

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**Ciências**  
**ULisboa**

**Evolução morfossedimentar do sapal da Caldeira de Tróia em  
contexto de subida do nível médio do mar**

Miguel Filipe Pinto de Oliveira Inácio

**Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos  
e Ordenamento do Território**

Dissertação orientada por:  
Professora Doutora Maria da Conceição Pombo Freitas



---

# RESUMO

---

As alterações climáticas são uma preocupação global da sociedade e a comunidade científica tem, por isso, o dever de quantificar as suas consequências. Esta dissertação apresenta um estudo sobre o efeito da subida do nível médio do mar no sapal do setor norte da Caldeira de Tróia, localizado no concelho de Grândola, distrito de Setúbal, em Portugal continental.

Este trabalho incluiu uma componente de campo, em que se realizaram levantamentos topográficos do sapal e sondagens manuais; e uma componente de laboratório, que incluiu a análise da atividade isotópica de  $^{210}\text{Pb}$  e  $^{137}\text{Cs}$  (efetuada por Tiago Silva, na Universidade de Genebra, Suíça) com o objetivo de determinar taxas de sedimentação médias relativas às últimas décadas.

A abordagem para a resolução da problemática introduzida no primeiro parágrafo passou pelo desenvolvimento de um modelo em Matlab e Arcmap que permite estimar a morfologia futura da área em estudo, tendo em consideração quatro parâmetros fundamentais: as cotas dos limites de maré atuais; a morfologia atual do sapal; as taxas de sedimentação médias e o cenário de subida do nível médio do mar considerado. Para além disso, foi estabelecido um indicador de maturidade do sapal ao qual foi dado o nome de Rácio AS/BS, adaptado da classificação proposta por Davis Jr e Fitzgerald (2004).

Foram utilizados quatro cenários de subida do nível médio do mar e os resultados foram organizados de acordo com estes: IPCC RCP2.6, IPCC RCP8.5, Antunes (2016) e NOAA *High*, sendo o primeiro linear e os restantes com diferentes valores de aceleração da taxa de subida anual.

Foi possível aferir que, no que respeita à área total, o sapal estudado apresenta uma elevada resiliência até meados do século XXI (2050). Para 2100, os cenários IPCC RCP2.6 e RCP8.5 permitem antever a conservação de uma fração considerável de área, enquanto concretização das projeções propostas nos cenários Antunes (2016) e NOAA *High* poderá tornar crítica a manutenção desta área de elevada importância ecológica. Constatou-se ainda que a maturidade deverá sofrer uma redução considerável, independentemente do cenário adotado – efetivamente, esta perda de maturidade deverá estar já, atualmente, a ocorrer.

Ter em consideração a variação espacial do sapal é fundamental para compreender a sua evolução e revelou ser uma condicionante importantíssima, pois é a translação deste ambiente para terra que permite a manutenção da maior parte da sua área. Note-se, no entanto, que esta expansão não é ilimitada e é determinada pela morfologia das áreas adjacentes ao sapal, em particular das dunas costeiras. Quando o sapal se aproxima da zona de maior declive das dunas, o seu movimento de translação fica limitado, observando-se, a partir deste momento, uma redução crítica da área total.

Por fim, importa acrescentar que a metodologia apresentada para quantificar a resposta do sapal em estudo à subida do nível médio do mar produziu resultados interessantes, mas que devem ser encarados com precaução, dada a sua falta de validação.

Palavras chave: Sapal, Subida do nível médio do mar, Modelação, Alterações Climáticas, Estuário do Sado



---

# ABSTRACT

---

Climate changes are a global concern of society and therefore the scientific community ought to quantify its consequences. This dissertation presents a study about the mean sea level rise at the salt marsh of Caldeira de Tróia north sector, located in Grândola, Setúbal district, Portugal continent.

This study includes a field component, where several topographic surveys and manual cores of the salt marsh were done together with a laboratorial component, which includes an analysis of the isotopic activity of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  (performed by Tiago Silva at University of Geneva, Switzerland) aiming to get the mean sedimentation rates regarding the last decades.

The approach to solve the problem introduced by the first paragraph included the development of a model with Matlab and Arcmap, which enables to estimate the future morphology of the studying area, considering four fundamental parameters: current tidal limits; current morphology of the salt marsh; mean sedimentary rates and the considered scenarios of the mean sea level rise. Furthermore, it was established an indicator of the salt marsh maturity named Ratio AS/BS, adapted from the classification proposed by Davis Jr and Fitzgerald (2004).

Four scenarios of the mean sea level rise were used and the results were organized according to these: IPCC RCP2.6, IPCC RCP8.5, Antunes (2016) and NOAA High. The first one is linear and the others have different acceleration values of the increase annual rate.

It was possible to verify that, concerning the total area, the studied salt marsh presents a high resilience until the middle of the 21st century. By 2100, the IPCC RCP2.6 e RCP8.5 scenarios allow to foresee the conservation of a considerable fraction of the marsh area, while the concretization of the forecasts proposed by Antunes (2016) and NOAA High scenarios may be critical for the maintenance of this highly important ecological area. It was also possible to observe that the maturity will suffer a considerable reduction, no matters the adopted scenario – this loss of maturity may effectively be already occurring.

The spatial variation of the salt marsh is fundamental to understand its evolution and it revealed to be a very important constraint, as only the translation of this environment to land allows the maintenance of most of the area. However, this expansion is not unlimited and it is constrained by the morphology of the salt marsh surrounding areas, mainly by the coastal dunes. When the salt marsh is near higher slopes of the dunes, its translation movement is limited and from that moment on, a critical reduction of the total area is observed.

Finally, it is important to add that the presented methodology to quantify the Caldeira de Tróia salt marsh response to the mean sea level rise produced interesting results, but they should be looked carefully, regarding their lack of validation.

Key words: Salt marsh, Mean sea level rise, Modelling, Climate Changes, Sado Estuary



---

# AGRADECIMENTOS

---

A realização desta dissertação teve diversos contributos e sem estes não seria possível chegar aos resultados apresentados nas páginas seguintes. Quero deixar algumas palavras de agradecimento às pessoas que, comigo, fizeram com que este trabalho pudesse ser concluído.

Em primeiro quero agradecer à minha orientadora, a Professora Doutora Maria da Conceição Freitas, pela total disponibilidade e pela transmissão de conhecimentos fundamentais para a resolução das mais variadas questões que surgiram na realização desta dissertação. O trabalho apresentado surgiu, em grande parte, de um equilíbrio perfeito entre uma orientação muito próxima e uma autonomia total, o que nos permitiu enveredar por “caminhos” onde ambos pudemos aprender e contribuir para um resultado que deixa o seu contributo para um melhor conhecimento das consequências que a subida do nível médio do mar tem em ambientes de sapal – deixo-lhe, por isso, um enorme “obrigado”.

Quero deixar um agradecimento especial ao Professor Doutor Carlos Antunes pelo seu contributo no tratamento dos dados de maré e pela transmissão de conhecimentos relativos ao fenómeno da subida do nível médio do mar. Um agradecimento igualmente importante ao Professor Doutor Rui Taborda por se ter disponibilizado sempre para me ajudar a resolver todas as questões relacionadas com a utilização do Matlab e Arcmap.

Um agradecimento ao Professor Doutor César Andrade pela sua preocupação em dar-me a conhecer a bibliografia fundamental para que eu pudesse compreender melhor os princípios teóricos das áreas sobre as quais estudei. Um obrigado ao Professor Doutor Mário Cachão pela forma como encoraja os alunos com que se cruza a não se contentarem com um trabalho igual aos que outros fizeram em anos anteriores.

Agradeço à Daniela Rato pela forma como nos acompanhámos constantemente nesta etapa das nossas vidas, contribuindo mutuamente para a realização de duas dissertações em que fomos extremamente exigentes um com o outro – sem a Daniela este trabalho teria, certamente, menos qualidade. Um obrigado à Ana Cunha pela partilha de dados e resultados e pela sua constante preocupação em ajudar-me e fazer deste um trabalho melhor. Deixo um agradecimento à Vera Lopes pela sua total disponibilidade para me ajudar a interpretar resultados e resolver os mais diversos problemas.

Quero agradecer ao André Baptista pelo apoio em todo este processo e à Filipa Fernandes pelo seu companheirismo, certamente que teria sido tudo mais difícil sem a vossa ajuda. Um obrigado à Tânia Ferreira e Ana Costa pela amizade e apoio que demonstraram. Um agradecimento ao Pedro Costa, Ana Bastos e Cristina Lira, pelo contributo no trabalho de campo, fornecimento de dados e esclarecimento de dúvidas.

Por fim, quero agradecer aos meus pais. Ao meu pai pelo incentivo que me tem dado ao longo de todo o mestrado e à minha mãe pelo apoio e compreensão que sempre me deu e que foi fundamental nos últimos meses de trabalho, agradeço-lhe também pelo contributo dado na revisão final desta dissertação.



---

# ÍNDICE

---

Resumo.....	I
Abstract .....	III
Agradecimentos.....	V
Índice de Figuras .....	XI
Índice de Tabelas.....	XV
Índice de Anexos.....	XVII
Lista de Abreviaturas .....	XIX
1. Introdução.....	1
1.1. Nota introdutória .....	1
1.2. Objetivo.....	1
1.3. Estrutura da dissertação.....	2
1.4. Problemática a nível global .....	3
2. Conceitos.....	5
2.1. Sapal e raso de maré.....	5
2.1.1. Raso de Maré.....	5
2.1.2. Sapal.....	7
2.2. Sedimentação nos sapais e rasos de maré.....	9
3. Enquadramentos .....	11
3.1. Enquadramento geográfico.....	11
3.1.1. O rio Sado e a sua bacia hidrográfica.....	11
3.1.2. O estuário do Sado .....	11
3.1.3. A Caldeira de Tróia .....	13
3.2. Enquadramento Geológico .....	15
3.2.1. Evolução do estuário do Sado .....	17
3.2.2. Evolução da restinga de Tróia .....	18
4. Metodologias.....	21
4.1. Campo .....	21
4.1.1. Levantamentos topográficos.....	21
4.1.2. Sondagens.....	22
4.2. Laboratório .....	23
4.2.1. Análise isotópica $^{210}\text{Pb}/^{137}\text{Cs}$ .....	24
4.3. Gabinete.....	26

4.3.1.	Rácio AS/BS.....	26
5.	Modelo de evolução do sapal .....	27
5.1.	Organização do modelo.....	27
5.2.	Construção do modelo.....	28
5.2.1.	Primeira etapa: Matlab .....	28
5.2.2.	Segunda etapa: Arcmap.....	31
5.3.	Resultado final.....	33
6.	Materiais.....	35
6.1.	Modelo digital de terreno .....	35
6.2.	Cotas de transição.....	36
6.3.	Cenários de subida do NMM.....	38
6.3.1.	IPCC .....	38
6.3.2.	Antunes (2016).....	42
6.3.3.	NOAA (2017).....	44
6.3.4.	Outros cenários de subida do NMM.....	46
6.3.5.	Nivelamento e comparação de cenários .....	46
6.4.	Taxas de sedimentação.....	49
6.4.1.	Sondagem CTBS1 .....	50
6.4.2.	Alto sapal e raso de maré.....	52
7.	Evolução do sapal.....	55
7.1.	Morfologia atual .....	55
7.2.	IPCC RCP2.6.....	57
7.2.1.	Mapas de referência: 2050 e 2100.....	59
7.3.	IPCC RCP8.5.....	60
7.3.1.	Mapas de referência: 2050 e 2100.....	62
7.4.	Antunes (2016).....	63
7.4.1.	Mapas de referência: 2050 e 2100.....	65
7.5.	NOAA High .....	66
7.5.1.	Mapas de referência: 2050 e 2100.....	68
8.	Discussão.....	71
8.1.	O modelo: vantagens e desvantagens .....	71
8.1.1.	Vantagens .....	71
8.1.2.	Desvantagens.....	72
8.2.	Os dados de entrada do modelo.....	73
8.2.1.	Influência inicial.....	73
8.2.2.	Influência na evolução.....	75

8.3. Evolução do sapal.....	77
8.3.1. IPCC RCP2.6.....	77
8.3.2. IPCC RCP8.5, Antunes (2016) e NOAA High .....	78
9. Conclusão .....	85
10. Bibliografia.....	87
11. Anexos.....	89



---

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.1 - Distribuição das áreas de sapal pelo globo (UNEP-WCMC, 2015) .....	3
Figura 1.2 - Mapa com distribuição das áreas de sapal afetadas desde 1940 (adaptado de UNEP-WCMC, 2009).....	4
Figura 2.1 - Esquema representativo das áreas de raso de maré e sapal .....	5
Figura 2.2 - Organização do sistema raso de maré (com raso arenoso e vasoso) e sapal intercetados por uma rede de canais (adaptado de Woodroffe, 2003).....	6
Figura 2.3 - Bloco 3D com estrutura do baixo e alto sapal cortado por canais (adaptado de Woodroffe, 2003).....	7
Figura 2.4 – Vegetação típica de sapal (espécies dominantes) de acordo com o ICNF:.....	8
Figura 2.5 - <i>Spartina maritima</i> ( <a href="http://flora-on.pt/Spartina-maritima_ori_7fTp.jpg">http://flora-on.pt/Spartina-maritima_ori_7fTp.jpg</a> , acedido a 22 de maio de 2017).....	8
Figura 2.6 - Esquema representativo dos três tipos de sapais consoante o grau de maturidade. A imagem acima corresponde a um sapal jovem; a imagem ao centro corresponde a um sapal intermédio; a imagem abaixo corresponde a um sapal maturo (Davis Jr e Fitzgerald, 2004) .....	9
Figura 3.1 - Localização e morfologia da bacia hidrográfica do rio Sado e das ribeiras que drenam diretamente para o estuário do Sado. O ponto a verde marca a nascente do rio Sado e o quadrado a vermelho enquadra o estuário do Sado.....	11
Figura 3.2 – Representação dos limites dos concelhos em contacto com o Estuário do Sado.....	12
Figura 3.3 - Representação do estuário do Sado com todos os limites montante e jusante considerados .....	13
Figura 3.4 - Enquadramento da Caldeira de Tróia no Estuário do Sado (a vermelho) .....	14
Figura 3.5 - Imagem de satélite da Caldeira de Tróia (Fonte: Microsoft; Data:18/03/2011).....	14
Figura 3.6 - União das cartas Geológicas 38-B e 39-A na escala 1:50 000 .....	16
Figura 3.7 - Imagem ilustrativa da área do estuário do Sado há 18.000 anos BP (Freitas e Andrade, 2008).....	17
Figura 3.8 - Imagem representativa do estuário do Sado entre 5.500 e 4.000 anos BP (Freitas e Andrade, 2008).....	17
Figura 3.9 - Imagem representativa do estuário do Sado na atualidade (Freitas e Andrade, 2008) .	18
Figura 3.10 – Restinga de Tróia com cinco fases de evolução e associação com as idades resultantes de datações OSL.....	18
Figura 4.1 - Distribuição de pontos cotados registados no setor norte da Caldeira de Tróia .....	21
Figura 4.2 - Localização das sondagens recolhidas no sapal em estudo .....	23

Figura 4.3 - Exemplo de um testemunho de sondagem durante o processo de subamostragem.....	24
Figura 5.1 - Fluxograma com os dados e passos necessários para a construção do modelo numérico .....	27
Figura 5.2 . Representação esquemática da forma como o modelo interpreta os dados altimétricos e os classifica .....	29
Figura 5.3 - Transformação do ficheiro raster binário em ficheiro vetorial que limita as áreas que sofreram alteração após execução do código Matlab .....	32
Figura 5.4 - Esquema que representa a forma como se obtém o limite do sapal para a data projetada a partir da união entre a área alterada após execução do modelo e o limite atual .....	32
Figura 6.1 - Boxplots representativos da distribuição de cotas em cada subambiente e tendo como fontes de informação os dados obtidos com DGPS no campo e o MDT .....	35
Figura 6.2 - Quatro cenários de subida do NMM propostos pelo IPCC. Adaptado de IPCC (2013)	38
Figura 6.3 - Subida do NMM (a) e variação da taxa anual de variação (b) para o cenário RCP2.6. Adaptado de IPCC (2013) .....	39
Figura 6.4 - Projeção da posição do NMM no cenário IPCC RCP2.6 em função do tempo com regressão linear.....	40
Figura 6.5 - Subida do NMM (a) e variação da taxa anual (b) para o cenário RCP8.5 Adaptado de IPCC (2013) .....	41
Figura 6.6 - Projeção da posição do NMM no cenário IPCC RCP 8.5 em função do tempo com ajuste a um polinómio de 2ª ordem.....	41
Figura 6.7 - Subida do NMM com observações no marégrafo de Cascais (Antunes, 2016) .....	43
Figura 6.8 - Gráfico com subida do NMM em função do tempo para os diversos cenários apresentados pela NOAA. Os valores são relativos ao ano 2000. Adaptado de NOAA (2017) .....	44
Figura 6.9 - Projeção da posição do NMM no cenário NOAA High em função do tempo com ajuste a um polinómio de 2ª ordem.....	45
Figura 6.10 - Variação do NMM em função do tempo para os quatro cenários estudados, considerando, para todos os cenários, o NMM 18 cm acima do zero altimétrico em 2016 .....	47
Figura 6.11 - (a) Variação da atividade de $^{210}\text{Pb}$ em função da profundidade; (b) variação do logaritmo natural de $^{210}\text{Pb}$ não suportado com a profundidade e reta de regressão linear .....	50
Figura 6.12 - Variação da atividade de $^{137}\text{Cs}$ em função da profundidade com a data no topo e profundidades prováveis para 1954, 1963 e 1986 .....	51
Figura 6.13 - Localização do sapal da Malha da Costa em relação à área em estudo.....	53
Figura 7.1 - Configuração atual do sapal do setor norte da Caldeira de Tróia com base no MDT e nos limites de maré.....	56
Figura 7.2 - Mapa de declives do sapal do setor norte da Caldeira de Tróia .....	57

