade. A rocha maciça tem que ser caracterizada por uma condutividade hidráulica inferior a 10^{-8} m/s e tem que suportar os ciclos consecutivos de temperatura e humidade sem diminuir a resistência da rocha.

A estrutura de rocha maciça deve ter as dimensões necessárias ao desenvolvimento da cavidade e estar entre 300 a 1500m de profundidade (Swensen e Potashnik, 1994).

Devido aos custos associados à criação de um reservatório na rocha dura o reservatório de um sistema CAES deverá operar em pressão constante, o que permite diminuir o volume a escavar. São indicadas por Allen (1982a) profundidade entre 750 m a 850 m e pressões de armazenamento compreendidas entre 7,35 e 8,33 MPa.

Kim *et al.* (2012) indica que as cavidades criadas em rocha maciça a pouca profundidade são passíveis de ser utilizadas como reservatório de ar, desde que seja utilizado betão de elevada resistência e um reforço adequado. Kim *et al.* (2012) determinaram que para uma cavidade, situada a uma profundidade de 100m revestida com betão, onde a permeabilidade do revestimento e rocha envolvente é inferior a $1 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ as fugas de ar são mínimas, inferiores a 1%.

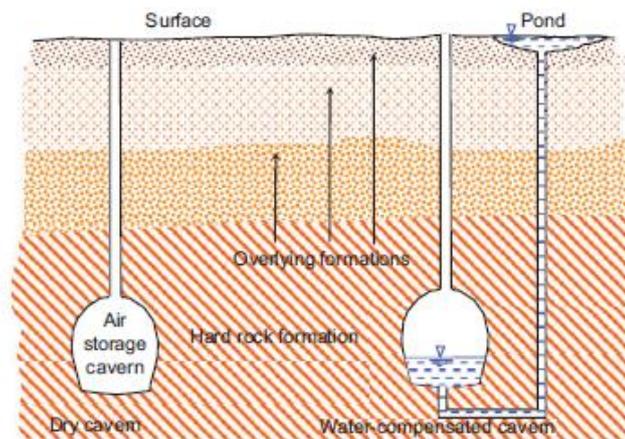


Figura 21 - Cavidade em rocha dura com pressão variável e pressão constante Khushnir *et al.* (2012).

2.6. Riscos Geológicos do CAES

O armazenamento de ar comprimido em estruturas geológicas pode conduzir a instabilidades na formação geológica que podem ter impacto à superfície e provocar danos.

A alteração das condições geológicas naturais, tais como campo de tensões, condições hidrogeológicas e condições térmicas, originadas pela instalação da cavidade ou bolha de ar comprimido podem causar a subsidência do solo.

Outro risco associado ao CAES é o aumento da microssismicidade causada quer pela alteração das condições naturais, quer pela injeção de fluidos com elevada pressão na estrutura geológica.

No armazenamento em aquíferos porosos reações geoquímicas, promovidas pela presença de oxigénio, podem alterar as propriedades estruturais do aquífero e provocar efeitos indesejados.

No armazenamento de ar comprimido em reservatórios de hidrocarbonetos existe o risco geológico de explosão provocada pela introdução de oxigénio num meio inflamável e pela piezoelectricidade.

2.7. Legislação Portuguesa aplicável ao CAES

Não existe legislação Portuguesa específica para sistemas de CAES.

Uma central de CAES terá que seguir a legislação sobre o Sistema Elétrico Nacional como os Decreto-Lei n.º 182/95 - de 27 de Julho, Decreto-Lei n.º 313/95 de 24 de Novembro, Decreto-Lei n.º 233/2004, de 14 de dezembro.

Para o armazenamento em aquíferos a Lei da Água (Lei 58/2005 de 29-Dezembro) indica que não se pode introduzir calor nos aquíferos.

A Portaria n.º 181/2012 de 8 de junho regula a atividade de pesquisa, projeto, construção e a exploração de cavidades em formações salíferas no território nacional para o armazenamento subterrâneo de gás natural, e que terá algumas similaridades com o armazenamento de ar comprimido.

3. Definição das estruturas geológicas adequadas para CAES em Portugal Continental

Nesta secção é apresentada a metodologia seguida para definir as formações geológicas e locais de maior potencial para a implementação da tecnologia CAES em Portugal Continental e a sua complementaridade com a produção de energia elétrica por fontes renováveis.

3.1. Metodologia e base de dados

A metodologia consistiu na implementação de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) que permitiu analisar as condições geológicas para armazenar ar comprimido em diferentes tipos de reservatórios (aquíferos, estruturas salíferas e minas) com as condições espaciais para implementação de uma central CAES (Figura 22). Assim, definiram-se as condições que devem estar reunidas para viabilizar a implementação de um sistema CAES. As secções seguintes descrevem em detalhe os critérios utilizados e os dados utilizados.

Inicialmente foram pesquisadas as estruturas geológicas que possam servir como reservatório de ar comprimido, foi avaliada a disponibilidade de superfície de terreno e a relação entre a superfície identificada e a produção de energia por fontes renováveis. Foram ainda avaliados outros critérios que condicionam a viabilidade de uma central de CAES, tais como a proximidade a gasodutos, a linhas de tensão e a fontes de água.

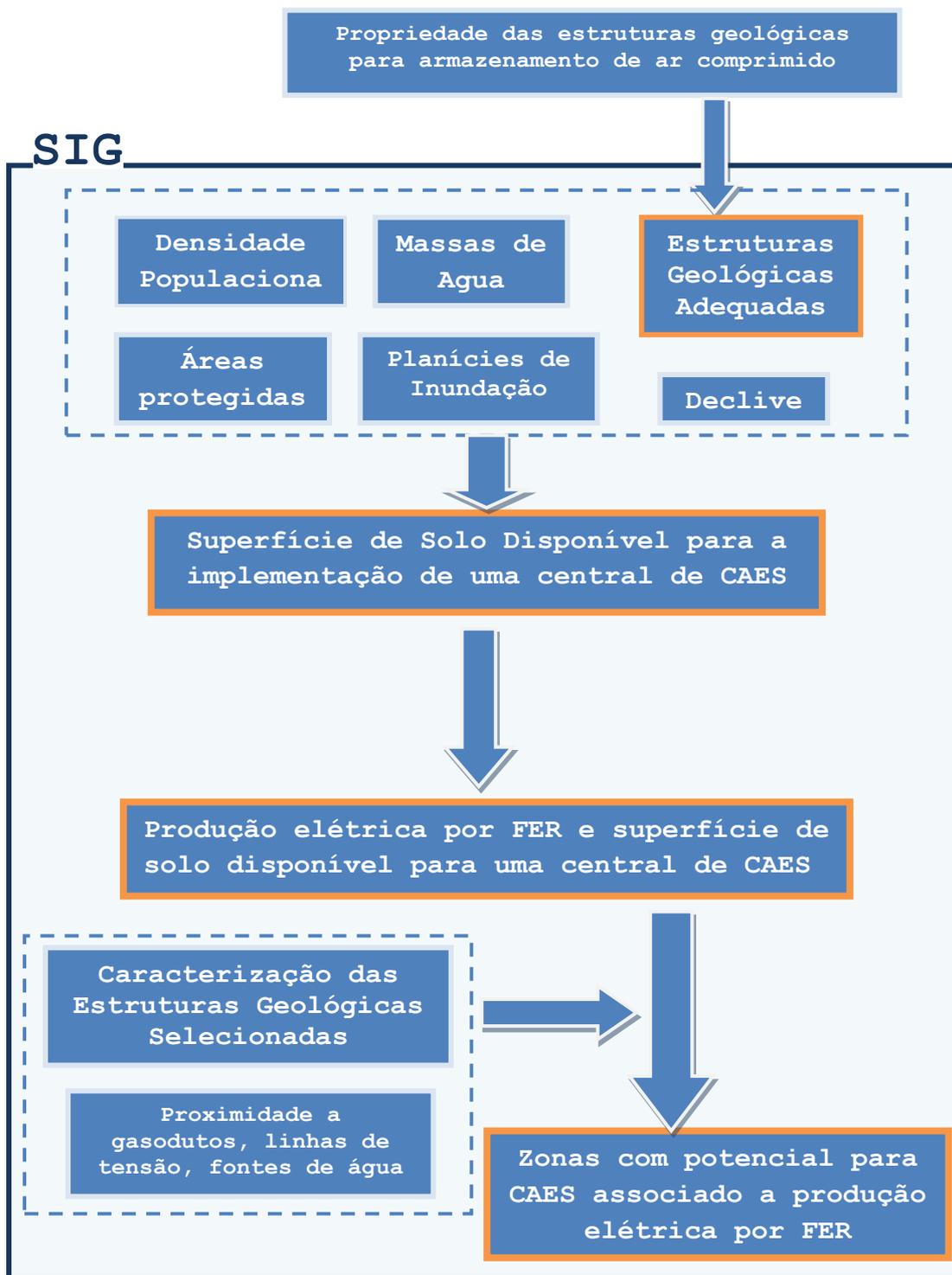


Figura 22 - Esquema da metodologia utilizada.

3.1.1. Dados de identificação de formações geológicas adequadas ao armazenamento de ar comprimido

De modo a identificar geograficamente as formações geológicas adequadas para o armazenamento de ar comprimido foram adotadas os critérios enunciados no ponto 2.5 (tabelas 5 e 6) para reservatórios em aquíferos detríticos, estruturas salíferas e rochas maciças.

Foi consultada informação e dados sobre a geologia de Portugal Continental nomeadamente diversas publicações científicas, registos de sondagens, cartas geológicas, perfis sísmicos para determinar quais as estruturas geológicas que cumprem os requisitos, compilando a informação através de um *software* de informação geográfica para representar geograficamente as formações e locais mais favoráveis para servirem de reservatório de ar comprimido.

Minas

Para identificar as minas subterrâneas abandonadas foi utilizada informação da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG, 2013) sobre minas subterrâneas abandonadas, da Empresa de Desenvolvimento Mineiro (EDM, 2013) sobre a recuperação ambiental de minas abandonadas e informação do Geoportal do LNEG (2013) para localizar ou confirmar a localização das minas (Figura 23).

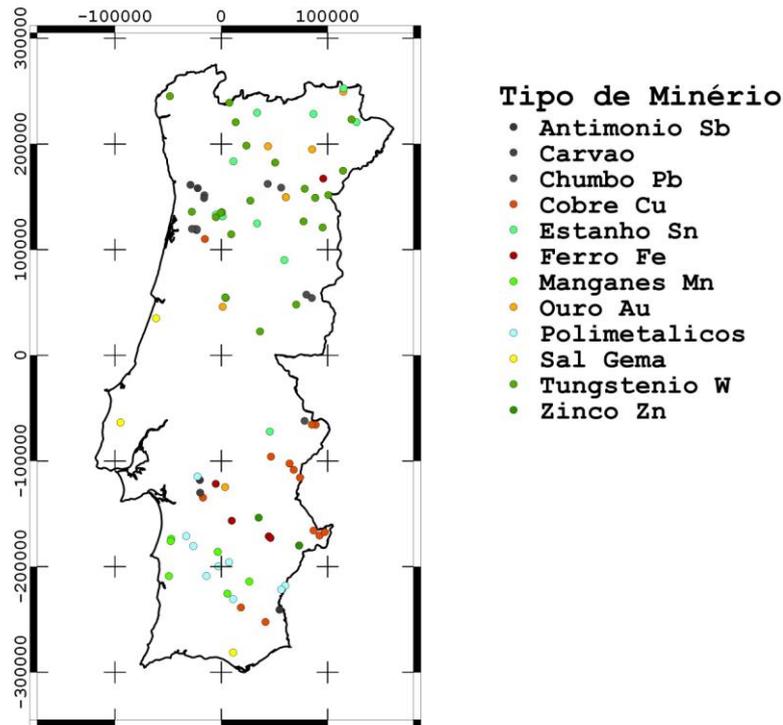


Figura 23 - Minas subterrâneas abandonadas em Portugal Continental (Figura em anexo página II).

Também foi efetuado o levantamento das minas de sal-gema em Portugal com base em informação do Geoportal do LNEG (2013). Estas minas, apesar de estarem em atividade, podem possuir cavidades totalmente exploradas e com potencial interesse para armazenar ar comprimido.

Aquíferos

A informação sobre os Sistemas de Aquíferos de Portugal Continental (Almeida *et al.* 2000) disponibilizada pelo Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos (SNIRH, 2013), apresentados na Figura 24, foi utilizada como informação de base para avaliar quais os aquíferos detríticos adequados para a contenção de ar comprimido de um modo seguro e eficiente. Também foram consultados os documentos de Diaz *et al.* (2013) e de Carvalho e Carvalho (2004) sobre aquíferos geotérmicos mais profundos.

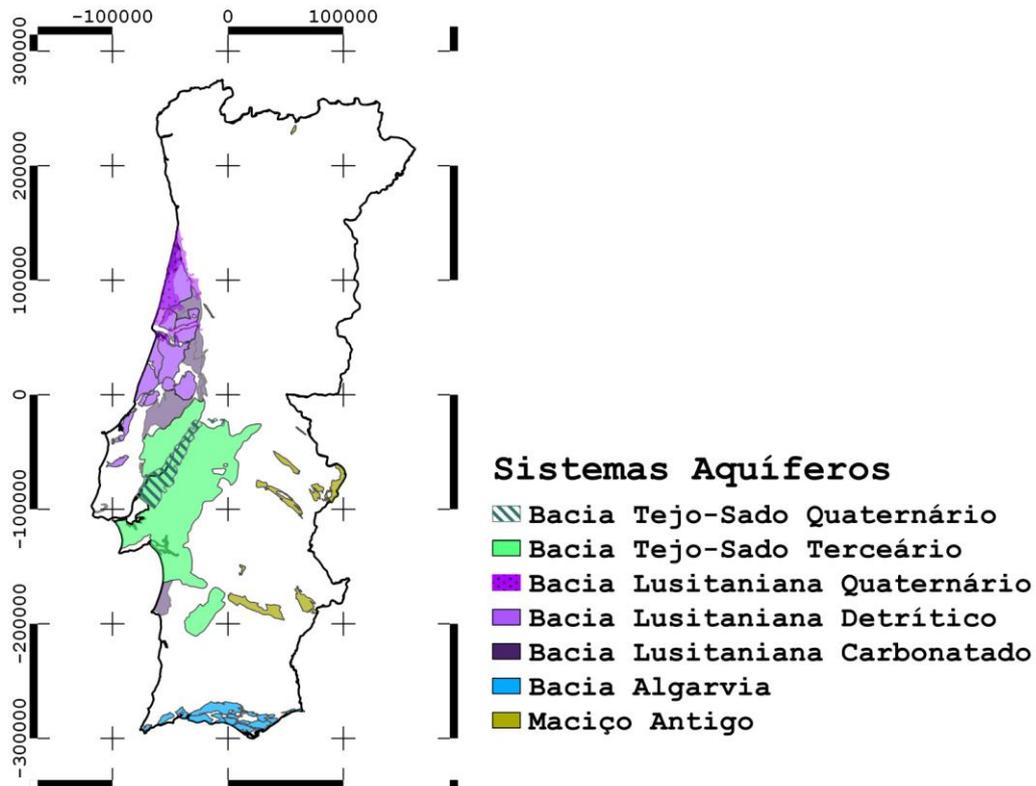


Figura 24 - Sistemas Aquíferos de Portugal Continental segundo unidade hidrogeológica (SNIRH, 2013) (Figura em anexo página III).

Esta informação foi filtrada de modo a incluir apenas aquíferos detríticos e que possuem um nível sobrejacente de muito baixa permeabilidade, uma camada selante ou *caprock*, que impossibilite a migração para a superfície do ar injetado devido ao gradiente de densidade entre o ar e a água que satura os potenciais reservatórios. Dos aquíferos selecionados foi avaliada a sua permeabilidade, profundidade, estrutura e qual a camada geológica que lhes serve de base. Foi verificado o comportamento das formações identificadas procurando zonas onde essas formações não constituam aquíferos de água potável, estejam às profundidades pretendidas e apresentem alguma estrutura passível de armazenar o ar comprimido, como um anticlinal.

Estruturas salíferas

Em Portugal as estruturas salíferas estão associadas à Formação de Dagorda constituída essencialmente por argilas e margas e evaporativos depositada durante o triásico superior e Jurássico Inferior. Nos locais em que os evaporitos apresentam maior importância, a existência de movimentos halocinéticos deu origem à formação de diapiros e domos salinos, dos quais foram representados, na Figura 25, os mais relevantes.

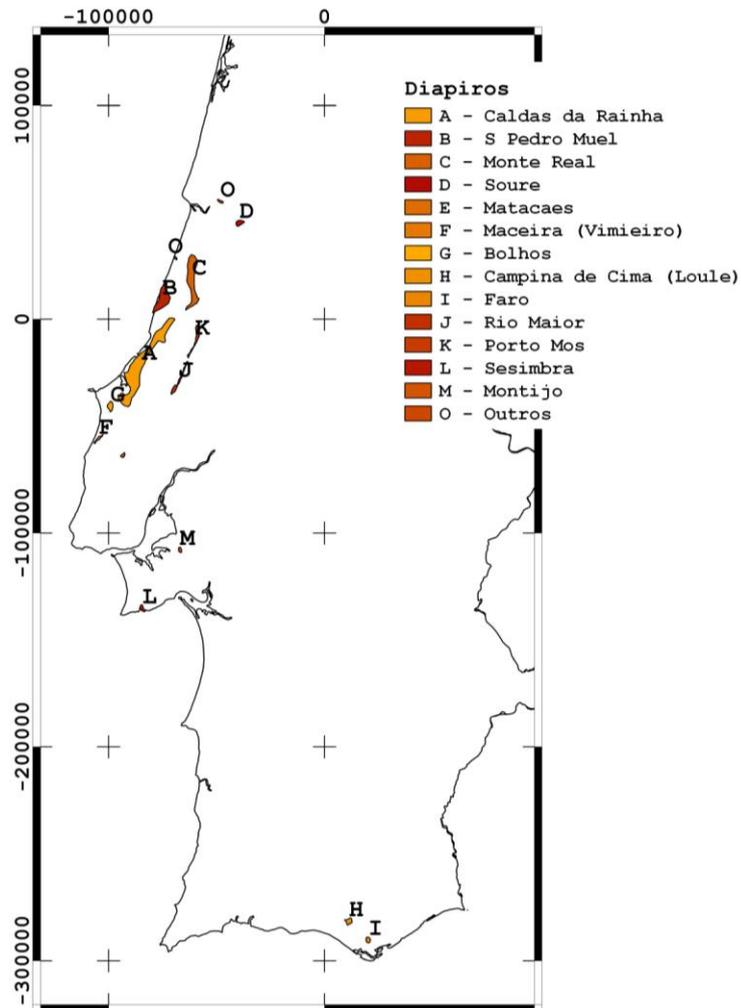


Figura 25 - Estruturas salíferas em Portugal Continental (Pereira et al., 2010) (Figura em anexo página IV).

A informação sobre a localização das estruturas salíferas foi retirada do Projeto KTEJO (Pereira et al., 2010) onde estas se encontram georreferenciadas.

3.1.2. Avaliação da disponibilidade de superfície de terreno

Utilizando o *software* Quantum GIS e a informação geográfica retirada das fontes descritas abaixo foi avaliada a disponibilidade da superfície de terreno para a implantação de uma central de CAES, seguindo a metodologia indicada por Mays *et al.* (2012). Estes autores sugerem que a localização de uma central de CAES depende principalmente da geologia, mas consideram os seguintes critérios de superfície para definir a localização de uma central de CAES:

- ▶ Densidade populacional inferior a 193 hab/Km²;
- ▶ Não existam massas de água (albufeiras, lagos, ribeiros) nem zonas húmidas;
- ▶ Não existam áreas protegidas (parques naturais);
- ▶ O declive do terreno seja inferior a 12% (7°);
- ▶ Risco de deslizamento de terras baixo;
- ▶ Não estejam numa planície de inundação de 100 anos;
- ▶ Distância inferior a 1 milha (1,6 Km) de uma estrutura geológica adequada para o armazenamento de ar comprimido.

No Quantum Gis foi criada uma camada para cada um dos itens indicados por Mays *et al.* (2012) e as diferentes camadas foram trabalhadas em formato matricial, atribuindo o valor de 1 às células que obedeciam aos critérios apresentados e de 0 às restantes (figura 26). Foi utilizada uma resolução de 30m. Para obter o mapa com a superfície disponível para a instalação de uma central de CAES foram multiplicadas todas as camadas individuais, obtendo o valor 1 nas áreas que cumprem todos os critérios.

A informação geográfica da densidade populacional de Portugal Continental foi obtida através da divisão do número de habitantes por freguesia pela área de cada freguesia, utilizando os dados do INE (2013), com base no censo 2011. Essa informação foi *rasterizada* e foram selecionadas as zonas onde a densidade populacional é inferior a 193hab/km². Complementarmente foi utilizada a informação do projeto CORINE Land Cover (Caetano *et al.*, 2009), que mostra a ocupação da superfície do solo de Portugal Continental, retirando os atributos que correspondem a Territórios Artificializados.

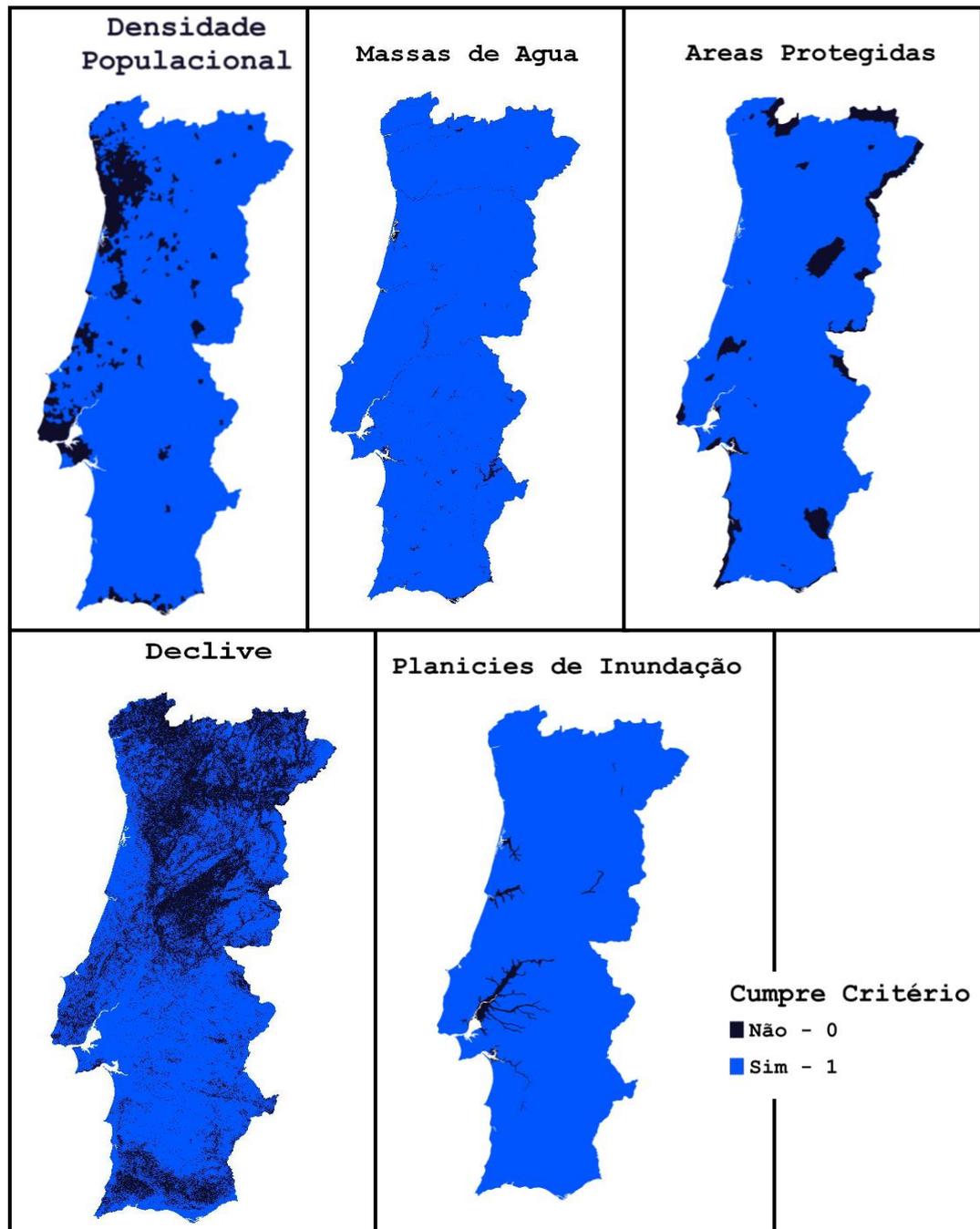


Figura 26 - Camadas trabalhadas em ambiente SIG utilizando os critérios propostos por Mays et al. (2012) para Portugal Continental (Figura em anexo páginas V a IX).

Do projeto CORINE Land Cover foram ainda retirados os atributos "Zonas Húmidas" e "Corpos de Água" e informação do Atlas da Água (SNIRH, 2013) para eliminar as massas de água.

As áreas protegidas que foram excluídas são as constantes no Atlas do Ambiente (APA, 2013)

Não foi encontrada informação geográfica sobre o risco de deslizamento de terra para Portugal Continental. Em Portugal Continental o risco de deslizamento de terra tem ocorrências bastante localizadas, sendo avaliado ao nível do Plano Diretor Municipal. Assim não foi utilizado este critério na identificação da superfície de solo disponível para a instalação de uma central de CAES. De algum modo a seleção de zonas de baixo declive também é um fator que minimiza o perigo de deslizamento de terras.

Partindo do mapa de declives de Portugal Continental, disponibilizado no site da Faunalia (2013), foram selecionadas as zonas onde o declive é inferior a 7°. Os declives da camada descarregada foram verificados utilizando a Carta de Declives retirada do Atlas do Ambiente (APA, 2013).

Foram consideradas as planícies de inundação de cheias com período de retorno de 100 anos, com informação geográfica retirada do Atlas da Água (SNIRH, 2013).

A identificação das estruturas geológicas resulta da aplicação dos critérios descritos no ponto 2.5. e são apresentados no Capítulo 4 - Estrutura para armazenamento de ar comprimido.

Após a identificação destas estruturas foi recolhida informação geográfica disponível e, utilizando o Quantum GIS, criado uma faixa (*buffer*) de 1600m ao redor das estruturas identificadas.

A área da superfície de terreno ocupada por uma central de CAES varia consoante a potência instalada. Contudo para determinar a necessidade de superfície de solo foi seguido o critério de Mays *et al.* (2012) que sugerem uma área de 40500m² (10 acres) para uma central de CAES de 110MWe. Assim no mapa obtido com as diferentes zonas que cumprem os critérios de Mays *et al.* (2012) foram selecionadas as áreas superiores a 40500m².

McGrail *et al.* (2013) apresenta ainda critérios como a proximidade a linhas elétricas de alta tensão e a uma subestação elétrica, e a organização das parcelas de solo. Para uma central de CAES que utilize a queima de gás natural a proximidade a um gasoduto e a uma fonte abundante de água, para arrefecimento, também representam critérios importantes. Estes critérios foram avaliados pela visualização de informação georreferenciada para a escolha da localização da central de CAES.

3.1.3. Zonas de Produção de Energia Elétrica por Fontes Renováveis.

As zonas de produção de energia elétrica através de fontes eólicas foram identificadas utilizando o Atlas de Potencial Eólico Onshore disponibilizado pelo Geoportal do LNEG (2013) através do serviço WMS do Geoportal (2013). Este atlas permite a visualização de vários parâmetros, como seja a velocidade do vento, fatores de Weibull, fluxo de potência incidente que permitem avaliar o potencial eólico de uma determinada zona. Os fatores de Weibull são 2 parâmetros da distribuição de Weibull, utilizada na caracterização local do vento, que permitem estimar a energia produzida por uma turbina eólica.

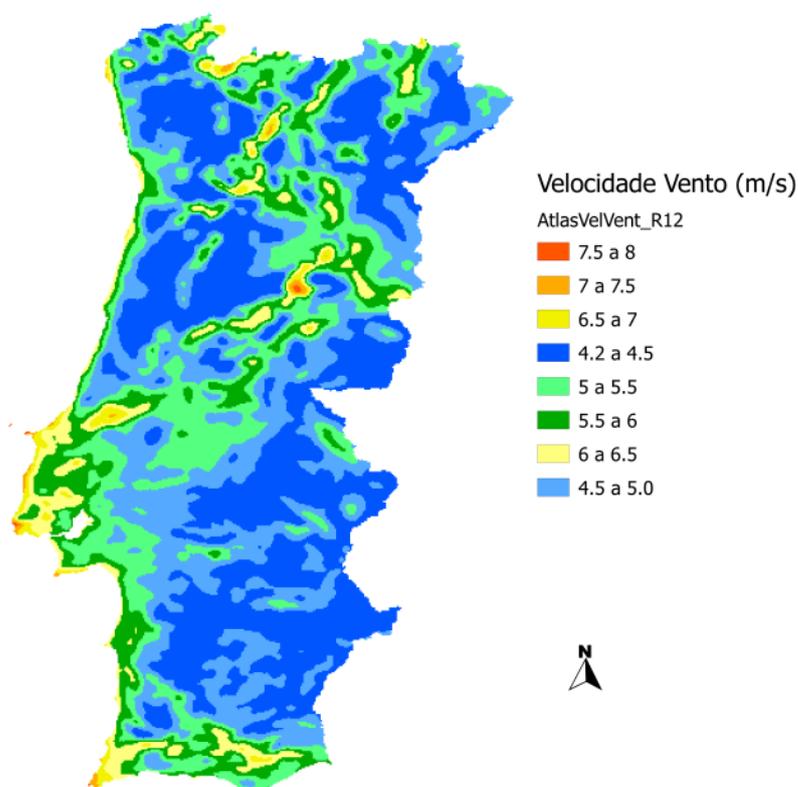


Figura 27 - Velocidade média do vento (m/s) em Portugal Continental a 80 m de altura. (Geoportal do LNEG, 2013) (Figura em anexo página X).

Para definir as zonas de coincidência entre o potencial CAES e de produção de energia por fonte solar foi utilizada a Carta da Radiação Solar Anual disponibilizada pelo PVGIS (2014) para verificar quais as zonas de Portugal Continental onde existe maior potencial de produção elétrica utilizando energia solar, quer seja através da tecnologia fotovoltaica ou da solar térmica (Torre Solar, Cilindros Parabólicos).

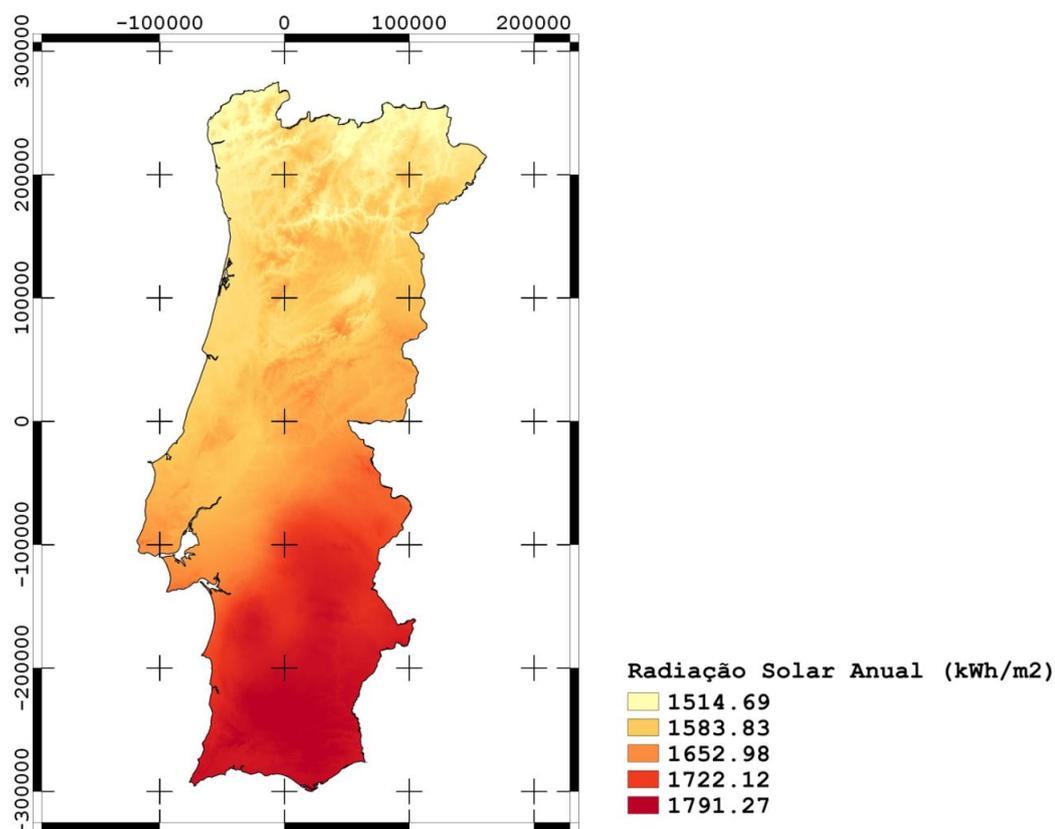


Figura 28 - Radiação solar anual (kW.h/m²) em Portugal Continental (PVGIS, 2014), (Figura em anexo página XI).

Para complementar a informação recolhida foi utilizada a base de dados geográfica de fontes renováveis de energia do projeto E2P - Energias Endógenas de Portugal (2013), onde constam os centros electroprodutores existentes em Portugal Continental. Desta base de dados foram recolhidos os centros electroprodutores que utilizam a energia eólica e solar e a sua potência instalada, para determinar as zonas onde atualmente se está a produzir energia por fontes renováveis e a sua dimensão.

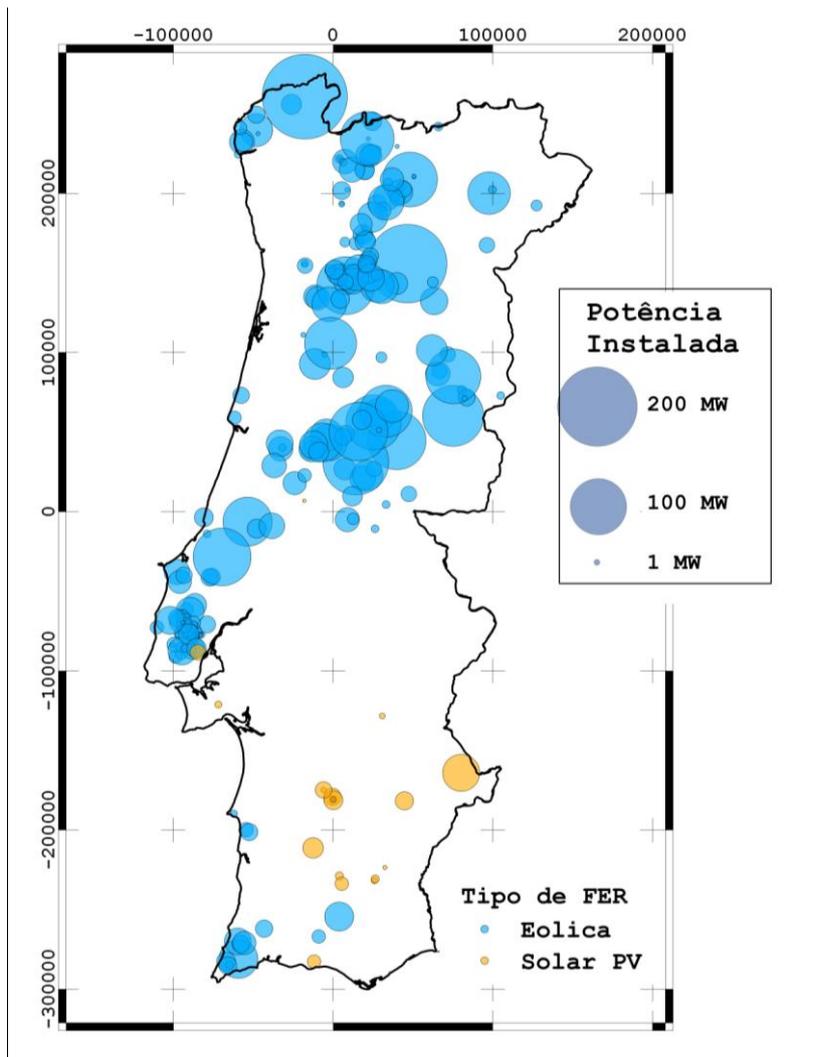


Figura 29 - Localização dos centros electroprodutores por fonte eólica e fotovoltaica em Portugal Continental. Elaborado com informação da base de dados E2P (2013), (Figura em anexo página XII).

A informação recolhida nos pontos anteriores foi avaliada e relacionada recorrendo aos sistemas de informação geográfica e identificando possíveis localizações para uma central de CAES. Foram ponderados os fatores que condicionam a implantação de uma central de CAES, avaliando as condições das estruturas geológicas identificadas e a produção de energia elétrica por fontes renováveis, com base na bibliografia referida.

Dos locais identificado foi escolhido um onde se encontram reunidas as condições pretendidas e analisada a sua viabilidade para a implantação de uma central de CAES.

4. Potenciais Reservatórios Geológicos Identificados

Neste capítulo serão apresentadas as formações geológicas identificadas como adequadas para reservatórios de CAES, descrevendo as suas principais características e discutindo a sua adequabilidade para o armazenamento de ar comprimido. As estruturas são apresentadas consoante o tipo de reservatório e por unidade hidrogeológica.

4.1. Sistemas Aquíferos de Portugal Continental

O SNIRH (2003) divide o território em 4 unidades hidrogeológicas (figura 24): Maciço Antigo, Orla Mesocenozóica Ocidental ou Bacia Lusitaniana, Orla Mesocenozóica Meridional ou Bacia do Algarve e a Bacia Terciária do Tejo-Sado.

Da análise efetuada às fichas dos aquíferos (Almeida *et al.* 2000) estão identificados, na tabela 7, os aquíferos constituídos por formações detríticas que serviram de base à seleção de aquíferos adequados ao armazenamento de ar comprimido.

Tabela 7 - Aquíferos avaliados

Unidade Hidrogeológica	Aquíferos
Maciço Antigo	Veiga de Chaves;
Bacia Lusitaniana	Sistema Cretácico de Aveiro; Figueira da Foz-Gesteira; Vieira de Leiria - Marinha Grande; Torres Vedras; Tentúgal; Pousos caranguejeira; Ourem; Alpedriz; Condeixa-Alfarelos; Louriçal;
Bacia do Algarve	Campina de Faro; Ferragudo-albufeira; Albufeira-Ribeira de Quarteira; S. João da Venda; Luz-Tavira
Bacia Terciária do Tejo-Sado	Aluviões do Tejo; Bacia do Tejo-Sado/margem direita; Bacia do Tejo-Sado/margem esquerda; Bacia de Alvalade

O maciço antigo é caracterizado por rochas eruptivas e metassedimentares ou cristalinas (Almeida *et al.*, 2000) onde os aquíferos são maioritariamente fissurados ou cárscicos. Por vezes é possível encontrar depósitos modernos com formações detríticas sobre a base cristalina (Almeida *et al.*, 2000). Estes depósitos são na sua maioria pouco espessos, não atingindo as profundidades requeridas para a tecnologia CAES (ver tabela 5, secção 2.5) e sub-horizontais.

A bacia Lusitaniana é uma bacia sedimentar originada aquando da abertura do Atlântico Norte, em que existem importantes sistemas aquíferos relacionados com formações calcárias e detríticas (Almeida *et al.*, 2000). A sequência estratigráfica, apresentada na figura 30, e a tectónica da bacia Lusitaniana fazem desta a zona de Portugal com maior propensão para a existência de estruturas que possibilitem o armazenamento de ar comprimido, não só em aquíferos detríticos como em estruturas salíferas, pois é possível encontrar uma formação com características salíferas, na Formação de Dagorda, presente na maior parte da Bacia Lusitaniana.