Figura 7.3 - Comparação entre a evolução da superfície média de alto e baixo sapal e os limites de maré com base no cenário de subida do NMM IPCC RCP2.6.....	57
Figura 7.4 - Evolução do sapal da C. Tróia (N) utilizando o cenário de subida do NMM IPCC RCP2.6 .....	58
Figura 7.5 - Mapa morfológico do sapal da C. Tróia (N) em 2050, utilizando o cenário de subida do NMM IPCC RCP2.6 .....	59
Figura 7.6 - Mapa morfológico do sapal da C. Tróia (N) em 2100, utilizando o cenário de subida do NMM IPCC RCP2.6 .....	59
Figura 7.7 - Comparação entre a evolução da superfície média de alto e baixo sapal e os limites de maré com base no cenário de subida do NMM IPCC RCP8.5.....	60
Figura 7.8 - Evolução do sapal da C. Tróia (N) utilizando o cenário de subida do NMM IPCC RCP8.5 .....	61
Figura 7.9 - Mapa morfológico do sapal da C. Tróia (N) em 2050, utilizando o cenário de subida do NMM IPCC RCP8.5 .....	62
Figura 7.10 - Mapa morfológico do sapal da C. Tróia (N) em 2100, utilizando o cenário de subida do NMM IPCC RCP8.5 .....	62
Figura 7.11 - Comparação entre a evolução da superfície média de alto e baixo sapal e os limites de maré com base no cenário de subida do NMM Antunes (2016) .....	63
Figura 7.12 - Evolução do sapal da C. Tróia (N) utilizando o cenário proposto por Antunes (2016) .....	64
Figura 7.13 - Mapa morfológico do sapal da C. Tróia (N) em 2050, utilizando o cenário de subida do NMM Antunes (2016).....	65
Figura 7.14 - Mapa morfológico do sapal da C. Tróia (N) em 2100, utilizando o cenário de subida do NMM Antunes (2016).....	65
Figura 7.15 - Comparação entre a evolução da superfície média de alto e baixo sapal e os limites de maré com base no cenário de subida do NMM NOAA High (2017).....	66
Figura 7.16 - Evolução do sapal da C. Tróia (N) utilizando o cenário de subida do NMM NOAA High.....	67
Figura 7.17 - Mapa morfológico do sapal da C. Tróia (N) em 2050, utilizando o cenário de subida do NMM NOAA High .....	68
Figura 7.18 - Mapa morfológico do sapal da C. Tróia (N) em 2100, utilizando o cenário de subida do NMM NOAA High .....	68
Figura 8.1 - Distribuição espacial do sapal e raso de maré na área de estudo tendo como cobertura altimétrica um MDT com resolução de 30 m.....	73
Figura 8.2 - Distribuição espacial do sapal e raso de maré na área de estudo, tendo como limites de maré os valores disponíveis na Carta Hidrográfica da Barra e Porto de Setúbal de 2003 .....	74

Figura 8.3 - Comparação entre as taxas de sedimentação consideradas e a evolução da taxa de subida do NMM com o cenário IPCC RCP2.6 .....	75
Figura 8.4 - Comparação entre as taxas de sedimentação consideradas e a evolução da taxa de subida do NMM com o cenário IPCC RCP8.5 .....	76
Figura 8.5 - Comparação entre as taxas de sedimentação consideradas e a evolução da taxa de subida do NMM com o cenário Antunes (2016) .....	76
Figura 8.6 - Comparação entre as taxas de sedimentação consideradas e a evolução da subida do NMM com o cenário NOAA High .....	76
Figura 8.7 - Variação de cada subambiente entre 2016 e 2100, considerando o cenário de subida do NMM IPCC RCP2.6 .....	78
Figura 8.8 - Evolução da área total de sapal para os cenários IPCC RCP8.5, Antunes (2016) e NOAA High .....	79
Figura 8.9 - Evolução dos Rácio AS/BS para os cenários IPCC RCP8.5, Antunes (2016) e NOAA High .....	79
Figura 8.10 - Variação de cada subambiente entre 2016 e 2050, considerando o cenário de subida do NMM IPCC RCP8.5 .....	80
Figura 8.11 - Variação de cada subambiente entre 2016 e 2050, considerando o cenário de subida do NMM Antunes (2016) .....	80
Figura 8.12 - Variação de cada subambiente entre 2016 e 2050, considerando o cenário de subida do NMM NOAA High .....	81
Figura 8.13 - Variação de cada subambiente entre 2016 e 2100, considerando o cenário de subida do NMM IPCC RCP8.5 .....	82
Figura 8.14 - Variação de cada subambiente entre 2016 e 2100, considerando o cenário de subida do NMM Antunes (2016) .....	82
Figura 8.15 - Variação de cada subambiente entre 2016 e 2100, considerando o cenário de subida do NMM NOAA High .....	83

---

# ÍNDICE DE TABELAS

---

Tabela 3.1 - Legenda da união das Cartas Geológicas 38-B e 39-A na escala 1:50 000 (Figura 3.6)	15
Tabela 4.1 – Parâmetros espaciais das sondagens recolhidas no sapal em estudo	22
Tabela 5.1 - Resumo da organização do script matlab para a execução do modelo	30
Tabela 6.1 - Relação entre níveis de maré e a distribuição de cotas do MDT	37
Tabela 6.2 - Compilação de taxas de subida do NMM para 2016 e aceleração para os quatro cenários estudados	47
Tabela 6.3 - Taxas de sedimentação com base nos picos de atividade nuclear identificados na projeção da atividade do isótopo $^{137}\text{Cs}$ em função da profundidade	52
Tabela 6.4 - Taxas de sedimentação consideradas para cada subambiente da Caldeira de Tróia	53
Tabela 8.1 - Cotas de maré disponíveis na Carta Hidrográfica da Barra e Porto de Setúbal (2003). O valor de PMMed corresponde à média entre o PMAV e PMAM e não está disponível nesta carta	74



---

# ÍNDICE DE ANEXOS

---

Anexo 1 - MDT do setor norte da Caldeira de Tróia e área envolvente (DGT-APA) .....	89
Anexo 2 - Parâmetros estatísticos da distribuição de cotas do MDT e de pontos registados com o DGPS.....	89
Anexo 3 - Localização do marégrafo de Tróia em relação à área de estudo (assinalada no quadrado vermelho) .....	90
Anexo 4 – Subida do NMM proposto para cada cenário do IPCC. Valores em relação ao NMM médio entre 1986 e 2005 (IPCC, 2013).....	90
Anexo 5 – Subida do NMM proposto para cada cenário NOAA. Valores em relação ao NMM em 2000 (NOAA, 2017).....	90
Anexo 6 - Variação da atividade dos isótopos $^{137}\text{Cs}$ e $^{210}\text{Pb}$ em função da profundidade na sondagem CTBS1 .....	91
Anexo 7 - Áreas e variações de áreas de sapal até 2100, utilizando o cenário IPCC RCP2.6 .....	91
Anexo 8 - Áreas e variações de áreas de sapal até 2100, utilizando o cenário IPCC RCP8.5 .....	92
Anexo 9 - Áreas e variações de áreas de sapal até 2100, utilizando o cenário Antunes (2016).....	92
Anexo 10 - Áreas e variações de áreas de sapal até 2100, utilizando o cenário NOAA High .....	92



---

# LISTA DE ABREVIATURAS

---

- BP** – *Before present*;
- CAOP** – Carta Administrativa Oficial de Portugal;
- DGPS** – *Diferencial Global Positioning System*;
- GPR** – *Ground Penetrating Radar*;
- IPCC** – *Intergovernmental Panel on Climate Change*;
- LiDAR** – *Light Detection and Ranging*;
- MDT** – Modelo digital de terreno;
- NMM** – *Nível médio do mar*;
- NOAA** – *National Oceanic and Atmospheric Administration*;
- NUTS** – *Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos*;
- OSL** – *Optically Stimulated Luminescence*;
- PMMed** – *Preia-mar médio*;
- PMAM** – *Preia-mar de águas mortas*;
- PMAV** – *Preia-mar de águas vivas*;
- RCP** – *Representative Concentration Pathway*;
- RTK** – *Real Time Kinematic*;
- UNEP** – *United Nations Environmental Programme*;
- WMO** – *World Meteorological Organization*.



---

# 1. INTRODUÇÃO

---

## 1.1. Nota introdutória

Esta dissertação foi realizada no âmbito do mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e surgiu da união de dois interesses: a geologia costeira e a modelação.

As zonas húmidas e em particular os sapais são ambientes de grande importância ecológica, quer pela elevada biodiversidade que englobam, quer por serem a primeira proteção da linha de costa em ambientes estuarinos. Para além disso, os sapais são também ambientes filtradores da água no estuário, contribuindo positivamente para o aumento da sua qualidade.

A estabilidade destas áreas não está assegurada no futuro e é importante compreender como podem estes ambientes reagir a um fenómeno que tem despertado o interesse da comunidade científica e geral: a subida do nível médio do mar (NMM). Esta consequência das alterações climáticas poderá impactar estes ecossistemas, destruindo habitats e eliminando a barreira que eles representam.

Diversos autores e entidades têm proposto cenários de subida do NMM e as previsões são consideravelmente dispare, quer pela metodologia que lhes serve de base quer pelo propósito para que foram apresentados. Esta disparidade terá consequências diferenciadas nos sapais, algo que deve ser examinado, de modo a compreender a influência que a subida do nível do mar terá nestes ambientes.

## 1.2. Objetivo

O objetivo fundamental desta dissertação é compreender como poderá o sapal do setor norte da Caldeira de Tróia evoluir num contexto de subida do NMM até ao final do século XXI. Para a concretização deste objetivo, foram definidas diversas etapas de trabalho:

1. Determinar taxas de sedimentação no sapal da área em estudo;
2. Compreender a influência que diferentes cenários de subida do NMM podem ter na evolução desta área de sapal;
3. Construir um modelo para avaliar a evolução morfológica do sapal em contexto de subida do NMM;
4. Compreender de que modo a ocupação antrópica pode limitar a existência do sapal no futuro.

### 1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em onze capítulos que contêm quatro tipos de informação: introduções, metodologias, resultados com respetiva discussão e conclusões. Explicar esta estrutura torna-se especialmente relevante pelo facto de a dissertação não seguir uma organização típica.

No capítulo 1 é realizada uma introdução, quer à dissertação e à sua estrutura, quer ao tema em estudo. O capítulo 2 corresponde à explicação de diversos conceitos pertinentes para o estudo realizado e o capítulo 3 enquadra a área de estudo geográfica e geologicamente.

O capítulo 4 apresenta as metodologias utilizadas para a realização deste trabalho e engloba metodologias de campo, laboratório e gabinete. Neste capítulo refere-se como foram realizados os levantamentos topográficos, a recolha de sondagens e a análise laboratorial das mesmas. Para além disso, é também introduzido o conceito de Rácio AS/BS, parâmetro obtido a partir da classificação de sapais quanto à maturidade proposta por Davis Jr e Fitzgerald (2004).

O capítulo 5 apresenta a principal metodologia utilizada para a obtenção dos resultados: o modelo morfológico do sapal. Apesar de se tratar de uma metodologia, esta foi elaborada no âmbito desta dissertação e deve, por isso, ser encarada também como um resultado.

Este modelo necessita de uma série de parâmetros que estão expressos no capítulo 6, parte dos quais obtidos a partir da bibliografia. As cotas de transição propostas para os subambientes do sapal e uma das taxas de sedimentação utilizadas foram obtidas no decorrer deste trabalho, enquanto os cenários de subida do NMM e o modelo digital de terreno (MDT) têm suporte bibliográfico, embora tivessem de ser amplamente adaptados ao modelo proposto no capítulo 5.

O capítulo 7 é aquele que o leitor mais facilmente interpretará como resultados. Este capítulo apresenta a evolução do sapal da Caldeira de Tróia ao longo do tempo. Inclui uma abordagem através da comparação das cotas médias de alto e baixo sapal com as cotas de maré e os resultados da execução do modelo desenvolvido no capítulo 5, tendo em consideração os parâmetros elaborados no capítulo 6 – estes resultados são apresentados na forma de gráficos com informação decenal e de mapas relativos às duas datas de referência consideradas: 2050 e 2100.

No capítulo 8 são discutidos os resultados obtidos ao longo dos capítulos anteriores relativos à construção do modelo, aos dados de entrada e à evolução do sapal do setor norte da Caldeira de Tróia, incluindo um conjunto de mapas que mostram a variação da área de cada subambiente para as datas consideradas. O capítulo 9 apresenta as conclusões obtidas durante a realização desta dissertação.

Por fim, os capítulos 10 e 11 são relativos às referências bibliográficas e anexos.

## 1.4. Problemática a nível global

A distribuição das áreas de sapal pelo globo pode ser dividida em nove regiões, tendo como base as comunidades de espécies de flora (Davis Jr e Fitzgerald, 2004):

1. Elevadas latitudes norte na região ártica, que inclui a Gronelândia, Islândia e as porções norte da Rússia, América do Norte e Escandinávia;
2. Costa norte da Europa, incluindo o Reino Unido;
3. Costa mediterrânea da Europa;
4. Costa atlântica dos Estados Unidos da América e do Canadá;
5. Costa este e sul da América do Sul;
6. Costa pacífica da América, que inclui o continente norte-americano e sul-americano;
7. Austrália e Nova Zelândia;
8. Costa este da Ásia, incluindo o Japão;
9. Flórida e Baixa Califórnia.

Em destaque nesta lista está a existência dos sapais de maiores dimensões na costa Atlântica dos Estados Unidos da América e do Canadá (4). A última região proposta (9) tem a particularidade de estar inserida em latitudes pouco compatíveis com este tipo de ambientes, sendo nestas situações o ambiente mais comum os mangais. Apesar de não ser referido por estes autores, também é possível encontrar sapais em algumas zonas costeiras do continente africano, destacando-se os sapais do estuário de Knysna, na África do Sul (<http://www.hopespotknysna.co.za/about-knysna-s-hope-spot/salt-marshes.html>, acessado a 19 de maio de 2017). A Figura 1.1 mostra a distribuição das áreas de sapal em 2015.



*Figura 1.1 - Distribuição das áreas de sapal pelo globo (UNEP-WCMC, 2015)*

Em 2009 foi apresentada uma estimativa que aponta para uma erosão das áreas de sapal de 25 % a nível mundial entre 1940 e 2009 - Figura 1.2 (UNEP-WCMC, 2009).



Figura 1.2 - Mapa com distribuição das áreas de sapal afetadas desde 1940 (adaptado de UNEP-WCMC, 2009)

Mc Fadden *et al.* (2007) estimam que 33 % a 44 % das áreas de sapal possam desaparecer por efeitos de erosão até 2080, como consequência de uma subida do NMM variável entre 36 e 72 cm até à mesma data.

---

## 2. CONCEITOS

---

### 2.1. Sapal e raso de maré

Os dois ambientes em destaque neste relatório são os rasos de maré e os sapais, que se encontram tipicamente relacionados. Ambos são ambientes intertidais e podem ser distinguidos pela granulometria do sedimento, pelas cotas a que se encontram e pela vegetação que os coloniza. Na Figura 2.1 está representado um esquema com estas duas áreas.