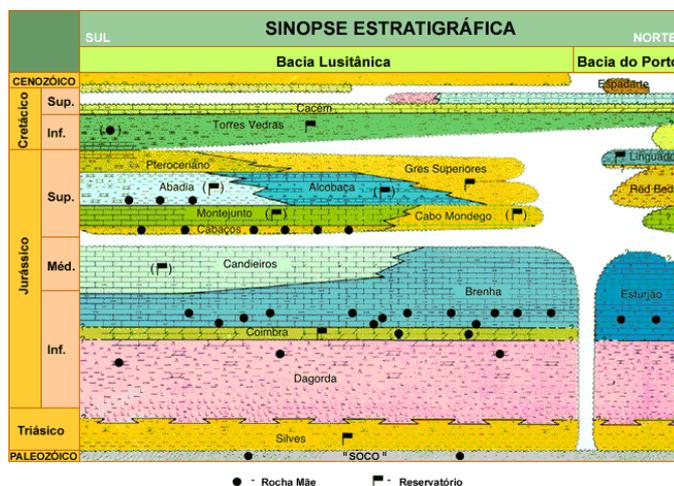


Figura 30 - Sinopse Estratigráfica da Bacia Lusitaniana (DPEP, 2014), (Figura em anexo página XIII).

A existência de informação (sondagens, perfis sísmicos, publicações científicas) proveniente da prospeção e pesquisa de petróleo também constitui uma mais-valia para o estudo e identificação de estruturas aptas para o armazenamento de ar comprimido na Bacia Lusitaniana.

A origem da Bacia do Algarve está relacionada com abertura do Atlântico Central e a formação de crosta oceânica entre o Algarve e o Norte de África, sendo constituída por terrenos sedimentares de idade mesozoica e cenozoica que assentam sobre o soco hercínio (Figura 31) (Almeida *et al.*, 2000).

Deste o início do Triássico até ao Sinemuriano a sedimentação ocorreu em ambiente continental marinho pouco profundo, originando formações como o Grés de Silves e o Complexo Margo-Carbonatado de Silves. Desde início do Pliensbachiano até ao Cretácico a deposição na bacia algarvia ocorreu de forma distinta sendo diferenciadas duas sub-bacias, ocidental e oriental, divididas na zona de Algoz (Terrinha *et al.*, 2006). Durante este período a deposição foi em ambiente marinho originando formações Calcárias e Margosas.

Durante o Cretácico existem alterações no ambiente de deposição da bacia Algarvia e a diferenciação entre as sub-bacias não é tão acentuada (Terrinha *et al.*, 2006). Apesar da maior parte das formações encontradas deste período, continuarem a ser calcárias é possível encontrar alguns depósitos siliciclásticos fluviais, como a Formação do Sobral e o grupo detrítico de Arenitos e Argilas de fáceis Wealdiano

O Cenozoico começa no Miocénico com formações Carbonatadas, como a Formação de Lagos/Portimão, e passa a formações areníticas, como a Formação de Cacela. Desde o final no Miocénico até ao presente a deposição tem sido principalmente de sedimentos arenosos, como a Formação de Ludo.

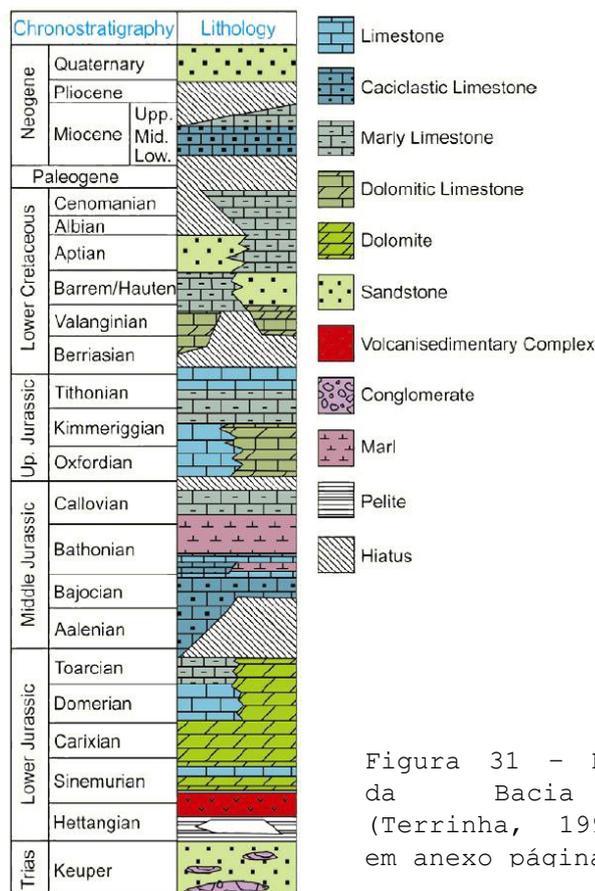


Figura 31 - Estratigrafia da Bacia Algarvia (Terrinha, 1998), (Figura em anexo página XIV).

Devido à litologia calcária de grande parte da Bacia Algarvia coberta por depósitos detríticos recentes não são esperadas condições adequadas para armazenar ar comprimido em aquíferos detríticos como no caso da Bacia Lusitaniana. Mas tal como na bacia Lusitaniana existe uma formação salífera, Complexo Margo-Carbonatado de Silves que também é denominada por Pelitos Calcários e Evaporitos de Silves, que está presente em profundidade em grande parte da bacia.

Na Bacia Algarvia a pesquisa de petróleo ocorre *offshore*, assim a informação da região *onshore* (sondagens, perfis sísmicos, publicações científicas) não é tão vasta como na bacia Lusitaniana, principalmente em profundidade. A maior parte da informação recolhida para este trabalho provém do estudo de aquíferos de água potável.

A Bacia Terciária do Tejo Sado é uma bacia sedimentar de depósitos paleogénicos, miocénicos e pliocénicos cobertos em grande parte por depósitos quaternários (Figura 32).

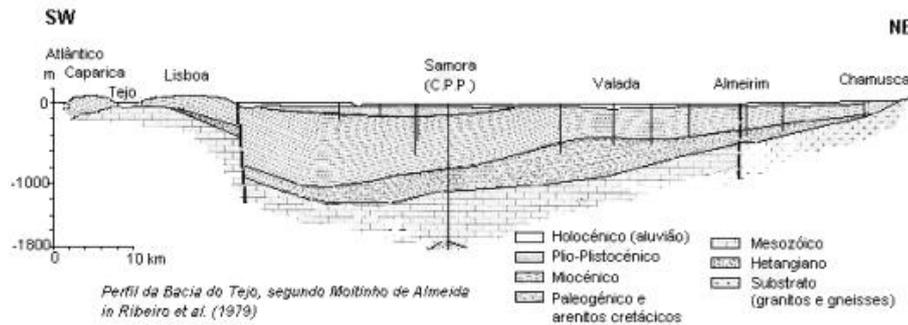


Figura 32 - Perfil geológico da Bacia do Tejo SE-NE (Almeida *et al.*, 2000), (Figura em anexo página xv).

As formações que preenchem a bacia apresentam-se sub-horizontais e de natureza predominantemente detrítica, com uma profundidade que pode chegar aos 1400m, entre Benavente e Coruche.

Na bacia do Tejo-Sado está localizado o maior sistema aquífero de Portugal, de grande importância para o abastecimento urbano, industrial e agrícola. Pela sua importância como reservatório de água potável e a horizontalidade das estruturas não é esperado que a Bacia Cenozoica do Tejo-Sado tenha uma estrutura que permita armazenar o ar comprimido.

4.1.1. Maciço Antigo

No maciço antigo não foram inventariados aquíferos com as características desejáveis devido às suas propriedades litológicas não serem favoráveis à ocorrência de aquíferos detríticos às profundidades requeridas para a tecnologia CAES. O maciço antigo é composto por rochas cristalinas e cristalofílicas em que os aquíferos são fraturados, por rochas carbonatadas do paleozoico em que os aquíferos funcionam por fracturação e/ou carsificação. Os aquíferos suportados por formações detríticas limitam-se a níveis superficiais de alteração de rochas cristalinas e cristalofílicas, e a depósitos aluvionares constituídos por areias, seixos e calhaus que usualmente não têm camada confinante nem profundidade compatível com a tecnologia de CAES.

De referir o centro da bacia de Mortágua, onde existe uma camada de argilas com 60m de espessura sobre arenitos arcósicos com bancadas de argilas e calhaus (Arenitos do Buçaco) a profundidades aceitáveis mas de permeabilidade bastante baixa, não sendo considerado um aquífero. Também o aquífero de Veiga Chaves que possui um nível inferior confinado a uma profundidade aceitável e composto por uma mistura do material da camada superior e material detrítico resultante da alteração das rochas graníticas. Esta camada tem uma estrutura bastante complexa o que não é favorável ao armazenamento de ar comprimido.

4.1.2. Bacia Lusitaniana

Dos aquíferos analisados na bacia Lusitaniana, os suportados por formações detríticas do Cretácico Inferior, constituída pelos Grés Inferior, sobrepostos por formações carbonatadas e margosas do Cenomaniano, que na Figura 30 são designados por formações do grés de Torres Vedras e Formação do Cacém, parecem ser os mais favoráveis para o armazenamento de ar comprimido. Este arranjo estratigráfico está inserido na sequência sedimentar característica da evolução do Bacia Lusitaniana em que houve a deposição de sedimentos com fácies siliclásticas, fluviais, estuarinas, costeiras ou lagunares (Kullberg, 2000) que originaram o Grés Inferior. Seguido de uma transgressão marinha com deposição marinha carbonatada de pouca profundidade e de calcários margosos do Cenomaniano-Turoniano (Rasmussen, 1998).

Na designação utilizada neste trabalho de Grés inferior, depositados entre o Berriasiano e o Albiano, estão incluídas formações como os Arenitos do Carrascal, zona da Figueira da Foz, Arenitos de Requeixo (Almeida *et al.*, 2000), Grés de Palhaça (Melo, 2002), Formação do Rodízio na parte sul da bacia e da Figueira da Foz na parte norte (Dinis *et al.*, 2002), Grupos de Torres Vedras e de Cascais depositados até ao Aptiano inferior e Grés Belasianos entre o Aptiano superior e Albiano (Kullberg, 2000), Formação de Almargem superior (Dinis *et al.*, 1994).

Nesta configuração, a camada selante do reservatório podem ser os elementos argilosos que surgem intercalados na formação do Grés Inferior ou a Formação do Cacém, composta por camadas margosas e calcárias do Cenomaniano (DPEP, 2014).

No intervalo de tempo geológico indicado e alternadas com as formações mais siliclásticas foram depositadas outras formações ou membros de componente calcária e margosa como a Formação de Cresmina (Kullberg *et al.*, 2006), Formação da Galé ou os leitos carbonatados na Formação da Figueira da Foz (Dinis *et al.*, 2002).

Nas formações carbonatadas e margosas, compreendidas entre o Cenomaniano e o Turoniano, estão incluídos Calcários apinhoados de Costa d'Arnes (Almeida *et al.*, 2000), Formação da Mamarrosa (Melo, 2002), Formação da Galé (Dinis *et al.*, 2002), Formação de Cacém (DPEP, 2014)

As formações do Cretácico inferior também foram identificadas como possível reservatório para o armazenamento de CO₂ no âmbito do projeto COMET. Amaral e Sampaio (2013) avaliaram a permeabilidade das formações para a injeção de CO₂ na bacia Lusitaniana com base em furos com profundidades entre 32,5 e 244m. A permeabilidade destas formações varia entre 129 e 19570 mD, não sendo possível verificar a existência de uma correlação entre a profundidade e a permeabilidade nas formações do cretácico inferior. As profundidades utilizadas por Amaral e Sampaio (2013) no seu estudo não são adequadas para o armazenamento de ar comprimido.

Como o Grés Inferior é relativamente superficial em grande parte da Bacia Lusitaniana e constitui a base de aquíferos de água potável foi pesquisada a existência de estruturas mais profundas para o armazenamento de ar comprimido. Estruturas mais profundas possuem a vantagem da pressão do sistema de CAES poder ser mais elevada.

A Formação do Grés de Silves, constituído por depósitos siliclásticos de sistemas de leques fluviais que correspondem à sedimentação durante o Triásico Superior, estando sobrepostos por um excelente selante, a Formação das Margas de Dagorda que serve de selante (figura 30). A formação do Grés de Silves tem uma permeabilidade entre de 67 e 783mD, determinada para profundidade entre 44 e 275m (Amaral e Sampaio, 2012) e existe em profundidade ao longo de maior parte da Bacia, aflorando nas margens Leste, e com uma espessura bastante variável. No relatório da sondagem de São Mamede 1 (Alves, 1958) é possível verificar que o grés de Silves está a uma profundidade de 3198m e que se apresenta "sem porosidade". Devido à sua permeabilidade relativamente reduzida e à sua profundidade elevada, esta formação não foi considerada no presente trabalho.

Após a deposição da Formação das Margas de Dagorda e durante o Jurássico Inferior e Médio as formações da Bacia Lusitaniana são maioritariamente carbonatadas (Formação de Coimbra, Formação de Candeeiros e Formação da Brenha). No Jurássico Superior é possível encontrar formações carbonatadas (Formação Montejunto), e detríticas, como os Grés Superiores. Desta época podem apresentar potencial para reservatórios de CAES os membros da Castanheira e do Cabrito pertencentes à formação da Abadia no sector Central da Bacia Lusitaniana.

Durante o Jurássico Superior neste sector da bacia foram diferenciadas as Sub-Bacias de Bombarral, a Norte, Turcifal, a Sudoeste, e Arruda, a Sudeste (Figura 33). O Membro a Castanheira está localizado na Sub-Bacia de Arruda (Kullberg *et al.*, 2006) e o Membro da Cabrito nas Sub-Bacias de Bombarral e Turcifal (Kullberg *et al.*, 2006; Silva, 2009)

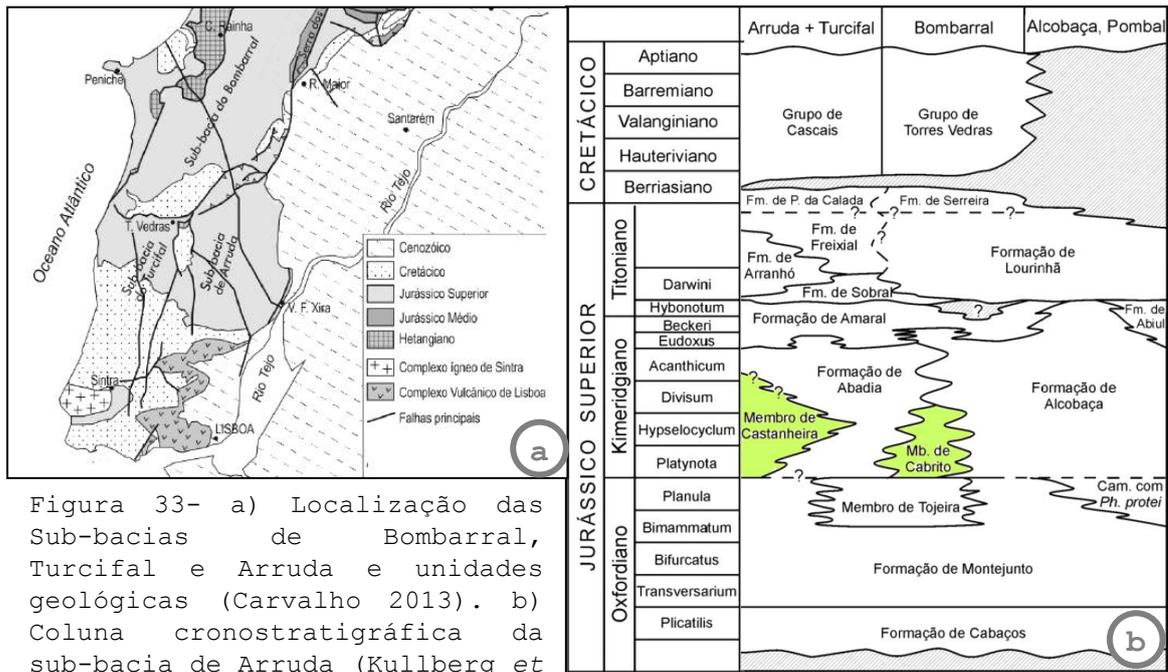


Figura 33- a) Localização das Sub-bacias de Bombarral, Turcifal e Arruda e unidades geológicas (Carvalho 2013). b) Coluna cronostratigráfica da sub-bacia de Arruda (Kullberg et al., 2006), (Figura em anexo página XVI).

Estes membros resultam da deposição em grandes leques submarinos de material siliclástico mais ou menos grosseiro durante o Kimmeridgiano (Kullberg et al., 2006) seguido da deposição das margas e siltitos das Margas da Abadia que podem constituir uma camada impermeável e funcionar como selante dos níveis inferiores (Silva, 2009).

Não são assinalados como aquíferos (SNIRH, 2014) o que é uma vantagem para a sua utilização como reservatórios de ar comprimido, embora Silva (2009) indique que estes membros da Formação da Abadia têm condições para serem reservatórios de hidrocarbonetos sendo de esperar alguma permeabilidade nestes membros.

Assim das formações detríticas ocorrentes na Bacia Lusitaniana, este trabalho apenas procurará identificar estruturas no Grés Inferior e na Formação da Abadia, por serem as formações que parecem apresentar melhores condições para constituírem reservatórios de CAES.

4.1.2.1. Localização de potenciais reservatórios na Formação do Grés Inferior

A figura 34a ilustra os afloramentos de Grés Inferior, que ocorrem principalmente nas zonas imediatamente a Norte de Lisboa, Torres Vedras e ainda Ourém. Mais a Norte e a Oeste as formações do Cretácico Inferior estão sobrepostas por depósitos mais recentes. As zonas a cinzento correspondem a afloramentos de litologias anteriores ao Cretácico Inferior e a afloramentos de formações vulcânicas. A azul na figura está representada a zona que pertence à Bacia Terciária do Tejo Sado, mas onde é possível encontrar o grés inferior em profundidade. A ocorrência de uma estrutura geológica para armazenar ar comprimido no Grés Inferior tem que se localizar nas zonas em que a Formação não aflora e se encontra sobreposta por sedimentos mais recentes (representadas a verde e a azul na figura 34a).

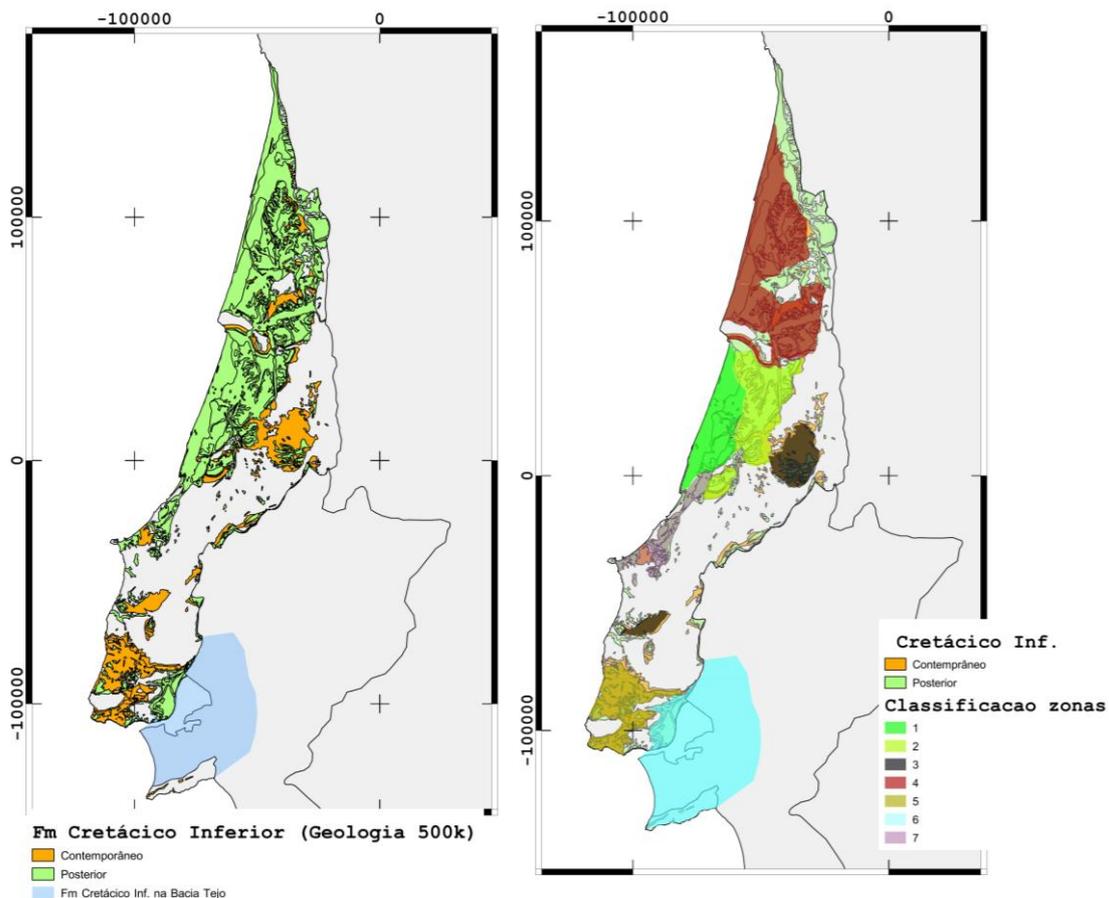


Figura 34 - a) Afloramento de formações contemporâneas ou posteriores ao Cretácico Inferior; b) classificação de zonas em relação à profundidade do grés inferior, (Figura em anexo nas páginas XVII e XVIII).

Na Figura 34b, foram classificadas quantitativamente as zonas de acordo com a possibilidade de encontrar Grés Inferior a profundidades aceitáveis para CAES.

Zona 1 - Os afloramentos correspondem aos aquíferos de Leirosa-Monte Real, apenas constituído por depósitos Plio-Plistocénicos que chegam a atingir os 200m de espessura, e ao aquífero Vieira de Leiria-Marinha Grande, em que algumas captações de água subterrânea atingem o Grés Inferior. Esta é a zona onde é possível encontrar o grés inferior à profundidade indicada para CAES e será analisada com maior detalhe.

Outra vantagem desta zona é demonstrada no estudo de (Amaral e Sampaio, 2013), pois a sondagem mais profunda que foi analisada nas formações do cretácico inferior (244m) está situada no aquífero de Leirosa-Monte Real e apresenta uma permeabilidade de 598 mD, valor adequado para o armazenamento de ar comprimido.

Zona 2 - O Grés Inferior é utilizado como camada produtiva nos aquíferos de Alpedriz, Louriçal e Pousos Caranguejeira. A profundidade do Grés Inferior pode ser adequada para CAES em alguns locais, como no centro do aquífero de Pousos, ou na parte S e W do aquífero do Louriçal, em que a base do Cenomaniano está a 800m de profundidade.

Zona 3 - Consiste nos afloramentos do Grés Inferior correspondente aos aquíferos de Torres Vedras e de Ourém. Devido a serem aquíferos de água potável não deverão ser utilizados para armazenar ar comprimido.

Zona 4 - Nesta zona não é esperado encontrar as condições para um reservatório de ar comprimido. As Formações do Cretácico Inferior são relativamente superficiais e constituem a matriz de sistemas aquíferos de água potável, como o aquífero cretácico de Aveiro, Viso-Queridas, Condeixa-Alfarelos, Figueira da Foz-Giesteira e Tentúgal.

Em Melo (2002) é possível verificar a profundidade do topo da camada do Cenomaniano, denominada Calcários de Mamarrosa, na zona do aquífero cretácico de Aveiro. O arranjo estratigráfico aflora no limite E do aquífero e mergulha para W a uma profundidade de 300m na linha de costa, continuando a afundar para W, como pode ser verificado na sondagem Carapau realizada *offshore* de Vagos, em que o topo do Turoniano atinge os 685m a 1135m na base do Cretácico.

Zona 5 - Nesta zona as formações do Cretácico inferior são de sedimentação detrítica e carbonatada, onde as formações mais carbonadas estão na área entre Sintra e Cascais e a mais detríticas na Ericeira. A Formação do Grés Inferior aflora em grande parte desta zona, em que a espessura das formações do cretácico está entre 255m na zona da Ericeira, mas aumentando até 430m na região de Cascais. Estruturalmente a Formação apresenta um sinclinal com o centro em Cascais (Kullberg *et al.*, 2006).

Assim, nesta zona devido à natureza mais carbonatada do Grés Inferior, à sua estrutura e profundidade não é esperado encontrar as condições necessárias para armazenar ar comprimido.

Zona 6 - Grande parte desta zona está situada na bacia Terciária do Tejo-Sado onde se pode encontrar o Grés Inferior em profundidade.

O estudo do aquífero do Cretácico Inferior na zona de Lisboa-Barreiro foi efetuado por Diaz (2013) no âmbito da avaliação do potencial geotérmico. O aquífero aflora na zona de Cascais/Sintra e tem uma profundidade máxima de 1432m no Barreiro, com uma estrutura anticlinal em Monsanto. A sua espessura média está entre 60 e 225m e a sua permeabilidade é a suficiente para ser considerado um aquífero geotérmico.

Em Machado *et al.* (2011) são avaliadas as estruturas geológicas para o armazenamento de CO₂ na Península de Setúbal. Pelos seus paralelismos com o armazenamento de ar comprimido é possível constatar existência de reservatórios no grés inferior adequados ao armazenamento de CO₂, embora a profundidade destes reservatórios seja superior à indicada para CAES.

Zona 7 - Não existe a Formação do Grés Inferior em profundidade, estando os depósitos Cenozoicos assentes em discordância sobre as formações do Jurássico ou anteriores. Esta zona não reúne as condições para um reservatório de ar comprimido no grés inferior.

Estruturas de contenção na zona 1

É possível encontrar informação sobre esta zona no relatório da MOHAVE (1996). Analisando o mapa do topo do Cretácico Médio na Figura 35a é possível identificar uma estrutura anticlinal próxima da Sondagem São Pedro de Muel 2 (SPM-2), onde o topo do Cretácico Medio está a uma profundidade de -750m. Em Dias (2005) também é possível verificar a existência desta estrutura no corte interpretativo efetuado com base na linha sísmica UTP 81-8 (Figura 35b).

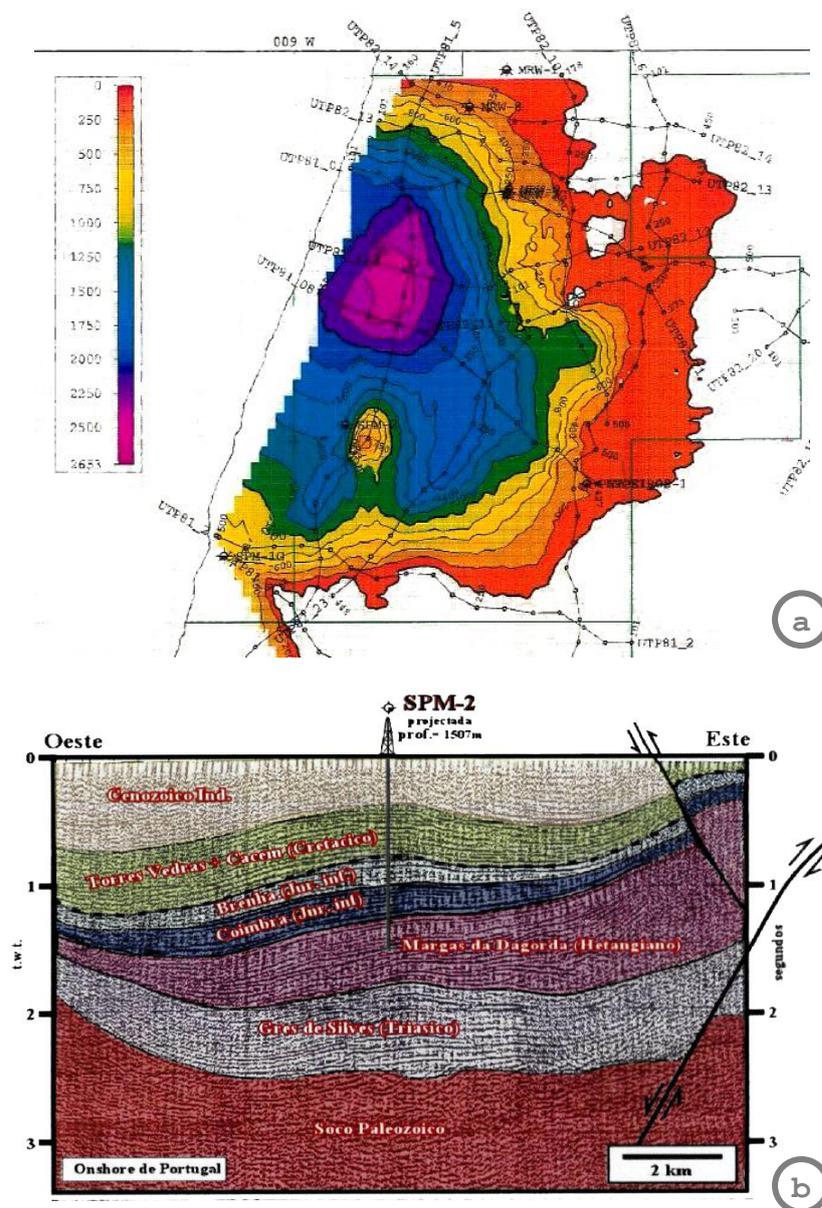


Figura 35 - a) Topo do Cretácico Médio (Mohave, 1995) com a presença da estrutura anticlinal. b) Perfil sísmico UTP81-8 interpretado por Dias (2005), (Figura em anexo página XIX).

A espessura da Formação do Cretácico Inferior no anticlinal é de 400m (Mohave, 1995), o que confere à estrutura um volume aceitável de armazenamento. Contudo pela bibliografia consultada não é possível diferenciar entre a camada impermeável do Cenomaniano do reservatório no Grés Inferior.

A estrutura foi digitalizada e georreferenciada para ser utilizada como estrutura geológica identificada para armazenamento de ar comprimido, representado com pontos na figura 36, a área da estrutura confinante e a distância de 1,6km que constitui o *buffer*.

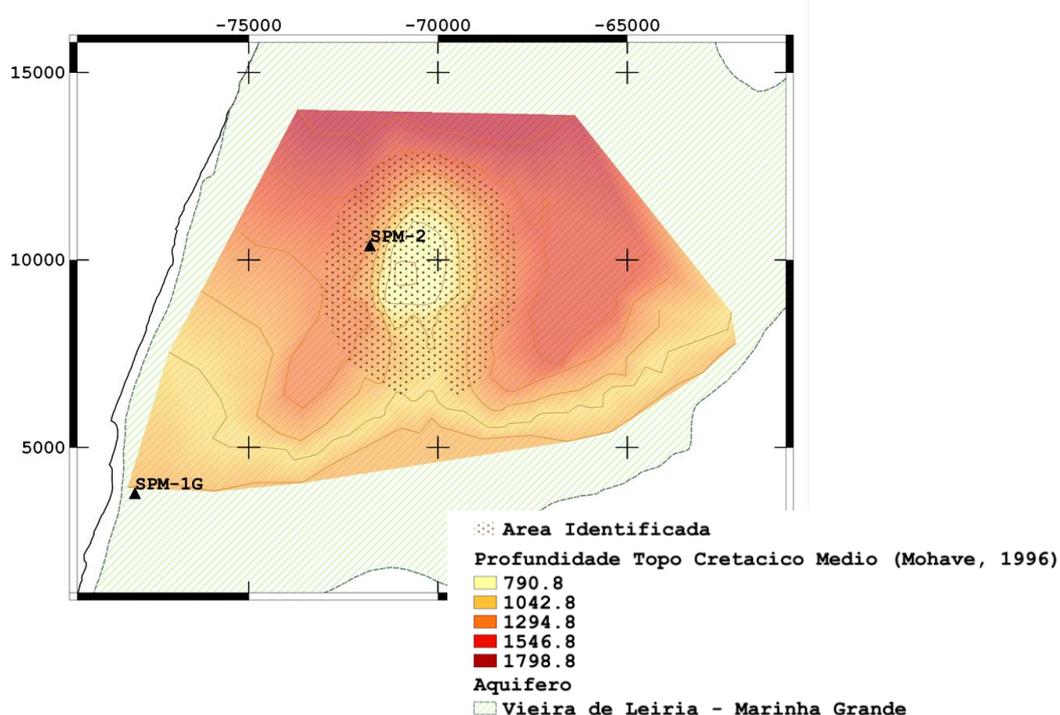


Figura 36 - Estrutura anticlinal representada com base em Mohave (1995), (Figura em anexo página xx).

Apesar da estrutura ser identificada como adequada para reservatório de ar comprimido, será necessário averiguar a ligação desta estrutura com o sistema de aquífero Vieira de Leiria - Marinha Grande. A proximidade da estrutura à formação salífera das margas de Dagorda pode diminuir a qualidade da água e tal como descrito por Melo (2002) os níveis inferiores do aquífero cretácico de Aveiro apresentam problemas de qualidade da água devido a elevada mineralização.

4.1.2.2. Formação da Abadia

O membro do Cabrito da Formação da Abadia com 200m de espessura média (Almeida *et al.*, 2000) foi interceptado nas sondagens Vila Verde-2 (VV-2), Benfeito 1 (Bf-1) e Freixial-1 (Fx-1) (Silva, 2009) a Sul da Serra de Montejunto, (Figura 37a) a uma profundidade de 700m. Nesta zona, em que a Formação da Abadia não aflora, é possível encontrar sobranceiramente as formações de Amaral e da Lourinhã.

Mais para SE, localizado entre Arruda dos Vinhos e Vila Franca de Xira, o membro da Castanheira foi identificado na sondagem Arruda 1 (Silva, 2009) e que aflora perto de Vila Franca de Xira (Almeida, 2000), Castanheira e Carregado (Kullberg *et al.*, 2006). O membro da Castanheira apresenta a forma de cunha ondulada com a espessura total a diminuir para NW e um comprimento de cerca de 5Km na direção NW-SE (Silva, 2009), apresentando uma espessura de 2000m na sondagem Arruda-1 (Kullberg *et al.*, 2006).

Carvalho *et al.* (2005) analisaram a sequência sedimentar da Sub-Bacia de Arruda através de reinterpretação de perfis sísmicos de reflexão efetuados no âmbito de prospeção e pesquisa de hidrocarbonetos métodos geofísicos das formações geológicas aí encontradas. A sequência estratigráfica na zona estudada descrita em Carvalho *et al.* (2008), e de interesse para o presente trabalho é composta da base para o topo pela Formação de Cabaços e Montejunto mais profunda, Formação da Abadia e Amaral intermédia e as formações do Sobral, Arranhó e Freixial que afloram em grande parte da zona (Figura 37a).

Não foi possível representar a profundidade da Formação da Abadia pois esta e as formações de Sobral, Arranhó e Freixial possuem igual gradiente de velocidade de propagação das ondas sísmicas. Assim, o topo da Formação da Abadia é apresentado em unidades de tempo para analisar a existência de alguma estrutura anticlinal.

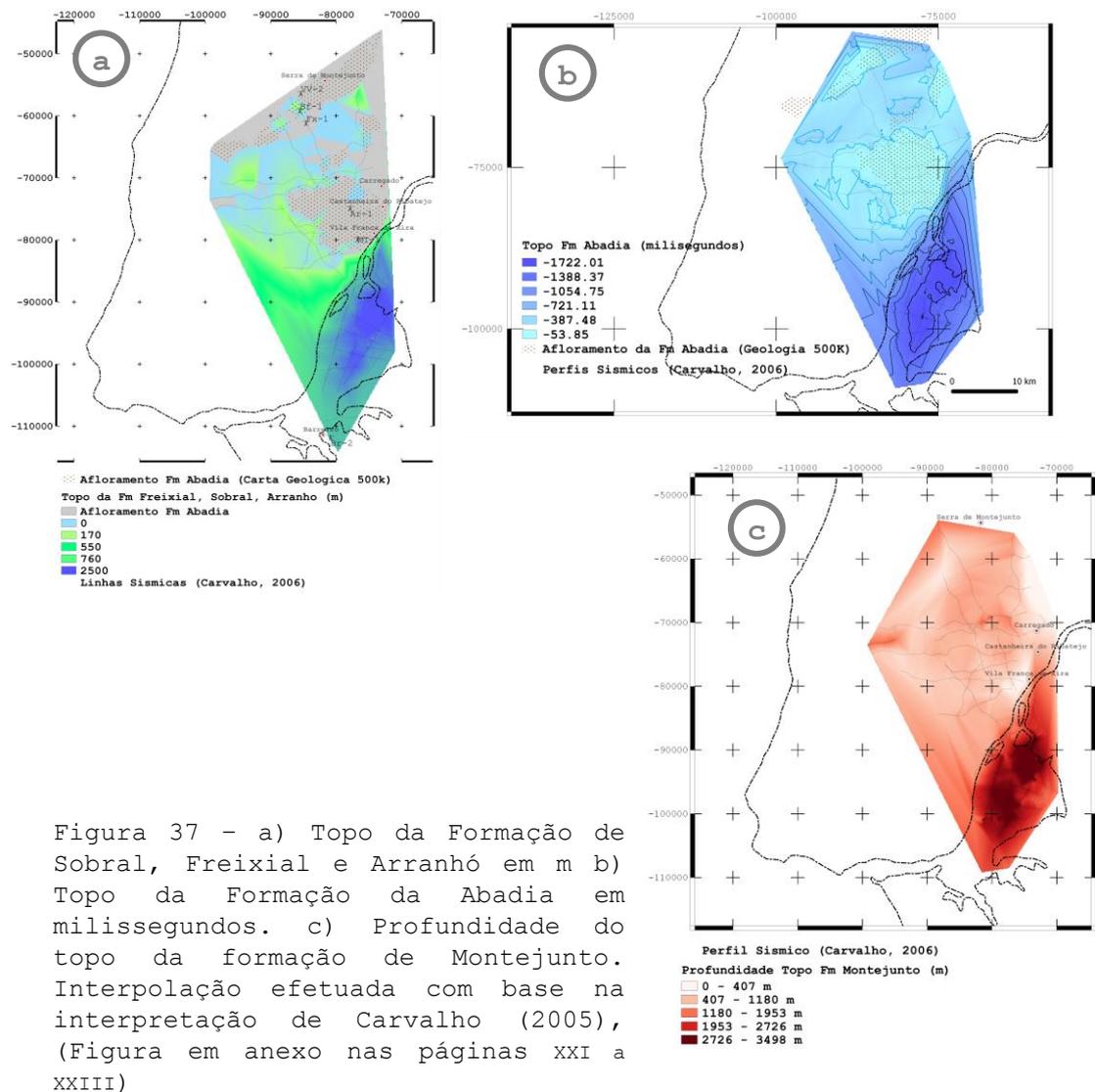


Figura 37 - a) Topo da Formação de Sobral, Freixial e Arranhó em m b) Topo da Formação da Abadia em milissegundos. c) Profundidade do topo da formação de Montejunto. Interpolação efetuada com base na interpretação de Carvalho (2005), (Figura em anexo nas páginas XXI a XXIII)

Nos perfis sísmicos interpretados por Carvalho *et al.* (2005) (Figura 37) é possível verificar a grande diferença de profundidades das Formações representadas nas figuras, entre o Norte e o Sul da Falha do Inferior do Tejo.

A Formação da Abadia deverá estar a uma profundidade aceitável para a tecnologia de CAES a norte da Falha do Inferior do Tejo, já que as Formações de Sobral Arranhó e Freixial apresentam profundidades aceitáveis para CAES, a tons de verde na Figura 37a. A profundidade do topo da formação de Montejunto também sugere uma profundidade da formação da Abadia adequada para reservatórios de ar comprimido.

A Formação do Sobral é descrita por Almeida *et al.* (2000) como sendo composta por "bancadas de arenitos siliciosos com calhaus de quartzo e por siltes ocres e violáceos". Terrinha *et al.* (2006) adiciona a esta descrição "argilas violáceas ou esverdeadas". Esta formação é pouco espessa com cerca de 30m a 50m (Terrinha *et al.*, 2006; Almeida *et al.*, 2000)

A Formação do Sobral aflora no Algarve central, na zona de Porches, Algoz, Paderne, Guia e Albufeira, fazendo parte dos sistemas aquíferos de Ferragudo-Albufeira e Albufeira-Ribeiras de Quarteira. Existem alguns afloramentos de Arenitos de Sobral que não são classificados como aquíferos o que indica uma variabilidade lateral das propriedades formação.

O grupo de Arenitos e Argilas de fáceis Wealdiano consiste em "conglomerados com calhaus siliciosos, arenitos finos, brancos ou amarelos, com estratificação oblíqua e argilas versicolores em sequências fluviais" que podem ter entre 80 a 170m de espessura (Terrina *et al.*, 2006).

Este grupo aflora no Algarve Oriental numa faixa a norte de Faro, desde Quarteira à Luz, e corresponde ao Aquífero de São João da Venda-Quelfes.

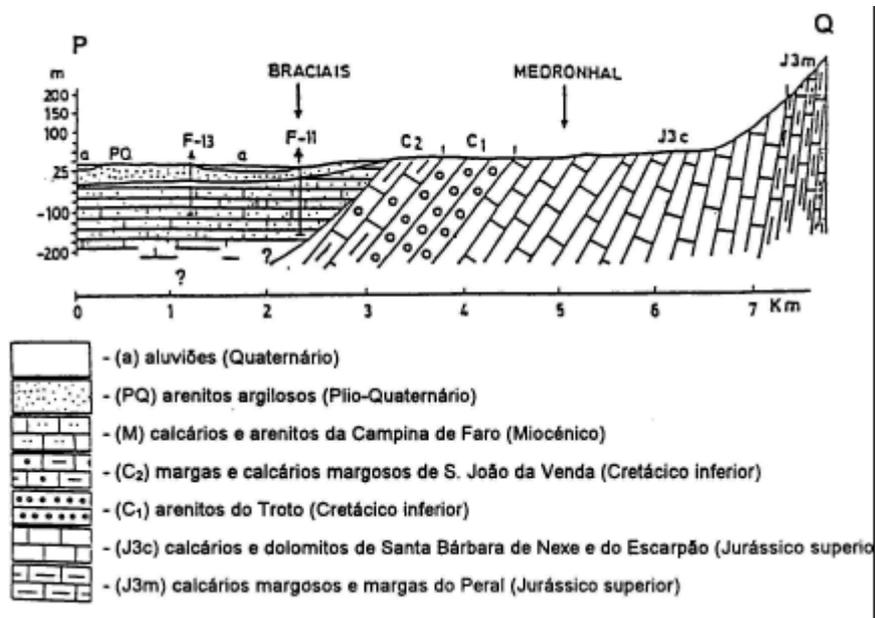


Figura 39 - Perfil geológico interpretativo N-S da Campina de Faro demonstrando a existência de Formações do Cretácico Inferior em profundidade adaptado de Silva *et al.*, 1986 em Roseiro, 2009). (Figura em anexo página xxv).

Estas formações do Cretácico inferior afundam para Sul com uma inclinação entre 20 a 30° (Roseiro, 2009), como está ilustrado na Figura 39, em que os arenitos do Troto correspondem ao grupo de Arenitos e Argilas de fáceis Wealdiano.

Roseiro (2009) indica que o topo do Cretácico (C₂) está a uma profundidade de 200 m na zona da Cidade de Faro e na sondagem Corvina, realizada *offshore* de Olhão, Terrinha *et al.* (2006) classificam o Cretácico Inferior com litologias margosas, calcárias e argilosas a uma profundidade de 1100m sobre a qual assenta uma formação de areias e siltes de calcário e dolomia de idade indeterminada a uma profundidade de 900m. Na sondagem Algarve-1, *offshore* de Tavira, foi identificada uma formação do Cretácico Inferior composta por arenitos com intercalações de margas, argilitos e siltitos, a uma profundidade de 500m e com uma espessura de 700m coberta por argila com leitos de carvão a 300m de profundidade.

Assim seria de esperar encontrar o grupo de Arenitos e Argilas de fáceis Wealdiano na parte inferior do Aquífero da Campina de Faro, mas Roseiro (2009) não descreve esta formação na sequência estratigráfica da zona. Os *logs* de furos por ela analisados e interpretados descrevem o Cretácico com calcários e margas.

Em períodos mais recentes, durante o Cenozoico a partir do Miocénico Superior, os depósitos detríticos são abundantes. A maioria destas formações são superficiais não possuindo a profundidade necessária para sistemas de CAES, como sucede na formação de Ludo.

Contudo, como pode ser exemplificado no aquífero de Luz-Tavira, podem existir formações detríticas a profundidades marginais para o armazenamento de ar comprimido, mas não foi identificado nenhum local onde este arranjo estratigráfico possa servir de base para um reservatório de ar comprimido.

Na zona do Aquífero Luz-Tavira a Formação de Cacela, datada do Miocénico Superior é inferior às Camadas do Morgadinho (Pliocénico) que possuem uma espessura superior a 120m (Almeida *et al.*, 2000).

A Formação de Cacela é dividida em três membros, inferior, medio e superior. O membro inferior é constituído por um conjunto de arenitos finos, mais ou menos micáceos ricos em fósseis; o membro médio por areolas amarelo-alaranjadas intercaladas com níveis pelíticos; o membro superior engloba várias unidades geológicas de natureza mais detrítica grosseira (Terrinha *et al.*, 2006).

Esta zona não é indicada para armazenamento de ar comprimido pois é um aquífero de água potável e a Formação de Cacela para o aquífero de Luz-Tavira é descrita por Almeida *et al.* (2000) como constituída por conglomerados grosseiros fortemente consolidados.

Podemos concluir que na Bacia do Algarve a variabilidade das formações do Cretácico Inferior é desfavorável à instalação de um reservatório de ar comprimido. Também não foi possível identificar formações em profundidades adequadas para sistemas de CAES. As formações detríticas identificadas na bacia do Algarve não evidenciam as propriedades necessárias para servirem de reservatório nem a existência de estruturas em anticlinal que permitam armazenar de ar comprimido.

4.1.4. Bacia Terciária do Tejo-Sado

A existência de um arranjo estratigráfico adequado para o armazenamento de ar comprimido na Bacia do Tejo Sado é evidenciado por Machado *et al.* (2011) na avaliação de estruturas geológicas para armazenar CO₂. A sondagem Barreiro-2 intersecta uma camada de arenitos grosseiros a finos com cimento carbonatado e calcário argiloso com leitões de argila, a uma profundidade entre 685 e 735m com uma camada impermeável constituída por margas e argilas arenosas entre 645 e 685m. Estas profundidades são compatíveis com a tecnologia CAES.

Porém a horizontalidade das formações não permite que existam estruturas que confinem o ar comprimido e mais importante, a reserva de água potável que este aquífero representa, levam a que esta zona não seja identificada para o armazenamento de ar comprimido.

4.2. Estruturas salíferas

As estruturas salíferas identificadas para armazenar ar comprimido estão associadas com a Formação das Margas de Dagorda na Bacia Lusitaniana e o Complexo Margo-Carbonatado de Silves na Bacia Algarvia. Estas formações, depositadas no início da instalação das bacias sedimentares, possuem baixa densidade e a uma ductilidade que permite migrações verticais e horizontais quer por tectónica salina ou por halocinese.

Estes movimentos criam espessuras e profundidades bastante variáveis das formações salíferas que podem mesmo levar ao seu afloramento, como mostrado na Figura 25, ou à sua extinção por soldadura, o que é possível verificar na zona de concessão da Mohave Oil and Gas Company na bacia Lusitaniana (Figura 40). O topo da Formação salífera com idade do final do Triássico e princípio do Jurássico está entre o afloramento, -150m e os 5957m (Mohave, 1996) e a sua espessura varia entre 0 e mais de 5000m correspondendo as áreas mais espessas e superficiais aos diapiros, que na área daquela concessão correspondem aos diapiros de Monte Real e Caldas da Rainha.

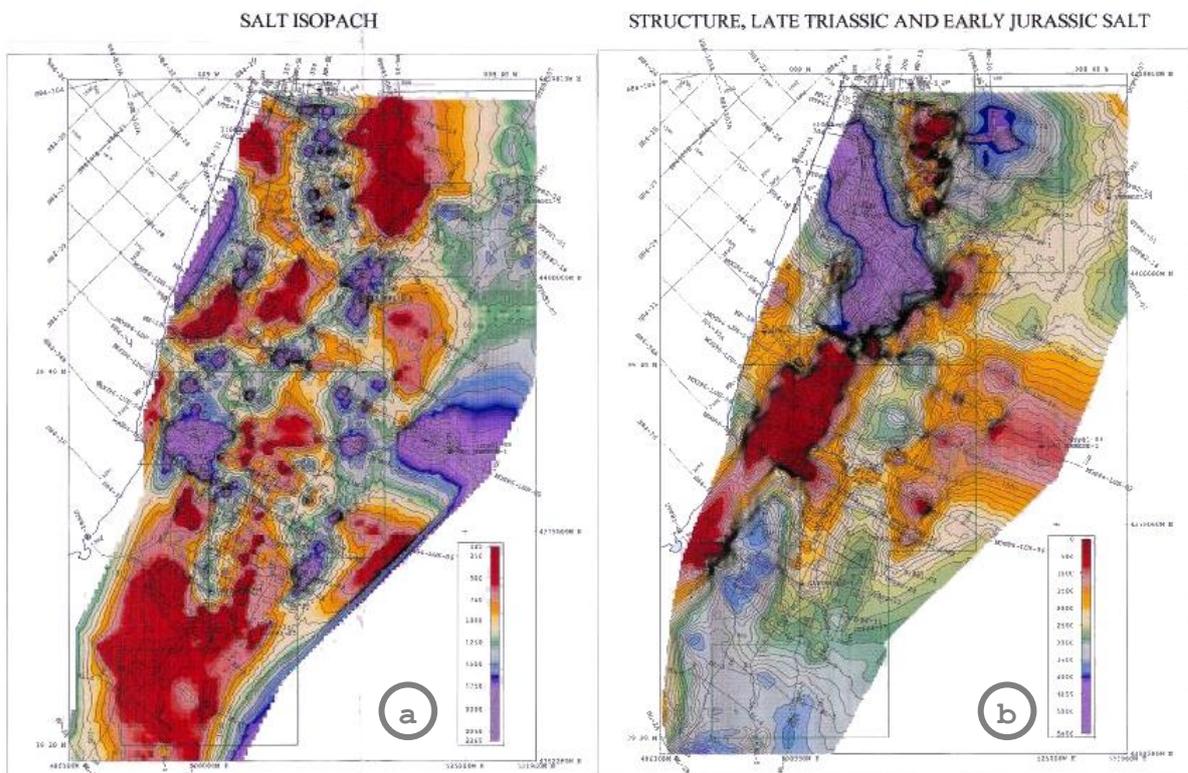


Figura 40 - a) Isopacas e b) profundidade das Margas de Dagorda (Mohave, 1996), (Figura em anexo nas páginas xxvi e xxvii).

Como a profundidade máxima para a instalação de um reservatório de ar comprimido em estrutura salífera é de 1500m as zonas adequadas para estes reservatórios correspondem quase exclusivamente aos diapiros cartografados na Carta Geológica de 1/500000, como está ilustrado na Figura 41, onde foram selecionadas as profundidades inferiores a 1500m.

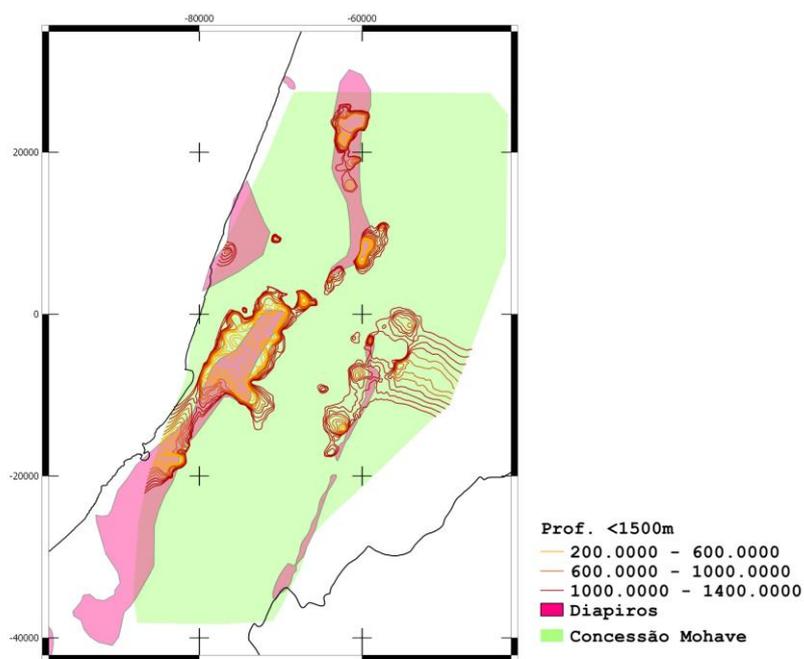


Figura 41 - Relação entre a profundidade adequadas para CAES em reservatórios salíferos e os diapiros cartografados, (Figura em anexo página xxviii).

Diapiros apresentados na Figura 24, retirados de Pereira *et al.* (2013) isóbatas da Formação de Dagorda constantes no relatório da Mohave (1996).

4.2.1. Formação das Margas de Dagorda

As margas de Dagorda originadas por um ambiente de deposição em planície aluvial com invasões marinhas episódicas (Kullberg, 2000) são constituídas por margas e argilas salíferas e por margas gessosas avermelhadas, por vezes acinzentadas ou esverdeadas fortemente enrugadas (Zbyszewski, 1960). No relatório da sondagem São Mamede I (Alves, 1958) as margas de Dagorda são descritas como constituídas quase na totalidade por sal com intercalações de margas, dolomite e anidrite.

Kullberg *et al.* (2006) indica uma constituição típica desta formação com base nessa sondagem, de cima para baixo:

1 - Membro dolomítico com espessura de 250 a 320m essencialmente dolomítico ou margo-dolomítico com pelitos vermelhos e/ou acinzentados e evaporitos;

2 - Membro salífero/dolomítico com espessura de 60-850 m predominantemente dolomítico e/ou calco-margoso e margoso rico em evaporitos (anidrite e halite);

3 - Membro salífero com espessura de 290-800 m caracterizado pelo domínio acentuado de halite, por vezes interestratificada com margas dolomíticas e/ou pelitos margosos e anidrite.

Apesar desta constituição típica as Margas de Dagorda apresentam uma elevada variabilidade na sua composição química (Zbyszewski, 1961). Carvalho (2013) descreveu a Formação das Margas de Dagorda nas sondagens efetuadas para a pesquisa de petróleo e a profundidade a que essa formação foi intercetada, sendo possível verificar a sua variabilidade na tabela 8.

Tabela 8 - Descrição das Margas de Dagorda em várias sondagens (Carvalho, 2013)

Sondagem	Prof. (m)	Descrição
Gaiteiros	2289 - 2368	Dolomitos com níveis anidriticos passando para a base a argilitos siltiticos cinzentos.
Aljubarrota-1	73 - 2478	Argilitos vermelhos e cinzentos alternantes com arenitos, dolomitos calcários, halite, anidrite e raros calcários micríticos.
Aljubarrota-2	2898 - 3027	Argilas siltiticas vermelhas com intercalações de níveis siltiticos e anidriticos.
São Mamede	917 - 1120	Dolomitos e calcários dolomíticos com níveis de anidrite e halite.
	1120 - 3198	Halite rosada translúcida com finas intercalações de calcários dolomíticos, de anidrite e de argilitos cinzentos a vermelhos. Dos 1525 aos 1880 m: argilitos e argilitos calcários com disseminações de halite.

4.2.2. Complexo Margo Carbonatado de Silves

Na Bacia Algarvia as estruturas salíferas estão associadas ao Complexo Margo Carbonatado de Silves, com espessuras entre 260 a 360m. As rochas salíferas afloram a Sul de uma linha tectónica que se prolonga por Sagres-Algoz-Tavira (Terrinha et al., 2006).

Para além dos diapiros cartografados, na bibliografia está descrita a existência de um diapiro em Albufeira (Terrinha, 2006).

4.2.3. Localização das estruturas salíferas

As estruturas salíferas identificadas para a instalação de um reservatório de ar comprimido correspondem aos diapiros identificados na cartografia aos quais se adiciona uma faixa (*buffer*) de 1,6km para implementação das instalações superficiais de um sistema de CAES, conforme descrito na metodologia.

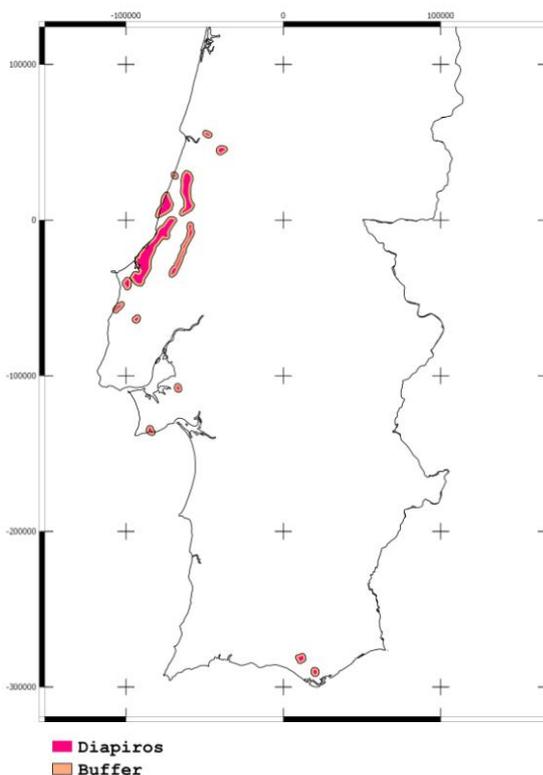


Figura 42 - Localização das estruturas salíferas, (Figura em anexo página XXIX).

4.3. Reservatórios em rocha maciça

Na metodologia seguida neste trabalho para identificar reservatórios em rochas maciças foi apenas considerada a hipótese do reservatório ser instalado em minas subterrâneas abandonadas, não identificou a existência de nenhuma mina onde o armazenamento de ar comprimido fosse viável, com exceção das minas de sal-gema.

Não foi possível validar as propriedades das minas inventariadas tais como as suas dimensões, estabilidade e estanquicidade das minas inventariadas, mas pela sua antiguidade e estado de conservação, muitas das minas deverão estar bastante degradadas. Também não foi avaliada a litologia onde as minas se encontram e assim foram inventariadas minas em litologias desfavoráveis.

As minas de sal-gema, mesmo que estejam em funcionamento como é o caso da mina de Loulé, podem possuir galerias abandonadas que sejam favoráveis ao armazenamento de ar comprimido. Esta solução tem bastante potencial na utilização para CAES diminuindo os custos de escavação, sendo apenas necessário adaptar a cavidade ao CAES.

Assim as minas não foram utilizadas como estruturas geológicas para armazenamento de ar comprimido. Com exceção das minas de sal-gema que estão associadas aos diapiros cartografados no presente trabalho. Assim, a avaliação destas minas será efetuada no âmbito das estruturas salíferas.

5. Superfície de terreno disponível para instalação de central de CAES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para a determinação da superfície de terreno adequada para CAES seguindo a metodologia descrita no capítulo 3 e de acordo como os critérios definidos por Mays *et al.* (2012). As zonas que cumprem os critérios de densidade populacional, declive, áreas protegidas, áreas inundáveis são apresentadas na seguinte figura 43a e as estruturas geológicas identificadas com o respetivo *buffer* na figura 43b.

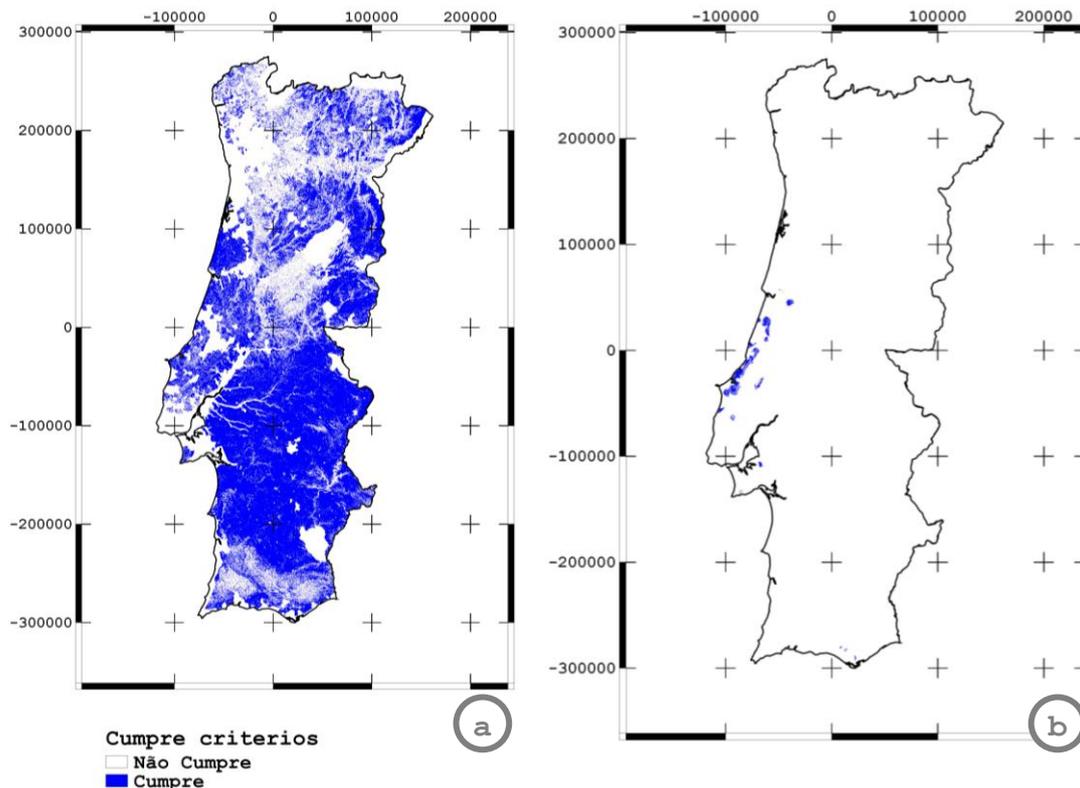


Figura 43 - a) Superfície de solo que cumpre os critérios de densidade populacional, declive, áreas protegidas, áreas inundáveis; b) estruturas geológicas identificadas e respetivo buffer, (Figura em anexo nas páginas xxx e xxxi).

Grande parte da área disponível para a instalação de uma central de CAES não considerando a proximidade de estruturas geológicas, estão localizadas na região do Alentejo principalmente devido a declives reduzidos e baixa densidade populacional. A norte de Aveiro e no Algarve, pela densidade populacional e declives elevados não existe muita superfície de solo disponível. Na zona Centro e Norte o elevado declive é o principal critério de exclusão, enquanto na zona de Lisboa incluindo a margem esquerda do Tejo o critério é a densidade populacional.

Em Portugal Continental as estruturas geológicas identificadas para armazenamento de ar comprimido foram os diapiros e o anticlinal na Formação do Grés Inferior próximo de São Pedro de Muel. Estas estão localizadas maioritariamente na Bacia Lusitaniana, Região Oeste. Na Península de Setúbal e na região algarvia existem apenas duas estruturas identificadas.

A conjugação dos critérios apresentados nas figuras 43a e 43b permite obter a superfície de solo disponível para a instalação de uma central de CAES, que devido às das estruturas geológicas identificadas, estão principalmente localizadas na zona Oeste de Portugal. Na zona do Algarve e na Península de Setúbal são pequenas áreas que estão disponíveis para uma central de CAES (Figura 44).

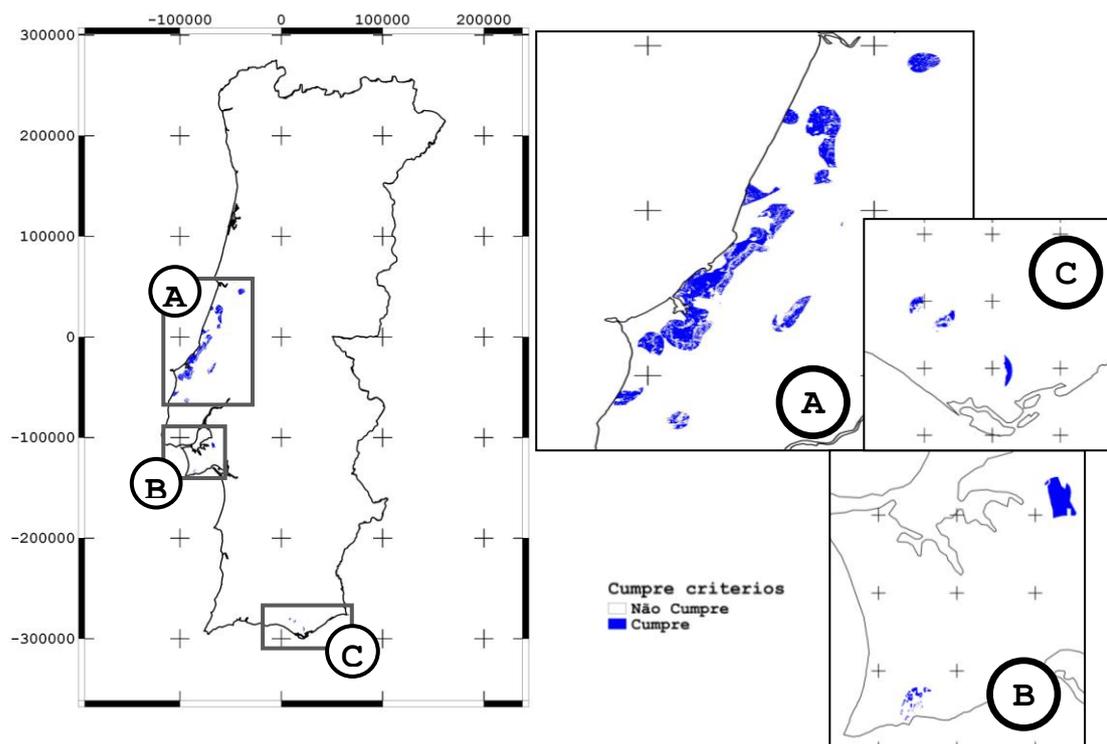


Figura 44 - Superfície de solo disponível para a instalação de uma central de CAES em Portugal Continental e pormenores das zonas identificadas, (Figura em anexo página xxxii).

A - Região Oeste

B - Península Setúbal

C - Algarve

A estrutura anticlinal identificada para armazenar ar comprimido em formações detríticas fica junto ao diapiro de São Pedro de Muel. Seguindo a metodologia descrita por Mays et al. (2012) a quase totalidade da estrutura aquífera, e grande parte do Diapiro de São Pedro de Muel são excluídos de áreas adequadas para CAES pois estão situados numa zona de elevada densidade populacional, a freguesia da Marinha Grande.

Contudo uma análise geográfica a uma escala mais reduzida desta área (Figura 45) permite verificar que, apesar da freguesia da Marinha Grande possuir uma densidade populacional superior a 193hab/km², na localização do anticlinal no Grés Inferior identificada no ponto 4.1.2.1 do presente trabalho é possível encontrar zonas onde a densidade populacional é bastante inferior.

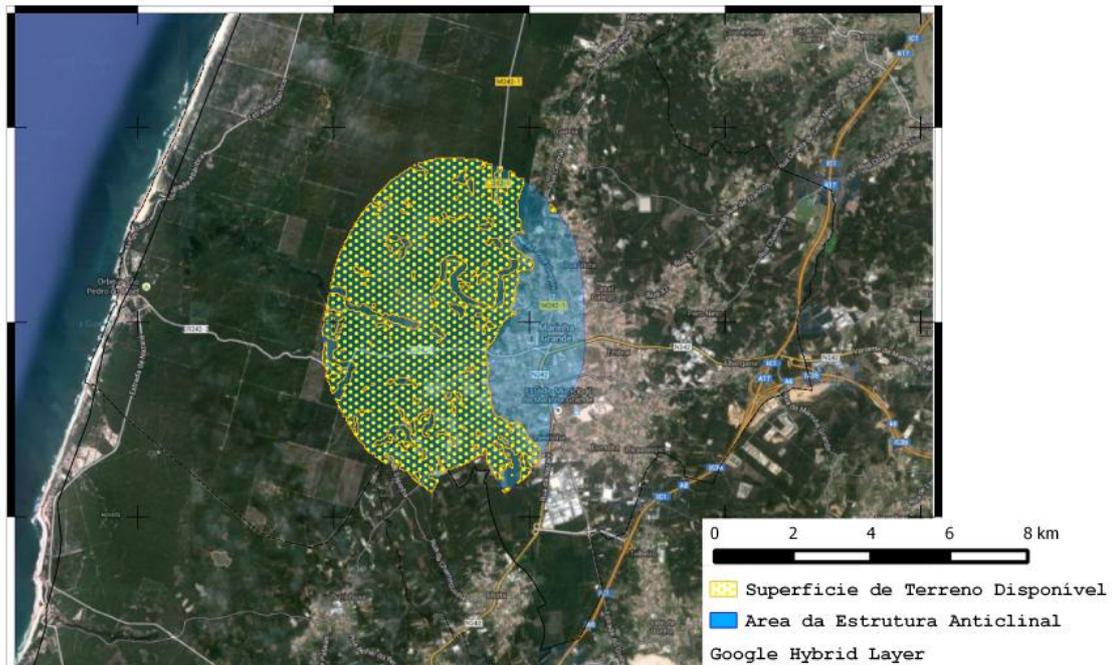


Figura 45 - Superfície de terreno disponível na área do anticlinal do Grés Inferior, (Figura em anexo página XXXIII).

Na Figura 45 está representada com ponteados a superfície de terreno na área da estrutura anticlinal que obedece a critérios de declive, massa de água, áreas protegidas, zonas inundáveis e não é classificada como território artificializado no projeto Corine Land Cover (Caetano *et al.*, 2009).

5.1. Análise espacial da correspondência entre potenciais reservatórios e produção de energia

A informação de produção energética por fontes renováveis apresentada na metodologia foi relacionada com superfície de solo disponível para a instalação de uma central de CAES na Figura 44.

5.1.1. Potencial Eólico

Relacionando o potencial de produção de energia eólico medido pela velocidade do vento a 80m de altura com a superfície de solo disponível, é possível verificar que na Região Oeste (Figura 46a) se pode encontrar superfície de solo disponível para a instalação de uma central de CAES e velocidade média do vento a 80m (Geoportal do LNEG, 2013) superiores a 6 m/s, representados de amarelo a vermelho na figura. Destas, a área do diapiro do Vimeiro, junto à linha de costa, é aquela que apresenta uma velocidade mais elevada. A zona associada ao diapiro das Caldas da Rainha, parte S e W, também mostra velocidade do vento elevada.

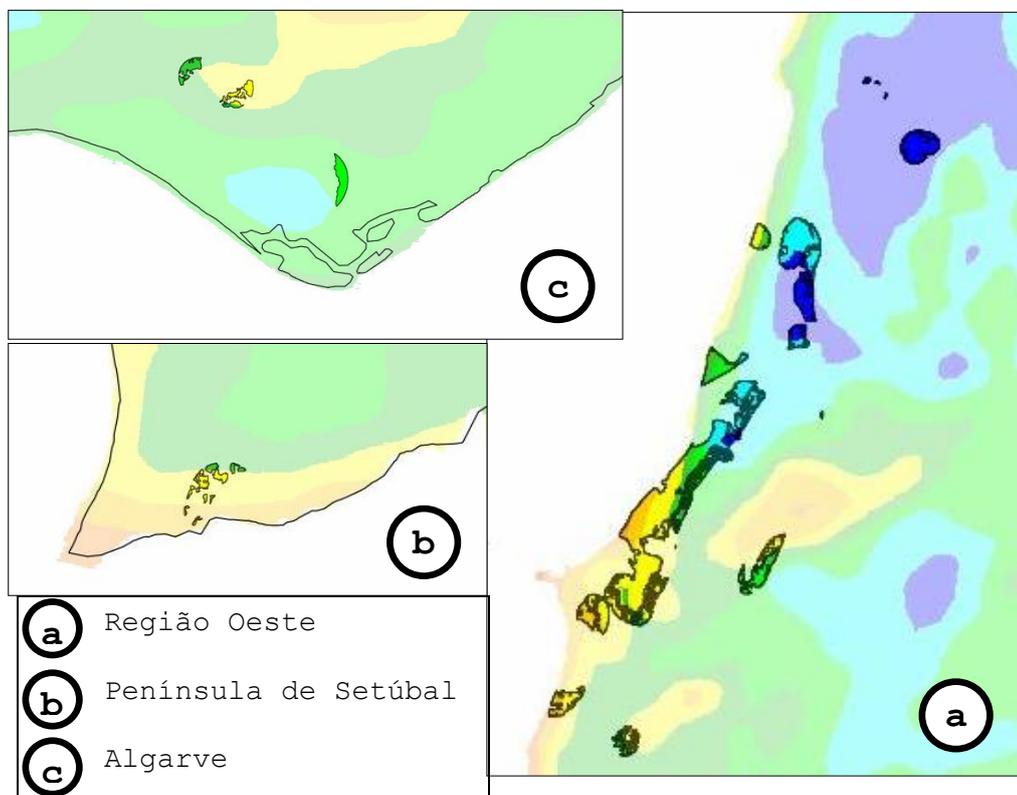


Figura 46 - Sinergias entre o potencial eólico e a superfície de solo disponível, (Figura em anexo página xxxix)..

Na zona de Sesimbra, na península de Setúbal (Figura 46b), a velocidade do vento também é elevada, principalmente na zona de costa, onde existem pequenas áreas de superfície de solo disponível. No Algarve (Figura 46c) é possível encontrar superfície de solo disponível, associadas ao diapiro de Loulé, em zonas de velocidade do vento elevadas. Nesta zona também existem as minas de Sal Gema de Loulé.

5.1.2. Radiação Solar

É na região Algarvia (Figura 47c) que se encontra a melhor conjugação entre a radiação solar incidente e a superfície de solo disponível para a instalação de uma central de CAES, já que a radiação tem valores anuais de 1800kWh/m^2 . A zona do Diapiro de Loulé e a sua exploração numa mina de sal-gema constituem fatores de interesse para a instalação de um reservatório de ar comprimido.

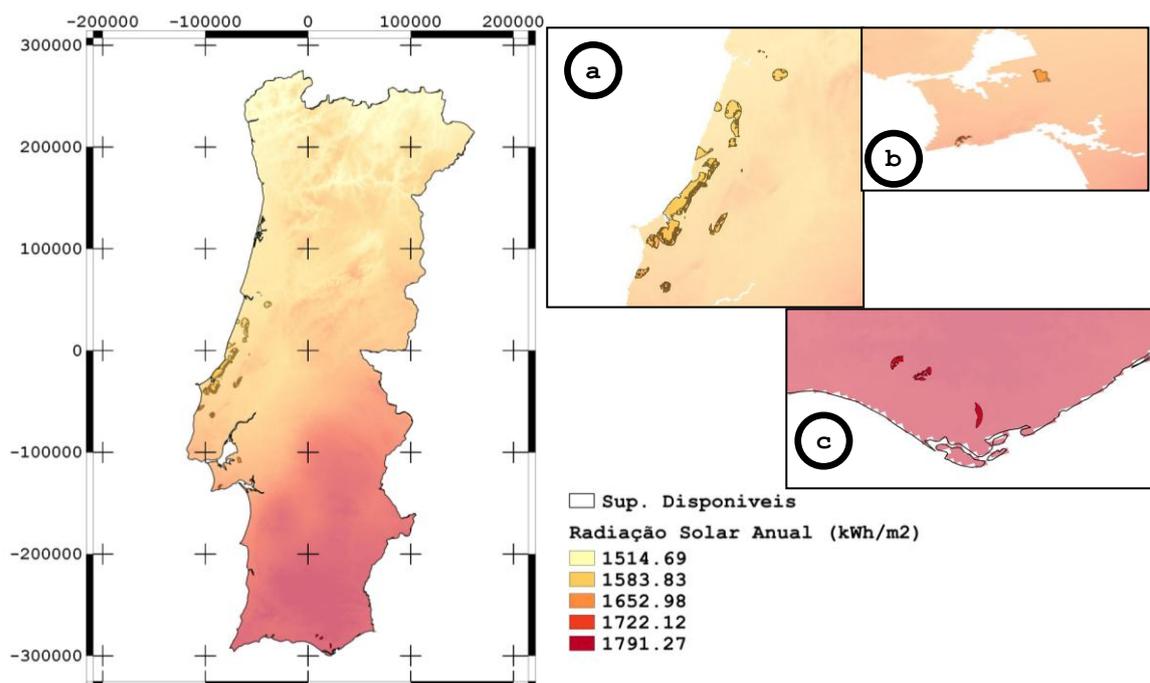


Figura 47 - Sinergias entre a Radiação Solar e a superfície de solo disponível, (Figura em anexo página xxxv).

Na bacia Lusitaniana a radiação solar anual está entre 1500 e 1600kWh/m^2 , o potencial para produzir energia elétrica a partir da radiação solar é menor (Figura 47a). Na Península de Setúbal (Figura 47b) a radiação solar é próxima de 1700kWh/m^2 .

5.1.3. Centrais electroprodutoras por FER

Considerando as centrais de FER já existentes e a sua potência instalada, é na região Oeste que existe maior sinergia entre a produção de eletricidade, através da energia eólica, e a superfície de terreno para CAES. Nesta região destaca-se na zona do Diapiro de Rio Maior a existência do Parque Eólico da Serra dos Candeeiros com uma potência instalada de 111 MW e o diapiro de Matacães, próximo do qual existem vários parques eólicos de menores dimensões.

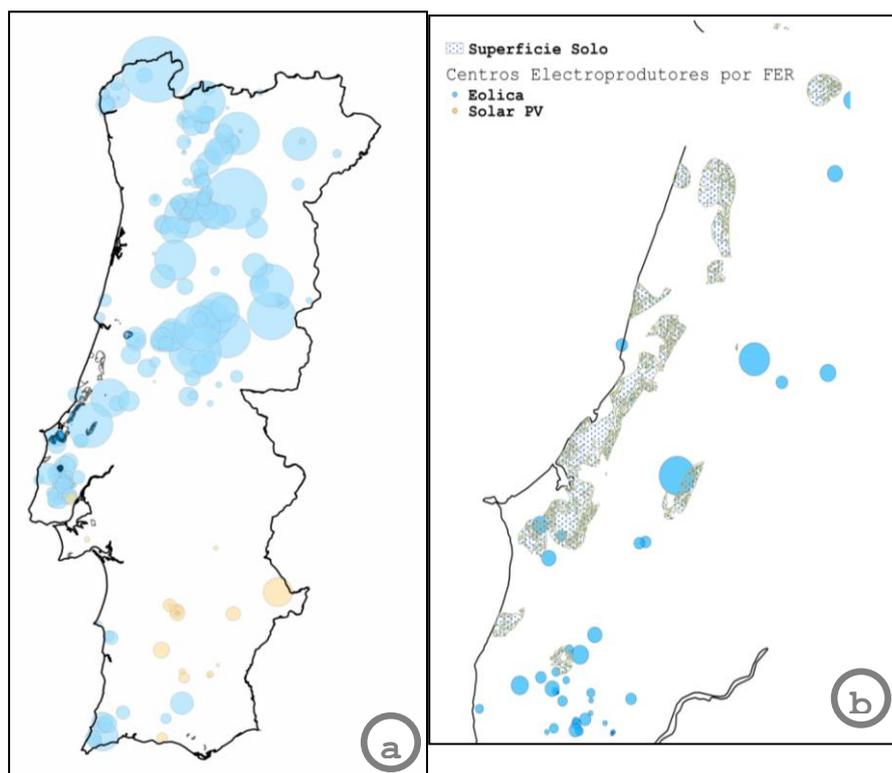


Figura 48 - a) Centros Electroprodutores por FER e superfície disponível. b) Pormenor da Região Oeste, (Figura em anexo página xxxvi).