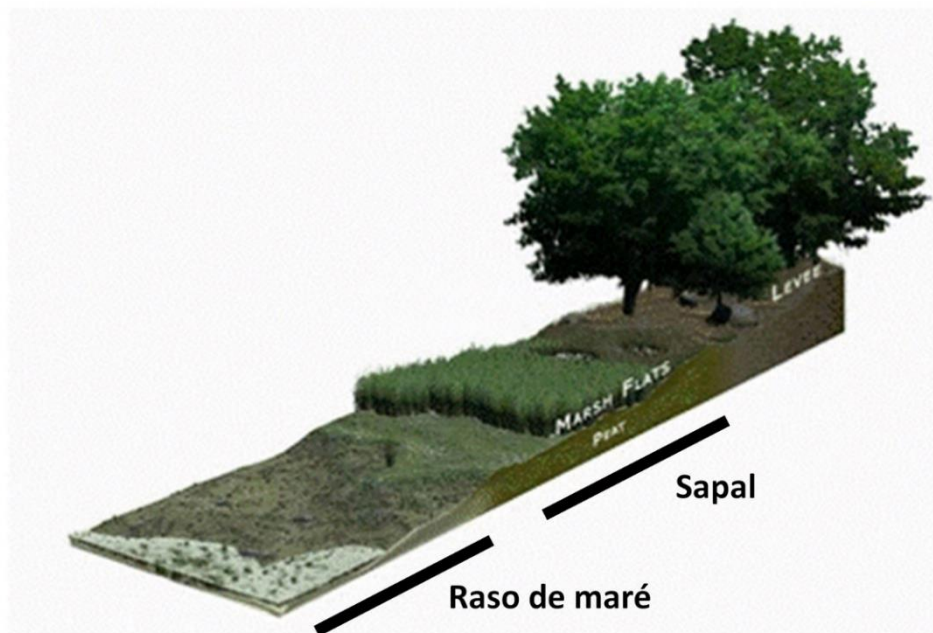


Figura 2.1 - Esquema representativo das áreas de raso de maré e sapal  
Figura adaptada de [http://oceanservice.noaa.gov/education/kits/estuaries/media/supp\\_estuar06a\\_saltmarsh.html](http://oceanservice.noaa.gov/education/kits/estuaries/media/supp_estuar06a_saltmarsh.html)  
(acedido a 17 de abril de 2017)

#### 2.1.1. Raso de Maré

Rasos de maré são ambientes intertidais (expostos em baixa-mar) não vegetados e que podem ser descritos como ambientes sedimentares de acumulação. Localizam-se em margens de baías, estuários, lagunas, barreiras e deltas, podendo também ser encontrados em litoral oceânico quando estes estão associados a baixa energia e expostos a uma fraca energia das ondas, formando terraços de baixa-mar (ex.: China, Coreia, Malásia).

São superfícies planas com um baixo gradiente para o mar e têm como principal fator forçador a maré, ainda que a ondulação possa ter importância em certas situações. Efetivamente, a subida e descida do plano de água por efeito da variação da maré faz com que uma massa de água seja forçada a entrar no estuário durante a enchente e a sair durante a vazante, formando correntes que podem ir desde alguns centímetros até um metro por segundo (Davis Jr e Fitzgerald, 2004).

A extensão destas superfícies depende da amplitude de maré, da morfologia do local e da disponibilidade sedimentar. Quanto maior for a amplitude de maré, maior deverá ser a extensão do raso, atingindo o seu máximo em condições macrotidais. Por outro lado, um gradiente baixo poderá também significar uma maior extensão, sendo esta relação direta válida também para a disponibilidade sedimentar, que está associada a uma extensão maior para uma disponibilidade maior de sedimento.

Quanto à granulometria, podem ser distinguidos dois tipos de raso de maré: raso vasoso e raso arenoso – ainda que o mais comum seja uma condição intermédia entre os dois tipos (Woodroffe, 2003). De um modo geral, o que se observa é que os sedimentos têm uma granulometria decrescente à medida que se avança para terra, resultando num padrão regular que varia paralelamente à linha de costa e que se inicia com um raso arenoso no extremo distal e termina com um raso vasoso no extremo proximal em relação à linha de costa (Davis Jr e Fitzgerald, 2004). Para além de areias e vasas, a presença de bioclastos num raso de maré é muito frequente. A matéria orgânica, que aumenta o seu teor com a proximidade ao sapal, constitui um contributo positivo para a posterior colonização por vegetação.

A distribuição granulométrica anteriormente referida deve-se à diminuição da energia de transporte com a maior proximidade à linha de costa, resultando num transporte de sedimentos essencialmente finos nas zonas de menor energia. Para além disso, a inundação do extremo proximal à linha de costa tem tendência a ser menos duradoura.

As fontes sedimentares podem ser fluviais, marinhas, erosão de arribas ou ressuspensão de sedimentos do próprio sistema. O raso de maré sofre acreção vertical até à cota do *preia-mar* de águas mortas (PMAM) local, cota a partir da qual tende a ser colonizado por vegetação, formando assim áreas de sapal (Allen, 2000).

A superfície que compõe um raso de maré encontra-se cortada por uma série de canais meandriformes, cuja distribuição se assemelha à de uma rede fluvial, com a particularidade do movimento de água no canal ocorrer em dois sentidos: para terra durante a enchente, para o mar durante a vazante. A Figura 2.2 ilustra, esquematicamente, a organização deste ambiente, com a variação do raso de maré arenoso para o raso vasoso.

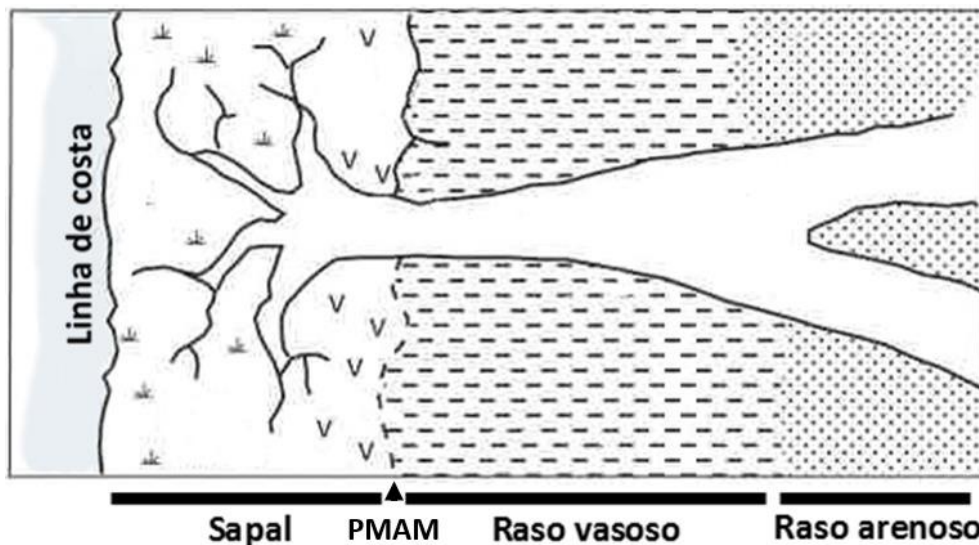


Figura 2.2 - Organização do sistema raso de maré (com raso arenoso e vasoso) e sapal intercetados por uma rede de canais (adaptado de Woodroffe, 2003)

### 2.1.2. Sapal

Um sapal é um ambiente intertidal superior composto normalmente por substrato vasoso (silte e argila) e que se encontra colonizado por plantas tolerantes a valores de salinidade típicos de água salobra e salgada – o substrato que compõe este ambiente é um indicador da sua afinidade com os rasos de maré vasosos (Allen, 2000). Nestes ambientes, podem considerar-se duas zonas: alto sapal e baixo sapal (Figura 2.3). O limite entre elas é normalmente estabelecido com base na vegetação e relacionado com os limites da maré. A superfície de um sapal tende a ser plana, horizontal e encontra-se cortada por uma série de canais que, tipicamente, são herdados do raso de maré.

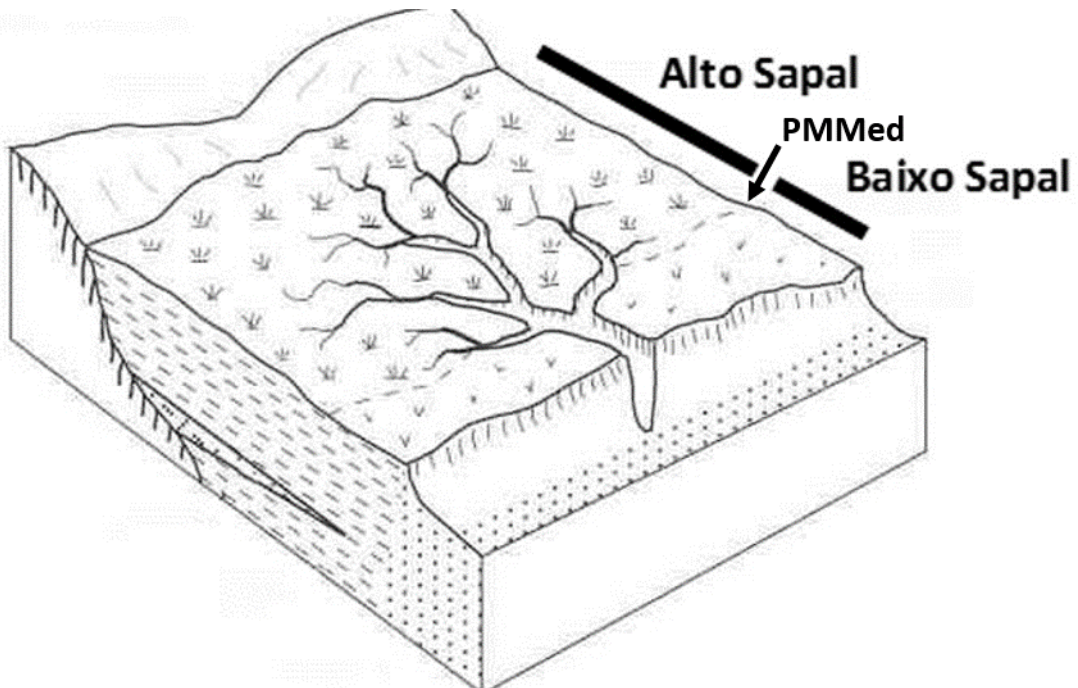


Figura 2.3 - Bloco 3D com estrutura do baixo e alto sapal cortado por canais (adaptado de Woodroffe, 2003)

Sapais são áreas com vegetação típica, existindo alguns géneros dominantes. Segundo o Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), a flora típica do alto sapal no estuário do Sado é composta por *Halimione portucalooides*, *Salicornia ramosissima* e *Suaeda maritima* (<http://www.icnf.pt/portal/ap/r-nat/rnes/flora>, acessado a 17 de abril de 2017) - Figura 2.4. Apesar de não ser referido por esta entidade, no baixo sapal é encontrada vegetação do género *Spartina* (Figura 2.5), como se pode confirmar no campo.

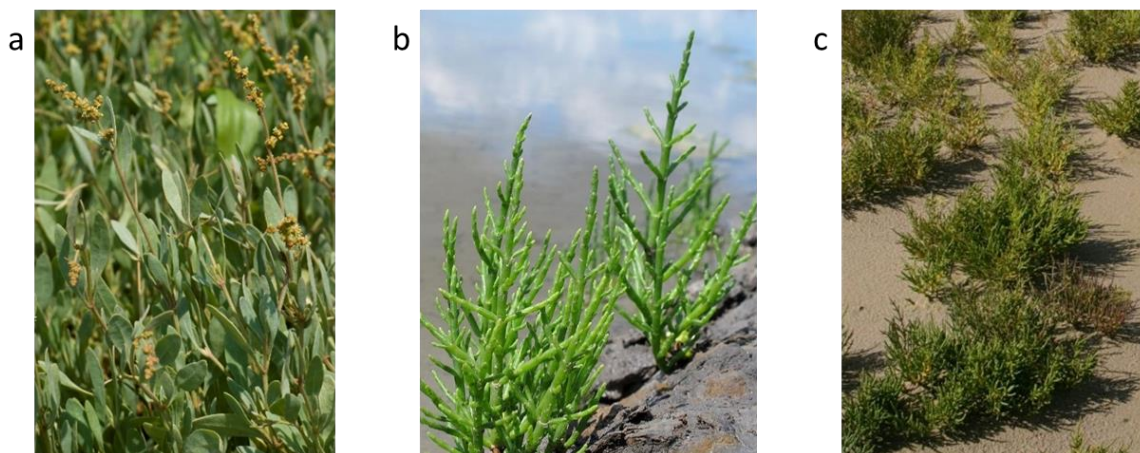


Figura 2.4 – Vegetação típica de sapal (espécies dominantes) de acordo com o ICNF:  
 (a) *Halimione portulacoides* ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Halimione\\_portulacoides\\_baie-authie\\_80\\_13072007\\_4.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Halimione_portulacoides_baie-authie_80_13072007_4.jpg), acedido a 17 de abril de 2017),  
 (b) *Salicornia ramosissima* ([http://almargem.org/biodiv/wp-content/uploads/2013/08/Salicornia\\_ramosissima\\_LLopes-2.jpg](http://almargem.org/biodiv/wp-content/uploads/2013/08/Salicornia_ramosissima_LLopes-2.jpg), acedido a 17 de abril de 2017)  
 (c) *Suaeda maritima* ([http://www.deiningindedelta.nl/flora\\_en\\_fauna/bibliotheek/](http://www.deiningindedelta.nl/flora_en_fauna/bibliotheek/), acedido a 17 de abril de 2017)



Figura 2.5 – Vegetação típica de sapal (espécie dominante): *Spartina maritima* ([http://flora-on.pt/Spartina-maritima\\_ori\\_7fTp.jpg](http://flora-on.pt/Spartina-maritima_ori_7fTp.jpg), acedido a 22 de maio de 2017)

A vegetação e os limites de maré local estão relacionados, pois a presença de determinadas espécies de flora é condicionada pelo tempo de submersão que o nível de maré pode proporcionar.

Assim, para cotas no terreno inferiores à cota do PMAM, o tempo de submersão é demasiado elevado para permitir a manutenção de vegetação, sendo este o limite superior do raso de maré. Os níveis de maré compatíveis com vegetação característica de baixo sapal são o PMAM (inferior) e o *preia-mar* médio (PMMed) (superior). Por fim, a vegetação característica de alto sapal tem como limite inferior o *preia-mar* médio e como limite superior o *preia-mar* de águas vivas (PMAV).

Existem uma série de fatores que podem influenciar a morfodinâmica destas áreas húmidas, destacando-se a exposição à ação das ondas, o regime de maré, a taxa de subida do NMM, a topografia da costa, a disponibilidade sedimentar e a natureza do substrato (Davis Jr e Fitzgerald, 2004).

Um sapal pode ainda ser classificado quando à sua maturidade, de acordo com a Figura 2.6. Podem ocorrer três situações distintas: quanto a extensão de alto sapal é superior à de baixo sapal, classifica-se como maturo; quando a extensão de alto sapal e de baixo sapal são equivalentes, classifica-se como

intermédio; quando a extensão de alto sapal é consideravelmente inferior à extensão de baixo sapal, classifica-se como jovem (Davis Jr e Fitzgerald, 2004). Assim, com o passar do tempo, a tendência é que um sapal se torne mais maturo, pois o seu crescimento vertical está limitado pela maré, o que resulta num aumento da área ocupada pelo alto sapal em comparação com o baixo sapal.

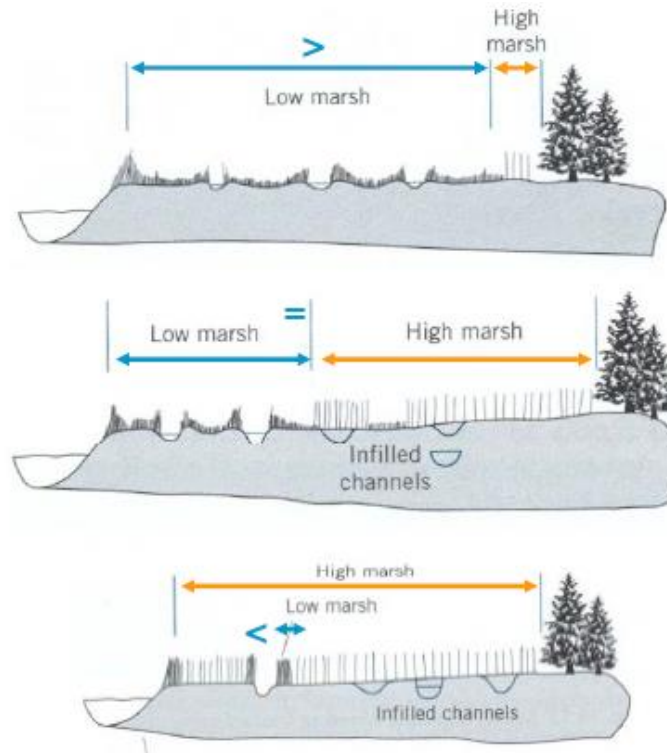


Figura 2.6 - Esquema representativo dos três tipos de sapais consoante o grau de maturidade. A imagem acima corresponde a um sapal jovem; a imagem ao centro corresponde a um sapal intermédio; a imagem abaixo corresponde a um sapal maturo (Davis Jr e Fitzgerald, 2004)

O fornecimento sedimentar destes ambientes é, na sua maioria, idêntico aos dos rasos de maré. No entanto, para além dos sedimentos de origem mineral, existe uma componente orgânica que contribui para a acreção dos sapais, proveniente, essencialmente, da vegetação que coloniza o próprio sapal – esta fonte sedimentar pode ter um contributo muito variável, ainda que normalmente seja consideravelmente inferior ao fornecimento mineral (Allen, 2000).