5.1.4. Sinergias entre as FER e as estruturas geológicas

A zona do diapiro de Loulé mostra algum interesse para a instalação de uma central de CAES, pois existe potencial para a produção de eletricidade por fontes eólica e solar conjugado com a existência de uma mina de sal-gema, possivelmente com galerias abandonadas que poderiam ser convertidas em reservatório de ar comprimido.

A superfície de solo identificada nas proximidades do diapiro de Maceira tem potencial para a produção de eletricidade por energia eólica que ainda não se encontra aproveitado, tal como nas proximidades dos diapiros das Caldas da Rainha, na zona da Foz do Arelho, e de Sesimbra.

A parte Sul do diapiro das Caldas da Rainha, o diapiro de Matações e de Rio Maior apresentam potencial de produção por energia eólica e parques eólicos que a aproveitam. Destes, no diapiro de Rio Maior está localizado o segundo parque eólico de Portugal, em termos de potência instalada, o que permitiria desenvolver uma central de CAES associada a esse parque eólico.

Nas outras áreas que cumprem os critérios definidos para a identificação da superfície de solo disponível, o potencial de produção de eletricidade por fontes eólica e solar é reduzido.

A estrutura anticlinal do Grés Inferior localizada próximo da Marinha Grande também está inserida numa zona sem potencial de produção de energia por FER.

5.2. Detalhe sobre a zona de Rio Maior

A zona de Rio Maior conjuga a existência de uma estrutura geológica, o diapiro de Rio Maior, com o parque eólico da Serra dos Candeeiros, e possui condições de superfície de terreno adequadas, de acordo com os critérios adotados neste trabalho. Assim é considerada uma das zonas com maior potencial para a instalação de uma central de CAES.

A presença de um gasoduto na zona, o que possibilita a instalação de uma central de CAES convencional que utilize gás natural como combustível, enquanto a existência de salinas que permite o aproveitamento da salmoura proveniente da mineração por dissolução e finalmente a existência de um parque eólico com elevada potência instalada ligado a linhas de média ou alta tensão são fatores favoráveis à instalação de uma central da CAES nesta zona (Figura 49).

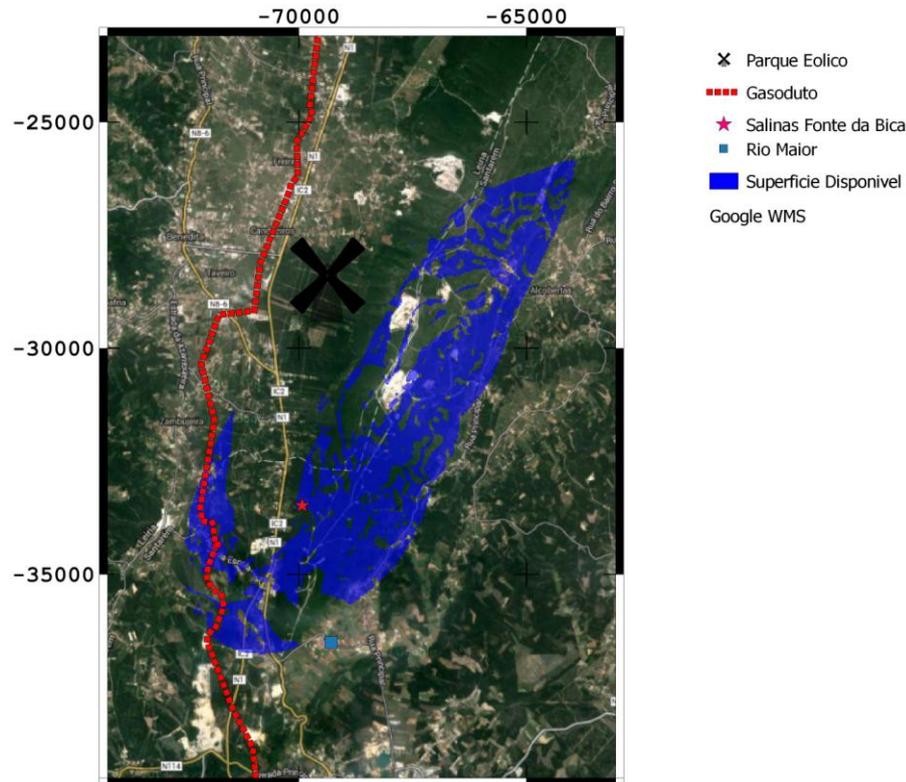


Figura 49 - Enquadramento da localização de uma possível central de CAES com armazenamento de ar comprimido no diapiro de Rio Maior, (Figura em anexo página xxxvii).

A superfície do solo disponível para a instalação de uma central de CAES está na ponta Sul do diapiro, próximo de Rio Maior. Na parte Norte existe o Parque Natural da Serra de Aire e Candeeiros que conjuntamente com os declives elevados são os principais critérios de exclusão.

5.3. Caracterização geológica do diapiro de Rio Maior

Devido à posição marginal da zona de Rio Maior na Bacia Lusitaniana não existem sondagens de pesquisa de petróleo próximas do Diapiro, pois está no limite da concessão da Mohave (1996), no limite do Maciço Calcário Estremenho estudado por Carvalho (2013) e da sub-bacia de Rio-Maior estudada por Fonseca (1996). Contudo Zbyszewski em 1961 estudou o diapiro de Rio Maior e as suas propriedades.

O diapiro de Rio Maior, constitui a parte Sul do diapiro de Porto de Mós - Rio Maior, e está localizado no limite Este da Bacia Lusitaniana. Na carta Geológica 26-D - Caldas da Rainha - está representado pelo afloramento de margas e calcários do Complexo de Dagorda, entre Formações Jurássicas, numa estreita faixa com orientação NNE-SSW, entre Rio Maior de Porto de Mós. A Oeste está a Serra de Candeeiros, também denominada Serra da Lua, e a Este o planalto de Santo António com formações do Jurássico e as formações Cenozoicas da Bacia do Tejo (Figura 50).

Kullberg (2000) indica que é um típico diapiro limitado por falhas e que afloram alguns filões de rochas ígneas no seu interior. Estes afloramentos são predominantemente de Basaltos e são mais expressivos no sul do diapiro.

A separação entre o diapiro de Porto de Mós, a Norte, e o diapiro de Rio Maior, a Sul é materializada entre o Serro Ventoso e o Alcobertas, na depressão da Mendiga, onde a Formação de Dagorda não está visível, aflorando Formações do Jurássico Superior. Nessa depressão existem sondagens de pesquisa de carvão, denominadas por Mendiga S1 a S4 com uma profundidade máxima de 700m que não intersectam a formação das Margas de Dagorda.

Entre Alcobertas e Teira o afloramento da Formação de Dagorda é uma banda estreita até voltar a desaparecer na passagem da Falha do Cidral (Figura 50 e 51), ficando os Grés Superiores em contacto com os calcários do Jurássico Médio que são cortados por filões doleríticos e de basaltos com analcite (Zbyszewski, 1961).

Para SW do Vale da Laranja, onde antigamente existiu uma fonte Salgada (Zbyszewski, 1961), recomeça o afloramento das Margas de Dagorda no que Zbyszewski (1961) denomina de vale tifónico de Fonte da Bica devido existência de água salgada perto de uma localidade com esse nome, a norte de Rio Maior. A salmoura, retirada de um pequeno poço a 6m de profundidade, é aproveitada para sal nas Marinhas de Fonte da Bica (Zbyszewski, 1961).

Próximo de Pé da Serra o vale tifónico alarga para SW onde as Margas de Dagorda constituem um afloramento de 4km de comprimento e 1,2km de largura. A vertente Oeste do vale é constituída pelos calcários do Jurássico Médio e a vertente leste pelos Grés Superiores, Formação da Lourinhã, assentes na camada de Alcobaça e mais para Sul um filão doleríticos seguido da Formação de Alcobaça subjacente a depósitos Cenozoicos (Figura 50).

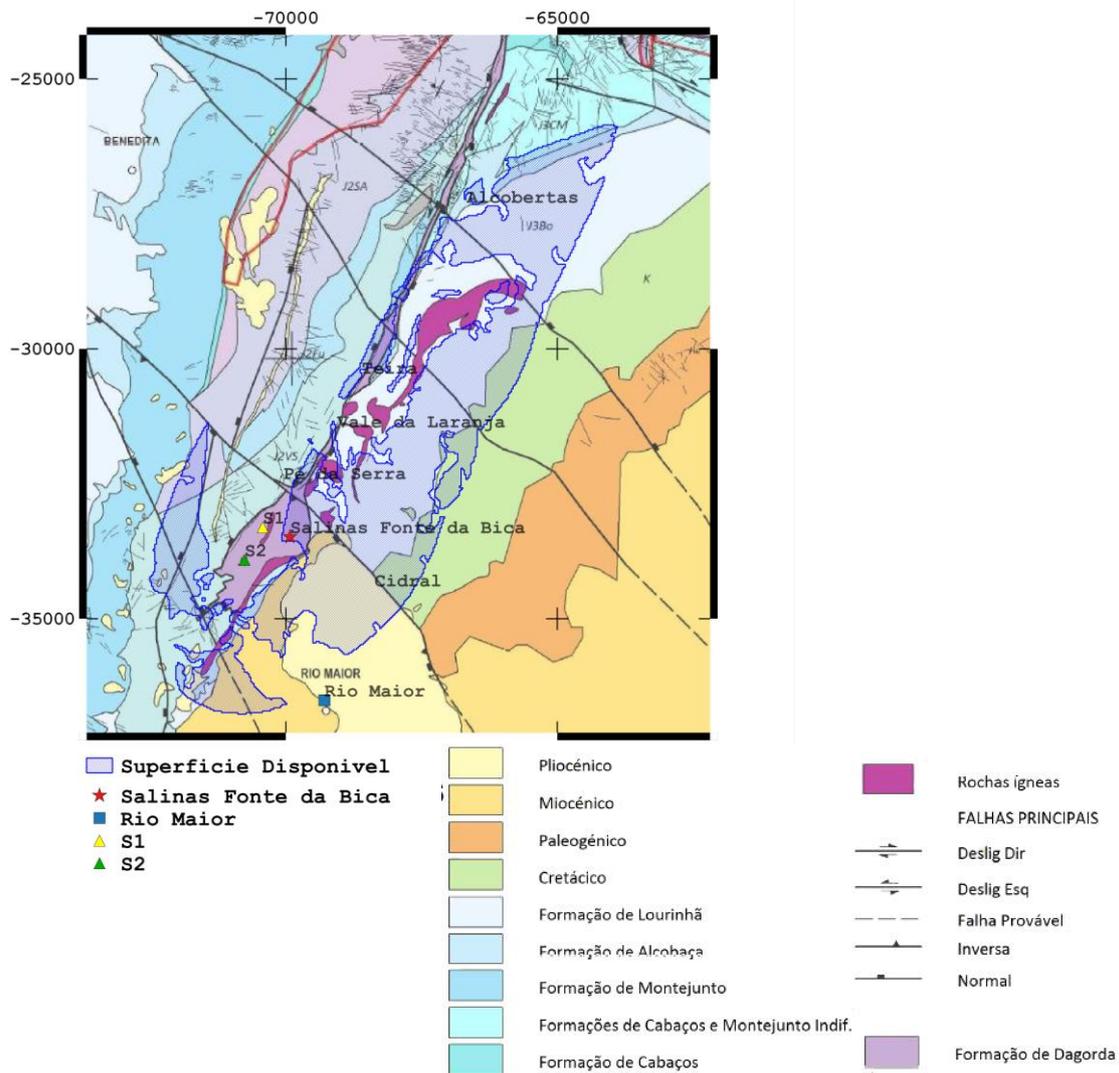


Figura 50 - Geologia da zona do Diapiro de Rio Maior à escala 1:50000. Adaptado de Carvalho (2013), (Figura em anexo página xxxviii).

A maior área de superfície de terreno disponível está a oeste do eixo diapiro, onde é esperado a espessura das Margas de Dagorda seja inferior, pois está no limite da bacia Lusitaniana (Figura 50).

Na zona do diapiro de Rio Maior, Carvalho (2013) identificou as falhas apresentadas na figura 51, em que é possível verificar que têm direções predominantes de NNE-SSW como a falha de Rio Maior - Porto de Mós, que acompanha todo o bordo oeste do diapiro e falhas perpendiculares a estas, com direção NNW-SSW como a falha do Cidral, que aparentemente corta a Formação de Dagorda. Zbyszewski (1961) indica que na extremidade SSW do vale tifónico existem varias falhas de orientação NNE-SSW e N-S (Figura 51).

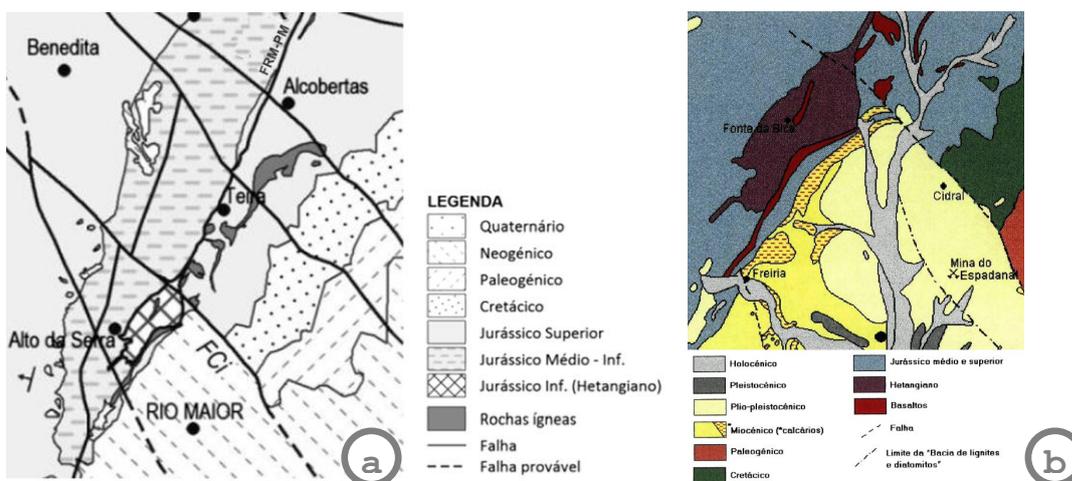


Figura 51 - Falhas na zona de Rio Maior de acordo com a) Carvalho (2013) e b) Fonseca (1996); (Figura em anexo na página XXXIX).

FCi - Falha do Cidral; FRM-PM - Falha de Rio Maior Porto de Mós

Esta área está situada numa zona de perigosidade sísmica em que a intensidade sísmica esperada se situa entre XIII a IX (na escala de Mercalli modificada, e para um sismo com período de retorno de 975 anos, com 5% de probabilidade de excedência em 50 anos). Os epicentros ocorridos em toda a região oeste têm magnitude inferior a 4 na escala de Richter.

Zbyszewski (em Fonseca, 1996) propôs um modelo de formação do diapiro de Rio Maior que relaciona a deposição, durante o Jurássico, de uma camada sedimentar carbonatada mais espessa no centro que nos bordos da bacia com a origem do diapiro (Figura 52). Os movimentos tangenciais, bem como uma forte compressão da Formação de Dagorda do centro da bacia provocaram a sua ascensão e a expulsão pelos bordos, originando os diapiros das Caldas da Rainha, por um lado, e de Porto de Mós - Rio Maior, por outro (Fonseca, 1996).

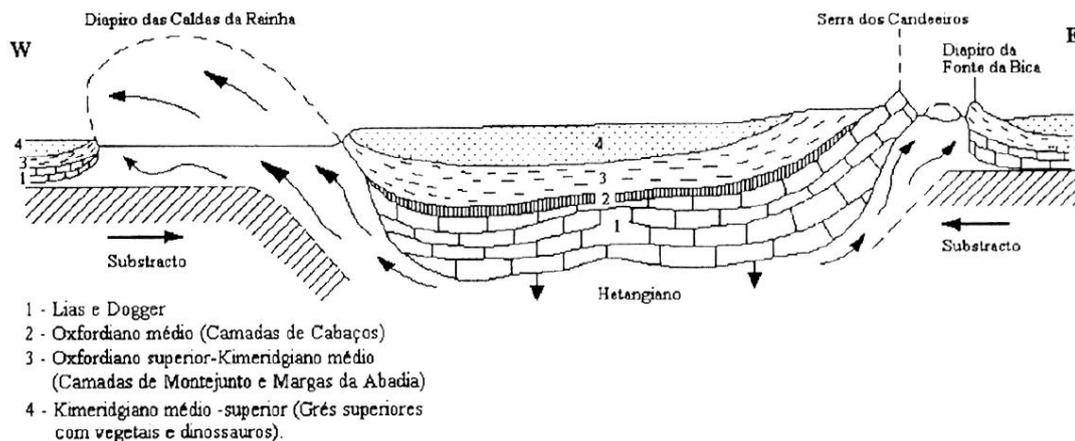


Figura 52 - Representação esquemática do modelo de formação dos diapiros das Caldas da Rainha e de Rio Maior (Zbyszewski (1959) em Fonseca, 1996), (Figura em anexo página XL).

Carvalho (2013) associa a origem do diapiro à reativação de uma falha antiga enraizada no soco, correspondente à falha Rio Maior - Porto de Mós, durante o Jurássico Inferior a Médio que despoletou a formação de um diapiro. As movimentações do diapiro ocorreram mais recentemente durante a compressão no Miocénico, em que a deslocação das Margas de Dagorda originou o afundamento na área de Rio Maior o que originou a sub-bacia Pliocénica de Rio Maior (Fonseca, 1996).

5.4. Caracterização litológica do diapiro

Na área de Rio Maior o afloramento das Margas de Dagorda está descrito por Zbyszewski (1960) como margas vermelhas com intercalações de calcários dolomíticos. Zbyszewski (1961) apresentou o estudo de duas sondagens na zona do Fonte da Bica no eixo anticlinal do diapiro com 352,1 e 250,3m de profundidade respetivamente, denominadas por S1 e S2 na figura 50 e realizou análises químicas às amostras permitindo verificar o seu conteúdo salífero.

Em ambas as sondagens foi verificada a presença de uma camada margosa mais superficial e de uma camada salífera aos 78,5m e 69m nas sondagens 1 e 2. Na figura 53 é observável a relação entre o cloreto de Sódio (NaCl) e os resíduos insolúveis ao longo das sondagens. Estes dois parâmetros são indicativos da qualidade do sal-gema para a formação e estabilidade de um reservatório e para a mineração por dissolução.

Na sondagem S1 o cloreto de sódio varia entre 12,72% e 89,16%, os resíduos insolúveis entre 9,58% e 89,16%, a percentagem de anidrite e de outros elementos solúveis é baixa. Na sondagem S2 o cloreto de cálcio varia entre 56,66% e 87,10%, os resíduos insolúveis entre 10,55% e 36,07%, e a percentagem de anidrite e outros materiais solúveis é muito baixa (<1%).

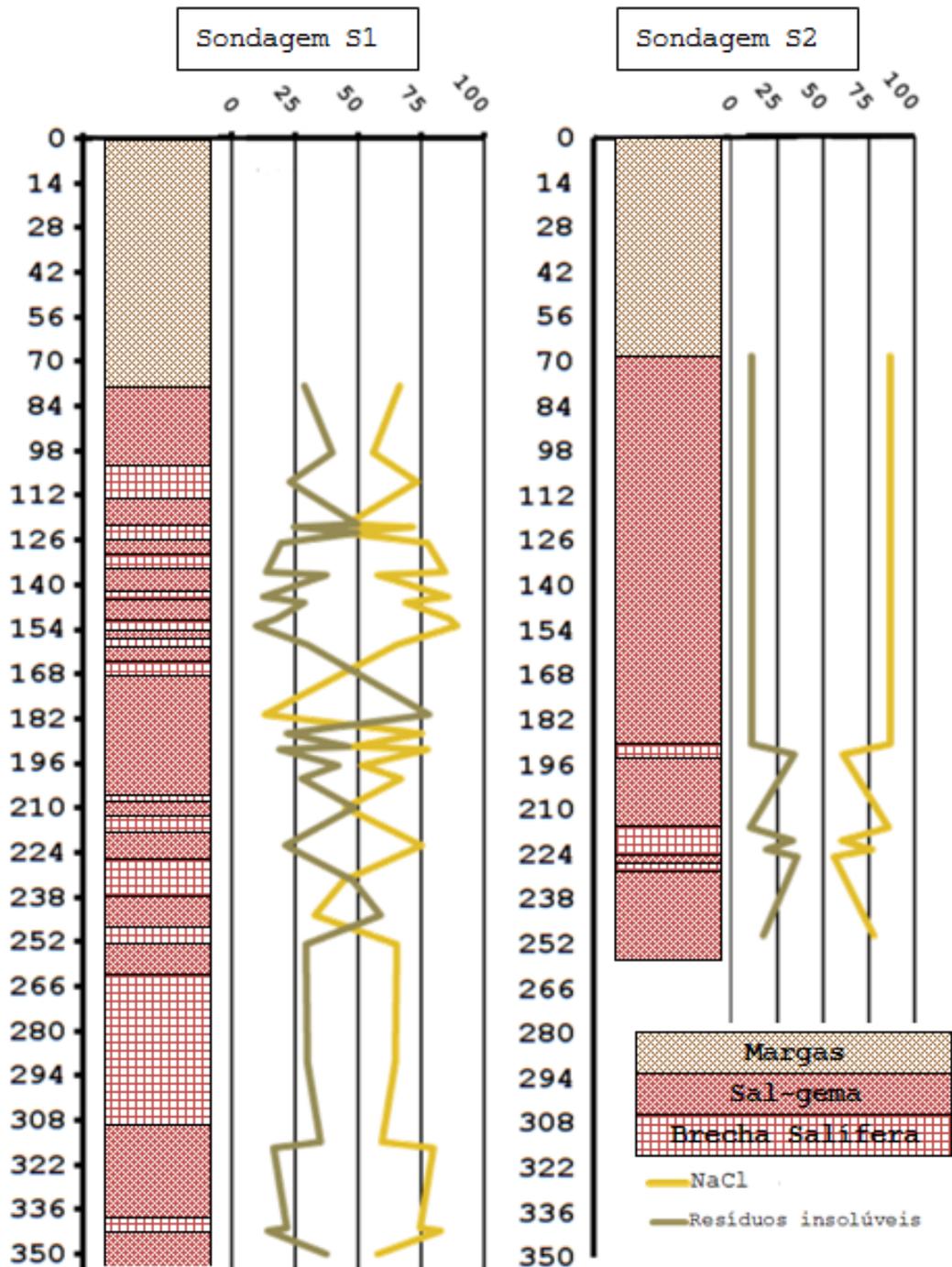


Figura 53 - Litologias e percentagens de material solúvel nas sondagens S1 e S2 no diapiro de Rio Maior. Efetuado com base em dados de Zbyszewski (1961), (Figura em anexo página XLI).

Apesar dos valores indicados de um conteúdo ótimo de 95% de halite ou mínimo de 60% para a formação de uma cavidade salina, bibliografia consultada sobre o armazenamento subterrâneo de gás natural (Evan, 2008; Gillhaus, 2007), permite afirmar que é possível realizar cavidades em estruturas subterrâneas com as propriedades verificada nas sondagens descritas por Zbyszewski. Gillhaus 2007 indica ainda que em Portugal a estrutura salífera é constituído por brecha salina heterogénea contendo blocos não salinos o que não impede a construção de novas cavidades.

Contudo as sondagens S1 e S2 não devem ter atingido o membro mais salífero das Margas de Dagorda e, tal como referido por Zbyszewski (1961) uma maior concentração salífera é encontrada a maior profundidade. Para a constituição de uma cavidade seria necessário realizar sondagens mais profundas, que posteriormente poderiam servir como furos produtivos. Essas sondagens também deveriam permitir determinar a composição química local da Margas de Dagorda, pois a distribuição irregular das impurezas no meio do complexo salífero mostram haver probabilidades de variações locais de certa importância na composição do sal-gema (Zbyszewski, 1961).

No relatório da Mohave (1996) a informação sobre a profundidade da formação das Margas de Dagorda não representa a existência do Diapiro de Rio Maior (Figura 40). Talvez por esta estrutura estar no limite da sua concessão e não possuir indícios de petróleo, não terá sido representada com grande detalhe.

No mesmo relatório é indicado que a estrutura do topo do Triássico o Grés de Silves ocorre a uma profundidade de 3500m a norte da zona de estudo afundando para sul até 4600m. Estas profundidades indicam uma grande espessura da formação das Margas de Dagorda, o que possibilita a existência de zonas com sal-gema mais puro a maior profundidade.

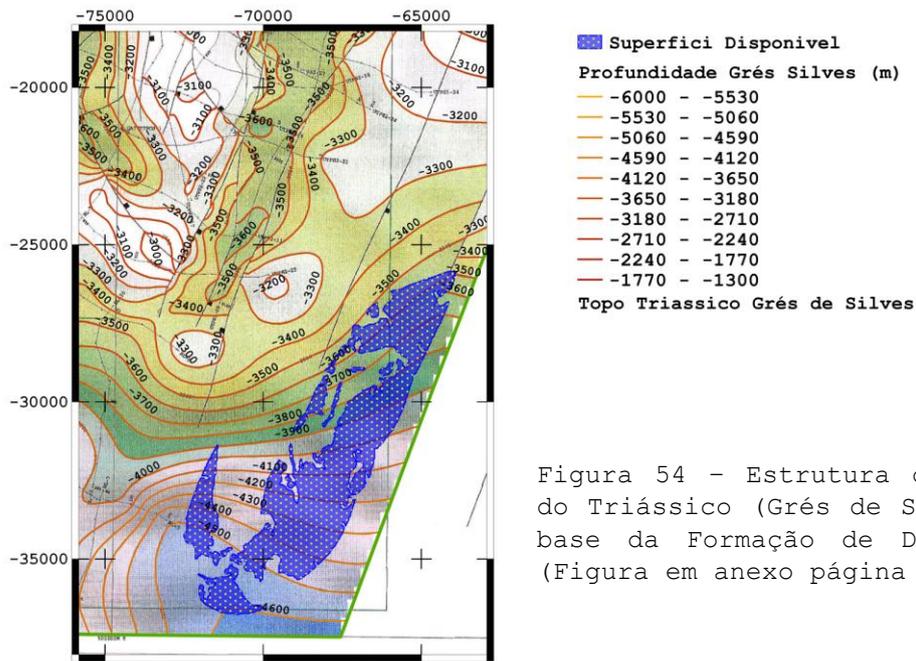


Figura 54 - Estrutura do topo do Triássico (Grés de Silves), base da Formação de Dagorda, (Figura em anexo página XLII).

A zona do diapíro de Rio Maior, escolhido como caso de estudo, dispõe de superfície de solo disponível para a instalação de uma central de CAES associada à produção de eletricidade pelo parque eólico dos Candeeiros. A Formação salífera das Margas de Dagorda dispõe de propriedades químicas e geométricas que possibilitam a instalação de um reservatório de ar comprimido, contudo será necessário efetuar estudos mais detalhados da geometria e da constituição química do diapíro.

6. Conclusões

Os sistemas de Armazenamento de Energia em Ar Comprimido (CAES) constituem a única alternativa de armazenamento de energia a grande escala às Centrais Hidrelétricas com Bombagem. A conjugação do CAES com a produção de eletricidade por Fontes Renováveis de Energia (FER) permite atenuar a variabilidade e intermitência das FER, contribuindo para a sua maior introdução no mix energético e para a segurança e qualidade da rede elétrica.

Neste trabalho foram identificadas as formações geológicas: Grés Inferior do Cretácico, Margas de Dagorda e Complexo Margo carbonatado de Silves como formações geológicas com as características necessárias para o armazenamento de ar comprimido.

O principal obstáculo para a utilização da Formação do grés Inferior como reservatório de ar comprimido é a sua pouca profundidade em grande parte da Bacia Lusitaniana e a consequente utilização como camada produtiva em aquíferos de água potável. Ainda assim foi identificada uma estrutura anticlinal com a capacidade de armazenar o ar comprimido a profundidades adequadas na zona da Marinha Grande.

Não se afasta a possibilidade de existirem outras estruturas favoráveis na mesma formação que uma análise mais sistemática ou a aquisição de nova informação permitam identificar. Para a instalação de um reservatório de ar comprimido numa estrutura aquífera detrítica em Portugal Continental será possível analisar os registos das sondagens existentes, nomeadamente as de pesquisa de petróleo na bacia lusitaniana, com o objetivo de encontrar uma formação geológica detrítica profunda que não esteja referenciada como aquífero, o que não foi efetuado de um modo sistemático neste trabalho.

As Margas de Dagorda e do Complexo Margo Carbonatado de Silves apresentam uma grande variabilidade nas suas propriedades químicas e geométricas. Foram selecionadas ocorrências destas formações como potenciais reservatórios geológicos para armazenamento de ar comprimido.

Esta tese não aborda a possibilidade de armazenamento em cavidades em rocha maciça, que representam tipos rochosos predominantes na maior parte do território nacional e em muitas das zonas com maior potencial de produção de energia eólica. Os mapas com as características superficiais e a inventariação das minas subterrâneas podem constituir um primeiro passo sobre a capacidade de armazenamento nesse tipo de reservatório.

Seguindo os critérios apresentados foi determinada a superfície de solo em Portugal Continental disponível para a instalação de uma central de CAES. O principal critério de exclusão foi a proximidade a estruturas geológicas, já que apenas foram identificadas estruturas na bacia Lusitaniana e Algarvia.

As sinergias entre a produção elétrica por fontes renováveis e as formações geológicas identificadas ocorrem principalmente na Região Oeste, devido ao elevado potencial eólico em zonas de ocorrência da Formação de Dagorda. Na Região do Algarve o maior potencial está associado à energia solar ao diapiro de Loulé que conjuga a sua mina de sal-gema com um potencial eólico moderado e elevado potencial solar.

O diapiro de Rio Maior conjuga uma estrutura geológica com produção de eletricidade no parque eólico dos Candeeiros, o que indica a presença de linhas elétricas de média ou alta tensão. Essa zona dispõe ainda um gasoduto permitindo a instalação de uma central de CAES convencional. Adicionalmente as salinas de Fonte da bica possibilitam reutilização da salmoura originada durante o processo de mineração por dissolução.

A percentagem de material solúvel da Formação de Dagorda é bastante variável, como se verificou nas sondagens apresentadas, mas os valores são adequados para o desenvolvimento de uma cavidade. Este diapiro também aparenta possuir um volume e profundidade suficiente para a instalação de um reservatório de ar comprimido. Contudo será necessário proceder a uma avaliação detalhada da geometria do Diapiro, tendo em atenção a presença de falhas, e uma análise química das zonas mais profundas da Formação de Dagorda antes de determinar as características do reservatório.

7. Referências

- ADELE, (2010). Adiabatic Compressed-Air Energy Storage for Electricity Supply; RWE Power
- Allen, R. D.; Doherty, T. J. Thorns; R. L., (1982). Geotechnical Factors and Guidelines for Storage of Compressed Air in Solution Mined Salt Cavities; Pacific Northwest Laboratory Operated for the U.S. Department of Energy by Battelle Memorial Institute; Washington.
- Allen, R. D.; Doherty, T. J. Thorns; R. L., (1982). Geotechnical Factors and Guidelines for Storage of Compressed Air in Excavated Hard Rock Cavities; Pacific Northwest Laboratory Operated for the U.S. Department of Energy by Battelle Memorial Institute; Washington.
- Allen, R.D.; Doherty, T. J.; Erikson, R. L; Wiles, L.E., (1983). Geotechnical Factors Affecting Storage of Compressed Air in Porous Rock Reservoirs; Pacific Northwest Laboratory Operated for the U.S. Department of Energy by Battelle Memorial Institute; Washington.
- Almeida, C.; Mendonça, J.L.; Jesus, M.R.; Gomes, A.J., (2000). Sistemas Aquíferos de Portugal Continental, Relatório. INAG, Lisboa, 2000.
- Alves, A. Martins; Ferreira, Gentil C., (1958). Relatório da Sondagem de S. Mamede.
- Amaral, H.; Sampaio, J., (2013). Identification of the locations and storage capacity of the sinks-Portugal, Integrated infrastructure for CO2 transport and storage in the west Mediterranean, Project COMET.
- APA, (2013). Agencia Portuguesa do Ambiente, Atlas do Ambiente <http://sniamb.apambiente.pt/webatlas/>; acedido em Junho de 2013
- APEX, (2012). Preventions of Significant deterioration Greenhouse Gas Permit Application Matagorda Energy Center, Matagorda County Texas, Preparado para a U.S. Environmental Protection Agency Region 6 por CH2MHill;
- BBC, (1980). Huntorf Air Storage Gas Turbine Power Plant; Brown Boveri; Energy Supply.
- Caetano, M.; Nunes, V.; Nunes, A., (2009). CORINE Land Cover 2006 for Continental Portugal, Relatório técnico, Instituto Geográfico Português. Disponível em www.igeo.pt/e-IGEO/egeo_downloads.htm
- Carvalho, J., Matias, H., Torres, L., Pereira, R., Manupella, G., Mendes-Victor, L., (2005). The structural and sedimentary evolution of the Arruda and Lower Tagus sub-basins, Portugal. Marine & Petroleum Geology, Vol. 22, 3, 427-453.

Carvalho, J.; Rabeh, T.; Cabral, J.; Carrilho F.; Miranda J.M., (2008). Geophysical characterization of the Ota-Vila Franca de Xira-Lisbon-Sesimbra fault zone, Portugal; *Geophys. J. Int.* 174, 567-584

Carvalho, Jorge Manuel Ferreira de, (2013). Tectónica e caracterização da fracturação do Maciço Calcário Estremenho, Bacia Lusitaniana. Contributo para a prospeção de rochas ornamentais e ordenamento da atividade extrativa. Doutoramento em Geologia, Geologia Económica e do Ambiente, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Carvalho, J., Martins; Carvalho, M. R., (2004). Recursos geotérmicos e seu aproveitamento em Portugal; *Caderno Lab. Xeolóxico de Laxe; Coruña.* 2004. Vol. 29, pp. 97-117.

Crotogino, Fritz; Mohmeyer Klaus-Uwe, Scharf Roland, (2001). *Huntorf CAES: More than 20 years of Successful Operation.*

Dakota Salts, (2011). Compressed air energy storage feasibility in North Dakota Final report; Dakota Salts a Sirius Minerals Project; 1 de Setembro de 2011.

Decreto-Lei n.º 182/95 de 27 de Julho; *Diário da República série I-A.*

Decreto-Lei n.º 313/95 de 24 de Novembro; *Diário da República série I-A.*

Decreto-Lei n.º 233/2004 de 14 de dezembro *Diário da República série I-A.*

Dias, António José Guerner, (2005). Reavaliação do potencial petrolífero do onshore da Bacia Lusitaniana, Portugal; Departamento de Geologia; Faculdade de Ciências; Universidade do Porto.

Diaz, Rayco Marrero; Costa, Augusto; Duarte, Luísa; Ramalho, Elsa; Rosa, Carlos; Rosa, Diogo, (2013). Principais características e limitações hidrogeológicas do aquífero cretácico inferior da região de Lisboa para o seu aproveitamento como recurso geotérmico de baixa entalpia; 9º Seminário sobre Aguas Subterrâneas; Campus de Caparica, 7 e 8 de Março de 2013; Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Dinis, Jorge; Rey, Jacques; Gracianskyc, Pierre-Charles de, (2002). Le Bassin lusitanien (Portugal) à l'Aptien supérieur-Albien : organisation séquentielle, proposition de corrélations, évolution.

Dinis, J. L.; Pena dos Reis, R.; Cunha, P. Proença, (1994). Controis on vertical changes of alluvial system character. The «grés belasianos» unit – Cretaceous of the Lusitanian Basin (Central Portugal).

DGEG, (2013). Página Internet da Direção Geral de Energia e Geologia (2013: <http://www.dgeg.pt/>; acedido em Junho de 2013.

DPEP, (2014). Página Internet da Divisão para a Pesquisa e Exploração de Petróleo da Direção Geral de Energia e Geologia www.dgeg.pt/dpep/pt/petroleum_pt.htm; acedido em Fevereiro 2014.

EDM, (2013). Página Internet da Empresa de Desenvolvimento Mineiro <http://www.edm.pt/>; acedido em Junho de 2013.

EDP, (2013). Página Internet da Energia de Portugal; <http://www.a-nossa-energia.edp.pt>; Acedido em Novembro 2013.

Elmegaarda, Brian and Brix, Wiebke, (2011). Efficiency of Compressed Air Energy Storage.

ERSE, (2012). Relatório Anual Para a Comissão Europeia, Entidade Reguladora dos Serviços Energético.

ESA, (2013). Pagina Internet da Electricity Storage Association; www.electricitystorage.org/ , Acedido em novembro de 2013.

EPRI, (2013). Compressed Air Energy Storage Demonstration Newsletter; Electric Power Research Institute; Abril de 2013.

Evans, D.J., (2008). An appraisal of underground gas storage technologies and incidents, for the development of risk assessment methodology, Prepared by the British Geological Survey for the Health and Safety Executive.

Faunalina, (2013). Pagina da internet da Faunalia <http://www.faunalia.pt/download>; acedido em Junho de 2013.

Fonseca, Deolinda Maria dos Santos Flores Marcelo da, (1996). Estudo Petrológico e geoquímico dos Carvões de Rio Maior; Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia.

Geoportal, (2013). Geoportal do Laboratorio Nacional de Energia e Geologia; <http://geoportal.lneg.pt>; acedido em Junho de 2013; Servidor WMS <http://geoportal.lneg.pt/Arcgis/services/AtlasEolico/MapServer/WMServer?r=>

Gillhaus, Axel, (2007). Natural Gas Storage in Salt Caverns - Present Status, Developments and Future Trends in Europe - Solution Mining Research Institute, Spring 2007, 2007, Basel, Switzerland.

Gyuk, Imre P., (2003). EPRI-DOE Handbook of Energy Storage for Transmission & Distribution Applications, EPRI, Palo Alto, CA, and the U.S. Department of Energy, Washington, DC: 2003. 1001834.

Herman, et al., (2003). Comparison of Storage Technologies for Distributed Resource Applications, EPRI, Palo Alto, CA, 2003.1007301.

Kim, Young-Min; Lee, Jang-Hee; Kim, Seok-Joon; Favrat, Daniel, (2012). Potential and Evolution of Compressed Air Energy Storage: Energy and Exergy Analyses; Entropy.

Kullberg, José Carlos Ribeiro, (2000). Evolução Tectónica Mesozoica da Bacia Lusitaniana; Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Doutor em Geologia - Especialidade Geologia Estrutural pela Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Kullberg, J. C.; Rocha, R. B.; Soares, A. F.; Rey, J.; Terrinha, P.; Callapez, P.; Martins, L., (2006). A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. In Geologia de Portugal no contexto da Ibéria (R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha & J. C. Kullberg, Eds.). Univ. Évora, pp. 317-368.

Kushnir, Roy; Ullmann, Amos; Dayan, Abraham, (2012). Thermodynamic and hydrodynamic response of compressed air energy storage reservoirs: a review; Rev Chem Eng 28 (2012): 123-148.

E2P, (2013). Energia Endógenas de Portugal; Base de dados de Fontes renováveis de Energia; <http://e2p.inegi.up.pt/>; acedido em Junho de 2013.

INE, (2013). Portal de estatísticas Oficiais; Census 2011; Instituto Nacional de Estatística; <http://mapas.ine.pt/map.phtml>; Acedido em Dezembro de 2013.

Lei 58/2005 de 29-Dezembro; Diário da República, 1.ª série, N.º 249 - Lei da Água.

Machado, S.; Sampaio, J.; Rosa, C.; Rosa, D.; Carvalho, J.; Amaral, H.; Carneiro, J., Costa, A., (2011). Deep Geological Conditions and Constrains for CO2 Storage in the Setúbal Peninsula, Portugal; Proceedings of the Global Conference on Global Warming 2011; 11-14 July, 2011, Lisbon, Portugal.

Mays, G. T.; Belles, R. J.; Blevins, B. R.; Hadley, S. W.; Harrison, T. J.; Jochem, W. C.; Neish, B. S.; Omitaomu, O. A.; Rose, A. N., (2012). Application of Spatial Data Modeling and Geographical Information Systems (GIS) for Identification of Potential Siting Options for Various Electrical Generation Sources, May 2012; Oak Ridge National Laboratory; UT-Battelle; Electric Power Research Institute (EPRI); U.S. Department Of Energy.

McGrail, B.P.; Cabe, J.E.; Davidson, C.L.; Knudsen, F.S.; Bacon, D.H.; Bearden, M.D.; Chamnessn, M.A.; Horner, J.A.; Reidel, S.P.; Schaef, H.T.; Spane, F.A.; Thorne, P.D., (2013). Techno-economic Performance Evaluation of Compressed Air Energy Storage in the Pacific Northwest; Pacific Northwest Laboratory, U.S. Department of Energy.

Melo, Maria Teresa Condesso de, (2002). Modelo matemático de fluxo e transporte de massa do sistema multiaquífero Cretácico da região de Aveiro (Portugal), Universidade de Aveiro Departamento de Geociências.

MIBEL, (2013). Mercado Ibérico de eletricidade; Boletim Mensal Fevereiro de 2012.

MOHAVE, (1995). Geological Report, Aljubarrota, Marinha Grande, Figueira da Foz Licenses, Lusitanian Basin, Portugal, MOHAVE Oil and Gas Corporation, Houston, Texas, USA.

MOHAVE, (1996). Geological Report, Aljubarrota, Marinha Grande, Figueira da Foz Licenses, Lusitanian Basin, Portugal, MOHAVE Oil and Gas Corporation, Houston, Texas, USA.

NYSEG, (2011). Compressed Air Energy Storage NYSEG Seneca Lake Project Final Report, Preparado por PB - Energy Storage Services Inc, Binghamton, New York.

Pereira, N., A. Araújo, M. Bezzeghoud, J. Borges, J. Carneiro and A. Correia, (2010). KTEJO - Looking for CO₂ storage sites in a densely populated region in Portugal. 34th Course of the International School of Geophysics: "Densely populated settings: the challenge of siting geological facilities for deep geothermics, CO₂ and natural gas storage, and radioactive waste disposal". Erice, Sicily.

PNBEPH, (2007). Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidrelétrico; Instituto da Água, Direção Geral de Energia e Geologia, Redes Energéticas Nacionais; Novembro de 2007; Preparado por COBA Consultores de Engenharia e Ambiente e PROCESL, Engenharia Hidráulica e Ambiente.

Pollak, Robert, (1994). History of First U.S. Compressed-Air Energy Storage (CAES) Plant (110 MW 26h), Volume 2: Construction, Final Report, Electric Power Research Institute, Palo Alto California.

Portaria n.º 181/2012 de 8 de junho, Diário da República, 1.ª série, N.º 111.

PVGIS, (2014). Photovoltaic Geographical Information System; Geographical Assessment of Solar Resource and Performance of Photovoltaic Technology; <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>; Acedido em Fevereiro de 2014.

Raju, Mandhapati; Khaitan, Siddhartha Kumar, (2012). Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: A case study of the Huntorf plant; Applied Energy 89 (2012) 474-481.

Rasmussen, Erik S., Lomholt, S., Anderson, C., Vejbaek, O.V., (1998). Aspects of the structural evolution of the Lusitanian Basin in Portugal and the shelf and slope area offshore Portugal. Tectonophysics 300, 199 - 225.

REN, (2013). A Energia Eólica em Portugal 2012; Redes Elétricas Nacionais.

Roseiro, Catarina Mota dos Santos Diamantino, (2009). Recarga artificial de aquíferos: aplicação ao sistema aquífero da Campina de Faro; Teses de doutoramento da Universidade de Lisboa.

Schainker, Robert B.; Nakhamkin, Michael; Kulkarni, Pramod; Key, Tom, (2008). New Utility Scale CAES Technology: Performance and Benefits (Including CO2 Benefits)

Schulte, Robert H.; Critelli, Nicholas Jr.; Holst, Kent; Huff, Georgianne, (2012). Lessons from Iowa. Development of a 270 Megawatt Compressed Air Energy Storage Project in Midwest Independet System Operator; A Study for the DOE Energy Storage Systems Program; Sandia Report.

Silva, Leonardo Torres, (2003). A Formação da Abadia no contexto evolutivo tectono-sedimentar da Bacia Lusitânica (Portugal) - considerações sobre o potencial como rocha reservatório de hidrocarbonetos; Dissertação de mestrado Programa de pós-graduação em Geociências - UFRGS, Porto Alegre.

Simmons, Joseph; Barnhart, Ardeth; Reynolds, Stanley; Son, Young-Jun; Cronin, Alex, (2010). Study of Compressed Air Energy Storage with Grid and Photovoltaic Energy Generation; Arizona Research Institute for Solar Energy; Draft Final Report.

SNIRH, (2013). Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos; <http://snirh.pt/>; acedido em Julho 2013.

Steta, Fernando De Samaniego, (2010). Modeling of an Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage (AA-CAES) Unit and an Optimal Model-based Operation Strategy for its Integration into Power Markets; EEH - Power Systems Laboratory; Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich; Master Thesis.

Succar, Samir, (2011). Compressed Air Energy Storage, pag 112-152; Large Energy Storage Systems Handbook; Frank S. Barnes, Jonah G. Levine; CRC Press; Taylor & Francis Group LLC; ISBN:978-1-4200-8601-0.

Succar, Samir; Williams, Robert H., (2008). Compressed Air Energy Storage: Theory, Resources And Applications For Wind Power, Princeton Enviromental institute.

SustainX's, (2013). <http://www.sustainx.com>. Acedido em novembro de 2013.

Swensen, E.; Potashnik, B., (1994). Evaluation of Benefits and Identification of Sites for a CAES Plant in New York State, Final Repor, Palo Alto, CA.

Terrinha, P., 1998. Strutural geology and tectonic evolution of the Algarve Basin, PhD thesis. Imperial; College, University of London, U. K., 428pp.

Terrinha, P., Rocha, R., Rey, J., Cachão, M., Moura, D., Roque, C., Martins, L., Valadares, V., Cabral, J., Azevedo, M. R., Barbero, L., Clavijo, E., Dias, R. P., Gafeira, J., Matias, H., Matias, L., Madeira, J., Marques da Silva, C., Munhá, J., Rebelo, L., Ribeiro,

C., Vicente, J. & Youbi, N., (2006). A Bacia do Algarve: Estratigrafia, paleogeografia e tectónica. In: R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha & J. C. Kullberg (Eds), Geologia de Portugal no contexto da Ibéria (pp. 247-316). Univ. Évora.

Wiles, L. E.; McCann, R. A., (1983). Reservoir Characterization and Final Pre-Test Analysis in Support of the Compressed Air Energy Storage Pittsfield Aquifer Field Test in Pike County, Illinois; Pacific Northwest Laboratory Operated for the U.S. Department of Energy by Battelle Memorial.

Zbyszewski, G. e ALMEIDA, F. M., (1960). Carta geológica de Portugal na escala de 1/50000. Notícia explicativa da Folha 26-D, Caldas da Rainha. Serv. Geol. Portugal, Lisboa.

Zbyszewski, Georges, (1961). Jazida de Sal Gema de Fonte da Bica (Rio Maior); Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal, t. XLV, 1961, p. 223-236.

8. Anexos

Mapas produzidos no decorrer do presente trabalho.

Os mapas estão no sistema de coordenadas ETRS/Portugal TM06 (EPSG:3763) excepto os que utilizam o serviço WMS.

Minas subterrâneas Abandonadas

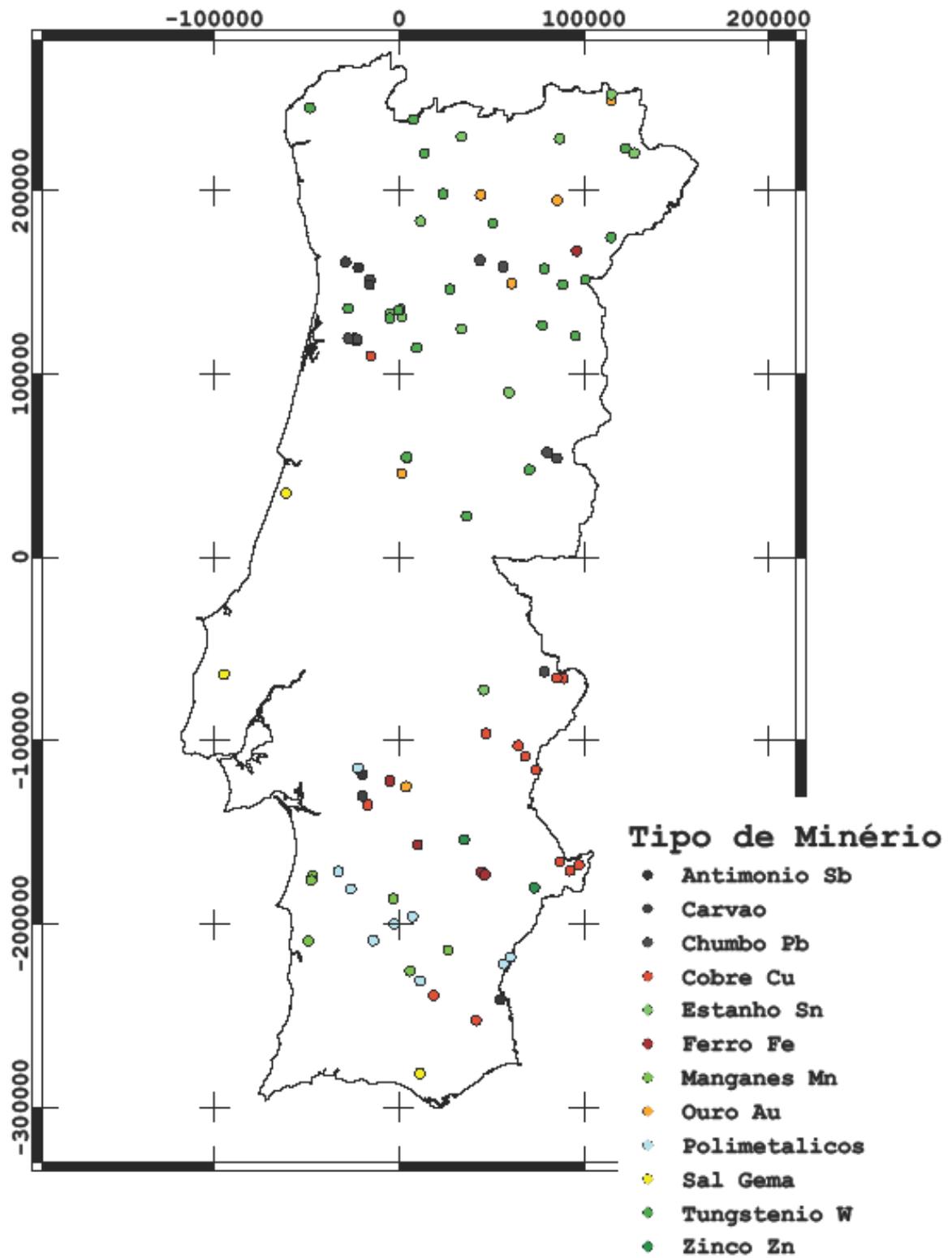


Figura 55 - Minas subterrâneas abandonadas em Portugal Continental.

Sistemas Aquíferos segundo Unidade Hidrogeológica

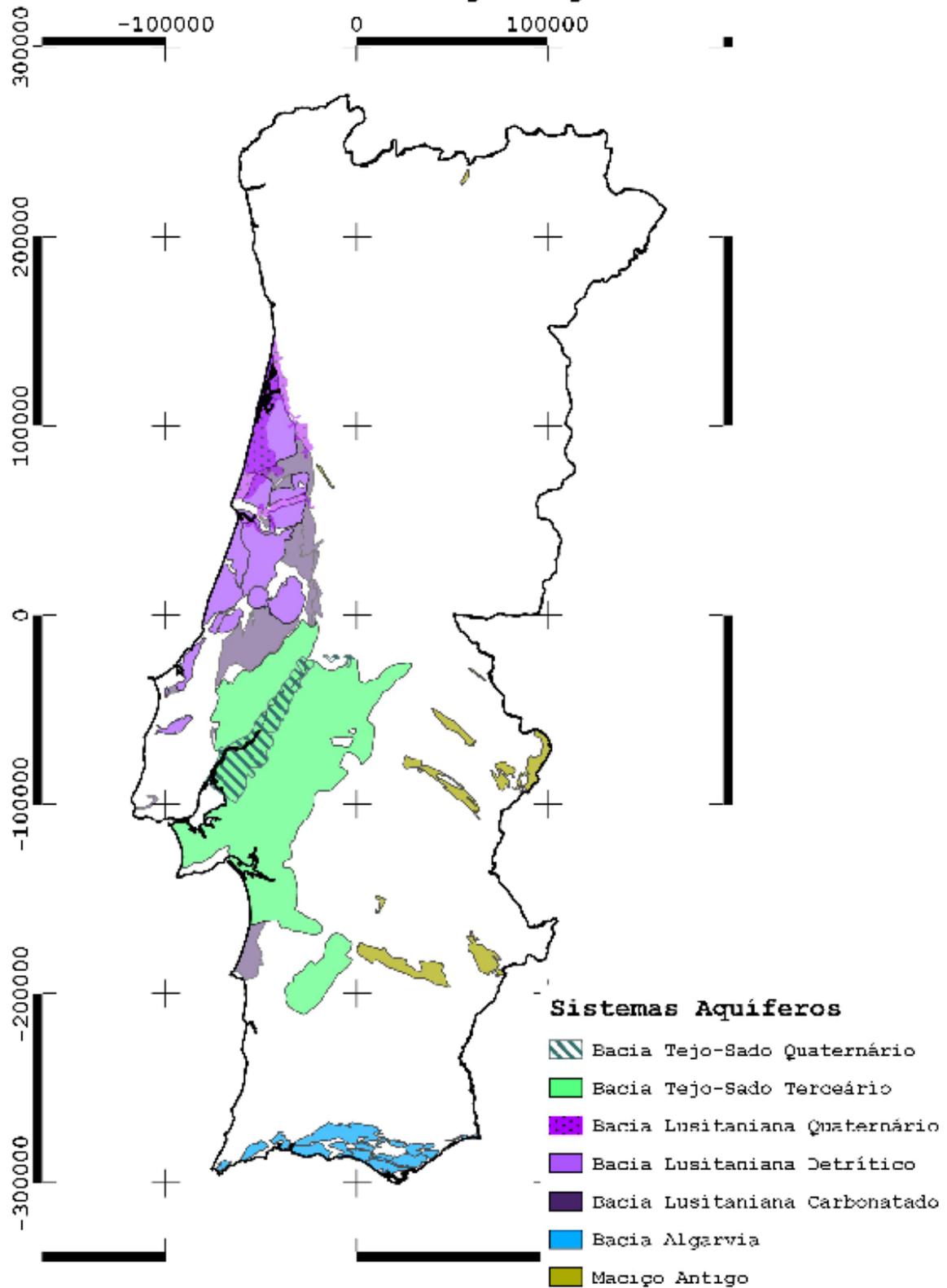


Figura 56 - Sistemas Aquíferos de Portugal Continental segundo unidade hidrogeológica (SNIRH, 2013)

Estruturas Salíferas

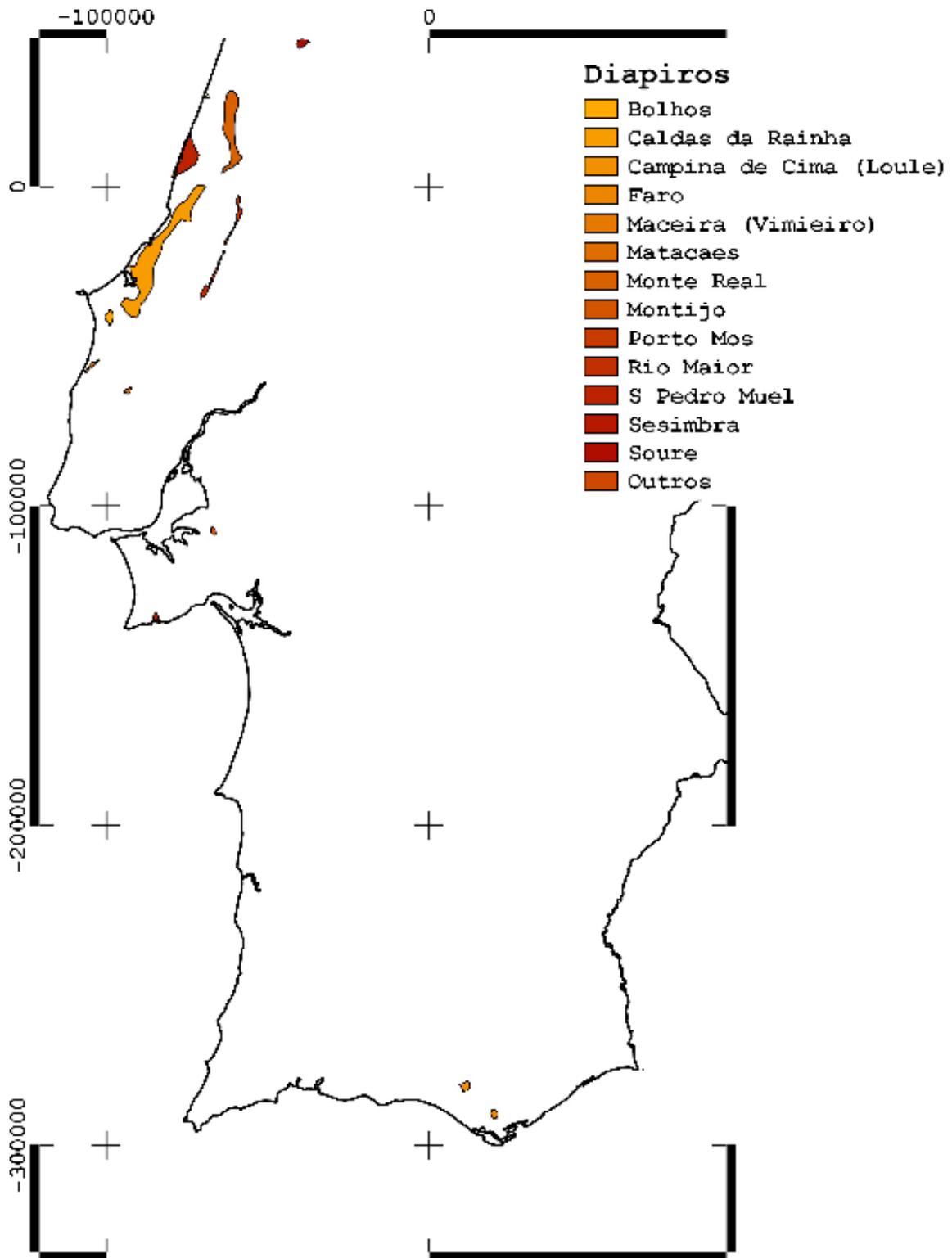


Figura 57 - Estruturas salíferas em Portugal Continental (Pereira *et al.*, 2010).

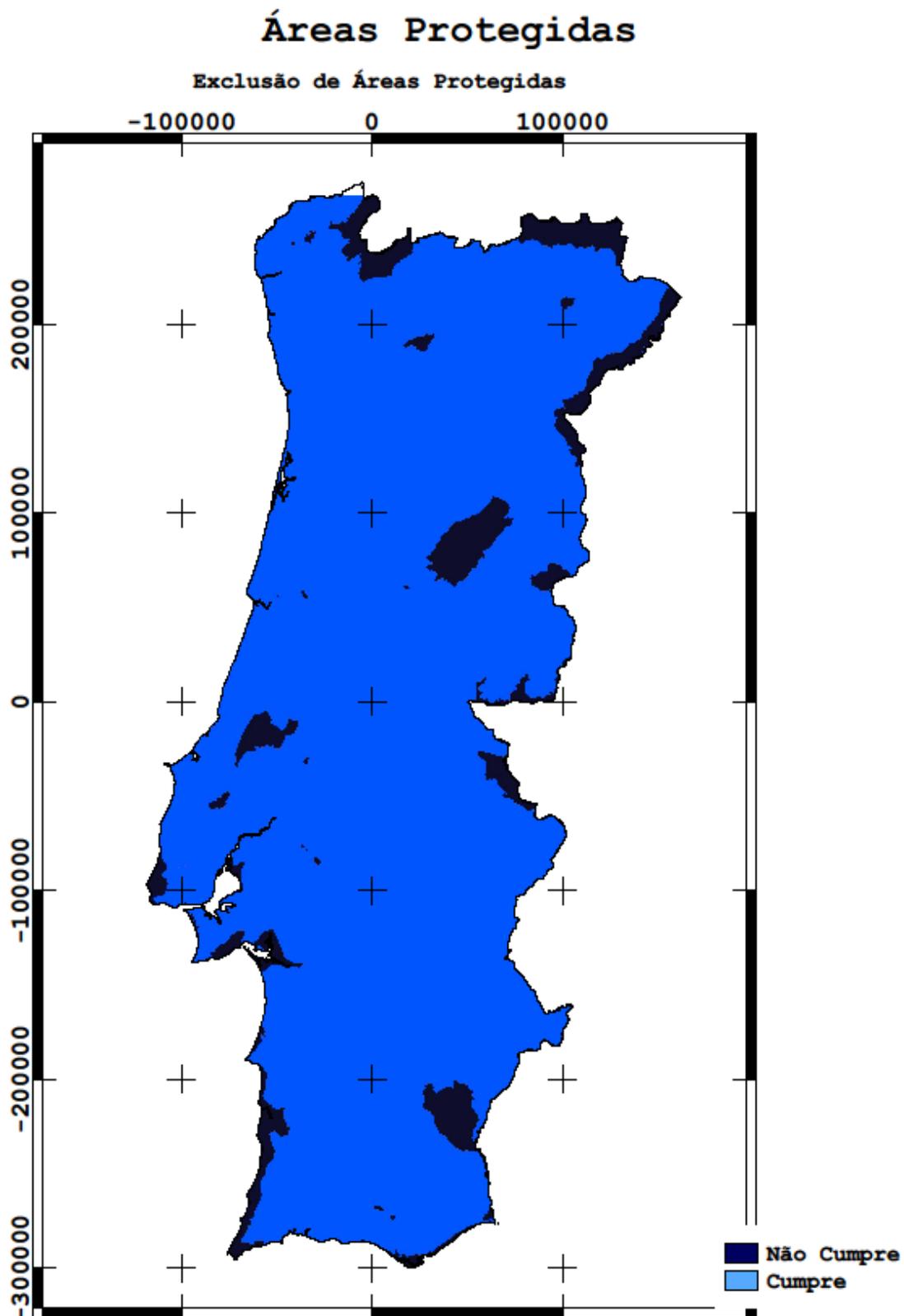


Figura 58 - Camadas trabalhadas em ambiente SIG utilizando os critérios propostos por Mays *et al.* (2012) para Portugal Continental.

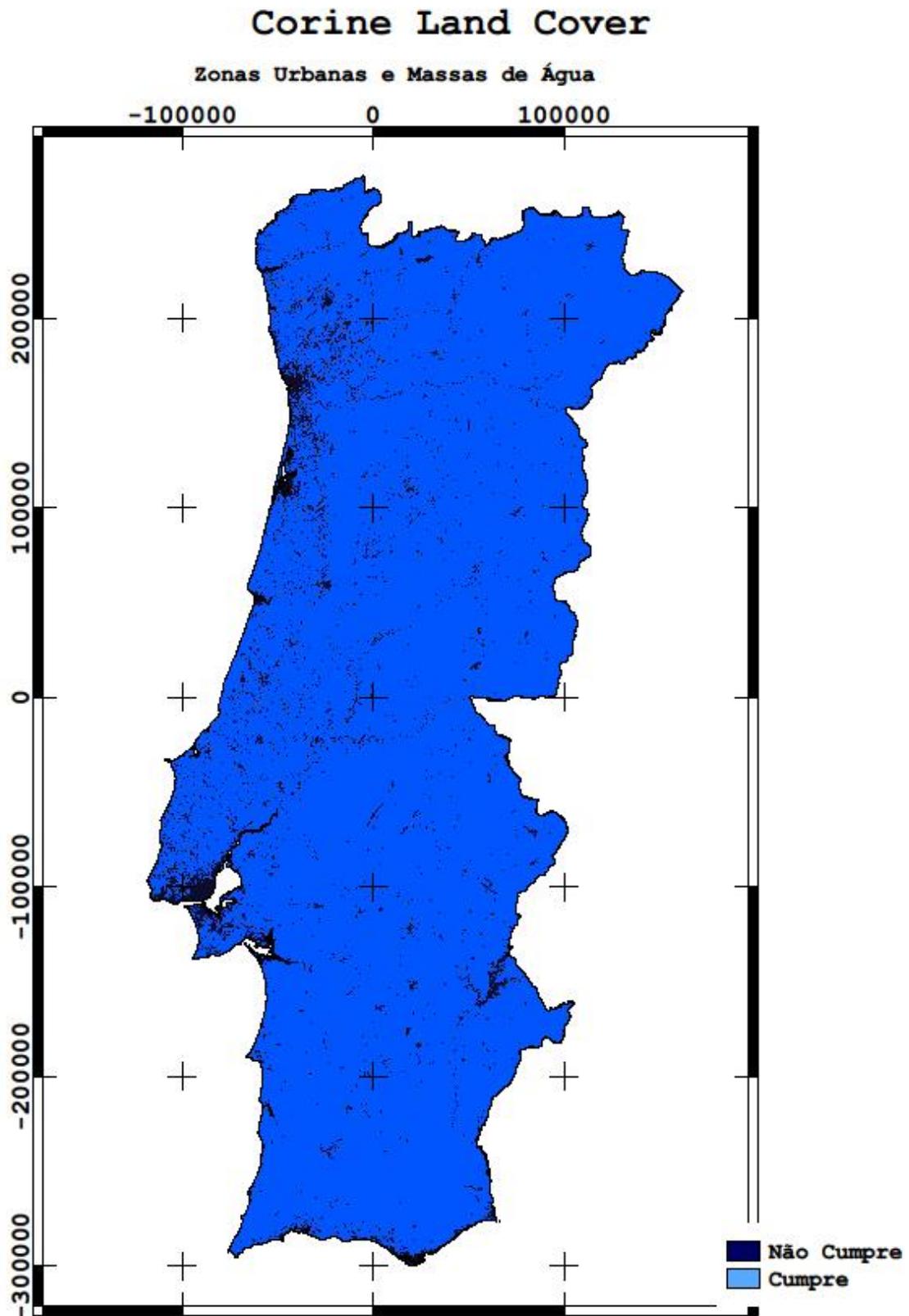


Figura 59 - Camadas trabalhadas em ambiente SIG utilizando os critérios propostos por Mays et al. (2012) para Portugal Continental.

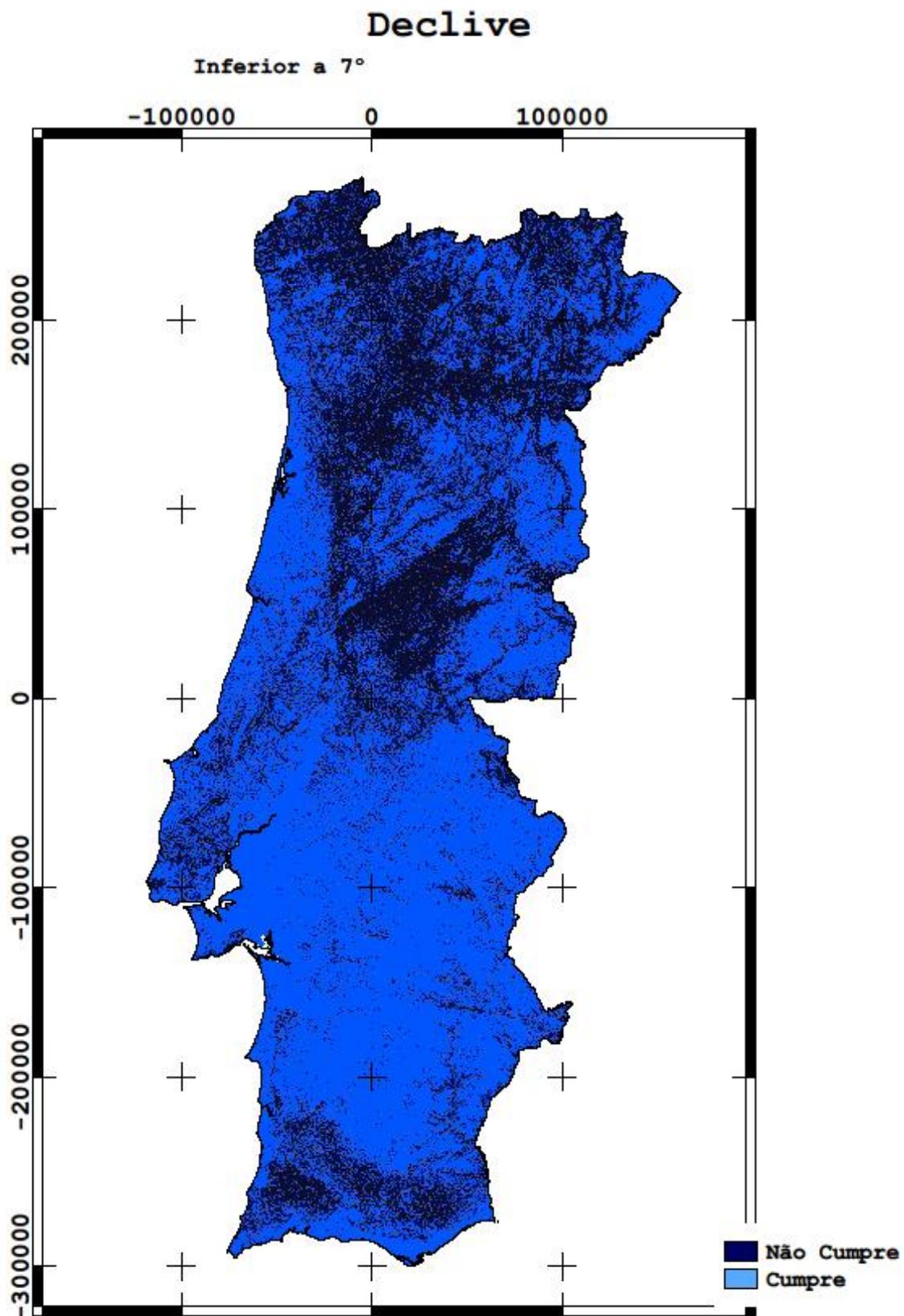


Figura 60 - Camadas trabalhadas em ambiente SIG utilizando os critérios propostos por Mays et al. (2012) para Portugal Continental.

Densidade Populacional

Inferior a 193 hab/km²

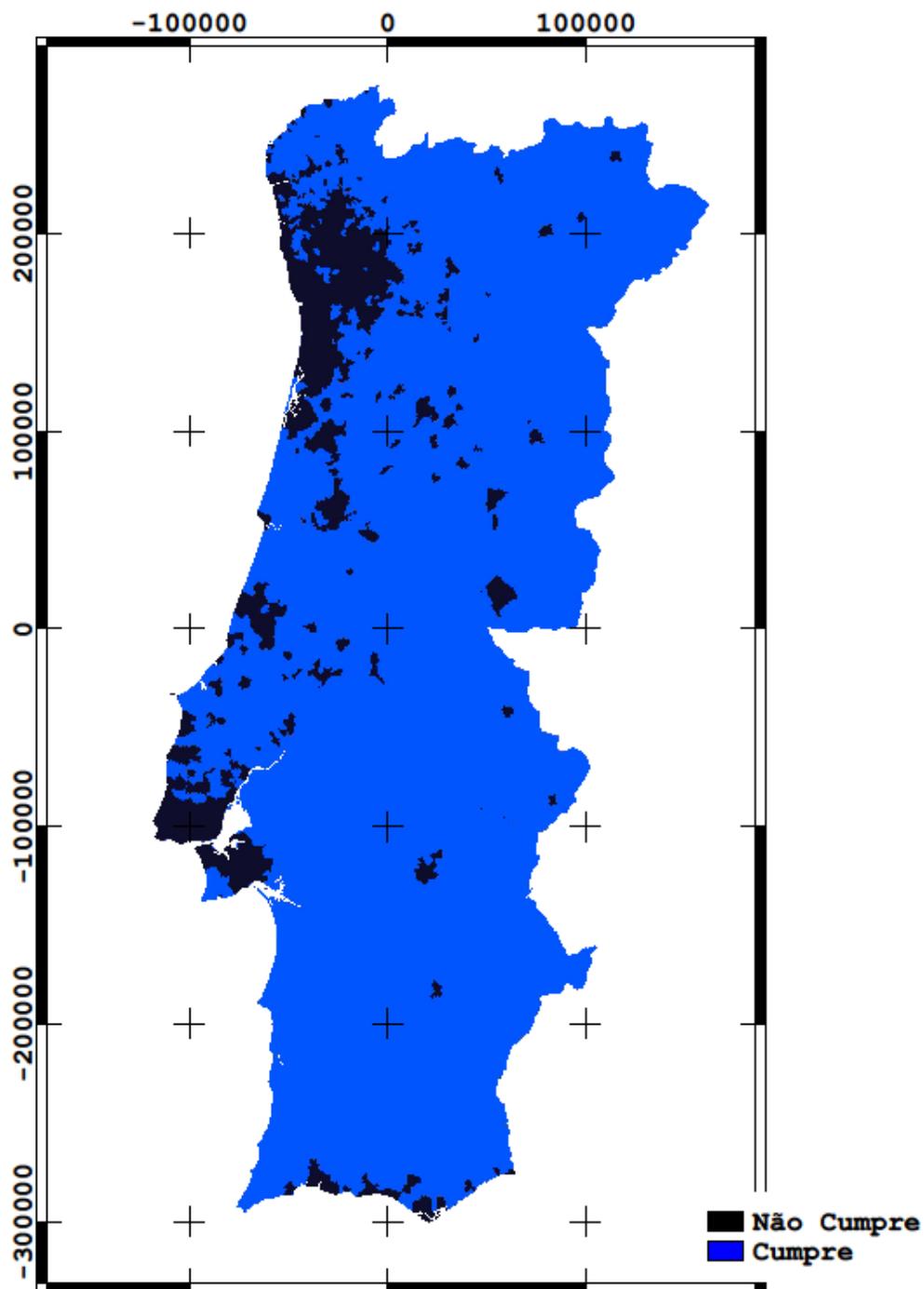


Figura 61 - Camadas trabalhadas em ambiente SIG utilizando os critérios propostos por Mays et al. (2012) para Portugal Continental.

Planícies de Inundação

Exclusão de Planície de Inundação

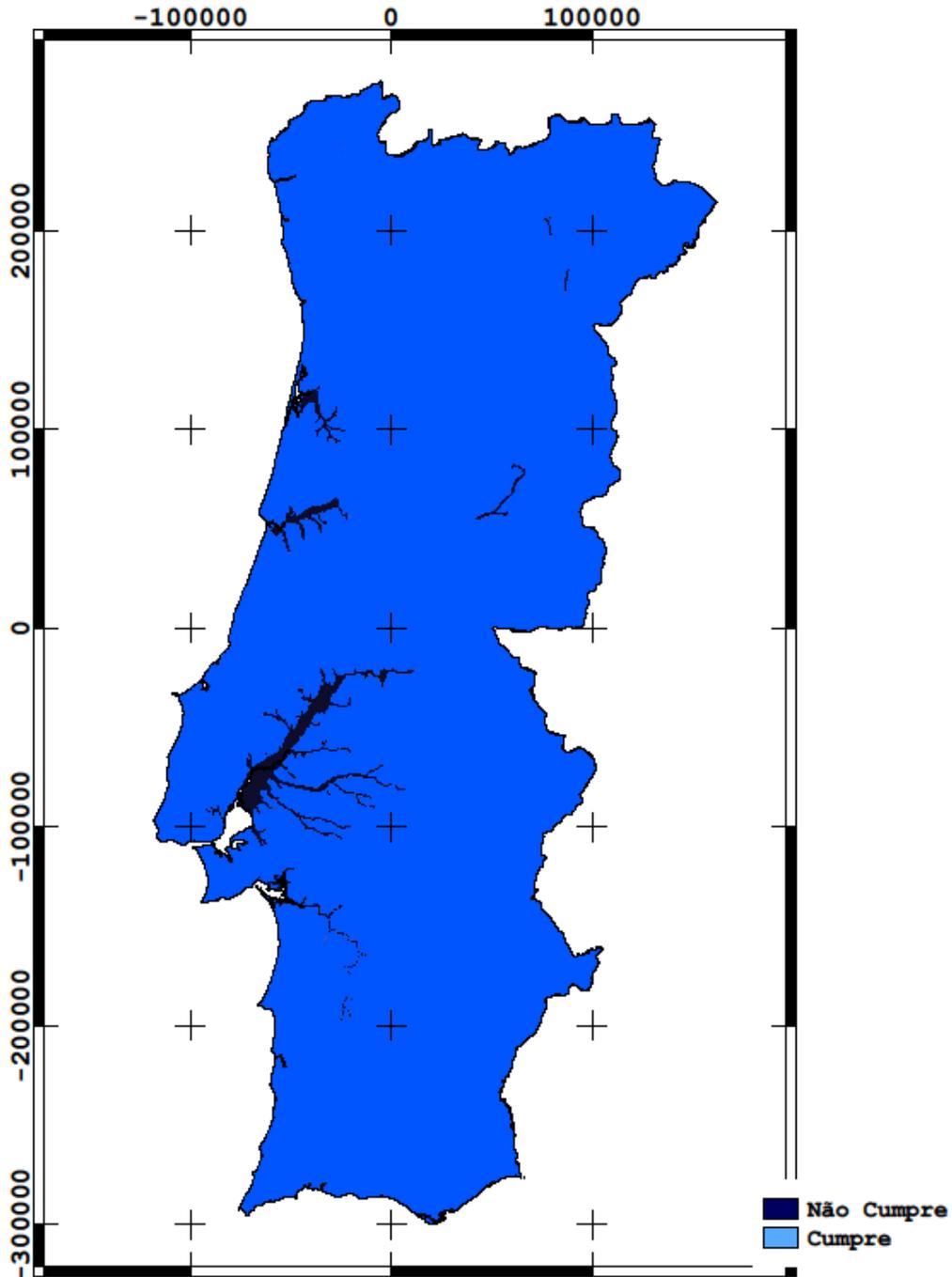


Figura 62 - Camadas trabalhadas em ambiente SIG utilizando os critérios propostos por Mays *et al.* (2012) para Portugal Continental.