## 2.2. Sedimentação nos sapais e rasos de maré

Para compreender a evolução que um sapal pode ter no futuro, importa compreender quais os fatores que o influenciam. Os fatores abordados ao longo desta dissertação serão o regime de marés, a subida do NMM e as taxas de sedimentação.

Seguindo a lógica de sedimentação dos rasos de maré, em que a granulometria tende a diminuir do mar para terra, o que se observa é que às áreas de sapal já só chegam sedimentos vasosos (siltes e argilas), sendo estes transportados, na sua maioria, através dos canais de maré herdados dos rasos de maré – resultando em taxas de sedimentação mais elevadas nas proximidades desses canais.

A presença de vegetação é uma das diferenças dos sapais em relação aos rasos de maré. Como noutros sistemas costeiros, a vegetação funciona como uma armadilha, ajudando a reter sedimento. Ainda assim, face aos rasos de maré, os sapais têm a particularidade de terem um tempo e frequência de submersão inferior, sendo este o principal motivo para que a taxa de crescimento destes ambientes seja inferior à dos rasos de maré.

Os sapais são definidos como zonas de acreção, ou seja, os episódios erosivos podem existir, mas normalmente não se manifestam de forma laminar e horizontal. A erosão típica das áreas de sapal ocorre através do recuo da escarpa que separa o alto e o baixo sapal ou o sapal e o raso de maré – resultando numa diminuição da sua área.

Outro fenómeno de elevada importância para o estudo da sedimentação nos sapais prende-se com a frequente existência de bioturbação provocada por animais e plantas, o que resulta numa alteração da sedimentação horizontal e laminar que é assumida em situações normais.

---

# 3. ENQUADRAMENTOS

---

## 3.1. Enquadramento geográfico

### 3.1.1. O rio Sado e a sua bacia hidrográfica

O rio Sado é um rio português que nasce na serra da Vigia a 230 m de altitude, no distrito de Beja, concelho de Odemira e percorre 180 km com um sentido geral de sul para norte até chegar à foz, onde se encontra o estuário do Sado. Como mais de metade do seu percurso se efetua a uma cota inferior a 50 m, é considerado um rio planície e a sua bacia hidrográfica é a maior integralmente em território português, com uma área de 7 692 km<sup>2</sup> e 828 linhas de água (Bettencourt *et al.*, 2003). A Figura 3.1 mostra a localização da nascente do rio Sado (ponto verde), bem como a sua bacia hidrográfica e a de todas as ribeiras que drenam para o estuário do Sado (ex. Comporta e Marateca) (a azul).

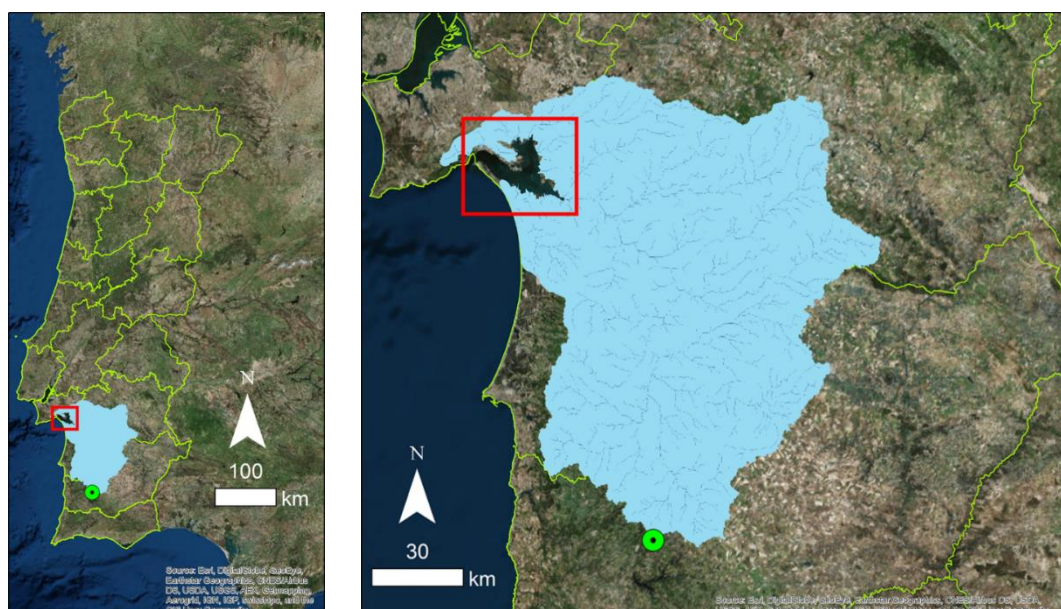


Figura 3.1 - Localização e morfologia da bacia hidrográfica do rio Sado e das ribeiras que drenam diretamente para o estuário do Sado. O ponto a verde marca a nascente do rio Sado e o quadrado a vermelho enquadra o estuário do Sado

### 3.1.2. O estuário do Sado

A Figura 3.1 mostra a localização do estuário do Sado relativamente à bacia hidrográfica do rio Sado. Na Figura 3.2 é possível observar os limites do concelho abrangidos pelo estuário do Sado, todos pertencentes ao distrito de Setúbal. Os concelhos onde o estuário tem representatividade são Setúbal e Palmela, a norte, Alcácer do Sal, a este e sul e Grândola, a oeste, representado pela restinga de Tróia. Esta restinga é uma formação arenosa enraizada junto à povoação do Carvalhal e que se estende, com uma orientação NW-SE, ao longo de 25 km. A norte da restinga e a sul da cidade de Setúbal encontra-se a embocadura do estuário com aproximadamente 2 km de largura.

Este é o segundo maior estuário português com uma área submersa de aproximadamente 200 km<sup>2</sup>.

De acordo com a Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS) definidas pelo Decreto-Lei n.º 46/89 o estuário do Sado encontra-se no nível III e abrange as subunidades da Península de Setúbal, a norte, e Alentejo Litoral, a sul.

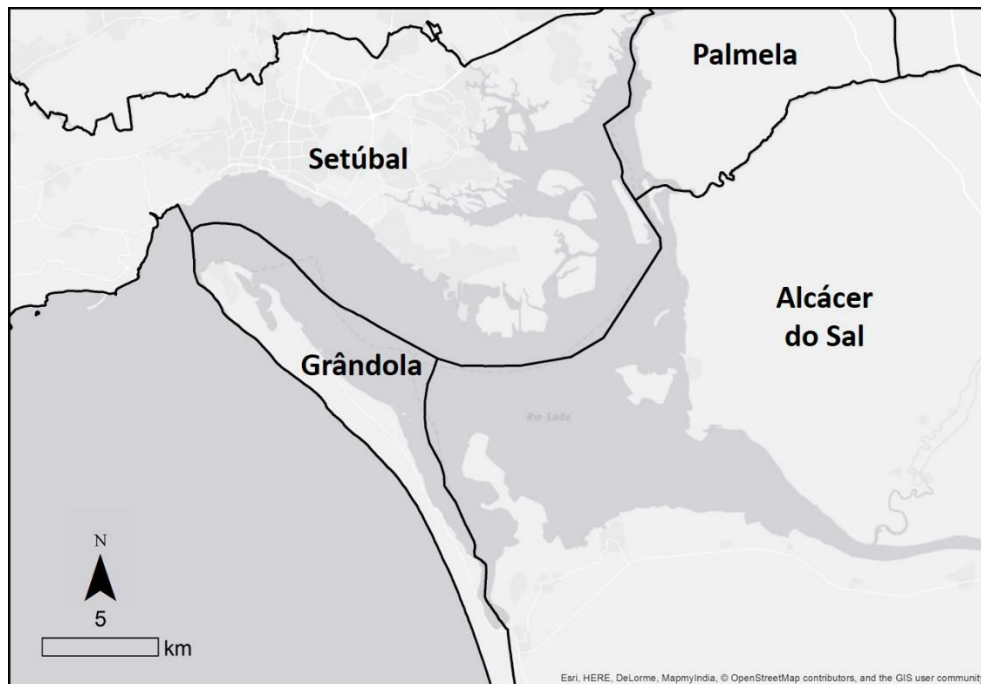


Figura 3.2 – Representação dos limites dos concelhos em contacto com o Estuário do Sado

### 3.1.2.1. Limites do estuário

Uma área de estuário tem, naturalmente, um limite montante a partir do qual se está em domínio fluvial e um limite jusante que faz a ligação ao oceano. Estabelecer estes limites nem sempre é simples e a sua marcação depende muito do critério adotado.

Seguidamente serão abordadas as metodologias para definir estes limites:

- a. Limite montante: intrusão salina; maré dinâmica.
- b. Limite jusante: Carta Administrativa Oficial Portuguesa (CAOP) (Aviso n.º 10080/2016, de 16 de agosto); frente do delta submarino.

O limite montante pode ser definido com base em parâmetros oceanográficos ou biológicos (por exemplo, a fauna característica das margens do estuário). Os mais utilizados no contexto de trabalhos semelhantes a este são:

- a. Limite de maré dinâmica: limite para montante até onde se observam variações de cota do plano de água por efeito de maré;
- b. Limite de intrusão salina: limite para montante até onde se observa variação da salinidade por influência da água do oceano.

Para definir estes limites, Bettencourt *et al.* (2003) consideraram um caudal na ordem de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  e uma onda de maré com cerca de 3 m de amplitude em Tróia, resultando num limite de intrusão salina situado 8 km a montante de Alcácer do Sal. O limite da maré dinâmica foi definido 7 km a montante do anterior.

O limite jusante pode ser definido pelo limite da CAOP de 2015 ou pela linha da frente do delta submarino do estuário do Sado. Este limite foi proposto por Moreira (1995) e baseou-se na observação de imagens de satélite.

A Figura 3.3 representa o estuário do Sado com todos os limites montante e jusante considerados nesta dissertação.

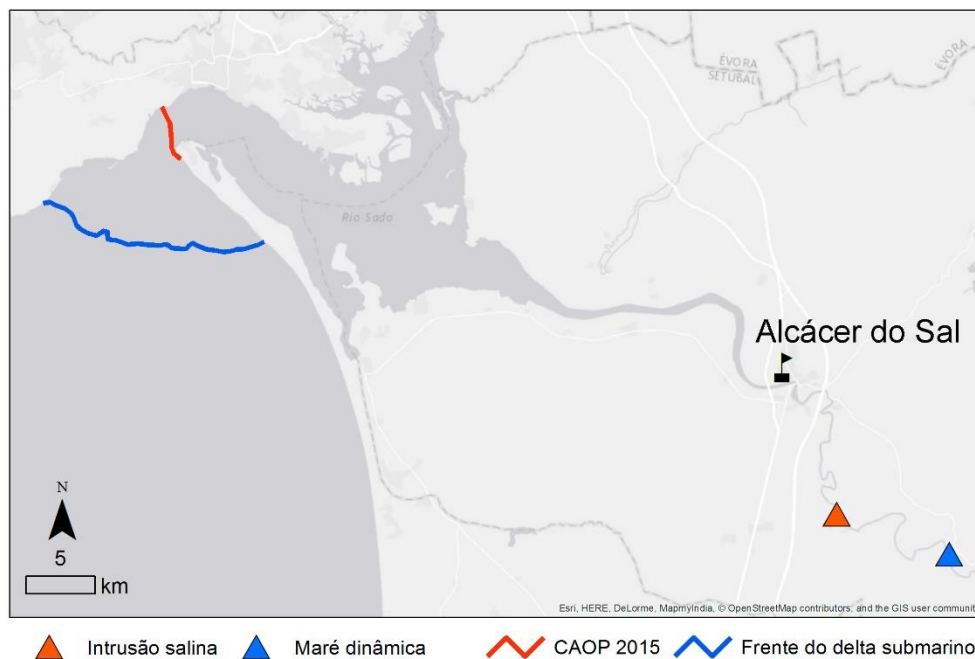


Figura 3.3 - Representação do estuário do Sado com todos os limites montante e jusante considerados

### 3.1.3. A Caldeira de Tróia

Por impossibilidade de estudar todos os sapais do estuário do Sado, surgiu a necessidade de encontrar uma área de menores dimensões, onde fosse possível realizar um estudo de evolução morfodinâmica em tempo útil.

Após a realização de uma primeira saída de campo aos sapais do estuário, escolheu-se a “Caldeira de Tróia”, em particular o setor norte, que pode ser observado na Figura 3.4 e na Figura 3.5. A Caldeira de Tróia fica situada na extremidade livre da restinga de Tróia. De formato oval, é composta por áreas de alto sapal, baixo sapal e raso de maré. Tem ainda como vantagem o fácil acesso e o facto de ser uma área que se encontra pouco modificada antropicamente.

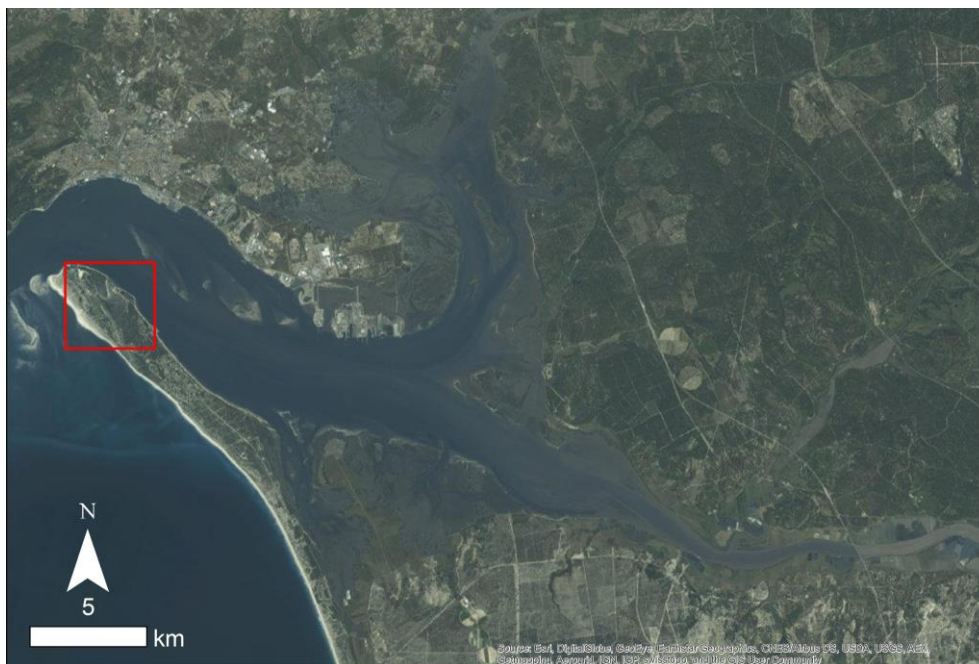


Figura 3.4 - Enquadramento da Caldeira de Tróia no Estuário do Sado (a vermelho)

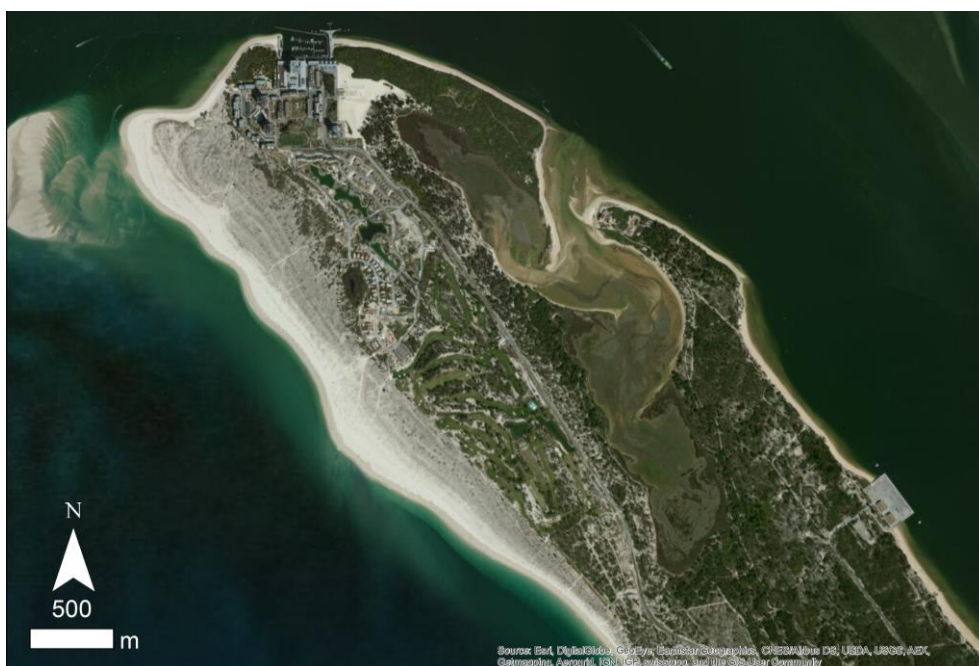


Figura 3.5 - Imagem de satélite da Caldeira de Tróia (Fonte: Microsoft; Data: 18/03/2011)

## 3.2. Enquadramento Geológico

A Figura 3.6 (legenda na Tabela 3.1) corresponde à união das Cartas Geológicas de Portugal de Setúbal (38-B) e de Águas de Moura (39-A) – Manuppella *et al.* (1999) e Zbyszewski *et al.* (1976), respetivamente. Nela se representam as formações geológicas aflorantes na região envolvente do estuário do Sado.

Os sedimentos holocénicos ocorrem na maior parte das margens:

1. Aluviões (a), ao longo dos principais cursos de água, constituídos por sedimentos fluvio-marinhos predominantemente arenosos e com espessura variável. A ocorrência destes sedimentos nas margens do estuário do Sado corresponde às zonas de instalação de sapais;
2. Dunas (d), que se desenvolvem ao longo da península de Tróia;
3. Areias de dunas (Ad), que ocorrem essencialmente na margem sul do estuário do Sado.

Afloram ainda antigos terraços Plistocénicos (Q), que se observam em retalhos de pequena extensão juntos dos principais rios e ribeiras.

Na maior parte da área aflora substrato Pliocénico e Miocénico. De idade pliocénica, ocorrem:

1. Formações vermelhas de Gamita e Vale Grou (P'), constituídas por areias e arenitos argilosos com seixos na parte superior e por argilas e arenitos argilosos vermelhos ou acastanhados na parte inferior;
2. Complexo arenito-argiloso de Aljeruz e do Monte do Pinheiro (P), constituído por areias, arenitos e argilas cinzentas ou esverdeadas.

De idade miocénica ocorrem:

1. Formação areno-argilosa de Marateca (MP) constituída, de um modo geral, por areias ricas em feldspato, medianamente grosseiras, intercaladas com níveis argilosos esverdeados e ricos em montmorilonites;
2. Formação marinha de Marateca, Palma e Alcácer do Sal (M) constituída por conglomerados com seixos bem rolados na base, areias muito finas amareladas, argilas acinzentadas ou esverdeadas e níveis carbonatados frequentemente em relevo na topografia.

Tabela 3.1 - Legenda da união das Cartas Geológicas 38-B e 39-A na escala 1:50 000 (Figura 3.6)

<b>a</b>	Aluviões	<b>HOLOCÉNICO</b>
<b>d, Ad</b>	Dunas e areias de dunas	
<b>Q</b>	Areias e cascalheiras de antigos terraços	<b>PLISTOCÉNICO</b>
<b>P'</b>	Formações vermelhas da Gamita e Vale Grou	<b>PLIOCÉNICO</b>
<b>P</b>	Complexo arenito-argiloso de Aljeruz e do Monte do Pinheiro	
<b>MP</b>	Formação areno-argilosa de Marateca	<b>MIOCÉNICO</b>
<b>M</b>	Formação marinha de Marateca, Palma e Alcácer do Sal	

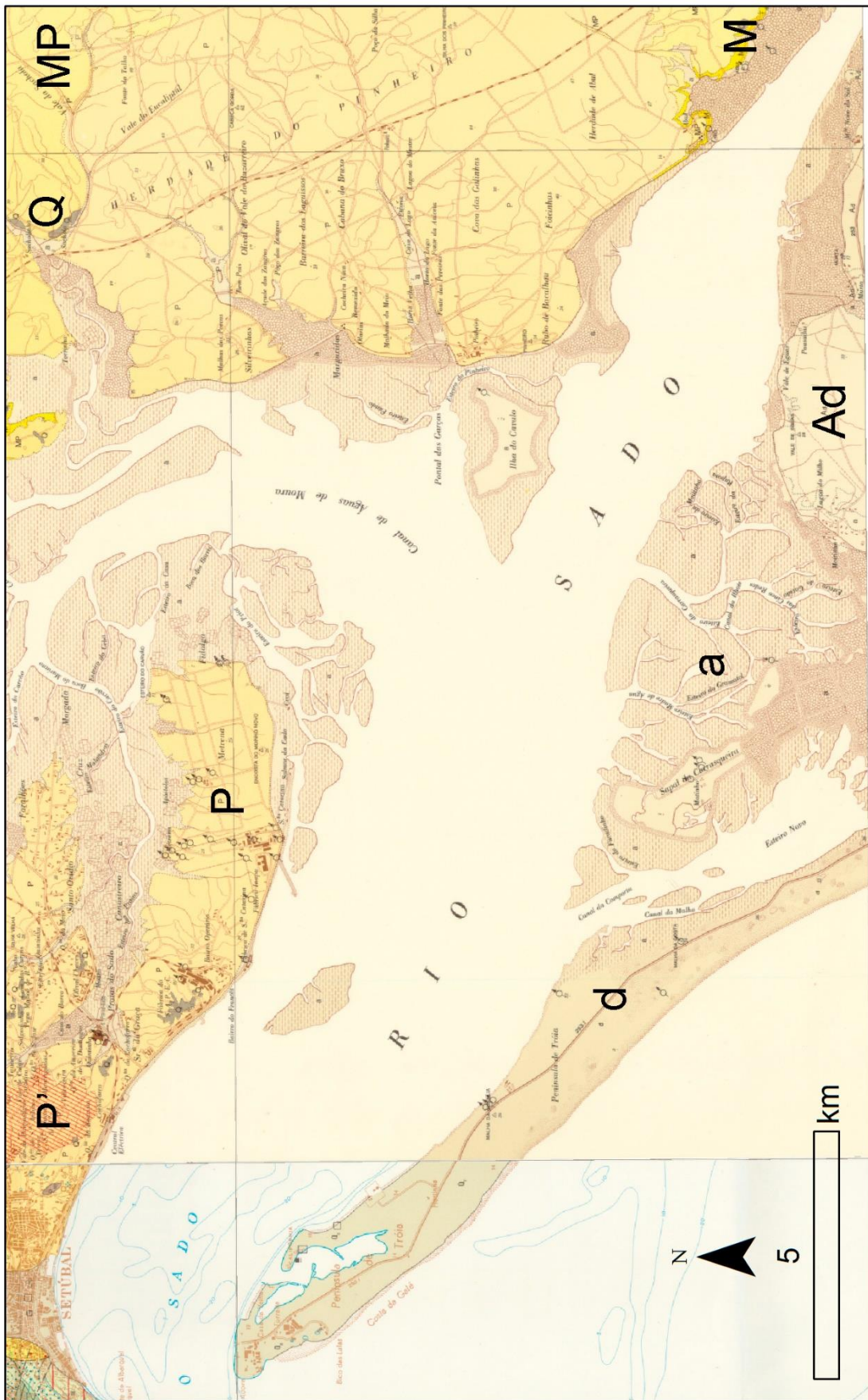


Figura 3.6 - União das cartas Geológicas 38-B e 39-A na escala 1:50 000

### 3.2.1. Evolução do estuário do Sado

Segundo Freitas e Andrade (2008), o estuário do Sado teve origem há cerca de 18 000 anos BP (*before present*) com uma configuração distinta da atual, coincidindo com o fim da última glaciação – teria, por esta altura, a ribeira da Comporta a desaguar diretamente para o oceano Atlântico (Figura 3.7).

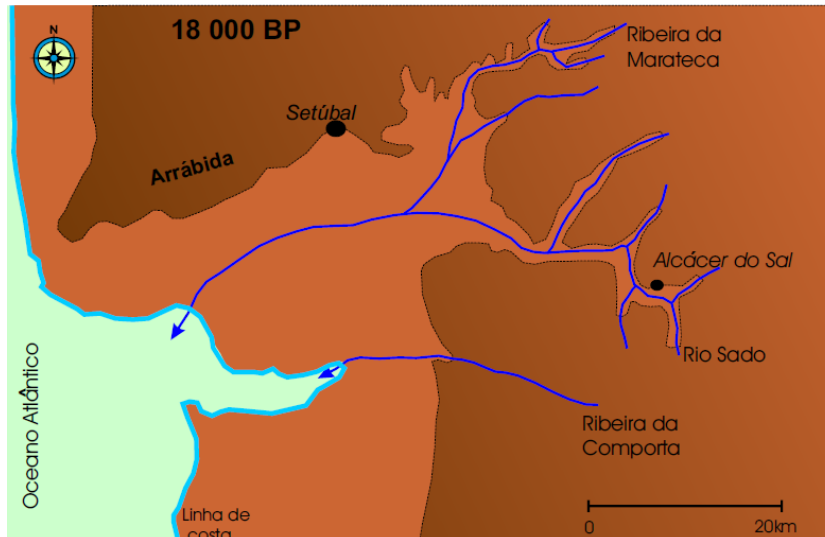


Figura 3.7 - Imagem ilustrativa da área do estuário do Sado há 18.000 anos BP (Freitas e Andrade, 2008)

Uma segunda fase da evolução do estuário terá sido iniciada com desaceleração da taxa de subida do NMM no Holocénico médio, com valores na ordem de 2 mm/ano até 2 600 anos BP e 0.43 mm/ano posteriormente. Estabeleceram-se condições para o crescimento de uma restinga arenosa de extensão limitada (Península de Tróia), forçando a ribeira da Comporta a fletir para norte (Figura 3.8).

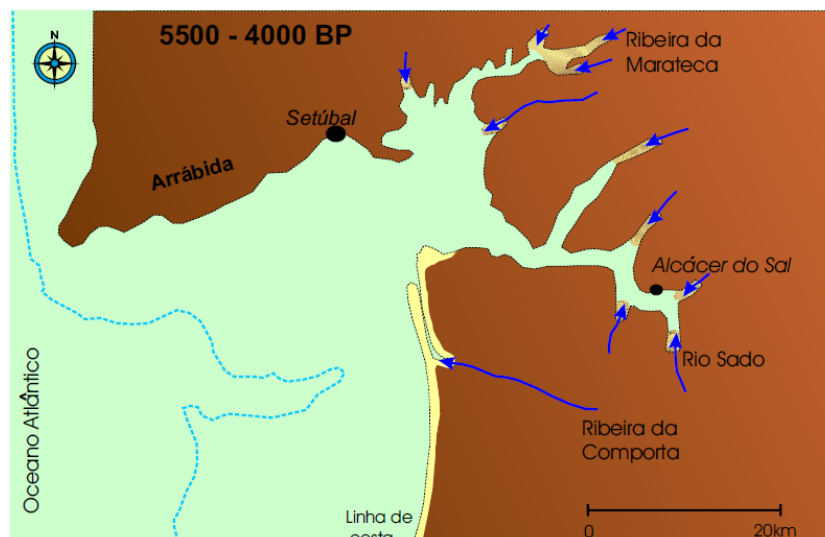


Figura 3.8 - Imagem representativa do estuário do Sado entre 5.500 e 4.000 anos BP (Freitas e Andrade, 2008)

Assim, criaram-se condições de abrigo no interior do estuário, permitindo o desenvolvimento de alguns sapais – sendo que a restante sedimentação ocorreu submersa. O desenvolvimento da restinga foi progredindo até ao seu último troço onde se localiza a Caldeira de Tróia (área de estudo), sendo este posterior à ocupação romana (entre o séc. I e V d.C.) – Figura 3.9.

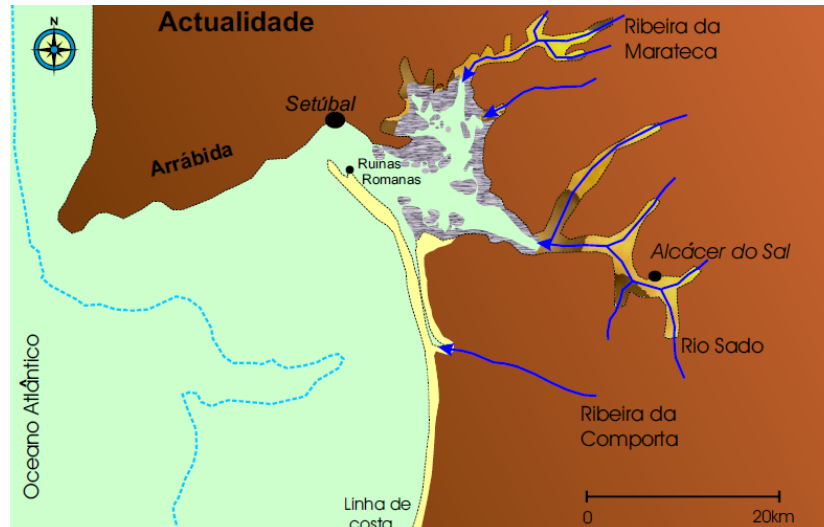


Figura 3.9 - Imagem representativa do estuário do Sado na atualidade (Freitas e Andrade, 2008)

### 3.2.2. Evolução da restinga de Tróia

A evolução da restinga de Tróia foi estudada por Costas *et al.* (2015) através da análise de um MDT de elevada resolução, de Georadar (GPR – *Ground Penetrating Radar*), de perfis 2D de reflexão sísmica na área submersa e de datações por OSL (*Optically Stimulated Luminescence*). A Figura 3.10 apresenta as etapas de evolução da restinga de Tróia, bem como a localização de alguns pontos de interesse: Tróia; o setor norte da Caldeira de Tróia e uma zona com ruínas romanas próximas do setor sul da Caldeira de Tróia.

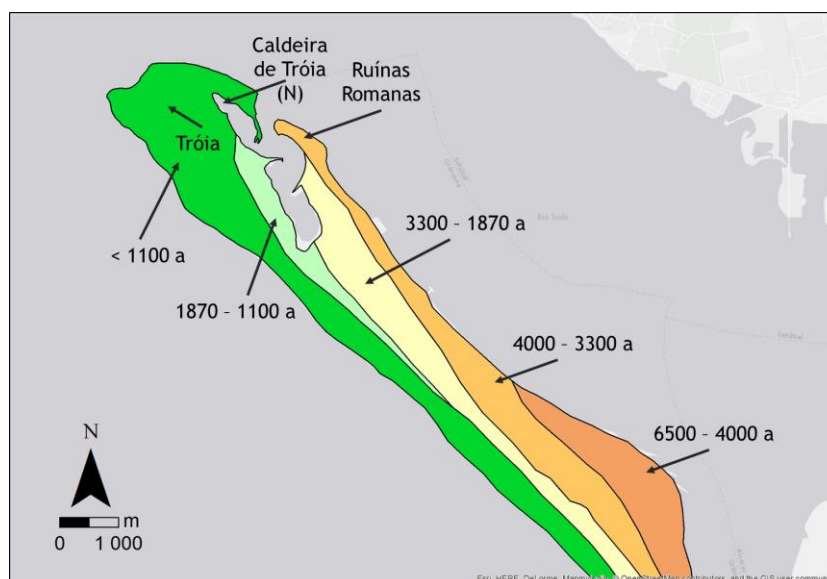


Figura 3.10 – Restinga de Tróia com cinco fases de evolução e associação com as idades resultantes de datações OSL. (a) – anos. Adaptado de Costas *et al.* (2015)

Segundo estes autores, existem evidências para afirmar que a formação da Restinga de Tróia terá sido iniciado há cerca de 6 500 anos, tendo sido identificadas cinco fases de crescimento subparalelas e com um importante contributo para o aumento quer do comprimento quer da largura da mesma.

Como se pode observar na Figura 3.10, o setor norte da Caldeira de Tróia enquadra-se na última fase de formação da restinga e será, por isso, posterior a esta. Consequentemente, o substrato onde o sapal em estudo está inserido e o próprio sapal terão uma idade inferior a 1 100 anos. Já o setor sul da restinga poderá ser mais antigo, provavelmente posterior à penúltima etapa de formação da restinga (1 870 a 1 100 anos).