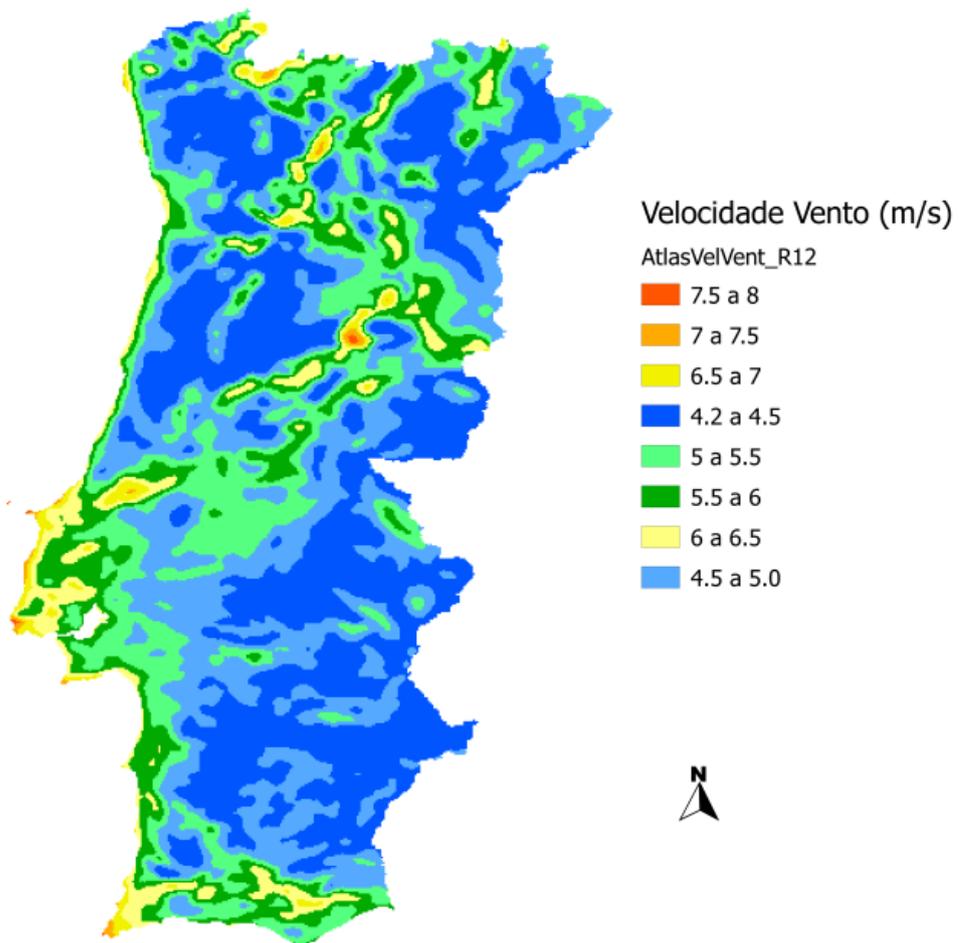


Figura 63 - Velocidade média do vento (m/s) em Portugal Continental a 80 m de altura. (Geoportal do LNEG, 2013)

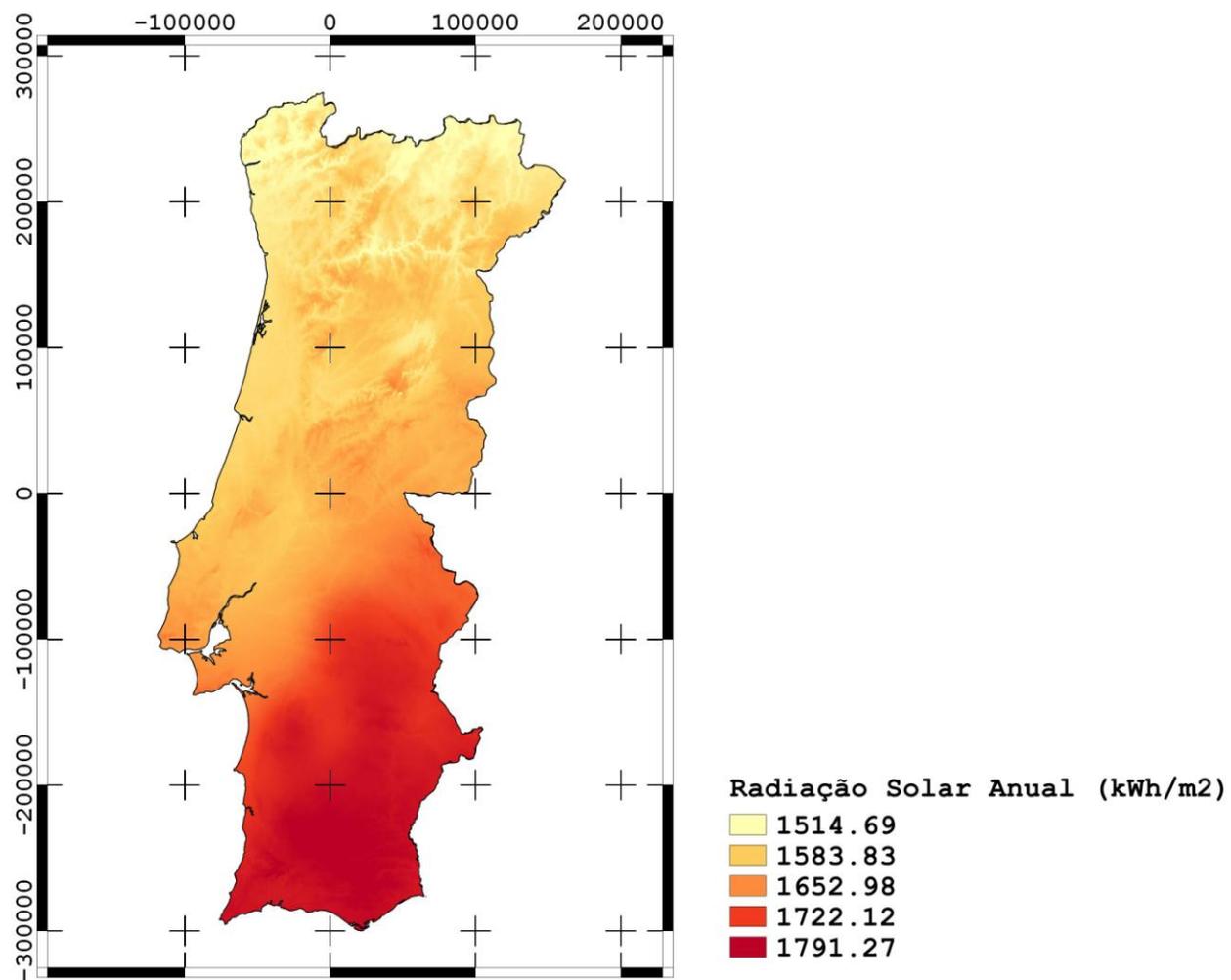


Figura 64 - Localização dos centros electroprodutores por fonte eólica e fotovoltaica em Portugal Continental. Elaborado com informação da base de dados E2P (2013)

Centros Electroprodutores por FER

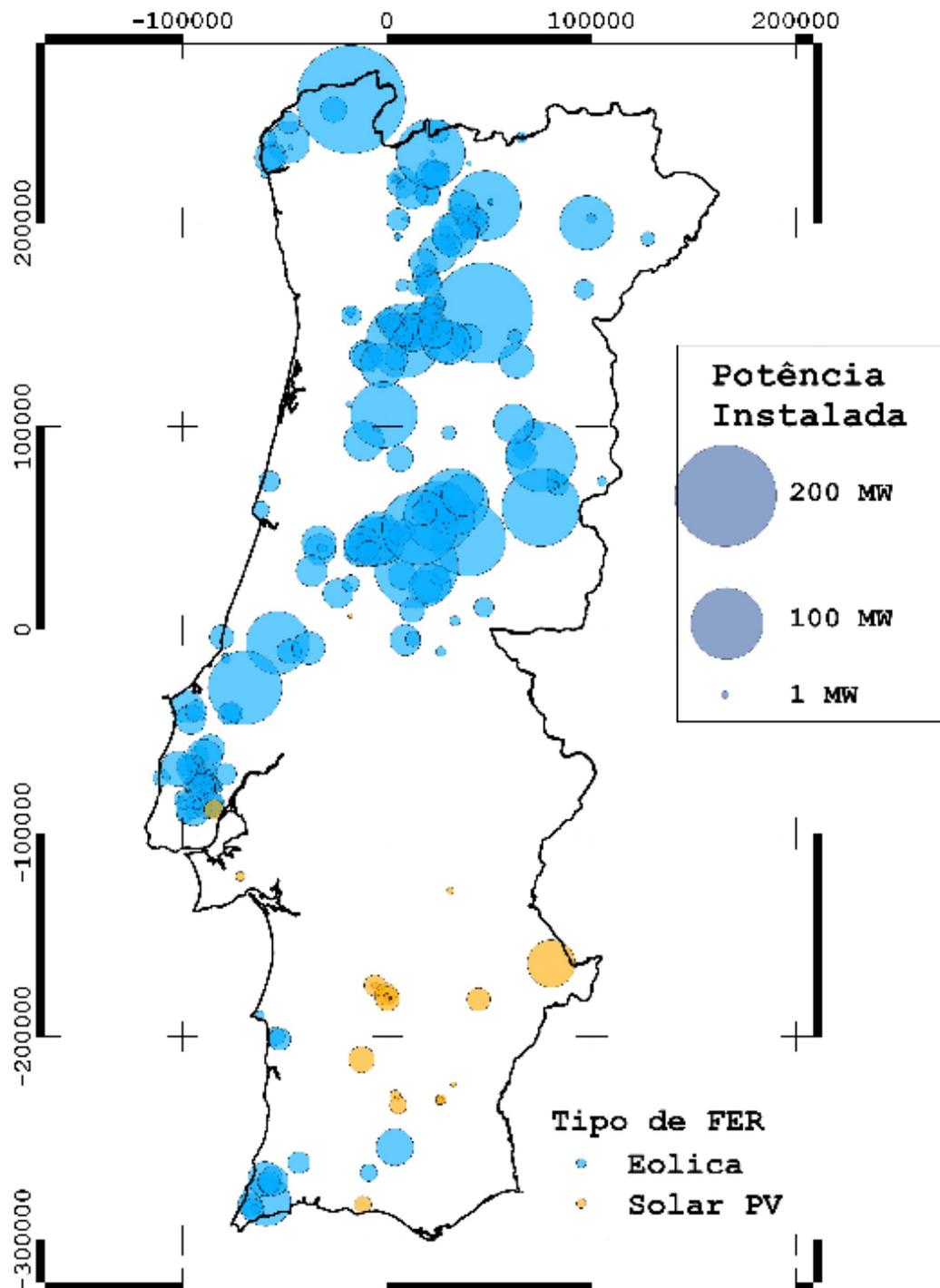


Figura 65 - Localização dos centros electroprodutores por fonte eólica e fotovoltaica em Portugal Continental. Elaborado com informação da base de dados E2P (2013)

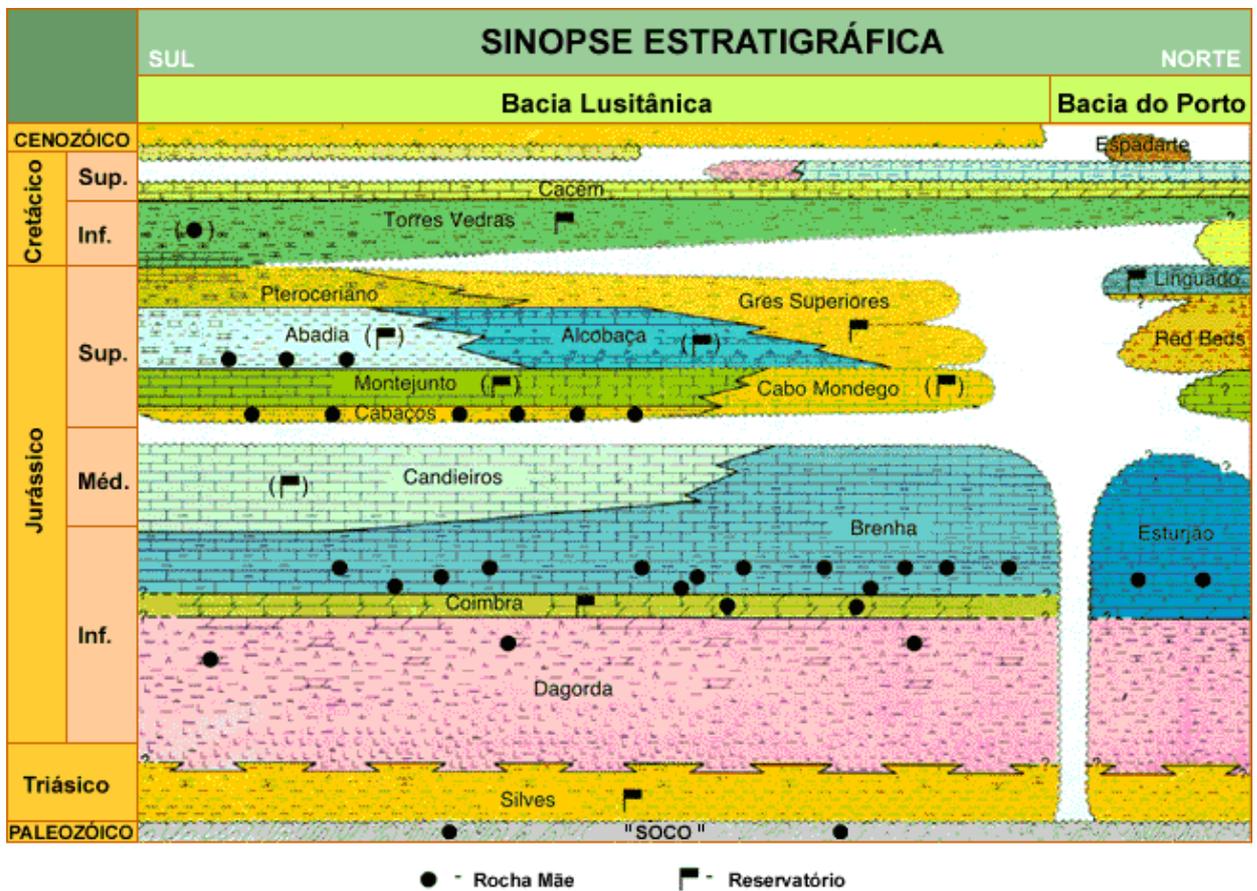


Figura 66 - Sinopse Estratigráfica da Bacia Lusitaniana. (DPEP, 2014)

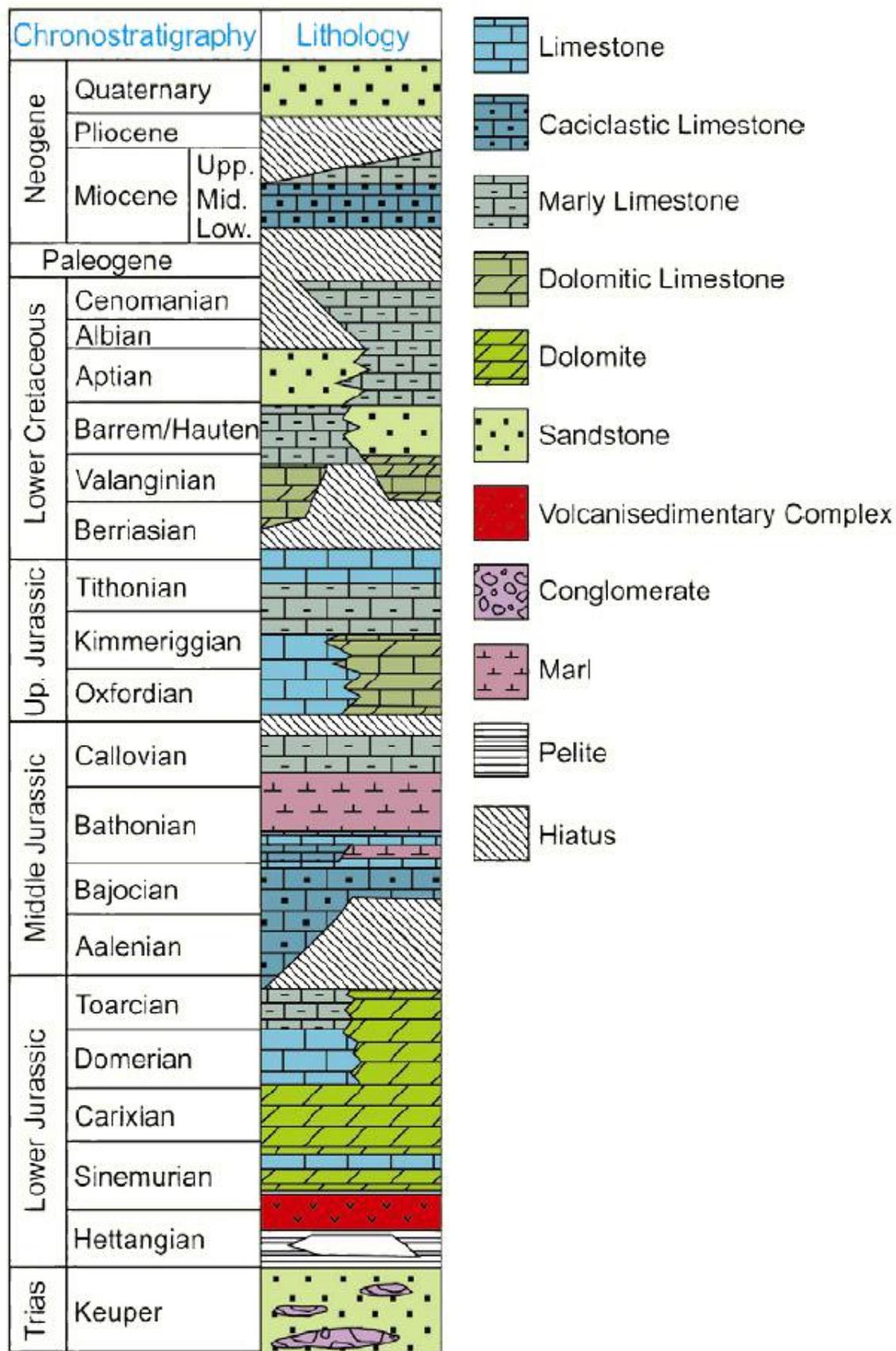


Figura 67 - Estratigrafia da Bacia Algarvia (Terrinha, 1998).

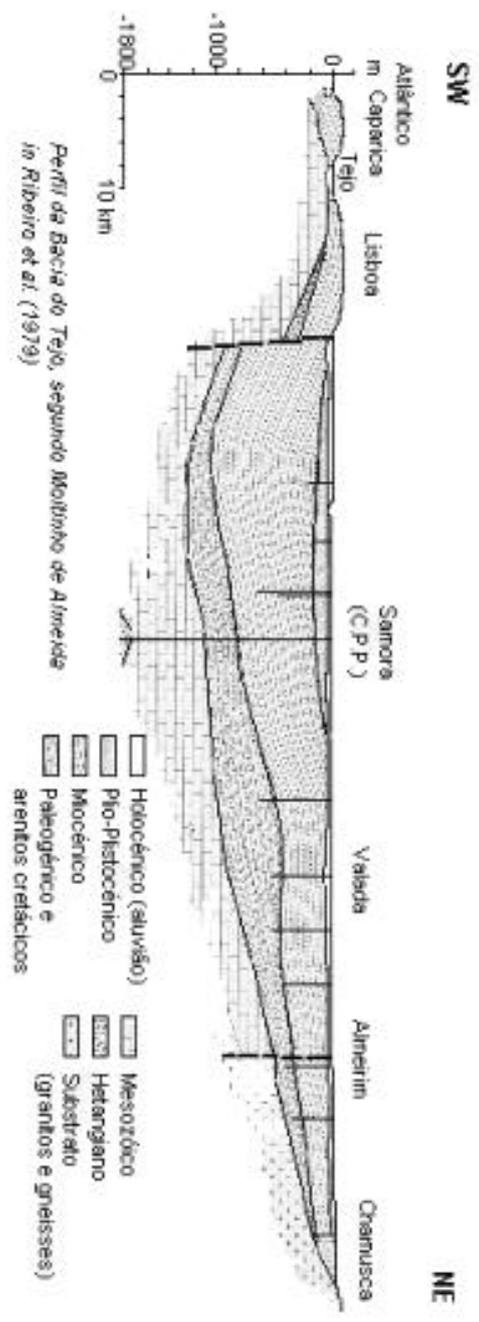


Figura 68 - Perfil geológico da Bacia do Tejo SE-NE (Almeida et al., 2000).

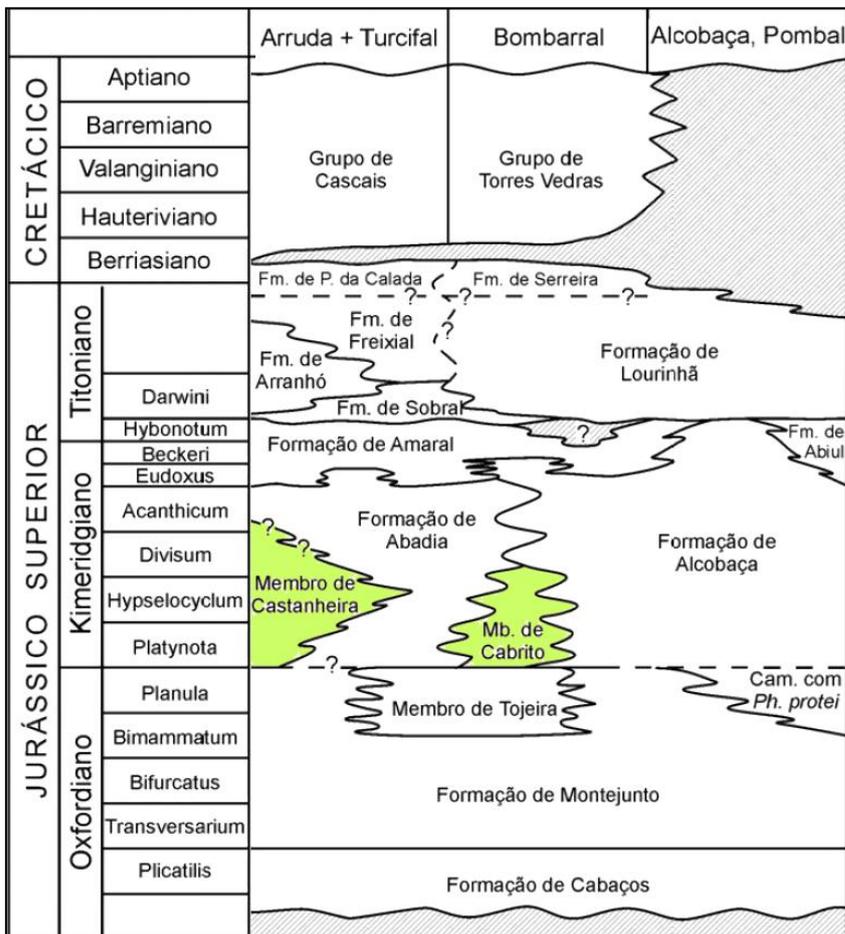
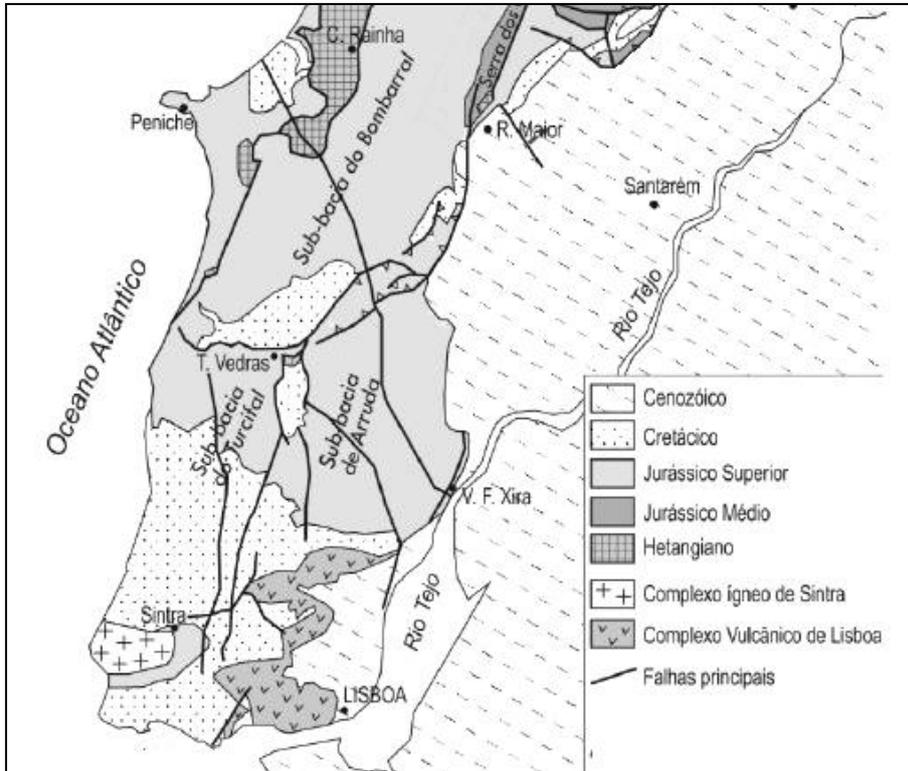


Figura 69- a) Localização das Sub-bacias de Bombarral, Turcifal e Arruda e unidades geológicas (Carvalho 2013). b) Coluna cronostratigráfica da sub-bacia de Arruda (Kullberg et al.,2006)

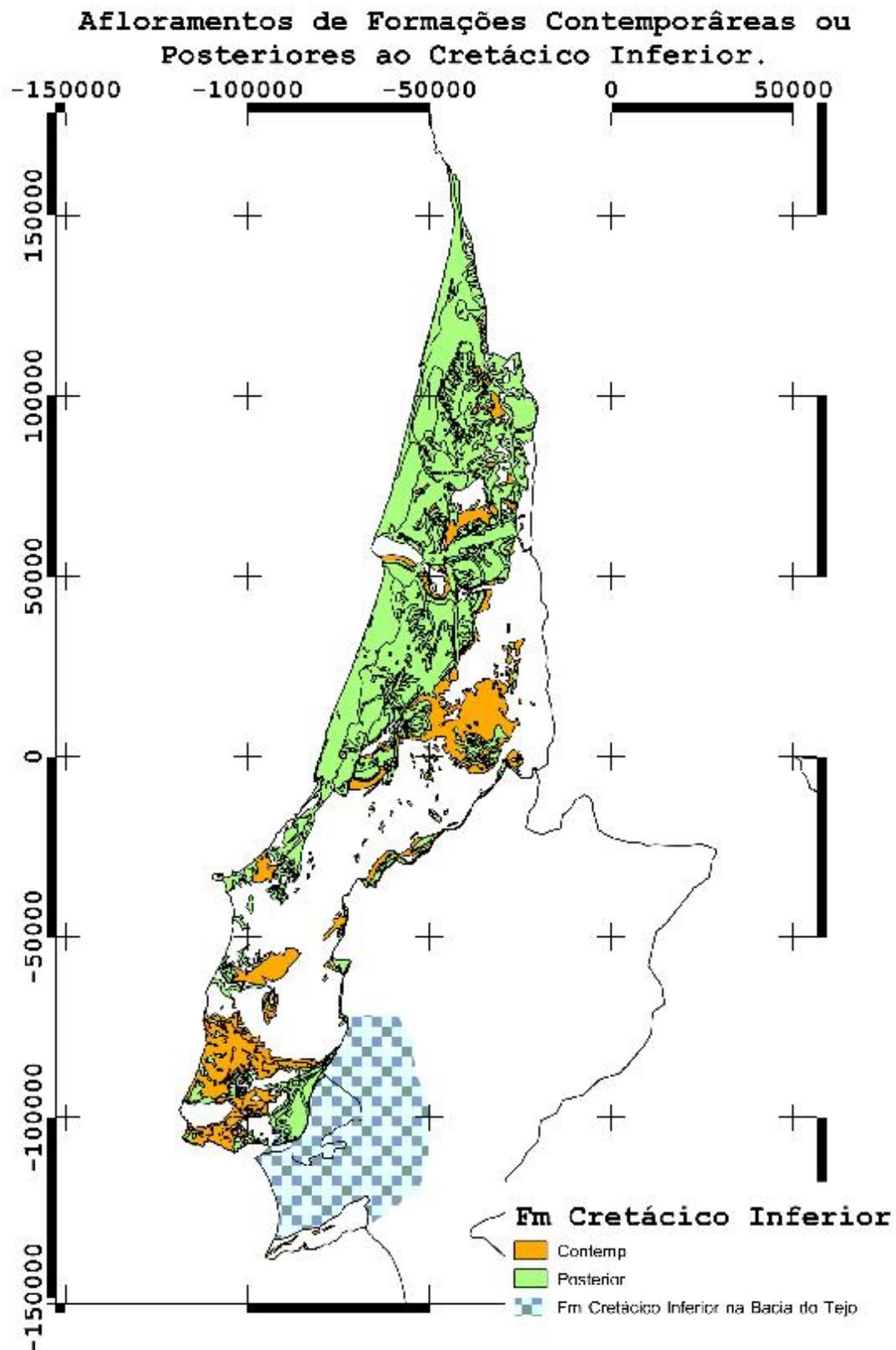


Figura 70 - a) Afloramento de formações contemporâneas ou posteriores ao Cretácico Inferior; b) classificação de zonas em relação à profundidade do grés inferior.

Classificação de zonas em relação à profundidade do Grés Inferior

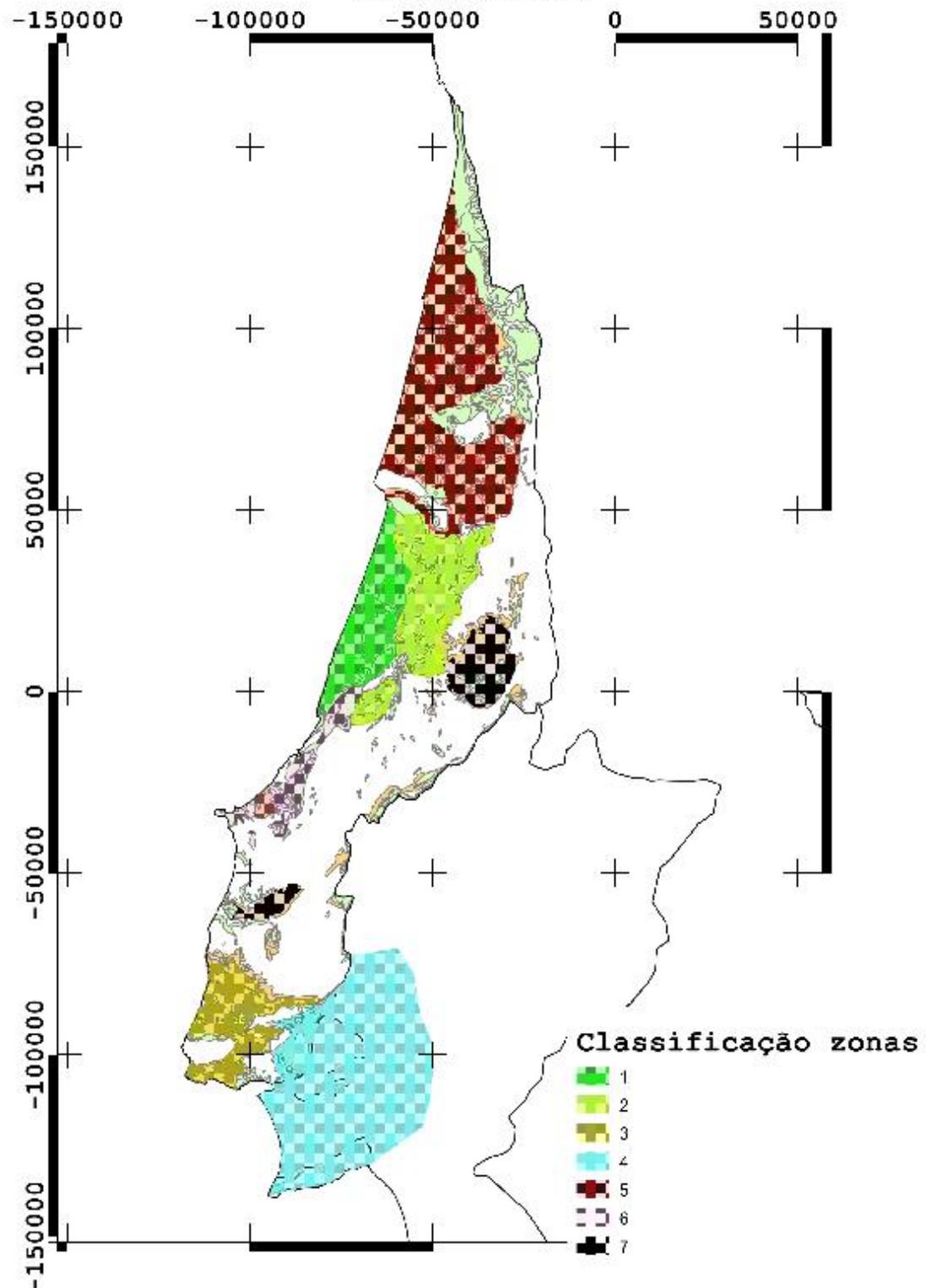


Figura 71 - a) Afloramento de formações contemporâneas ou posteriores ao Cretácico Inferior; b) classificação de zonas em relação à profundidade do grés inferior.

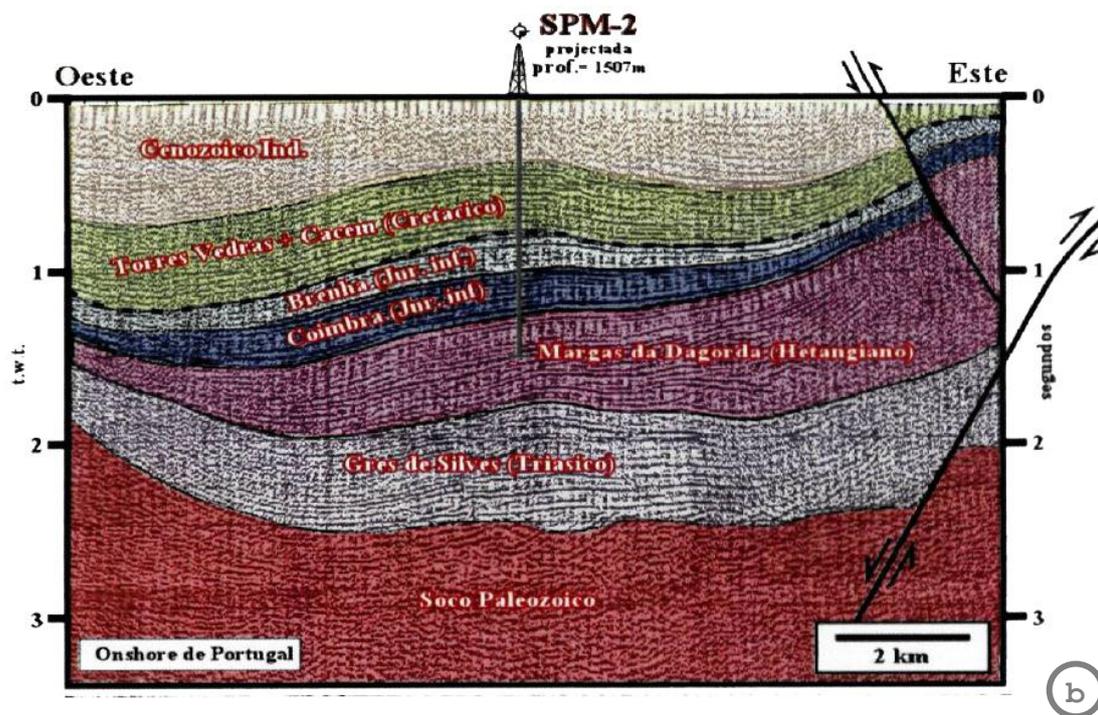
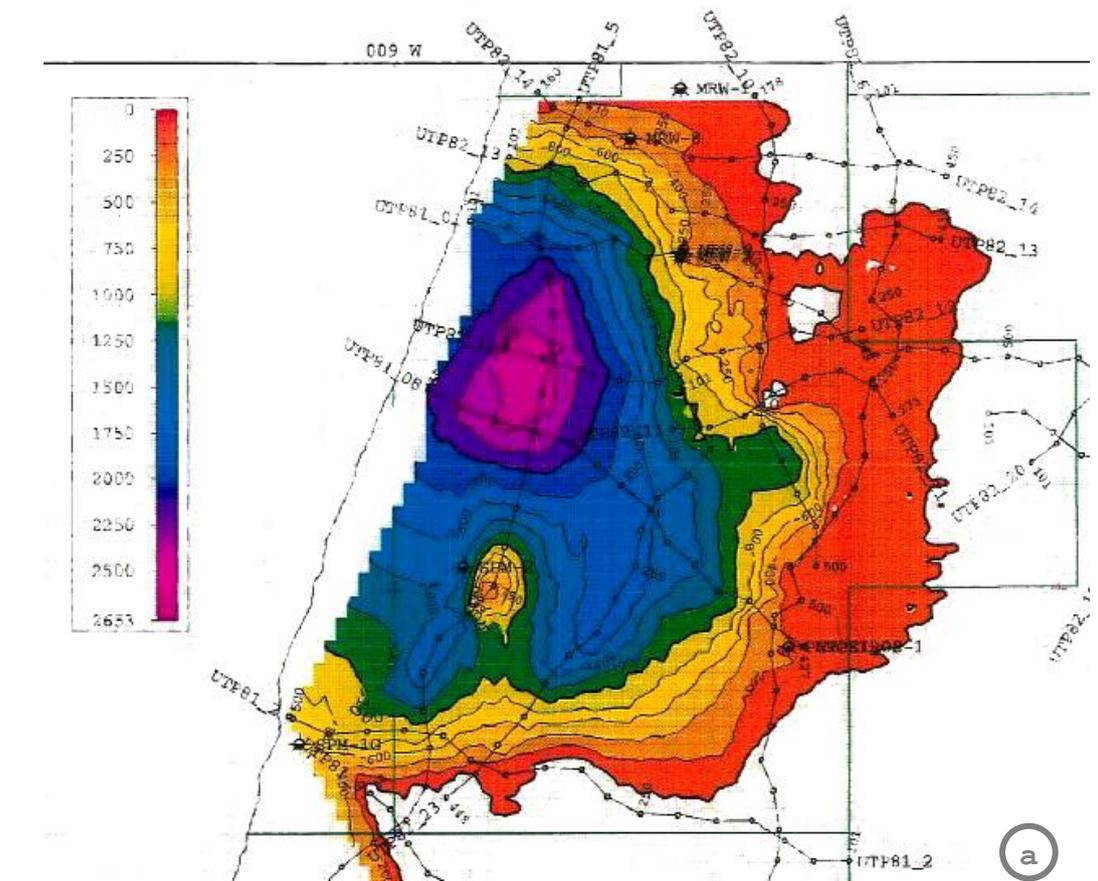
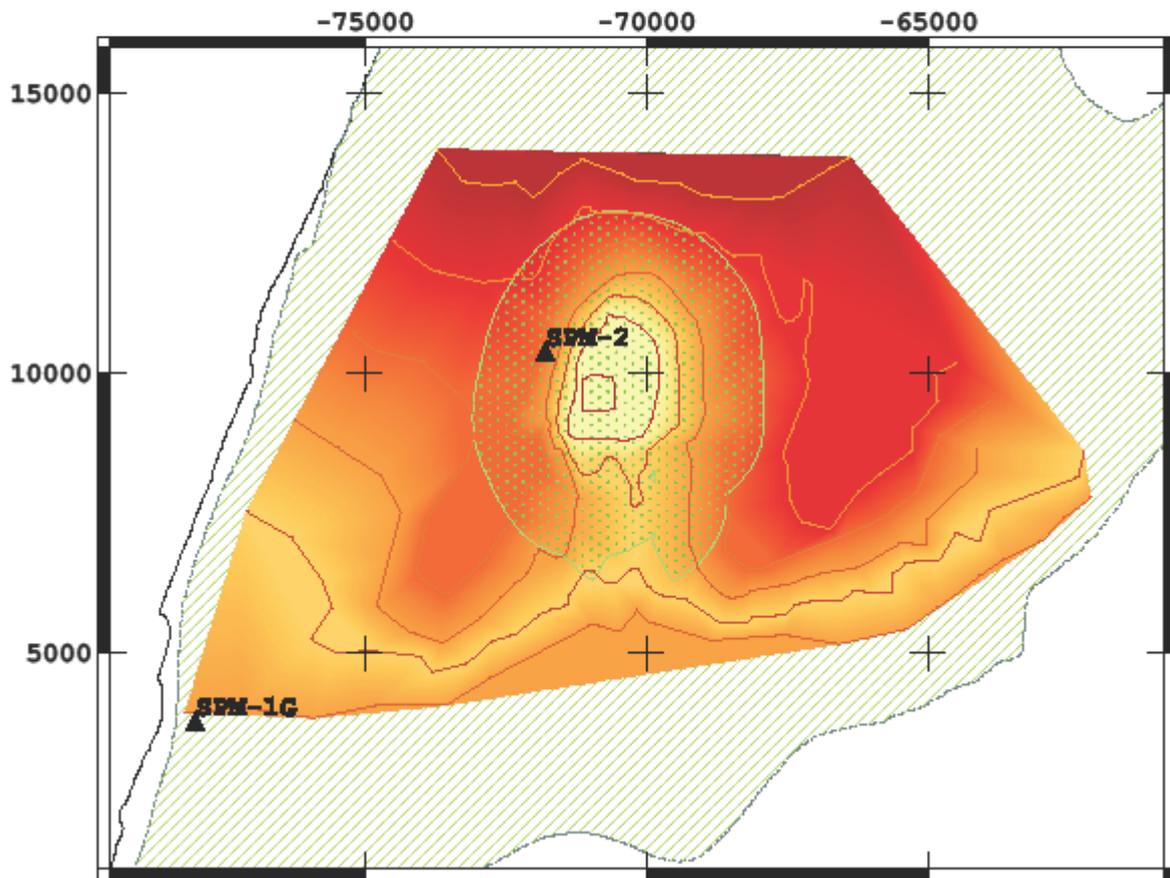


Figura 72 - a) Topo do Cretácico Médio (Mohave, 1995) com a presença da estrutura anticlinal. b) Perfil sísmico UTP81-8 interpretado por Dias (2005).