---

# 4. METODOLOGIAS

---

## 4.1. Campo

O trabalho de campo é uma etapa fundamental para a realização de qualquer trabalho geológico. Para além de permitir um reconhecimento do local, permite ainda identificar algumas das suas particularidades que, por consulta bibliográfica, nunca seriam notadas. De modo a aumentar a eficiência do trabalho de campo, foram estabelecidos os seguintes objetivos:

1. Reconhecimento do local e seleção da área de estudo;
2. Levantamento topográfico com anotação da flora presente (associando-a a cada subambiente);
3. Realização de sondagens para posterior análise sedimentológica, paleoecológica e geoquímica.

A primeira visita ao local de estudo permitiu realizar uma identificação preliminar dos diversos subambientes presentes (alto sapal, baixo sapal e raso de maré), definir a área onde seriam efetuados os levantamentos topográficos e decidir onde realizar as sondagens manuais (com a garantia de recolher pelo menos uma em cada ambiente).

### 4.1.1. Levantamentos topográficos

Os levantamentos topográficos foram realizados no dia 15 de março de 2016 com o auxílio de um DGPS (*Differential Global Positioning System*) – Leica Viva NetRover GS08 – em modo RTK (*Real Time Kinematic*), que permite o registo de posições absolutas com elevada precisão. O equipamento foi utilizado em modo manual, com o utilizador a escolher os pontos a registar e tendo em consideração o ambiente: alto sapal, baixo sapal e raso de maré. A Figura 4.1 mostra a posição dos pontos recolhidos, organizados em perfis topográficos transversais à disposição oval da Caldeira de Tróia.



Figura 4.1 - Distribuição de pontos cotados registados no setor norte da Caldeira de Tróia

Os pontos foram registados no datum ETRS1989, com a cota em metros em relação ao NMM.

### 4.1.2. Sondagens

A recolha de amostras de sedimento com recurso a sondagens manuais é fundamental para uma correta caracterização sedimentológica e geoquímica do sapal e raso de maré adjacente. Efetuou-se um reconhecimento em profundidade dos diversos ambientes com recurso a uma meia-cana de reduzido diâmetro com o intuito de encontrar qual o melhor local para realizar uma sondagem manual com recuperação integral de sedimento.

Assim, foram executadas cinco sondagens manuais com o auxílio de amostradores do tipo *Van der Horst* e *Livingstone*. Para limpeza do furo de sondagem durante o processo foi utilizado um trado manual, que permitiu também a recolha de amostras de areia em maiores profundidades, onde os restantes amostradores foram ineficazes.

Obtiveram-se cinco testemunhos de sondagem representativos dos três ambientes em estudo: dois em alto sapal; dois em baixo sapal e um em raso de maré. Os testemunhos foram recolhidos com objetivos distintos:

1. Análise sedimentológica e geoquímica: CTAS8 (alto sapal), CTBS (baixo sapal) e CTRM (raso de maré);
2. Análise de isótopos  $^{210}\text{Pb}$  e  $^{137}\text{Cs}$ : CTAS9 (alto sapal) e CTBS1 (baixo sapal).

Note-se que as sondagens do mesmo ambiente (CTAS8/CTAS9 e CTBS1/CTBS2) foram realizadas adjacientemente, evitando introduzir erro na sua comparação provocado por alterações laterais do ambiente em profundidade.

A Tabela 4.1 inclui a informação considerada relevante sobre a localização das sondagens realizadas e a Figura 4.2 ilustra a sua localização espacial. Todas as sondagens foram recolhidas no dia 1 de junho de 2016.

Tabela 4.1 – Parâmetros espaciais das sondagens recolhidas no sapal em estudo

Ambiente	REF	Coordenadas (ETRS89)		Cota (m) NMM	Profundidade (m)
		Lat. (m)	Long. (m)		
Alto Sapal	CTAS8	- 130 531.11	- 66 572.12	1.40	1.50
	CTAS9				1.45
Baixo Sapal	CTBS1	- 130 529.25	- 66 550.48	1.12	1.08
	CTBS2				1.00
Raso de Maré	CTRM	- 130 527.02	- 66 534.33	0.52	0.40



Figura 4.2 - Localização das sondagens recolhidas no sapal em estudo

Ainda no campo, as amostras foram acondicionadas em meias-canas de PVC e envolvidas em película aderente, de modo a conservar a sua forma e teor em água, tendo sido posteriormente, em laboratório, armazenadas numa arca refrigeradora a 3 °C.

## 4.2. Laboratório

A análise das amostras recolhidas no campo inicia-se pelo trabalho de subamostragem dos testemunhos de sondagem. Foram separadas amostras com 2 cm de espessura para análise sedimentológica e com 1 cm de espessura para análise isotópica. Durante o processo de subamostragem foi realizado um registo fotográfico, descrição macroscópica e identificação de elementos particulares (conchas, elementos vegetais, etc.) - Figura 4.3.

A única análise comum a todas as sondagens foi a determinação do teor em água. Para isso, todas as amostras foram pesadas, congeladas e posteriormente liofilizadas, sendo o teor em água obtido a partir da Equação 4.1.

$$\text{Teor em água (\%)} = \frac{\text{Peso}_{\text{Amostra húmida}} - \text{Peso}_{\text{Amostra seca}}}{\text{Peso}_{\text{Amostra húmida}}} \times 100 \quad (\text{Equação 4.1})$$



Figura 4.3 - Exemplo de um testemunho de sondagem durante o processo de subamostragem

As sondagens destinadas à análise sedimentológica não serão abordadas nesta dissertação, pois a informação que pode ser obtida desta análise não foi considerada relevante para a apresentação de resultados, discussão e conclusões. No entanto, refere-se que foram realizadas as análises sedimentológicas:

1. Separação da fração grosseira e fina por via húmida com um crivo de 63  $\mu\text{m}$ ;
2. Granulometria de finos por difração de raios *laser* com o difratómetro Malvern Mastersizer 2000;
3. Teor de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) com calcímetro de Eijkelkamp;
4. Teor de matéria orgânica (lábil e refratária), seguindo o método de incineração adaptado de Loh *et al.* (2008).

#### 4.2.1. Análise isotópica $^{210}\text{Pb}/^{137}\text{Cs}$

A análise da atividade dos isótopos  $^{210}\text{Pb}$  e  $^{137}\text{Cs}$  não será objeto de estudo desta dissertação, no entanto, revelou-se fundamental para apurar taxas de sedimentação adequadas ao ambiente que se pretende modelar (sendo, por isso, um dado de entrada fundamental para o modelo de evolução morfológica do sapal).

Para a determinação destas taxas de sedimentação foram selecionadas 24 amostras irregularmente distribuídas da sondagem CTBS1 entre a superfície e 65 cm de profundidade. Apenas esta sondagem foi analisada até ao final da escrita deste trabalho, ficando os resultados do alto sapal e raso de maré para apresentar no futuro. A análise foi realizada pelo mestre Tiago Silva do Instituto F.-A. Forel da Universidade de Genebra, Suíça.

#### 4.2.1.1. Radionuclídeo $^{210}\text{Pb}$

O  $^{210}\text{Pb}$  é um radionuclídeo natural pertencente à série de decaimento do  $^{238}\text{U}$  com um tempo de semivida de 22.3 anos (<https://gec.cr.usgs.gov/archive/lacs/lead.htm>, acessado a 14 de abril de 2017) e uma constante de decaimento de 0.03118. Este radionuclídeo está presente no sedimento e pode ter duas origens distintas: na bacia hidrográfica, transportado como  $^{226}\text{Ra}$  pelos rios até ser depositado e, *in situ*, sofrer decaimento para  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}$  suportado) ou por via atmosférica ( $^{210}\text{Pb}$  não suportado), sendo este último identificado como o  $^{210}\text{Pb}$  em excesso, fundamental para o cálculo de taxas de sedimentação.

A análise da atividade do isótopo  $^{210}\text{Pb}$  seguiu a organização proposta por Sanchez-Cabeza e Ruiz-Fernández (2012), onde são considerados três modelos:

1. Modelo de sedimentação constante (CS – *Constant sedimentation model*);
2. Modelo de fluxo constante (CF – *Constant flux model*);
3. Modelo de sedimentação e fluxo constantes (CFCS – *Constant flux constant sedimentation model*).

A interpretação dos resultados obtidos na análise da atividade deste isótopo foi realizada através do modelo de sedimentação e fluxo constantes, método que tem como princípio um fluxo constante de  $^{210}\text{Pb}$  em excesso para o sedimento, bem como da taxa de deposição de massa seca, correspondente à massa de sedimento depositada num metro quadrado.

O cálculo da taxa de sedimentação pode ser obtido com base na Equação 4.2, uma equação linear que relaciona o logaritmo natural da atividade de  $^{210}\text{Pb}$  com a sua constante de decaimento e taxa de sedimentação em função do tempo.

$$\ln C(m) = \ln C(0) - \frac{\lambda}{r} m \quad (\text{Equação 4.2})$$

$C(m)$  – Atividade de  $^{210}\text{Pb}$

$C(0)$  – Atividade inicial de  $^{210}\text{Pb}$

$\lambda$  – Constante de decaimento de  $^{210}\text{Pb}$

$m$  – Profundidade

$r$  – Taxa de sedimentação

A Equação 4.3 corresponde a uma reta de regressão linear obtida a partir da projeção dos pontos com informação da atividade do  $^{210}\text{Pb}$  não suportado em função da profundidade da amostra. Na equação linear ( $y = ax + b$ ), “y” corresponde à atividade de  $^{210}\text{Pb}$ , “a” ao declive da reta ( $a = \lambda/r$ ), “x” à profundidade e “b” à atividade inicial de  $^{210}\text{Pb}$ .

Depois de obtida a reta, basta utilizar a Equação 4.3 e substituir “a” pelo declive e “ $\lambda$ ” pela constante de decaimento do  $^{210}\text{Pb}$ , sendo a incógnita a taxa de sedimentação (r) que se pretende determinar.

$$a = \lambda/r \quad (=) \quad r = \lambda/a \quad (\text{Equação 4.3})$$

#### 4.2.1.2. Radionuclídeo $^{137}\text{Cs}$

O  $^{137}\text{Cs}$  é um radionuclídeo artificial que começou a ser libertado para a atmosfera com o início dos testes de armas termonucleares, em 1952. Estas experiências tiveram como consequência a libertação de isótopos radioativos para a atmosfera que foram transportados por todo o globo por efeito do vento e que acabaram por ser depositados nos sedimentos, atingindo atividades significativas em 1954.

A incorporação destes isótopos nos sedimentos foi aumentando até 1963, data em que foi assinado o Tratado de Interdição Parcial de Testes Nucleares, resultando numa diminuição acentuada da atividade do  $^{137}\text{Cs}$  no sedimento (<http://www.nuclearfiles.org/menu/library/treaties/>, acessado a 14 de abril de 2017).

Por fim, o acidente nuclear de Chernobyl, em 1986, pode também ter o seu registo nos sedimentos como resultado da deposição de mais isótopos radioativos transportados por milhares de quilómetros na atmosfera.

Este método de determinação de taxas de sedimentação consiste em identificar picos de atividade do  $^{137}\text{Cs}$  ao longo dos sedimentos de uma sondagem, associando a data desse pico à profundidade a que ele se encontra. A espessura de sedimento sobrejacente ao pico de atividade, quando dividida pelos anos decorridos até à recolha da sondagem permite estimar taxas de sedimentação médias para esse intervalo de tempo.

### 4.3. Gabinete

#### 4.3.1. Rácio AS/BS

Como referido no segundo capítulo deste trabalho, um sapal pode ser classificado como maturo, intermédio ou jovem em função da razão entre a área ocupada por alto sapal e por baixo sapal. A este rácio foi dado o nome de “Rácio AS/BS” e é obtido através do cálculo do quociente entre a área de alto sapal e a área de baixo sapal. Os valores obtidos para esta relação podem ser classificados do seguinte modo:

Rácio AS/BS > 1: Sapal maturo

Rácio AS/BS  $\approx$  1: Sapal intermédio

Rácio AS/BS < 1: Sapal jovem

O Rácio AS/BS é, portanto, um indicador da maturidade do sapal, sendo expectável que estes ambientes evoluam, ao longo do tempo, de jovens a maturos. No entanto, em cenários de subida do NMM, quando este excede a capacidade de sedimentação do sistema, a evolução pode ser inversa e o sapal perde maturidade, passando de maturo a rejuvenescido.

É ainda importante que a aplicação deste rácio em sapais de dimensões muito reduzidas deve ser encarada com precaução, pois a relação entre estas áreas torna-se muito sensível.

# 5. MODELO DE EVOLUÇÃO DO SAPAL

A projeção da morfologia futura das áreas de sapal da Caldeira de Tróia irá englobar duas datas fundamentais: 2050 e 2100 (meados e final do presente século). Estas datas serão alvo de análise detalhada, mas para compreender a evolução desta zona ao longo de todo o século foram gerados mapas de distribuição do sapal, em todas as décadas do século XXI, a partir da atualidade.

Para a realização desta projeção é necessário obter uma cobertura altimétrica do sapal, determinar cotas de transição entre subambientes, taxas de sedimentação em cada subambiente e selecionar um cenário de subida do NMM.

## 5.1. Organização do modelo

O fluxograma da Figura 5.1 representa as etapas percorridas para a projeção da morfologia do sapal ao longo do tempo. Esta projeção é obtida através de duas etapas distintas, cada uma associada a um *software*: Matlab R2016a e Arcmap 10.2.2.

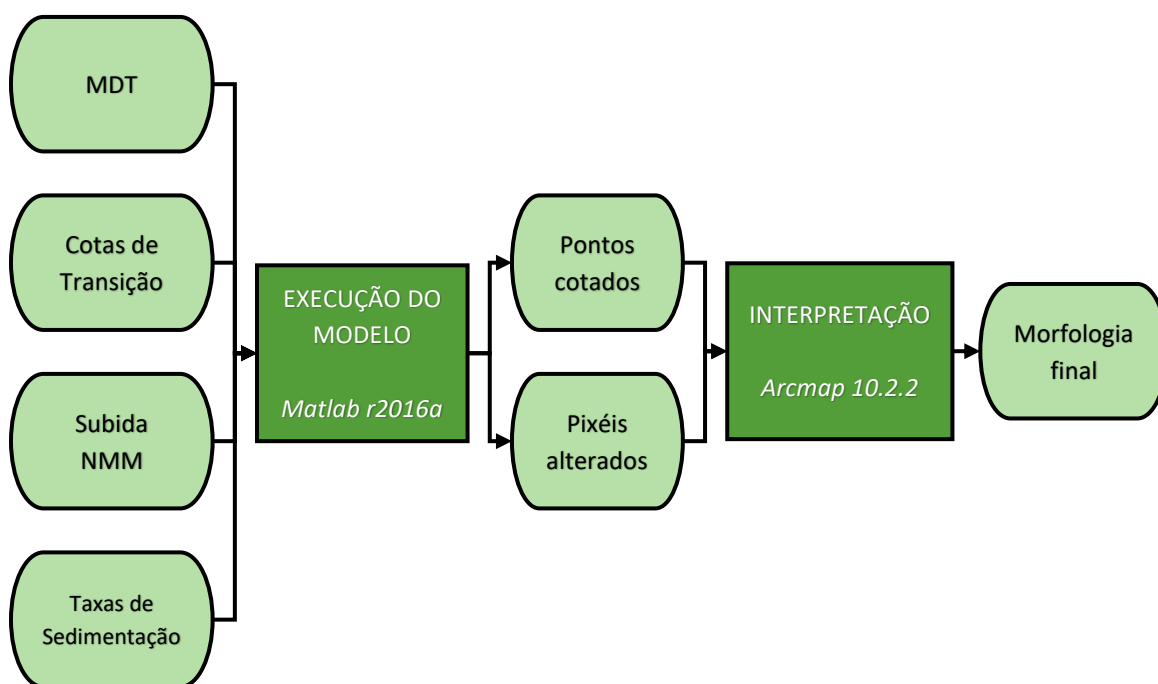


Figura 5.1 - Fluxograma com os dados e passos necessários para a construção do modelo numérico

## 5.2. Construção do modelo

### 5.2.1. Primeira etapa: Matlab

#### 5.2.1.1. Dados iniciais

A primeira etapa do modelo é fundamental, pois é nesta fase que é gerada a nova superfície de sapal adequada à data projetada. Assim, importa definir uma série de parâmetros *a priori*:

1. O MDT de elevada resolução que deve incluir a área onde o sapal está inserido, o raso de maré e ainda a área envolvente com uma abrangência suficiente para poder simular a sua expansão;
2. Três cotas que representem os limites de transição entre os diversos ambientes, em metros, no ano em que a simulação tem início, assumindo que estas irão variar a uma taxa idêntica à da subida do NMM. A primeira cota representa a transição entre raso de maré e baixo sapal, a segunda entre baixo e alto sapal e a terceira representa o limite vertical de crescimento do alto sapal;
3. Um cenário de subida do NMM através de uma taxa representativa do ano zero (neste caso, 2016) em m/ano, bem como de uma aceleração, em m/ano<sup>2</sup>, que será incrementada anualmente à taxa de subida. Este último parâmetro é de introdução opcional, podendo optar-se pela utilização de um cenário de subida linear do NMM;
4. Três valores representativos das taxas de sedimentação anuais de cada subambiente (raso de maré e alto e baixo sapal) em m/ano. Note-se que estes serão os únicos valores constantes ao longo de toda a execução do modelo.

#### 5.2.1.2. Execução do modelo

Os dados para a execução do modelo devem ser introduzidos nos formatos explicitados no subcapítulo anterior. No entanto, o MDT necessita de um processamento inicial para a exportação de um novo modelo como resultado final, operação que é realizada de forma automática.

O Matlab interpreta o ficheiro *raster* do MDT como uma matriz constituída por uma série de linhas e colunas que não necessitam de ser definidas pelo utilizador e que correspondem à área delimitada inicialmente. Este ficheiro é lido pelo *software* através da ferramenta *geotiffread*, garantindo que a sua referência geográfica é conservada e que pode ser aplicada nos ficheiros de saída. Cada ponto da matriz corresponde a uma cota representativa de uma área equivalente à dimensão do pixel, pelo que se recomenda a utilização de um MDT de elevada resolução. Por fim, a cada ponto da superfície é atribuído um ambiente com base nas cotas, de acordo com a Figura 5.2.

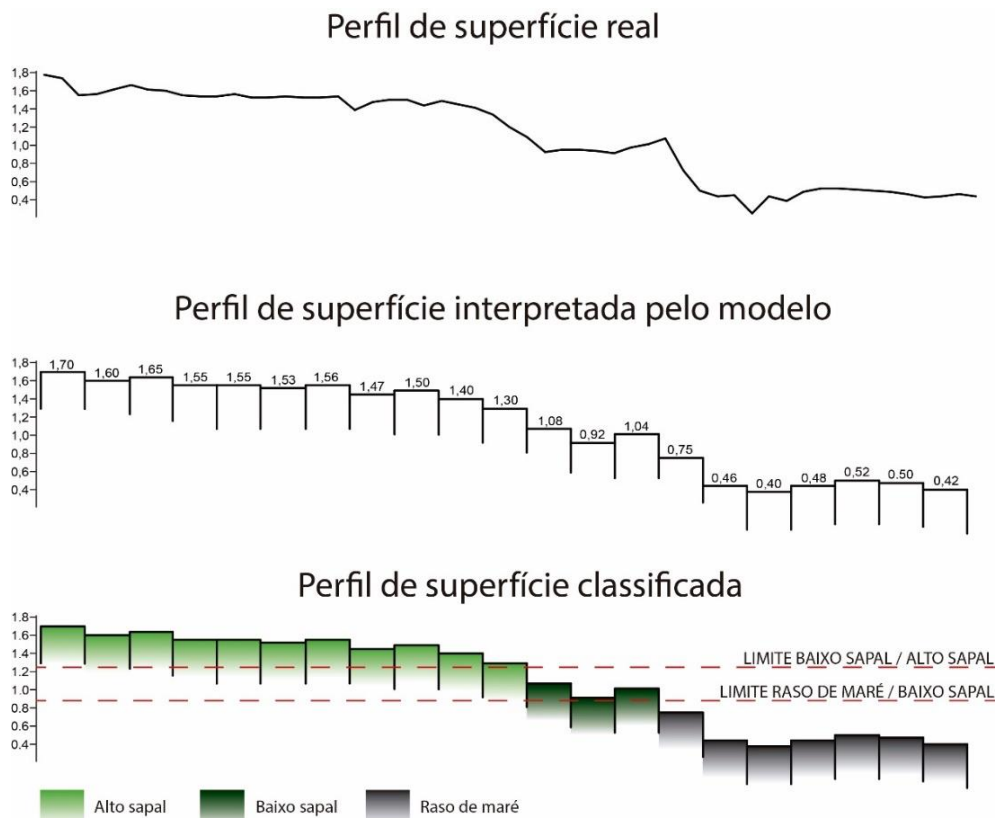


Figura 5.2 . Representação esquemática da forma como o modelo interpreta os dados altimétricos e os classifica

Para identificar o alto sapal não se estabelece um limite superior, pois o limite vertical de crescimento do sapal não corresponde necessariamente à cota de sapal mais elevada, como se irá observar no subcapítulo 6.2. Por exemplo, se o limite de crescimento for a cota 2 m e existirem pontos à cota 2.05 m, estes serão classificados como alto sapal, ainda que a taxa de sedimentação associada seja 0 mm/ano.

Na prática, significa que todos os pontos que se encontram acima do limite superior de crescimento do sapal são classificados como alto sapal, algo que não corresponde à realidade, mas que será resolvido na segunda etapa deste exercício.

Para a realização dos cálculos, é necessário um conjunto de dados que terão de variar anualmente e que devem, por isso, ser guardados na forma de um vetor com tantas entradas quanto o número de anos simulados. Assim, para o exemplo de 2100, são gerados os seguintes vetores com 84 elementos (2016 a 2100):

- a) Vetor com a subida do NMM anual;
- b) Dois vetores com a posição anual dos limites de transição entre subambientes – que correspondem à soma entre os valores inicialmente estabelecidos e o valor da subida do NMM para o mesmo ano;
- c) Um vetor com as cotas anuais de limite de crescimento do sapal, que é obtido do mesmo modo que os dois vetores anteriores.

A representação destes parâmetros na forma de vetores permite guardar e eventualmente projetar a sua variação desde a atualidade até à data pretendida.

A execução do modelo funciona numa combinação de três conjuntos de ciclos distintos:

- a) Um conjunto de ciclos anuais executado tantas vezes quanto o número de anos percorridos. Nesta fase é realizada uma comparação entre cada ponto cotado da superfície do sapal (elemento da matriz) e as cotas de transição adequadas a cada ano (ou seja, englobando a subida do NMM). No ano/ciclo seguinte, este processo é repetido, sendo utilizado como MDT o conjunto de pontos resultantes do ano anterior;
- b) O segundo e terceiro conjuntos de ciclos funcionam dentro do primeiro e percorrem todos os elementos da matriz (MDT) que serve de base para o processo de modelação: um ciclo para percorrer todas as linhas e outro para todas as colunas. Assim, o primeiro ciclo é executado completamente para cada ponto do sapal.

O funcionamento deste conjunto de ciclos pode ser expresso, simplificadaamente, pelas linhas de código da Tabela 5.1.

*Tabela 5.1 - Resumo da organização do script matlab para a execução do modelo*

<b>CÓDIGO</b>	<b>INTERPRETAÇÃO</b>
<code>for t = 1:(projecao - 2016)</code>	<i>Definição do número de ciclos (ex: para 2100 serão executados 84 ciclos)</i>
<code>if sup(t) &gt; LIM_AS(t)</code>	<i>Caso em que a cota da superfície (sup) é superior ao limite de crescimento do sapal (LIM_AS)</i>
<code>sup(t+1) = sup(t)</code>	<i>A cota da superfície não se altera</i>
<code>elseif sup(t) &gt;= T_BS_AS(t)</code>	<i>Caso em que a cota da superfície (sup) é superior à cota de transição entre o baixo e alto sapal</i>
<code>sup(t+1) = sup(t) + T_AS</code>	<i>Incremento à cota da superfície do valor da taxa de sedimentação do alto sapal (T_AS)</i>
<code>elseif sup(t) &gt;= T_RM_BS(t)</code>	<i>Caso em que a cota da superfície (sup) é superior à cota de transição entre o raso de maré e baixo sapal (T_RM_BS)</i>
<code>sup(t+1) = sup(t) + T_BS</code>	<i>Incremento à cota da superfície do valor da taxa de sedimentação do baixo sapal (T_BS)</i>
<code>else</code>	<i>Último caso – A cota da superfície é inferior à cota de transição entre o raso de maré e baixo sapal</i>
<code>sup(t+1) = sup(t) + T_RM</code>	<i>Incremento à cota da superfície do valor da taxa de sedimentação do raso de maré (T_RM)</i>
<code>end</code>	

Importa esclarecer algumas questões relativas à aplicação do código e que não estão expressas nas linhas anteriores:

- a) O código acima não inclui os dois conjuntos de ciclos responsáveis por percorrer toda a área de sapal;
- b) Nem todos os casos apresentados são necessariamente verificados, sendo ignoradas todas as situações que se encontrem abaixo do primeiro caso verdadeiro. Por exemplo, um ponto que se encontre acima do limite de crescimento do sapal mantém-se inalterado para o ano

seguinte e os casos seguintes não são verificados. Na realidade, se a primeira condição for verdadeira, as seguintes são necessariamente verdadeiras, mas não correspondem à realidade, sendo por isso necessário que não sejam verificadas. Por exemplo, se um ponto se encontrar à cota 2.05 m e a cota que limita o crescimento do sapal for de 2 m, este ponto estará naturalmente acima dos limites propostos para as restantes transições. No entanto, estas condições não devem ser verificadas, caso contrário seriam aplicadas as taxas associadas a cada ambiente inferior ao que está efetivamente associado ao ponto analisado.

### 5.2.1.3. Ficheiros de saída

Depois de finalizado o processo de modelação da superfície, é necessário exportar os dados como ficheiros do tipo *raster* georreferenciados, formato adequado para a sua posterior representação em mapa.

Exportar o novo MDT de forma integral irá incluir toda a informação sobre a nova morfologia do sapal. No entanto não é simples, recorrendo exclusivamente a este ficheiro, compreender que zonas conectadas com a área atual do sapal sofreram de facto alteração (fundamental para identificar que áreas foram colonizadas). Uma possível alternativa seria exportar exclusivamente os pixéis que sofreram alteração no processo de modelação, mas existiria o problema de estar a excluir zonas que, apesar de estarem a cotas superiores ao limite de crescimento estabelecido para o sapal, estão colonizadas por alto sapal.

Para resolver esta questão, optou-se por exportar dois ficheiros:

- a) O MDT integral com a mesma georreferenciação e com as cotas previstas para a data projetada;
- b) Um ficheiro *raster* binário com valores 0 e 1 que identifica todas as áreas que sofreram alteração em relação à data inicial (em que 0 significa que não houve alteração e 1 significa que houve alteração).

A primeira etapa do modelo fica concluída com a exportação destes dois ficheiros.

## 5.2.2. Segunda etapa: Arcmap

A segunda etapa deste modelo é realizada com o auxílio do *software* Arcmap e não irá introduzir alterações de cotas ao novo MDT, tendo como única função a delimitação horizontal do sapal para a data projetada utilizando a funcionalidade *Model Builder*.

A utilização desta funcionalidade tem como vantagem automatizar o processo e diminuir, assim, o erro associado ao utilizador, não dispensando uma atenta validação do resultado obtido.

Para esta etapa do processo não são necessários dados para além dos gerados na primeira etapa.

A ferramenta construída com o *Model Builder* começa por converter o ficheiro *raster* binário exportado pelo Matlab para um ficheiro vetorial (*shapefile*), de acordo com o esquema apresentado na Figura 5.3. Este ficheiro vetorial estabelece o limite da área que sofreu alteração.

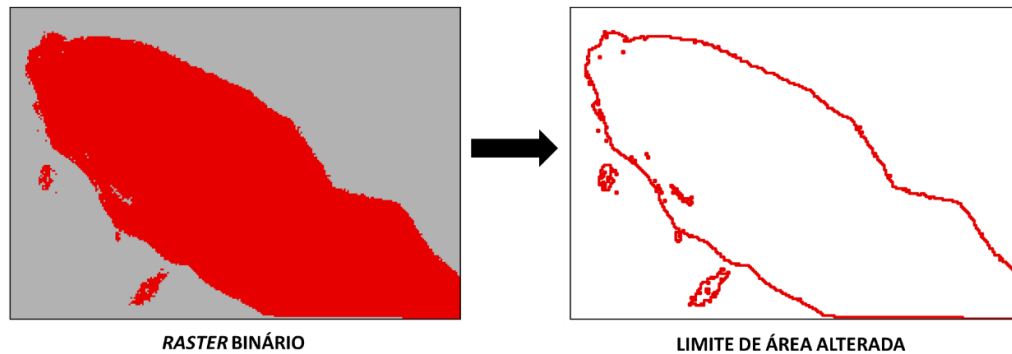


Figura 5.3 - Transformação do ficheiro raster binário em ficheiro vetorial que limita as áreas que sofreram alteração após execução do código Matlab

Uma vez obtido um ficheiro vetorial da área alterada, é necessário sobrepô-lo com o limite de área atual, pois é a união destes dois polígonos que irá estabelecer o limite de expansão do sapal para a data projetada. Este processo realizado dentro da ferramenta processa-se de acordo com a Figura 5.4.

O resultado é um ficheiro vetorial com o limite do sapal para a data projetada, em que foram incluídas as áreas de alto sapal inicial que não sofreram alteração por estarem a cotas demasiado elevadas e excluídas áreas com cotas compatíveis com a colonização por vegetação de sapal, mas que não comunicam com este.

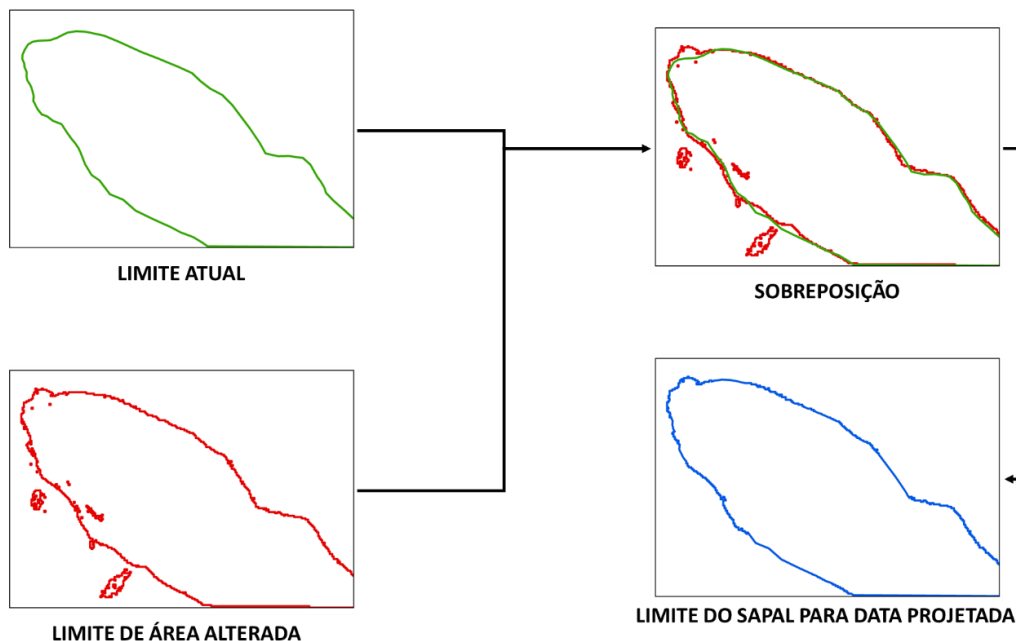


Figura 5.4 - Esquema que representa a forma como se obtém o limite do sapal para a data projetada a partir da união entre a área alterada após execução do modelo e o limite atual

### 5.3. Resultado final

O resultado final é obtido extraindo os pontos do MDT gerado no Matlab que se encontram dentro do polígono obtido na operação anterior. Para uma melhor visualização dos resultados, é recomendado incluir uma simbologia apropriada que identifique as transições entre alto e baixo sapal e entre baixo sapal e raso de maré.



---

# 6. MATERIAIS

---

## 6.1. Modelo digital de terreno

Para projetar a morfologia do sapal para o futuro é necessária uma cobertura altimétrica total da sua área, do raso de maré e da área envolvente atuais. Dada a necessidade de uma elevada resolução e qualidade nesta cobertura, optou-se pela utilização de um MDT de elevada resolução obtido através da técnica de deteção remota LiDAR (*Light Detection and Ranging*) (Silva *et al.*, 2012) e disponibilizado pela DGT (Direção Geral do Território) e pela APA (Agência Portuguesa do Ambiente) em 2013 – Anexo 1 – instrumento que tem como princípio de funcionamento a emissão de impulsos *laser* que incidem sobre um determinado objeto e que são refletidos pelo mesmo. Após a receção dos impulsos refletidos, o equipamento converte o tempo que o impulso demorou a realizar o percurso na distância ao próprio objeto. Por fim, o LiDAR está equipado com um sistema GPS de alta precisão que regista as suas coordenadas horizontais e vertical (Heidemann, 2014).