**Estruturas Anticlinal
identificada**



▨ Area Identificada

Profundidade Topo Cretácico Médio (Mohave, 1996)

790.8

1042.8

1294.8

1546.8

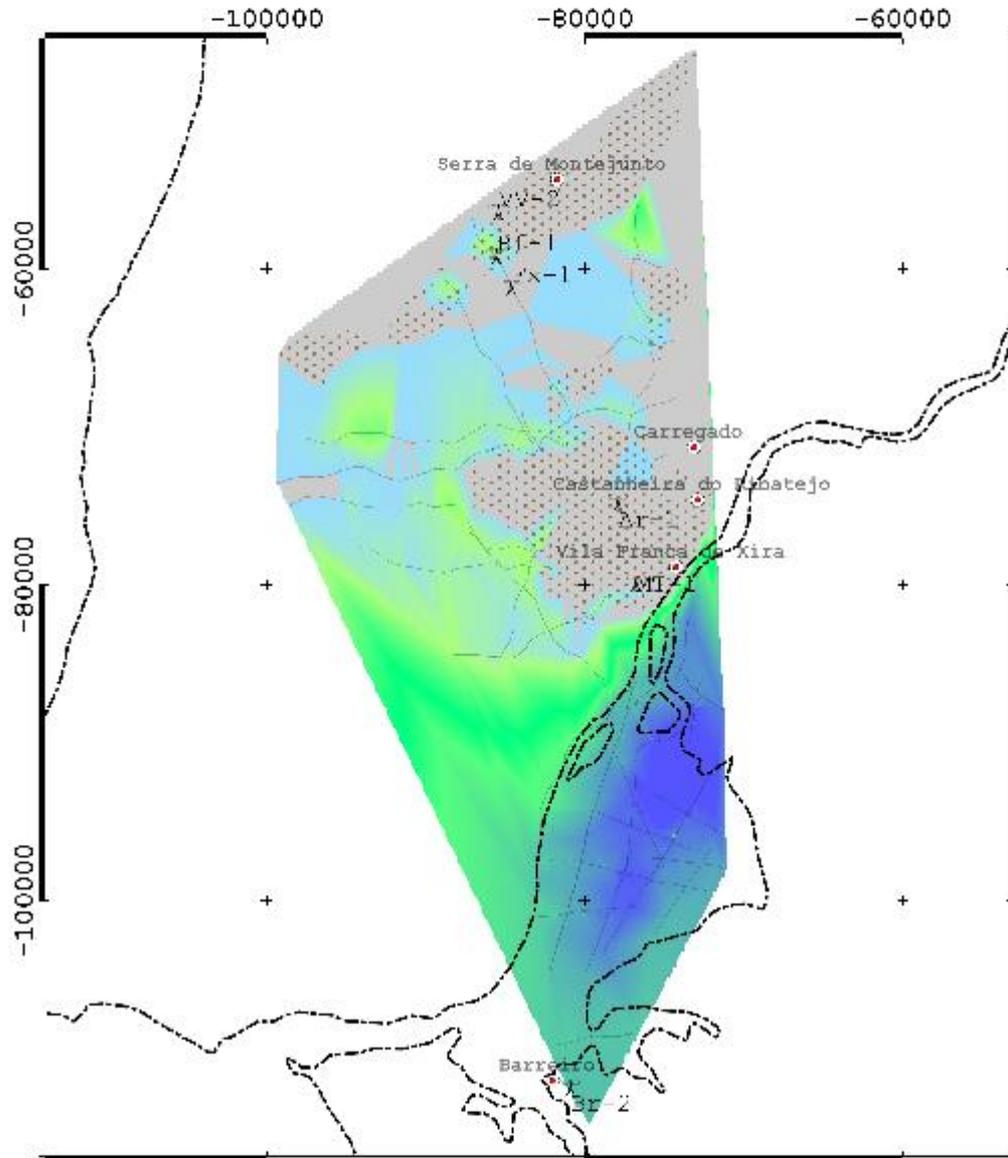
1798.8

Aquifero

▨ Vieira de Leiria - Marinha Grande

Figura 73 - Estrutura anticlinal representada com base em Mohave (1995)

Profundidade do Topo da Formação de Freixial, Sobral e Arranhó. 1



Topo Fm Sobral, Freixial, Arranhó (m)

■ Afloramento Fm Abadia

■ 0

■ 170

■ 550

■ 760

■ 2500

— Linhas Sísmicas (Carvalho, 2006)

■ Afloramento da Fm Abadia (Geologia 500k)

Figura 74 - a) Topo da Formação de Sobral, Freixial e Arranhó em m b) Topo da Formação da Abadia em milissegundos. c) Profundidade do topo da formação de Montejunto. Interpolação efetuada com base na interpretação de Carvalho (2005)

Topo da Formação da Abadia

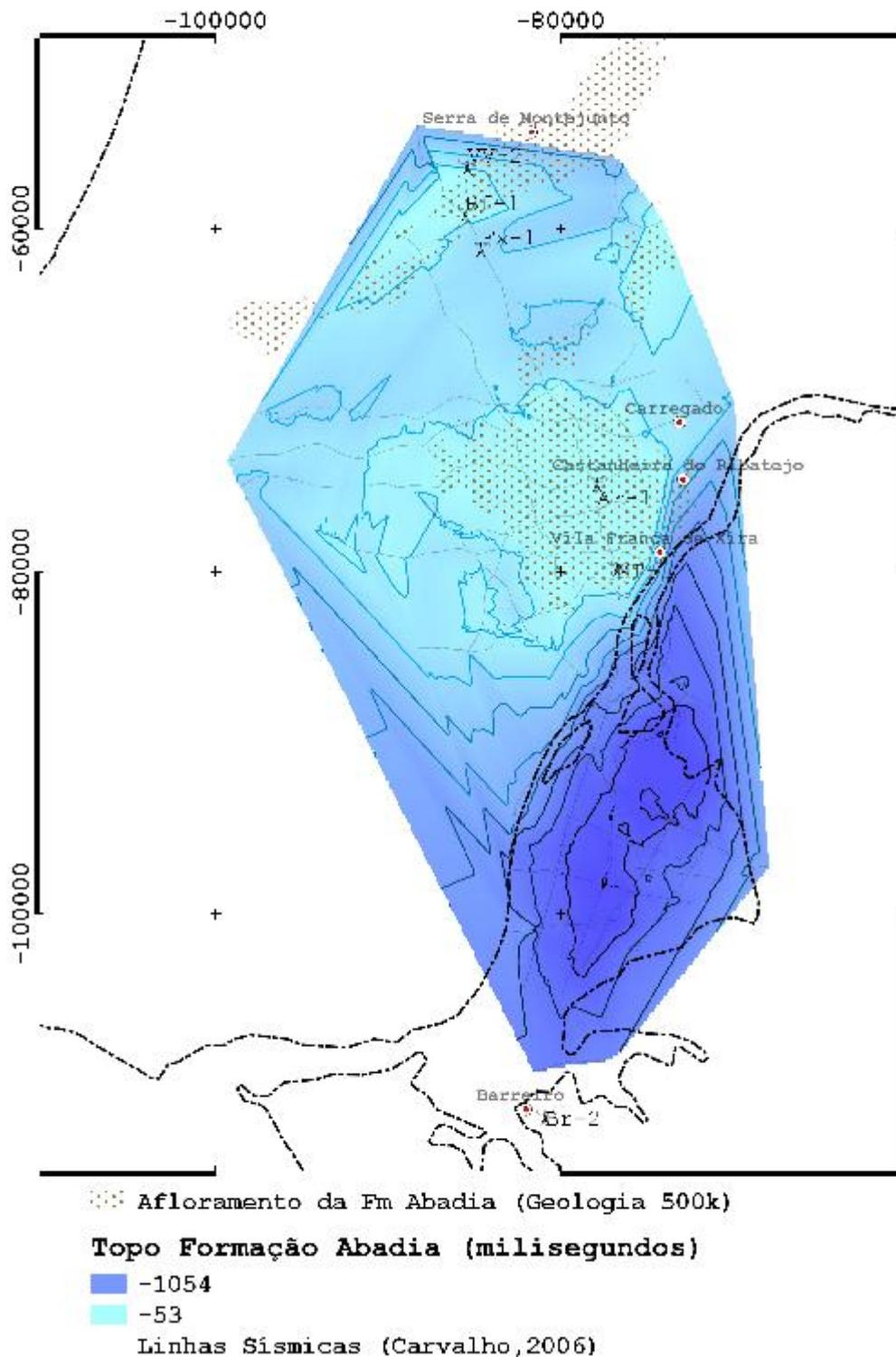


Figura 75 - a) Topo da Formação de Sobral, Freixial e Arranhó em m b) Topo da Formação da Abadia em milissegundos. c) Profundidade do topo da formação de Montejunto. Interpolação efetuada com base na interpretação de Carvalho (2005)

Profundidade do Topo da Formação de Montejunto

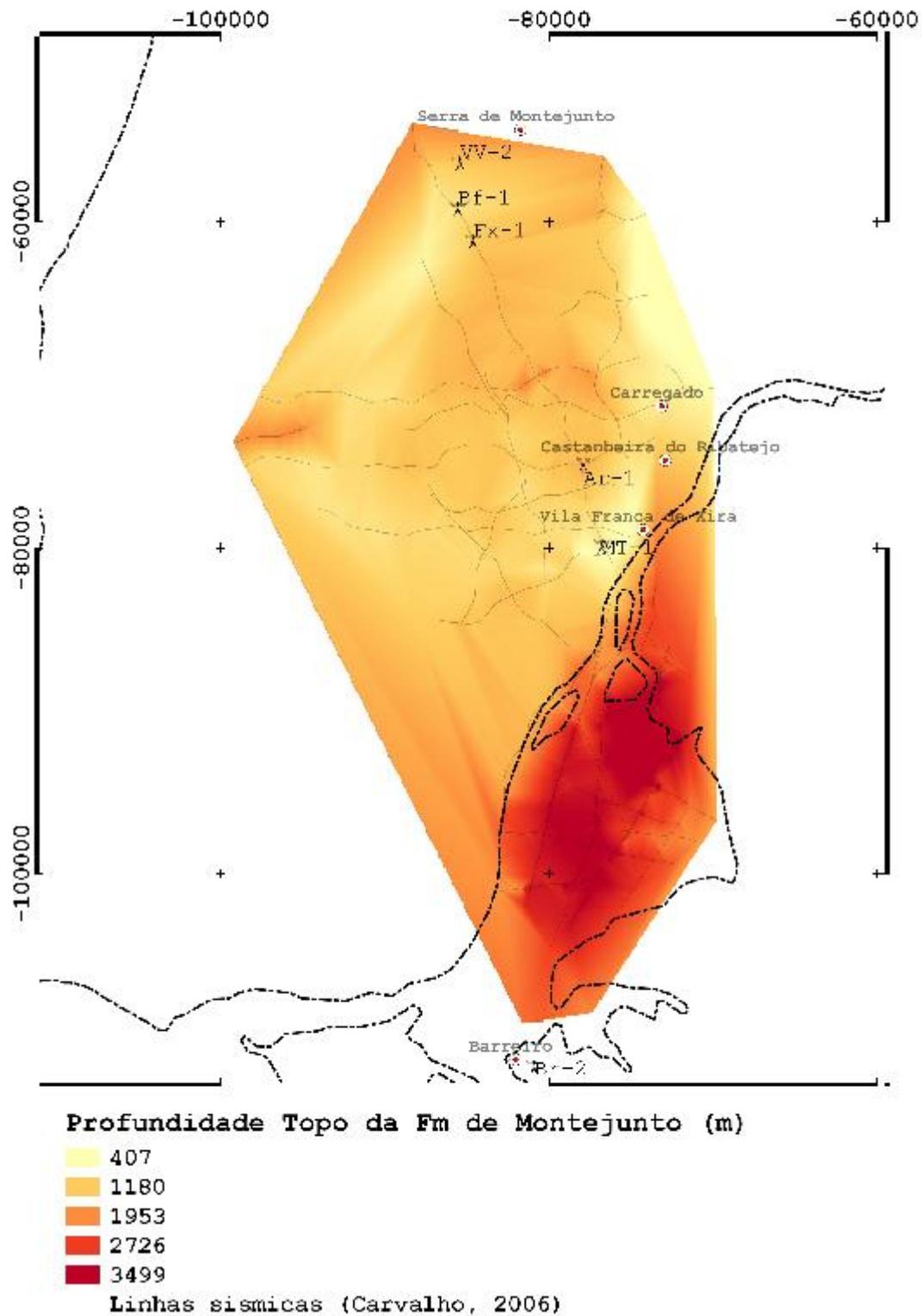


Figura 76 - a) Topo da Formação de Sobral, Freixial e Arranhó em m b) Topo da Formação da Abadia em milissegundos. c) Profundidade do topo da formação de Montejunto. Interpolação efetuada com base na interpretação de Carvalho (2005)

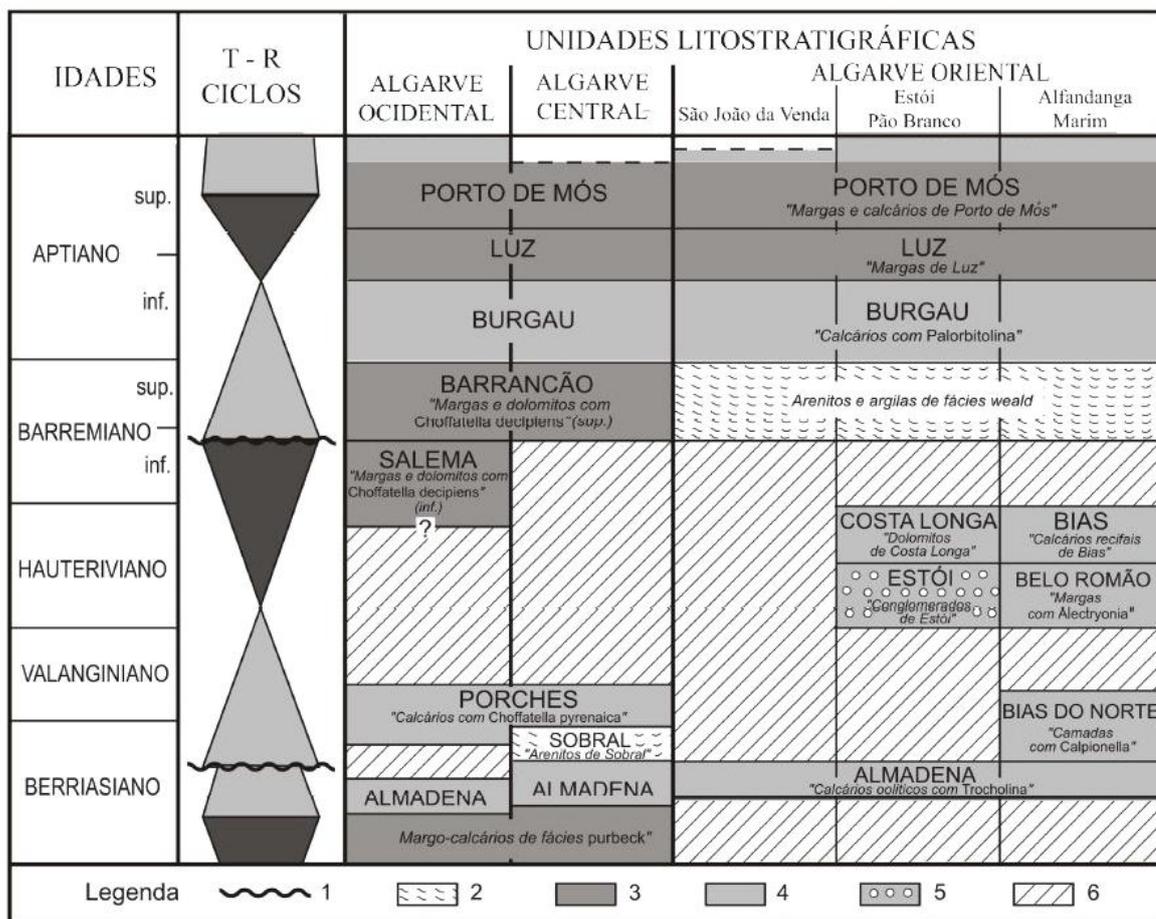


Figura 77 - Coluna estratigráfica do Cretácico Inferior na Bacia do Algarve (Terrinha et al., 2006).
 1 - Acontecimentos tectónicos maiores; 2 - depósitos siliciclásticos fluviais; 3 - depósitos carbonatados lagunares; 4 - depósitos carbonatados marinhos; 5 - conglomerados de origem marinha; 6 - Principais lacunas estratigráficas.

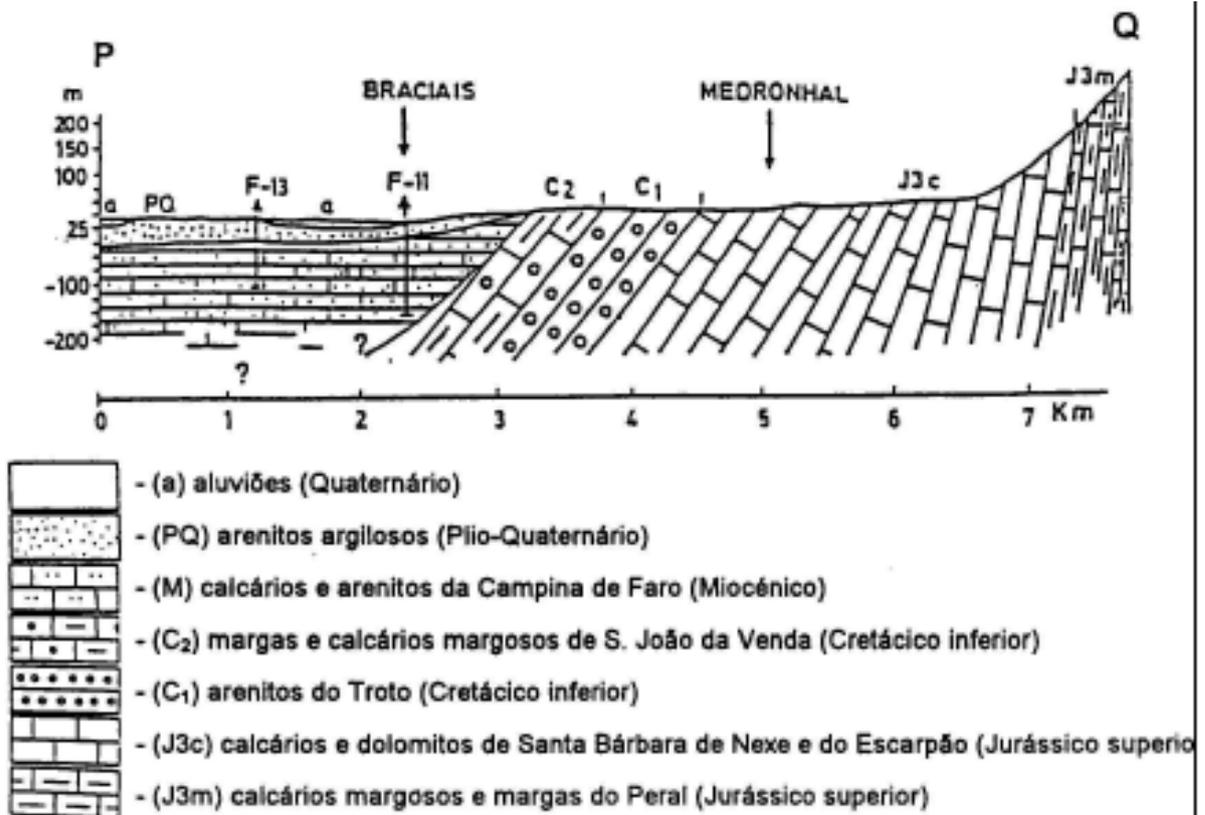
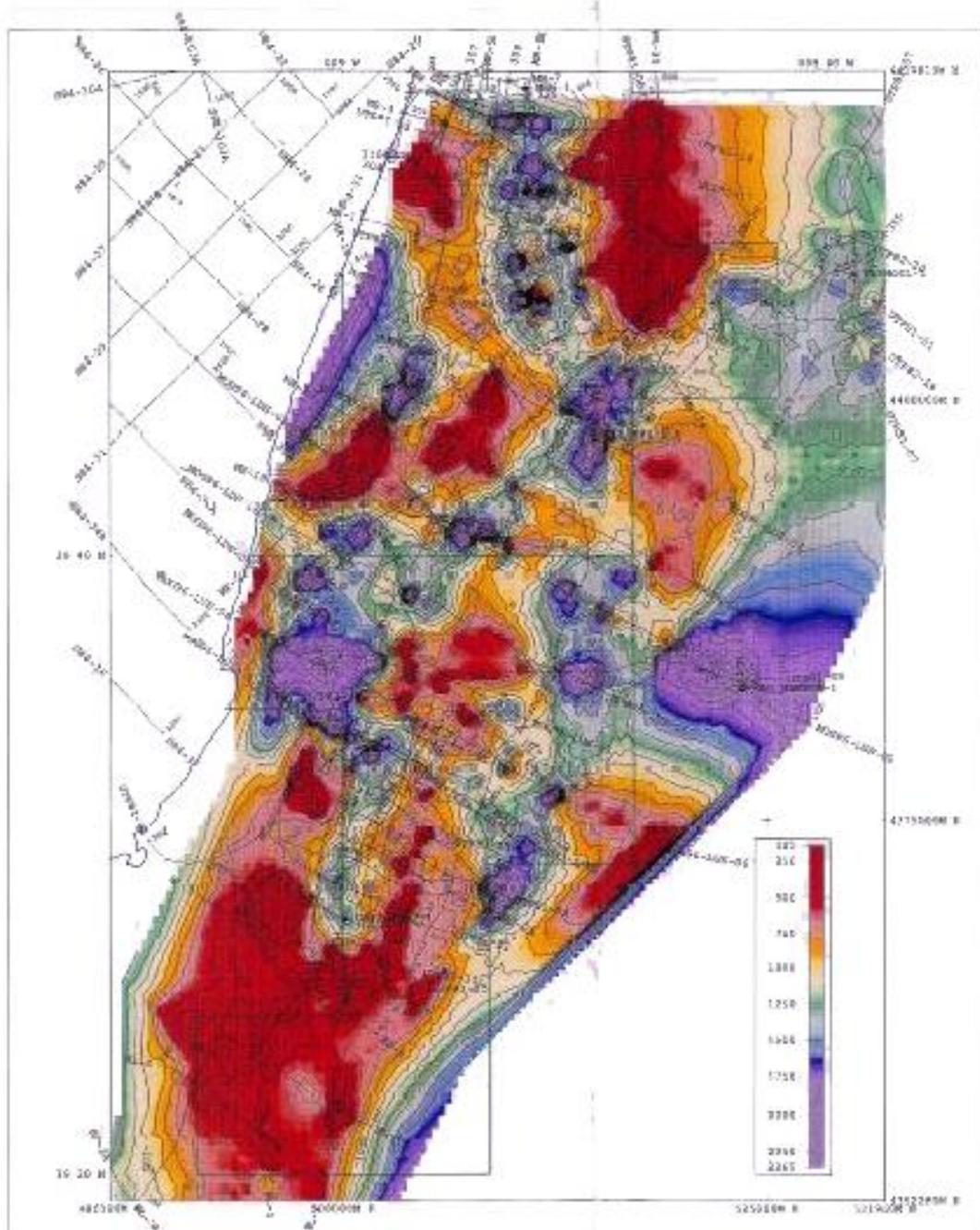


Figura 78 - Perfil geológico interpretativo N-S da Campina de Faro demonstrando a existência de Formações do Cretácico Inferior em profundidade adaptado de Silva *et al.*, 1986 em Roseiro, 2009)

SALT ISOPACH



a

Figura 79 - a) Isopacas e b) profundidade das Margas de Dagorda (Mohave, 1996)

STRUCTURE, LATE TRIASSIC AND EARLY JURASSIC SALT

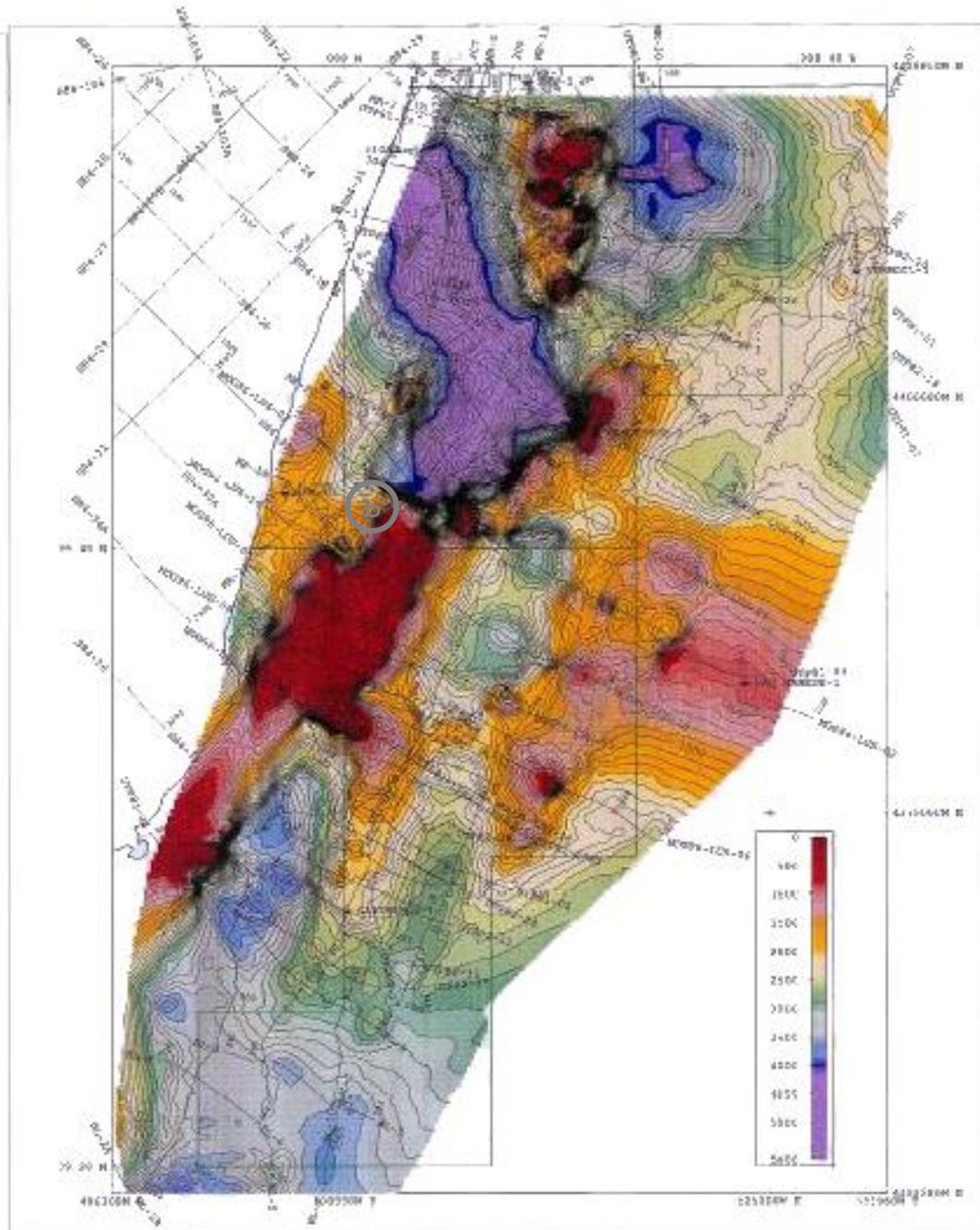
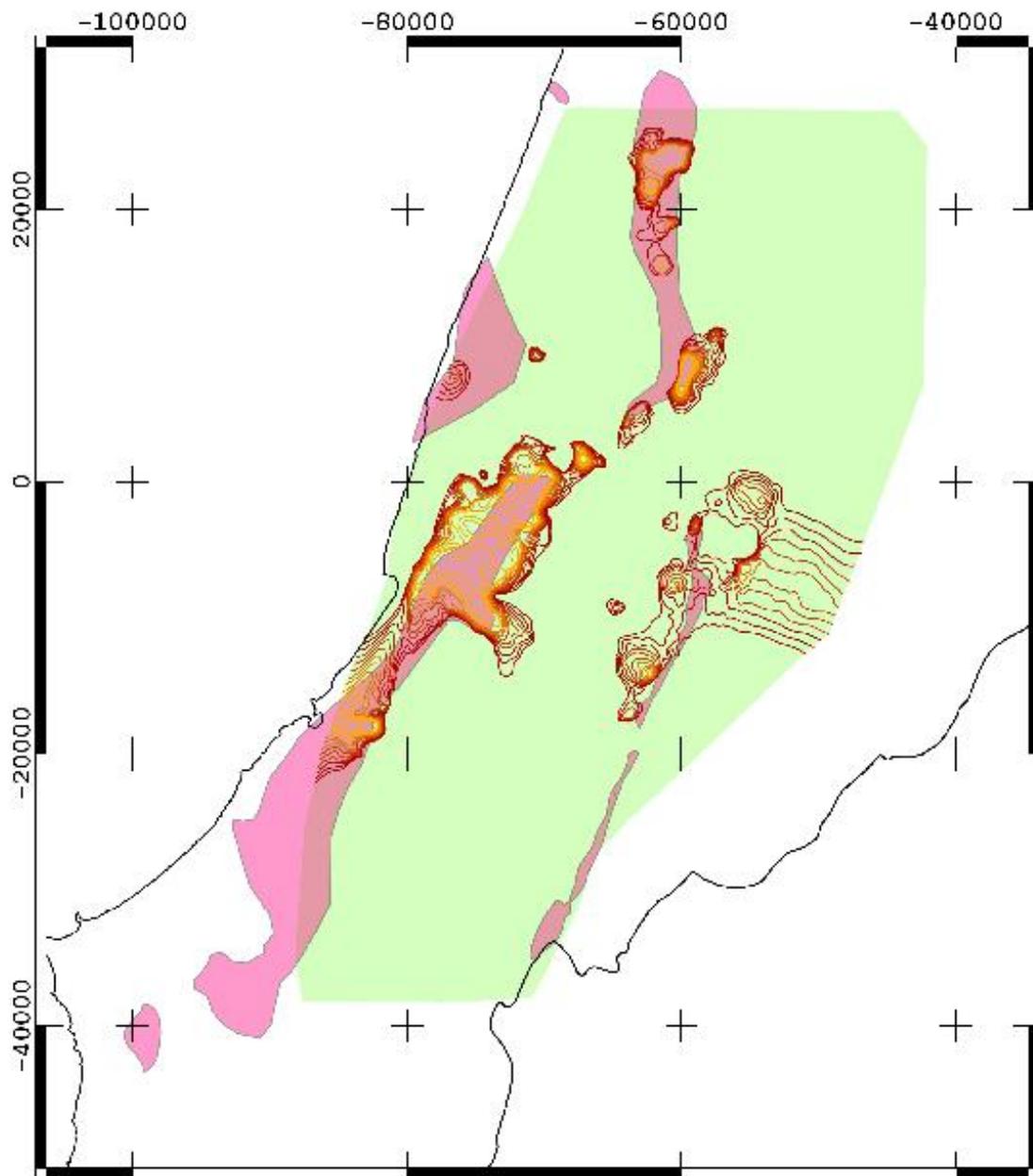


Figura 80 - a) Isopacas e b) profundidade das Margas de Dagorda (Mohave, 1996)

**Relação entre a profundidade adequada para CAES e
diapiros cartografados.**



Profundidade Topo Dagorda <1500m (m)

- 200 - 500
- 500 - 800
- 800 - 1100
- 1100 - 1400
- Ocorrências Salíferas
- Area Concessão Mohave

Figura 81 - Relação entre a profundidade adequadas para CAES em reservatórios salíferos e os diapiros cartografados.

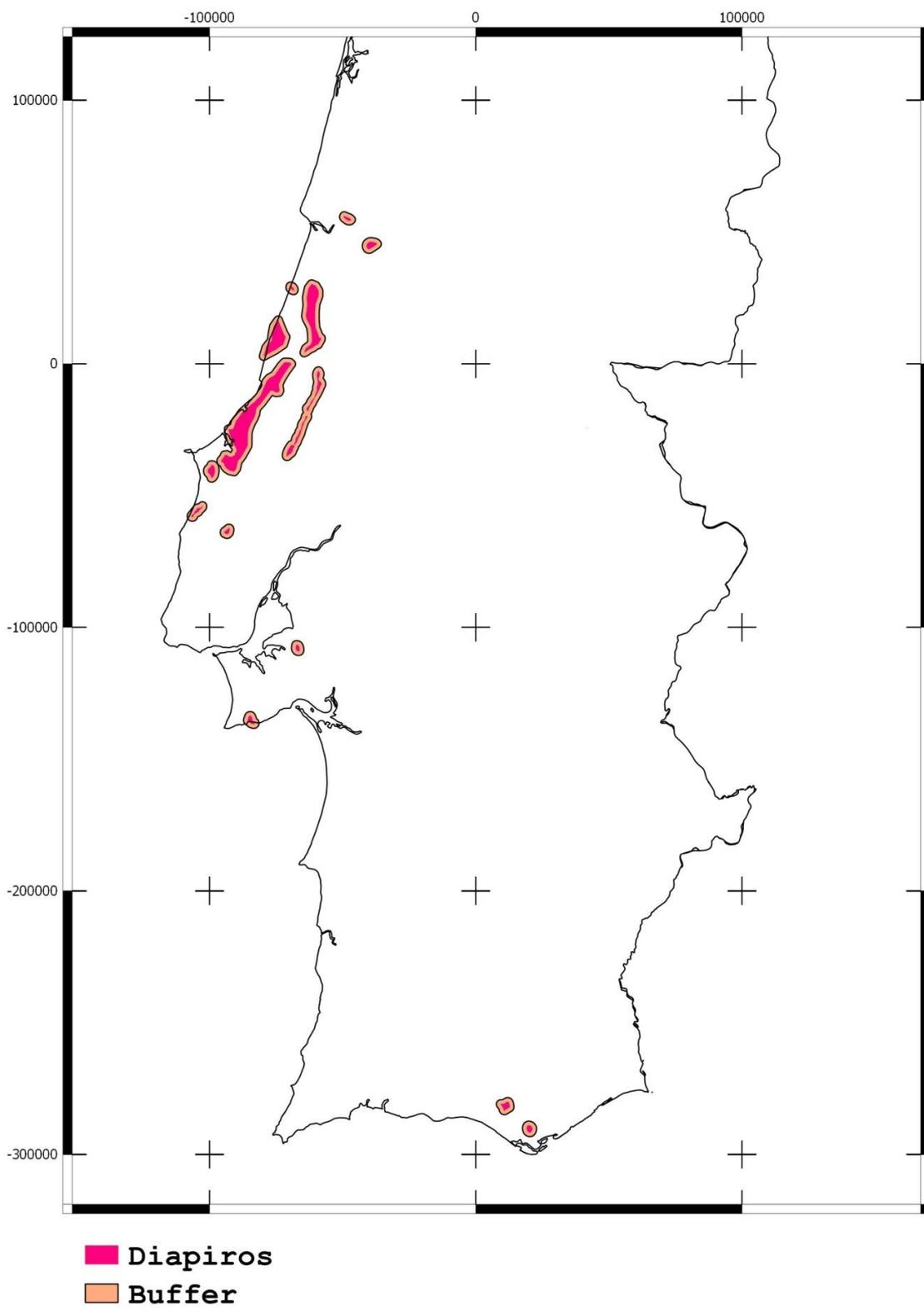


Figura 82 - Localização das estruturas salíferas.

Superfície de solo que cumpre criterios de Densidade Populacional, Declive, Áreas Protegidas, Áreas Inundáveis

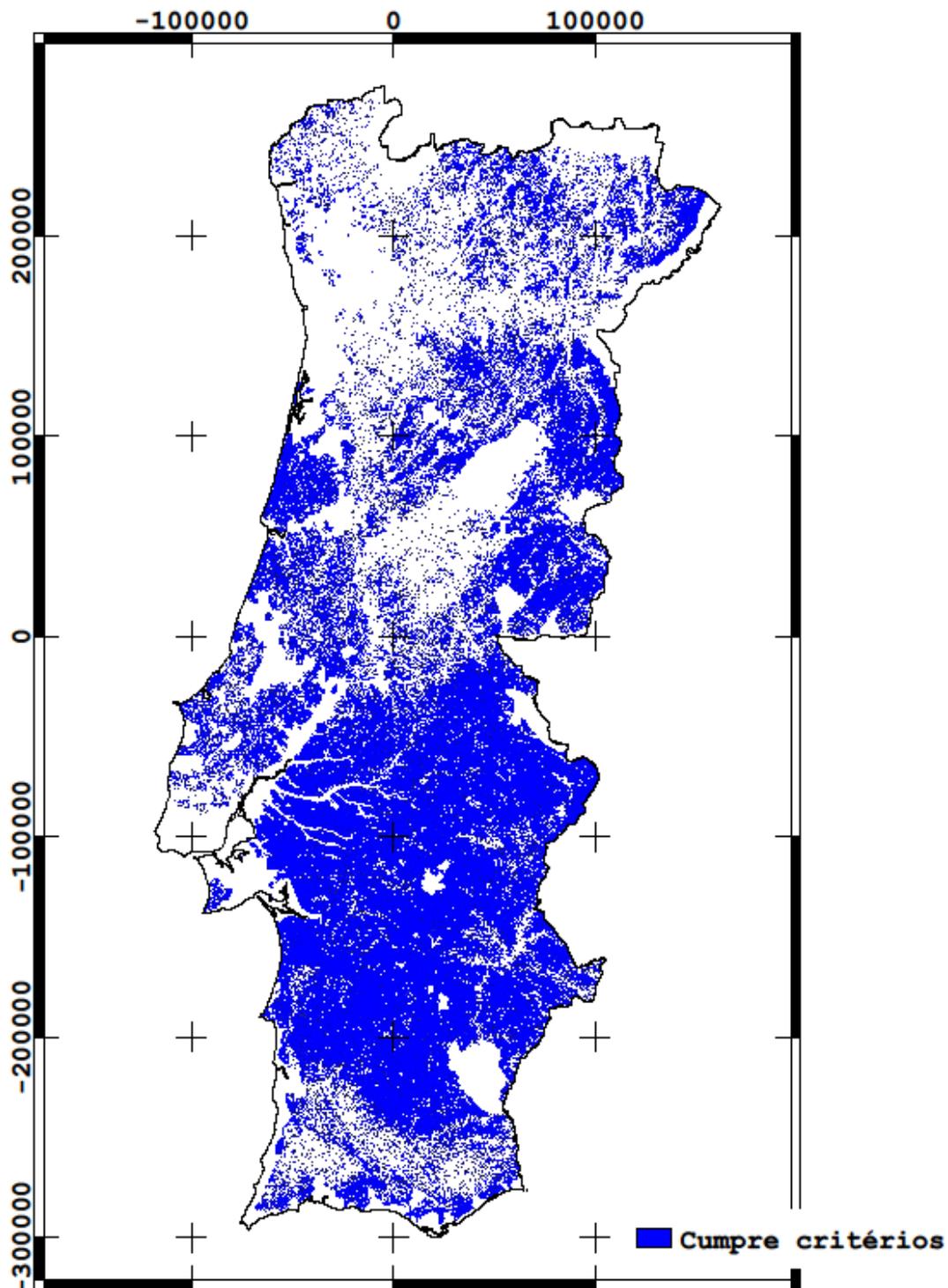


Figura 83 - a) Superfície de solo que cumpre os critérios de densidade populacional, declive, áreas protegidas, áreas inundáveis; b) estruturas geológicas identificadas e respetivo buffer.

Estruturas Geológicas Identificadas e respetivo buffer

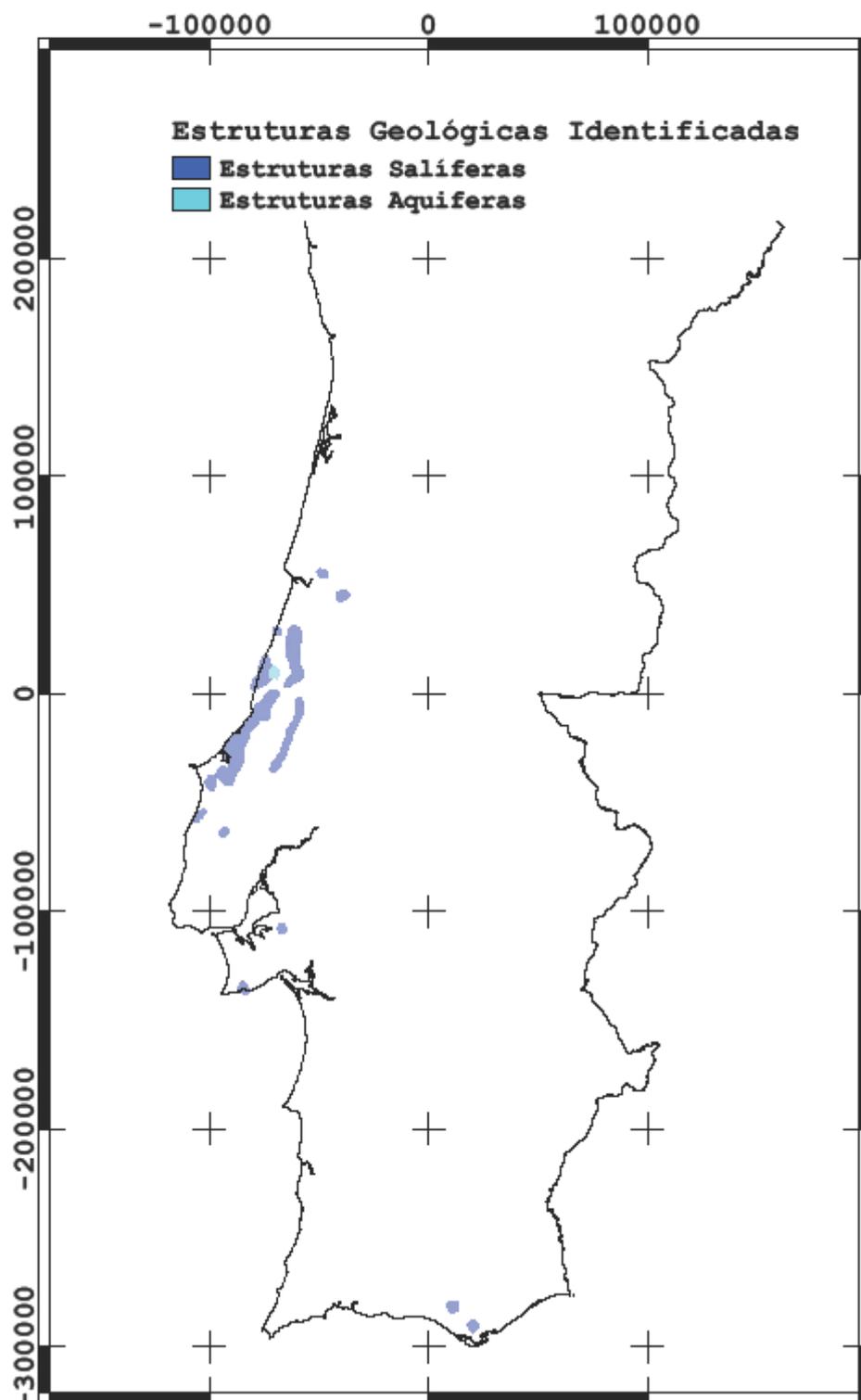


Figura 84 - a) Superfície de solo que cumpre os critérios de densidade populacional, declive, áreas protegidas, áreas inundáveis; b) estruturas geológicas identificadas e respetivo buffer.

Superfície de solo disponível para a instalação de uma central de CAES

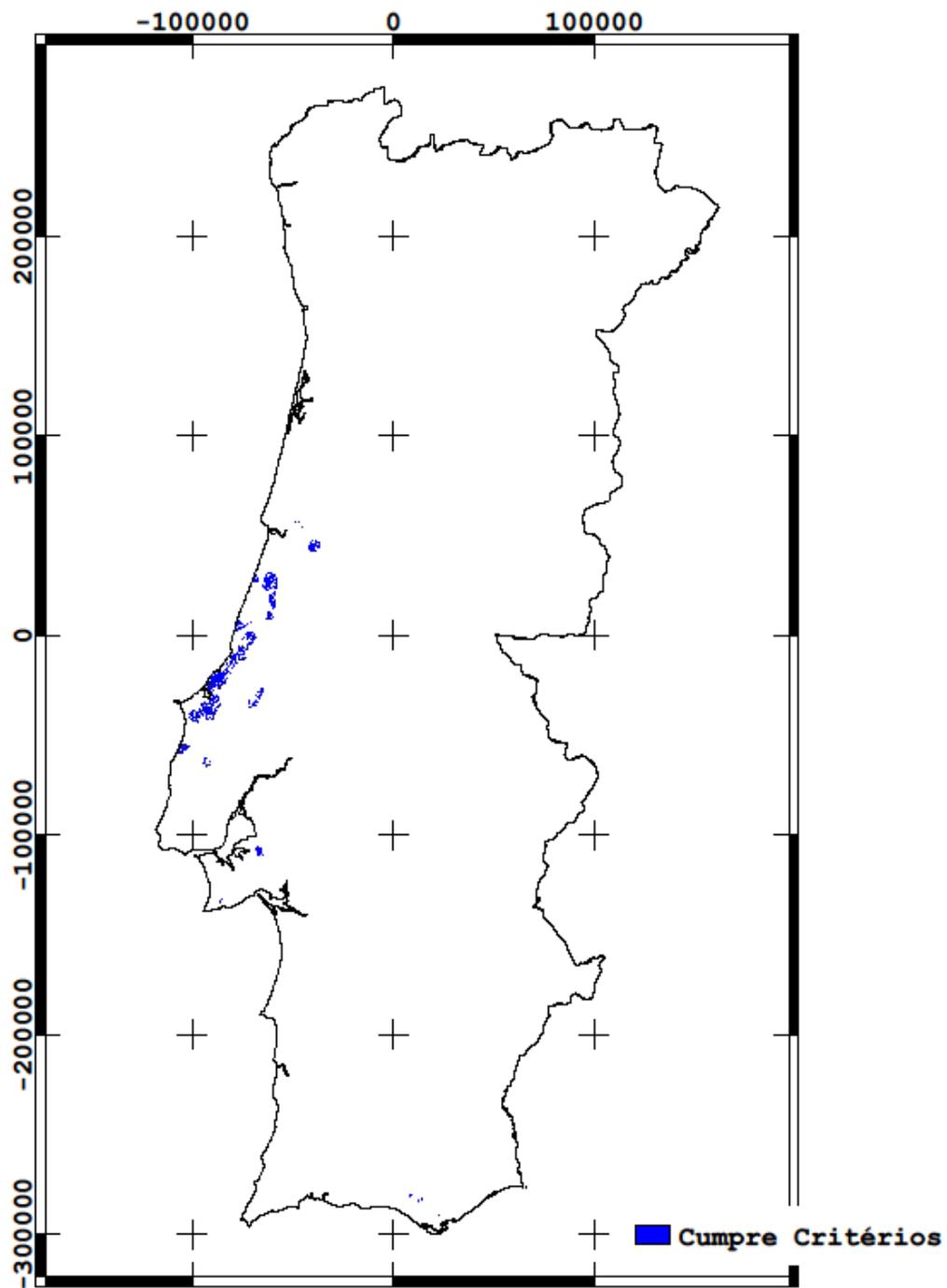
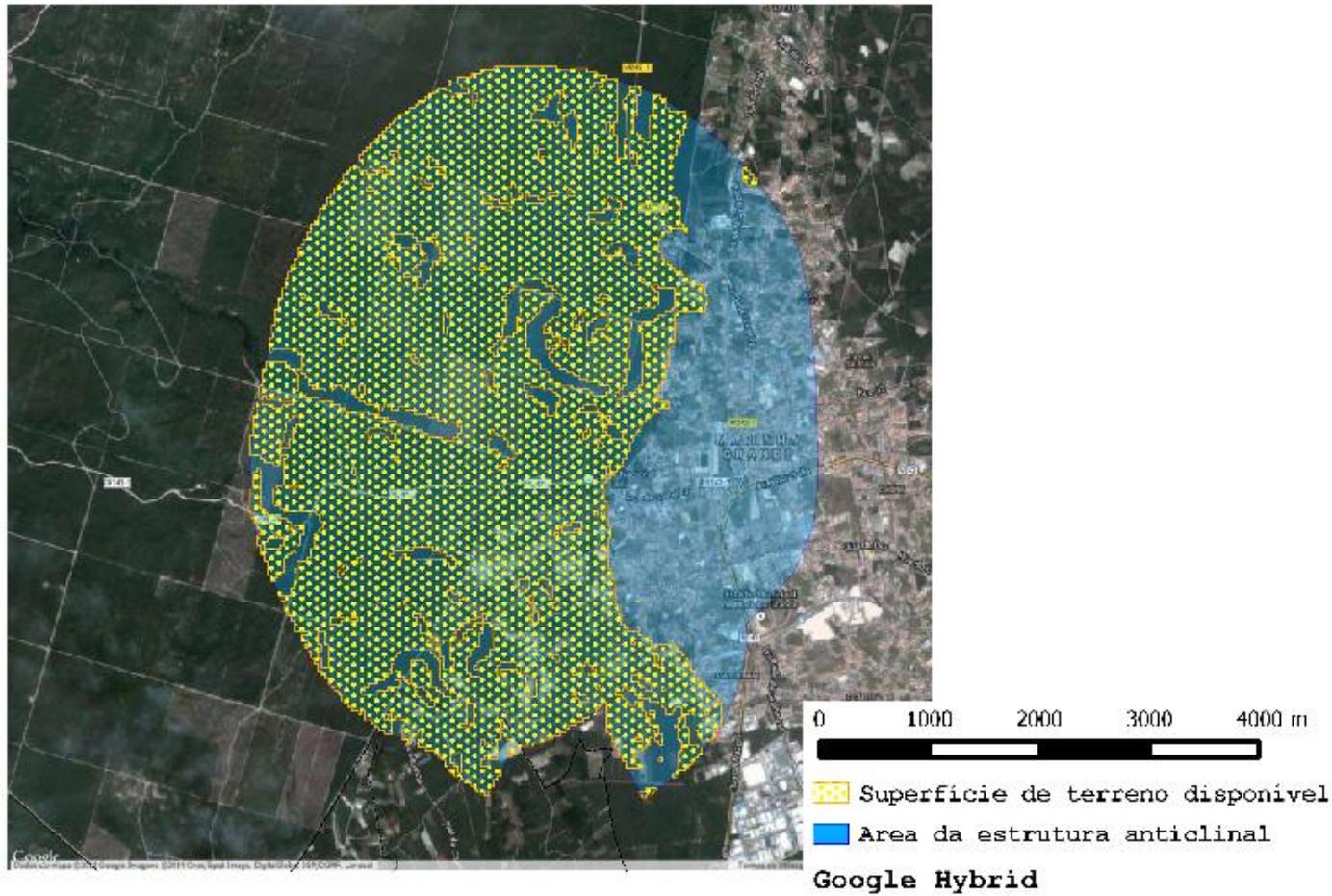


Figura 85 - Superfície de solo disponível para a instalação de uma central de CAES em Portugal Continental e pormenores das zonas identificadas

Superfície de terreno disponível no anticlinal no Grés Inferior



Sinergias entre o Potencial Eólico e a Superfície Disponível para a instalação de uma central de CAES. Pormenor Região Oeste

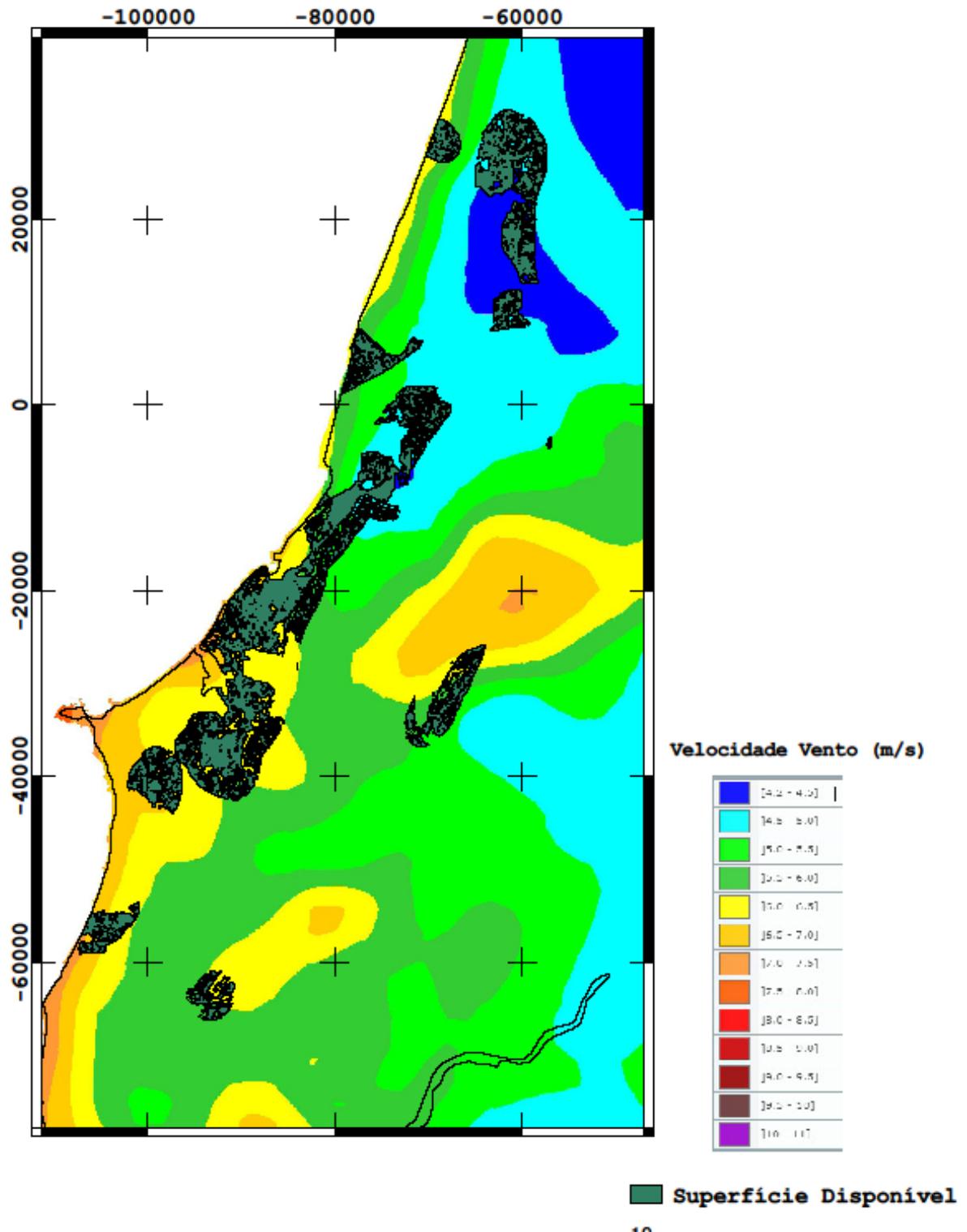
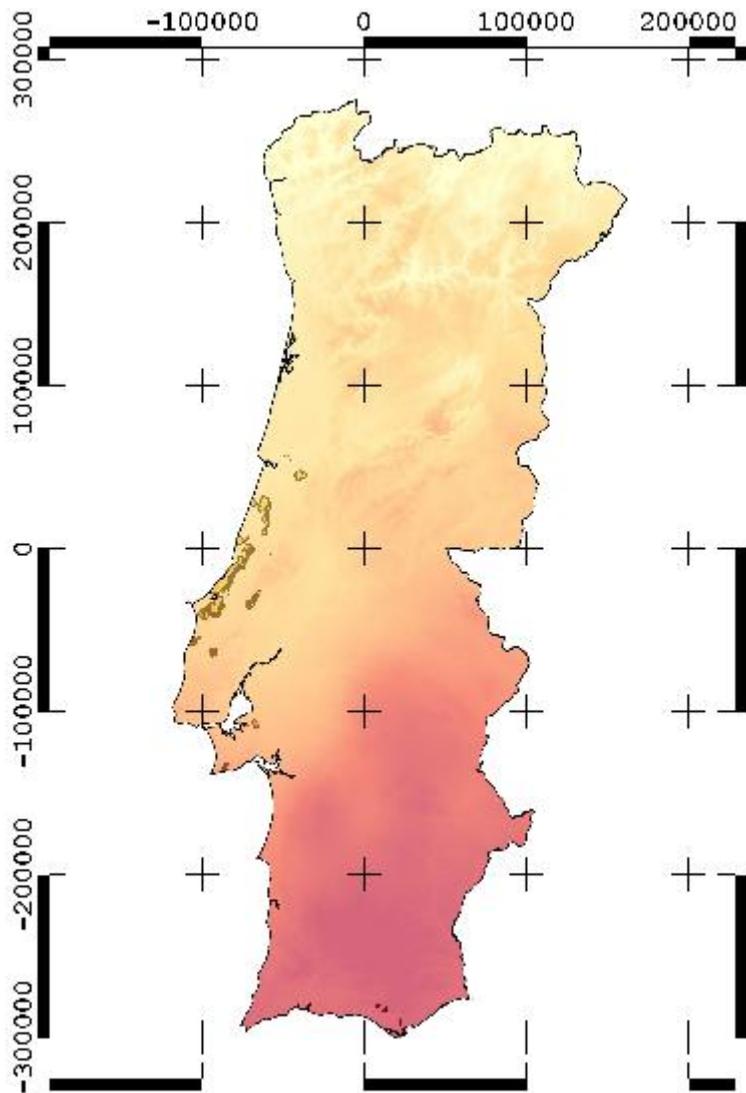


Figura 86 - Sinergias entre o potencial eólico e a superfície de solo disponível.



Radiação Solar Anual em Portugal Continental

Radiação Solar Anual (kWh/m²)

- 1514.69
- 1583.83
- 1652.98
- 1722.12
- 1791.27

Superfície de Solo Disponível

Sinergias entre os Centros Electroprodutores
por FER e superfície disponível para a
instalação de uma central de CAES

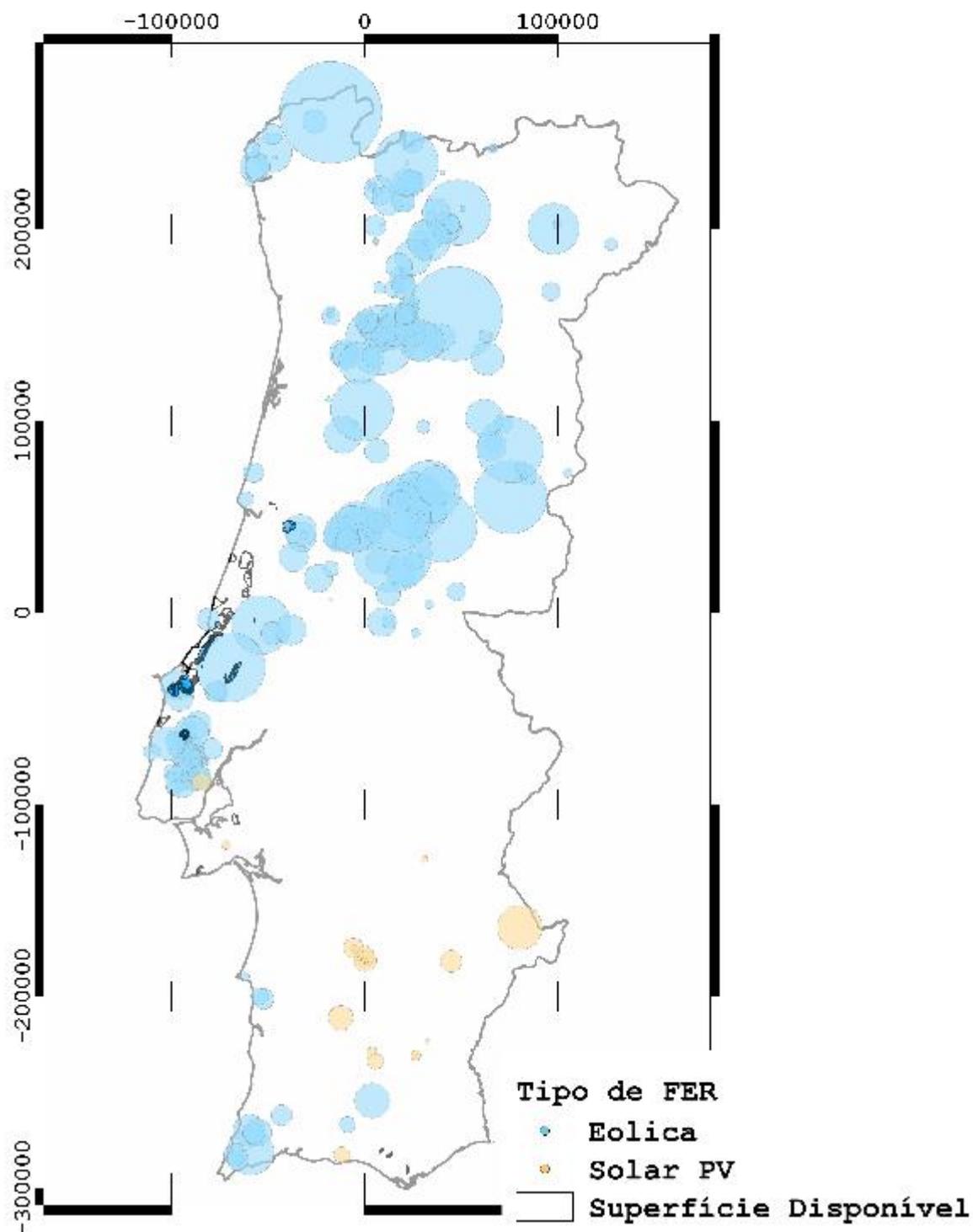


Figura 87 - a) Centros Electroprodutores por FER e superfície disponível.
b) Pormenor da Região Oeste.

Superfície disponível no Diapiro de Rio



Figura 88 - Enquadramento da localização de uma possível central de CAES com armazenamento de ar comprimido no diapiro de Rio Maior.

Carta Geologica (50k) do Diapiro de Rio Maior

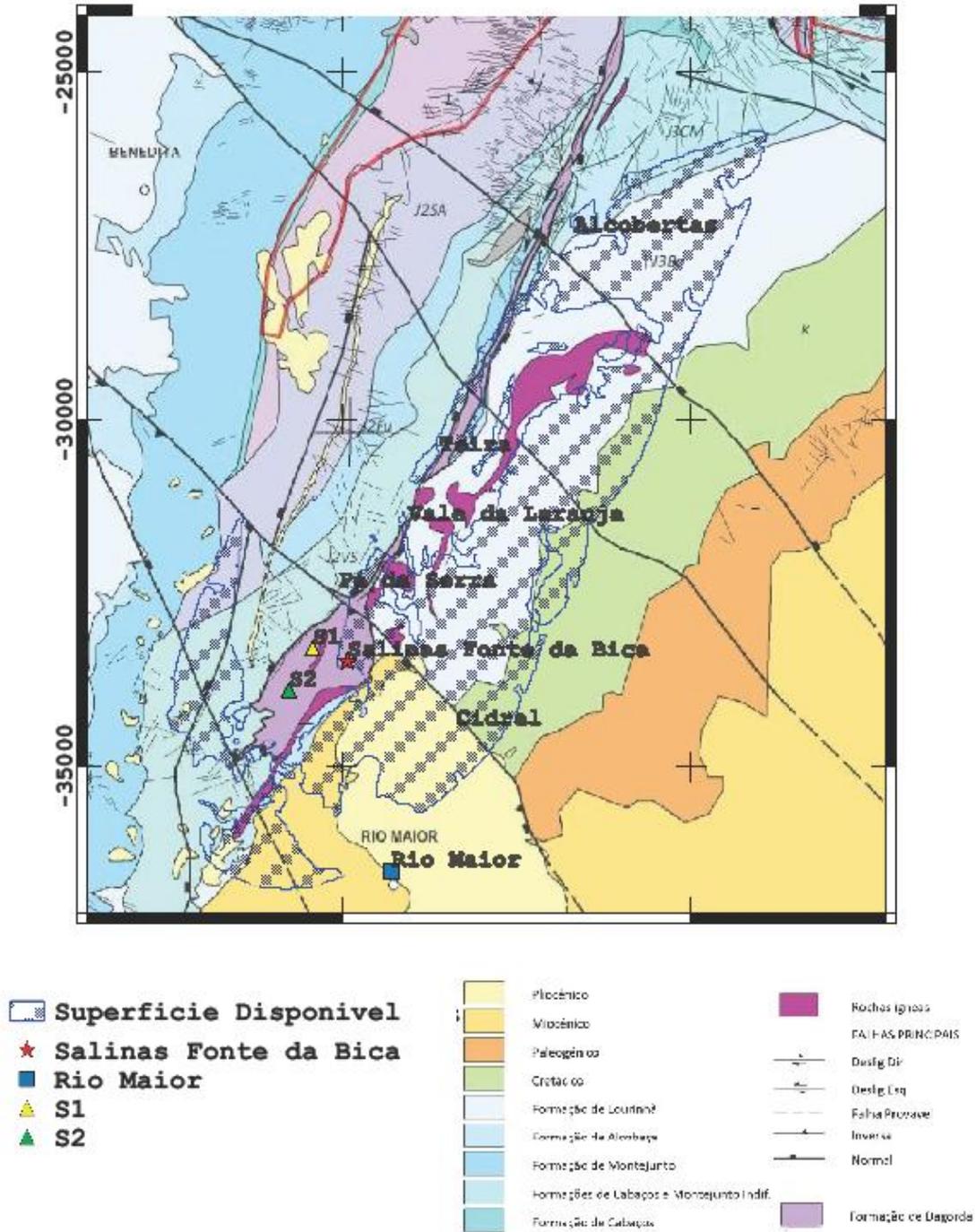


Figura 89 - Geologia da zona do Diapiro de Rio Maior à escala 1:50000. Adaptado de Carvalho (2013).

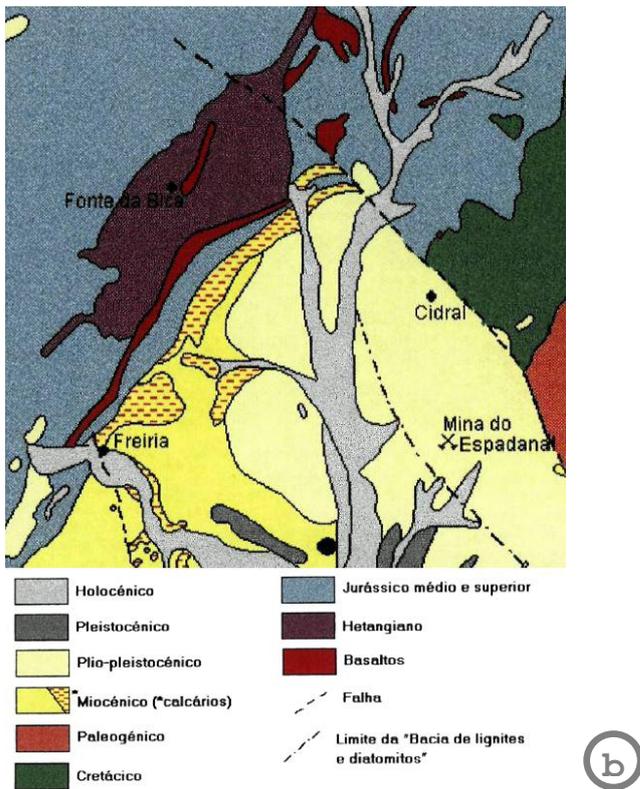
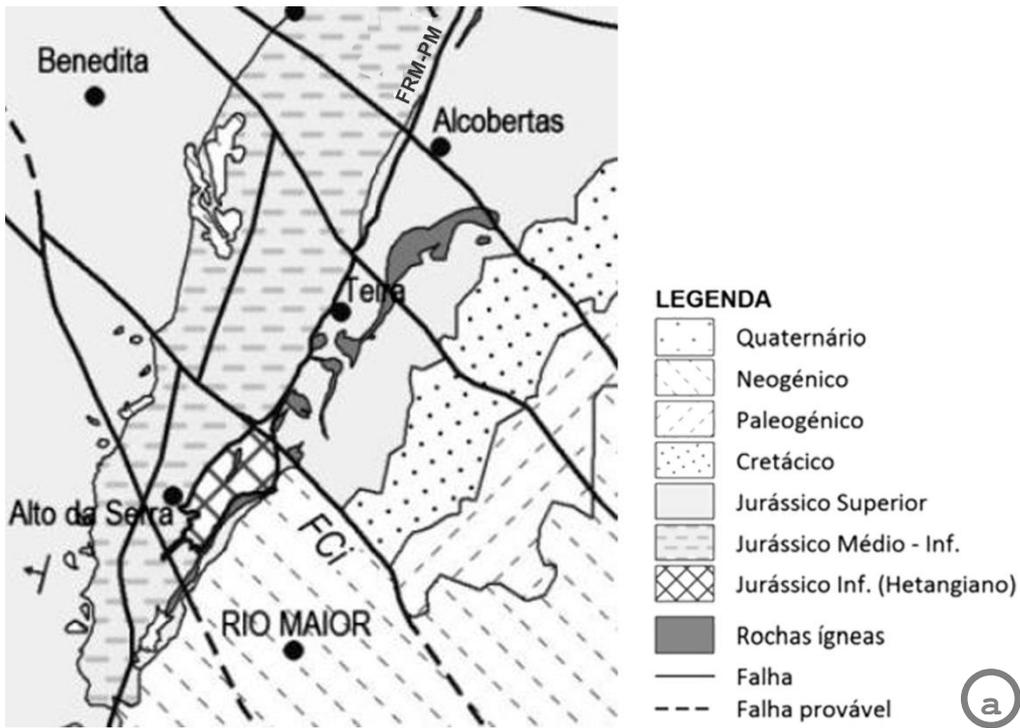


Figura 90 - Falhas na zona de Rio Maior de acordo com a) Carvalho (2013) e b) Fonseca (1996);

FCi - Falha do Cidral; FRM-PM - Falha de Rio Maior Porto de Mós

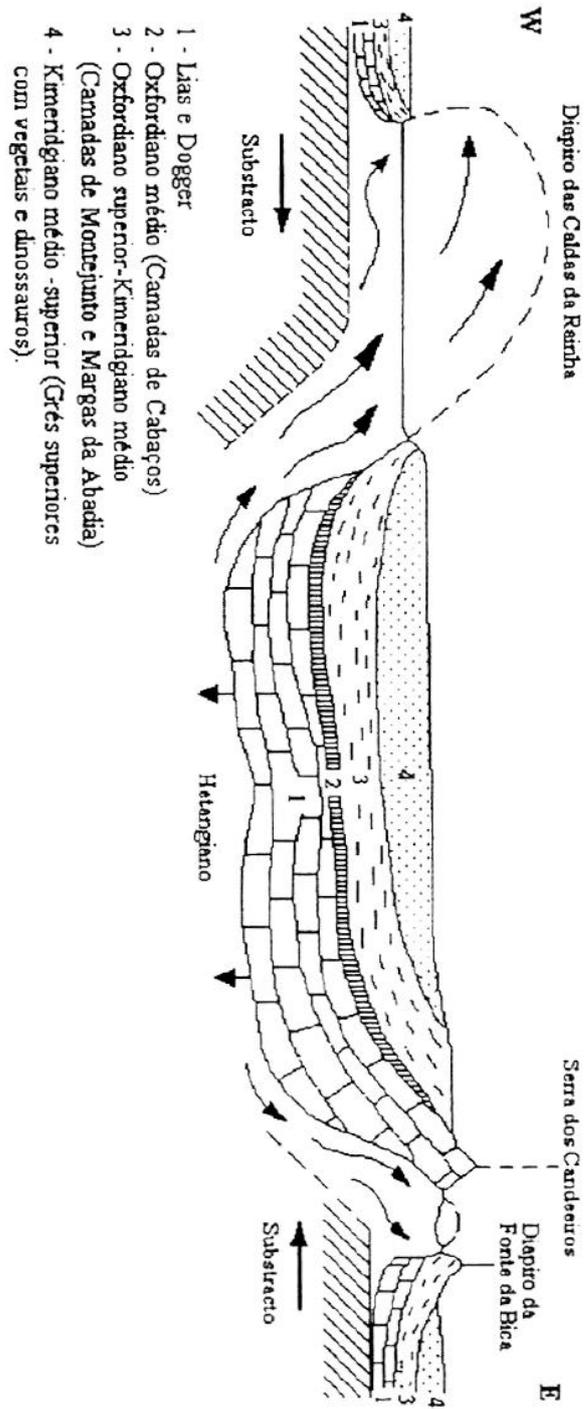


Figura 91 - Representação esquemática do modelo de formação dos diapiros das Caldas da Rainha e de Rio Maior (Zbyszewski (1959) em Fonseca, 1996).

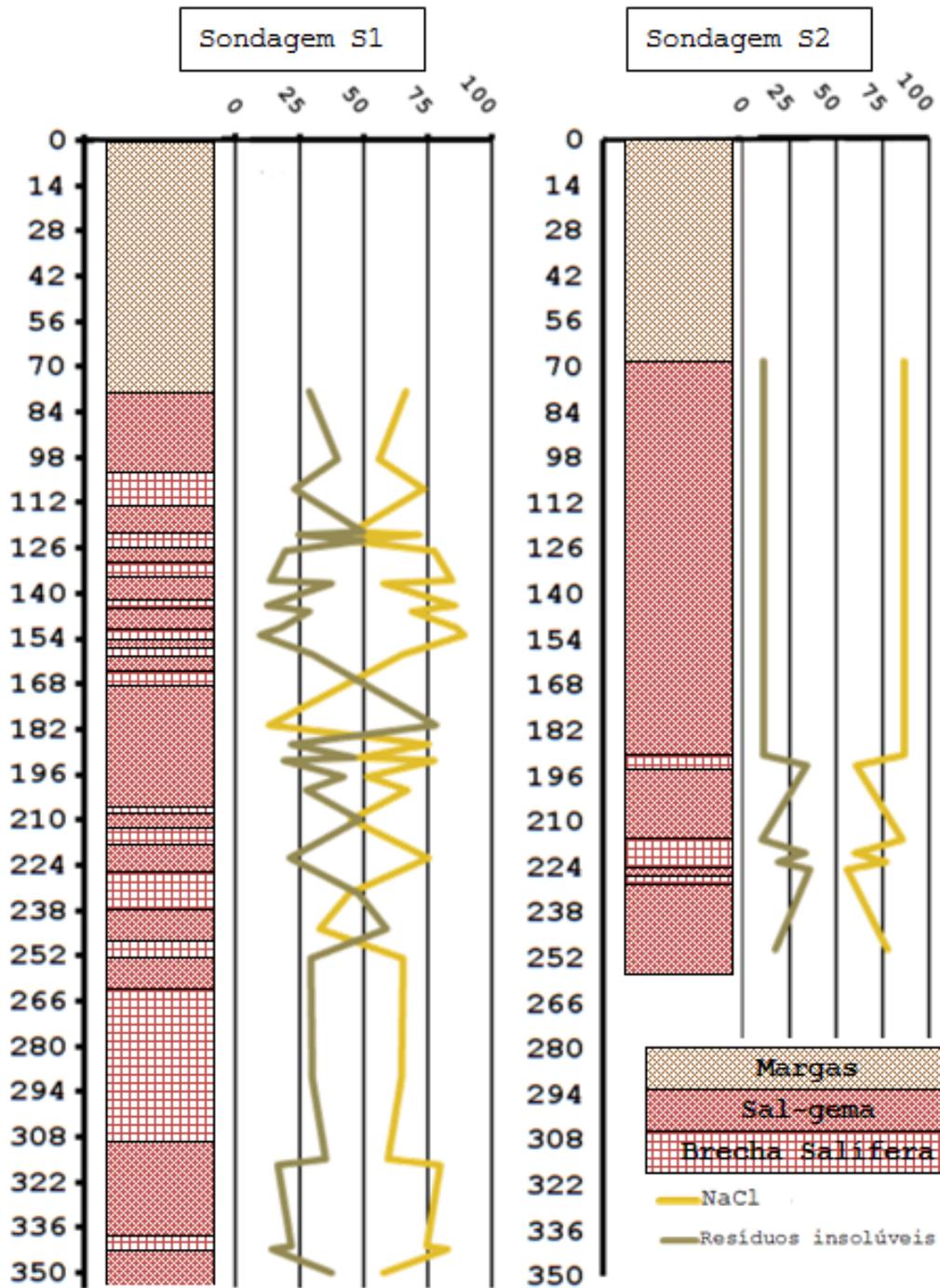
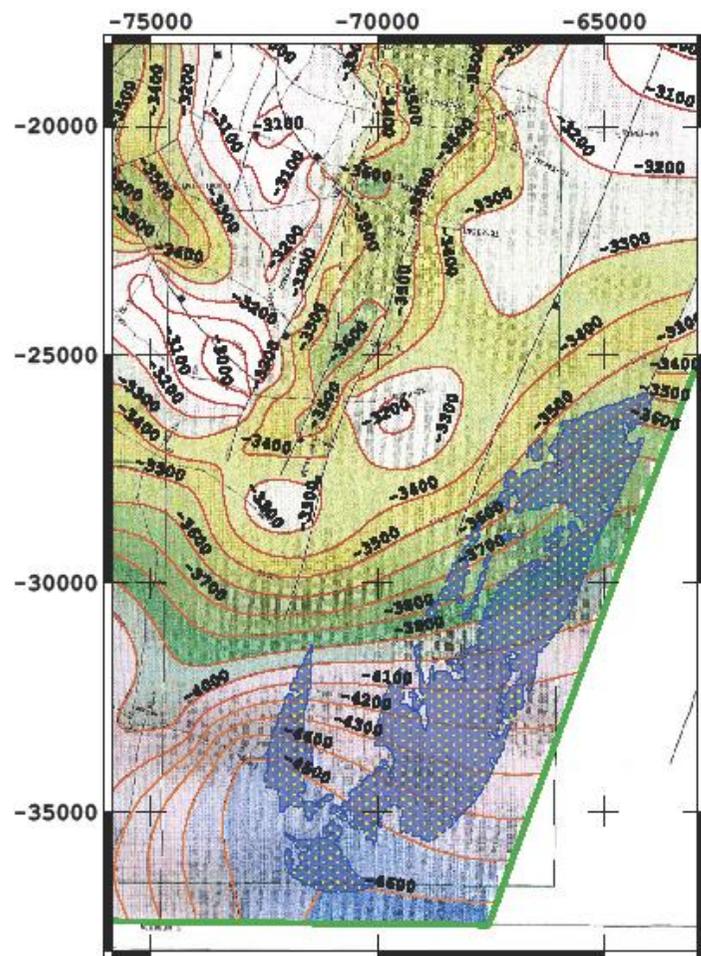


Figura 92 - Litologias e percentagens de material solúvel nas sondagens S1 e S2 no diapiro de Rio Maior. Efetuado com base em dados de Zbyszewski (1961)



**Estrutura do Topo do Triássico,
Grés de Silves, na Superfície
Disponível de Rio Maior**



Figura 93 - Estrutura do topo do Triássico (Grés de Silves), base da Formação de Dagorda.