A cobertura altimétrica abrangida por este MDT necessitou de validação, de modo a compreender qual a sua aproximação à superfície real do sapal. Para isso, foi realizada uma saída de campo onde foram registadas várias séries de pontos cotados distribuídos de forma razoavelmente uniforme pelo sapal.

O exercício de validação consistiu em extrair as células do MDT que são intersetadas por pontos cotados registados no campo com o DGPS, de modo a comparar os seus parâmetros estatísticos. A forma como as cotas destes pontos estão distribuídas pelos subambientes encontra-se nos gráficos *boxplot* da Figura 6.1. Estes gráficos apresentam na base e topo o mínimo e máximo excluindo *outliers*, respetivamente. A caixa é definida (da base para o topo) pelo primeiro quartil, mediana e terceiro quartil.

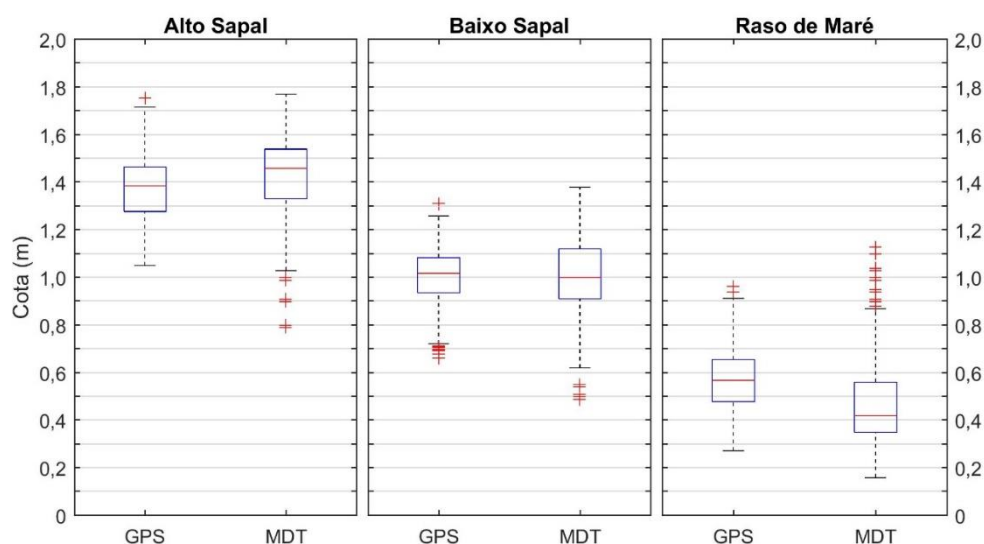


Figura 6.1 - Boxplots representativos da distribuição de cotas em cada subambiente e tendo como fontes de informação os dados obtidos com DGPS no campo e o MDT

Os parâmetros projetados na Figura 6.1 estão disponíveis no Anexo 2, facilitando a interpretação dos seus valores. De um modo geral, observa-se uma concordância razoável entre as cotas extraídas do MDT e as cotas registadas no campo, com uma tendência para um maior número de ocorrências de valores *outlier* e um desvio padrão mais elevado no MDT, como seria expectável.

As cotas de baixo sapal são as que apresentam maior concordância, quer ao nível da média e mediana quer dos extremos, sendo a única diferença digna de nota a maior amplitude interquartil da distribuição de cotas do MDT. O alto sapal apresenta uma concordância entre as duas fontes de informação bastante aceitável, com desvios pouco significativos da mediana e muito reduzidos da média. Excluindo os valores *outlier*, também os extremos se apresentam a cotas semelhantes e apesar de existirem diferenças entre estes valores, a amplitude interquartil é igual, apresentando uma variação idêntica da distribuição, havendo apenas uma ligeira translação que coloca os pontos extraídos do MDT a cotas a cerca de 5 cm mais elevadas.

Por fim, a concordância entre cotas de raso de maré é inferior à dos restantes ambientes, quer por responsabilidade dos pontos registados no campo, quer do MDT, pois ambos apresentam um desvio padrão mais elevado do que no alto e baixo sapal. No entanto, os valores máximos, excluindo *outliers* apresentam uma variação reduzida, sendo este um fator importante para estabelecer a cota de transição entre ambientes.

No que é essencial, a distribuição de cotas dos mesmos ambientes de fontes distintas apresenta-se razoavelmente concordante na mediana, média, extremos, desvio padrão e amplitude, permitindo a utilização deste MDT como cobertura altimétrica do setor norte e áreas envolventes do sapal da Caldeira de Tróia.

## 6.2. Cotas de transição

Como referido no capítulo 2 desta dissertação, a transição entre os três subambientes (alto sapal, baixo sapal e raso de maré) pode ser estabelecida, teoricamente, pelas diversas cotas de maré.

Para realizar a comparação entre as cotas reais de cada ambiente e as cotas teóricas de maré, foram adquiridos ao Instituto Hidrográfico dados horários de nível de maré observada para o marégrafo de Setúbal-Tróia (38° 29.69' N, 9° 07.53' W<sup>1</sup>) (<http://www.hidrografico.pt/download-tabelas-mare.php>, acessado a 18 de abril de 2017), cuja localização se encontra no Anexo 3. Infelizmente, este marégrafo não dispõe de intervalos contínuos e alargados de leituras horárias e foi por isso adquirido o registo de leituras dos anos de 1977, 1978, 1993, 1998 e 2001 a 2005. Recorrendo aos dados de 2005, foi modelada uma tabela de marés de 2000 a 2016 e foram selecionados os valores relativos a 2016 – este exercício de modelação foi realizado pelo Professor Doutor Carlos Antunes, do Departamento de Engenharia Geográfica, geofísica e Energia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

De acordo com os dados de maré, a cota de transição entre o raso de maré e o baixo sapal é fixada no PMAM, que tem um valor<sup>2</sup> de 0.88 m; a transição entre baixo sapal e raso de maré é fixada no PMMed com uma cota de 1.25 m; por fim, o limite superior de crescimento do sapal encontra-se no PMAV com 1.59 m de cota – todos os valores englobam a subida do NMM para 2016.

---

<sup>1</sup> Sistema de coordenadas: WGS84

<sup>2</sup> Apesar de serem relativos a marés, todos os valores têm como referência o NMM1938 e não ao zero hidrográfico.

Antes de aceitar estes valores teóricos e integrá-los no modelo, é necessário verificar a sua coerência e fiabilidade no estabelecimento de limites entre os diversos subambientes, tendo em consideração a distribuição de cotas apresentada no subcapítulo 6.1, onde foi validada a concordância entre as cotas reais e as cotas fornecidas pelo MDT, pois é sobre este último que todo o trabalho de modelação vai incidir. Esta verificação consistiu em averiguar a percentagem de pontos selecionados do MDT que se encontram dentro dos diversos intervalos de maré característicos de cada subambiente, sendo o resultado apresentado na Tabela 6.1.

*Tabela 6.1 - Relação entre níveis de maré e a distribuição de cotas do MDT*

<b>Limites</b>	<b>Subambientes</b>		
	<b>Alto Sapal</b>	<b>Baixo Sapal</b>	<b>Raso de Maré</b>
	14.6 %	---	---
<b>PMAV</b> (1.59 m)	70.8 %	5.6 %	---
<b>PMMed</b> (1.25 m)	14.6 %	74.2 %	8.2 %
<b>PMAM</b> (0.88 m)	---	20.2 %	91.8 %

Teoricamente, o alto sapal deverá estar limitado entre o PMMed e o PMAV. No entanto, observa-se que 14.6 % dos pontos de alto sapal encontram-se acima do limite de crescimento teórico do sapal e, em oposição 14.6 % dos pontos encontram-se abaixo do PMMed, resultando em mais de 70 % dos pontos cotados dentro dos limites previstos para o alto sapal.

O baixo sapal, apesar de apresentar uma dispersão inferior ao alto sapal (74.2 % dos pontos estão entre os limites teóricos), o número de pontos abaixo do limite inferior é consideravelmente maior do que o número de pontos acima do limite superior, indicando que todo este ambiente se encontra ligeiramente deslocado em relação aos valores teóricos.

Por fim, no raso de maré mais de 90 % dos pontos cotados estão dentro do intervalo teórico (até ao PMAM), indicando uma excelente relação com este nível de maré.

## 6.3. Cenários de subida do NMM

### 6.3.1. IPCC

O IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) é uma entidade estabelecida pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP – *United Nations Environment Programme*) e pela Organização Meteorológica Mundial (WMO – *World Meteorological Organization*) que tem como objetivo avaliar e divulgar o estado atual do conhecimento sobre as alterações climáticas e os seus impactos ambientais e socioeconómicos (<http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml>, acessado a 18 de abril de 2017).

*Climate Change 2013 – The Physical Science Basis* (IPCC, 2013) é o nome de uma das publicações do *Fifth Assessment Report (AR5)*, o último relatório apresentado por esta entidade e que aborda questões como as alterações climáticas e os seus impactos sociais e económicos. Um dos assuntos relevantes abordado nesta publicação é a subida do NMM, em particular pela apresentação de projeções com valores decenais (até 2100) para a posição do nível de água em relação à média do NMM entre 1986 e 2005.

Esta publicação, que apresenta quatro cenários (RCP2.6 (*Representative Concentration Pathways*); RCP4.5; RCP6.0 e RCP8.5 – Figura 6.2), tem em consideração fatores como a expansão térmica do oceano, degelo de glaciares e dos mantos de gelo da Gronelândia e da Antártida e o armazenamento de água subterrânea. Cada RCP estima um aumento da temperatura global com base nas emissões de gases poluentes para a atmosfera, considerando-se que no RCP2.6 existe um forte abrandamento de emissões (revertendo os valores atuais) e que no RCP8.5 existe um aumento considerável dessas emissões; estas estimativas têm em consideração fatores socioeconómicos e tecnológicos.

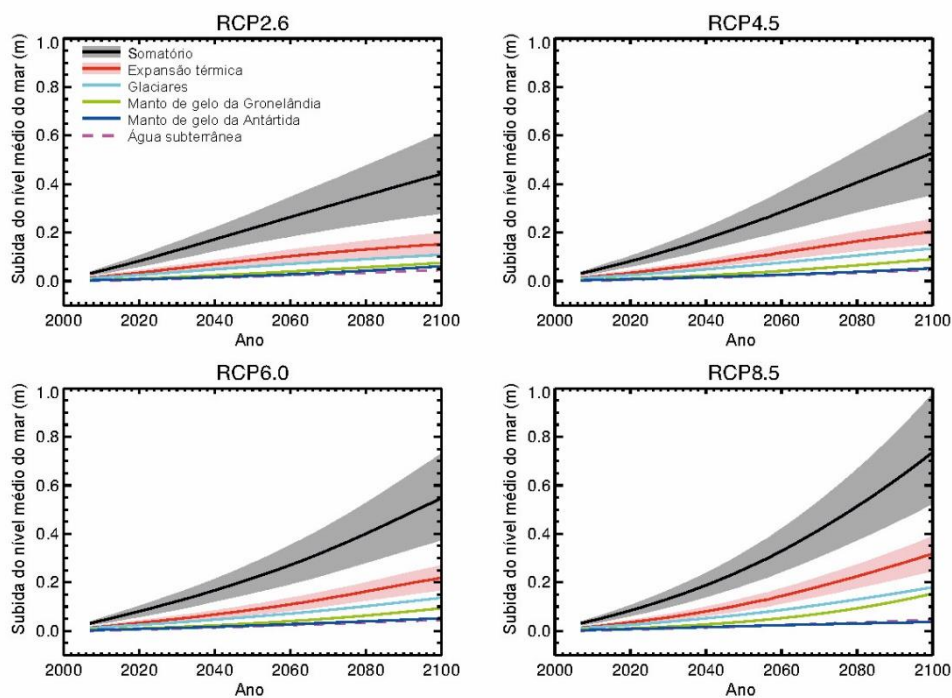


Figura 6.2 - Quatro cenários de subida do NMM propostos pelo IPCC. Adaptado de IPCC (2013)

Os quatro cenários apresentam valores de subida do nível do mar semelhantes para 2050 (a diferença de subida entre o RCP2.6 e RCP8.5 é de 3 cm), sendo na segunda metade do século que cada cenário mostra um comportamento distinto. O RCP2.6 apresenta uma taxa de subida do NMM constante (aceleração nula) até 2050, passando para uma situação de aceleração negativa de pequena magnitude entre 2050 e 2100. Os cenários RCP4.5 e RCP6.0 consideram taxas com aceleração positiva durante a maior parte do século, terminando-o com valores de aceleração nulos e, conseqüentemente, taxas de subida estabilizadas. Por fim, o cenário RCP8.5 considera uma subida acelerada do nível do mar com um agravamento da taxa à medida que se aproxima do final do século.

Em todos os cenários propostos por esta entidade considera-se que os diversos fatores mencionados contribuem de forma independente para a subida global e que esta corresponde ao somatório de todos os fatores. No entanto, é referido no relatório que esta situação não corresponde à realidade e que só assim foi considerada por impossibilidade de quantificar a relação de dependência entre os diversos fatores (justificando que o estado atual do conhecimento não permite quantificar esta relação).

Os valores apresentados nestas projeções são, de um modo geral, abaixo do que se observa em projeções propostas por outros autores (como as presentes nos subcapítulos seguintes). No entanto, estes cenários não incluem a influência de um possível colapso dos setores marinhos do manto de gelo da Antártida – um processo que, se iniciado, poderá levar a subida do NMM a ultrapassar os valores propostos para 2100 em todos os cenários. Apesar da influência deste fator não poder ser quantificada de forma precisa, considera-se que poderá ter uma contribuição decimétrica.

O objetivo da utilização de cenários de subida do NMM é, naturalmente, a sua aplicação na modelação da superfície do sapal para o futuro e, por isso, foram seleccionados dois cenários dos quatro propostos pelo IPCC: RCP2.6 e RCP8.5. A escolha destes cenários foi motivada por se tratarem dos extremos, excluindo-se os cenários de gravidade intermédia. Na realidade, apenas a utilização do cenário RCP8.5 deverá produzir resultados comparáveis aos obtidos com a utilização de cenários propostos por outros autores, mas a adoção de um cenário mais conservativo como o RCP2.6 poderá ser interessante exatamente pela sua diferença em relação aos restantes.

### 6.3.1.1. RCP2.6

A Figura 6.3 ilustra lado-a-lado ((a) e (b)) a subida do NMM no cenário RCP2.6 e a evolução da taxa anual de variação até 2100, bem como de todos os fatores considerados – sendo o valor global o somatório de todos os componentes.

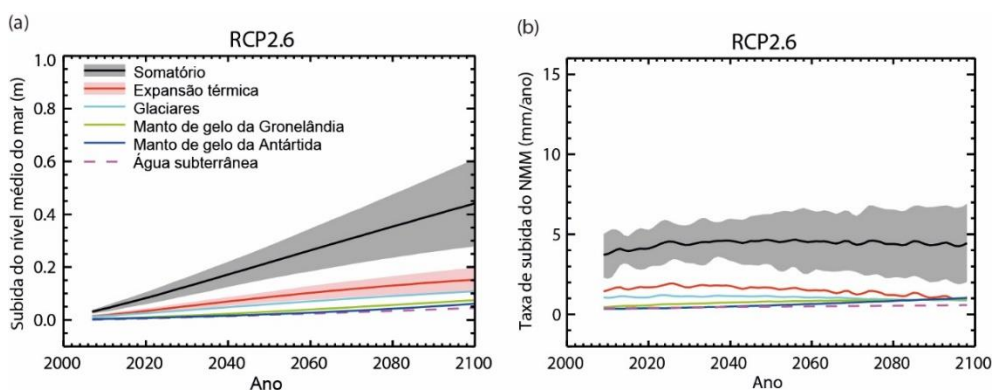


Figura 6.3 - Subida do NMM (a) e variação da taxa anual de variação (b) para o cenário RCP2.6. Adaptado de IPCC (2013)

Neste cenário, a influência da subida por efeito da expansão térmica do oceano é variável de 30 a 50 % e a influência do degelo dos glaciares fora da Antártida varia de 15 a 55 %. A taxa de subida deverá manter-se estável até meados do século e sofrer uma ligeira diminuição no seu final (aceleração negativa).

A utilização destes cenários no modelo requer a introdução de um valor para a taxa de subida anual inicial (2016) e um valor de aceleração – dados que não constam do relatório do IPCC (2013). No entanto, a publicação disponibiliza valores para a cota do NMM para as datas múltiplas de dez até 2100 (Anexo 4), sendo possível definir uma reta ou curva de aproximação, de onde poderão ser extraídos os dados necessários (Figura 6.4).

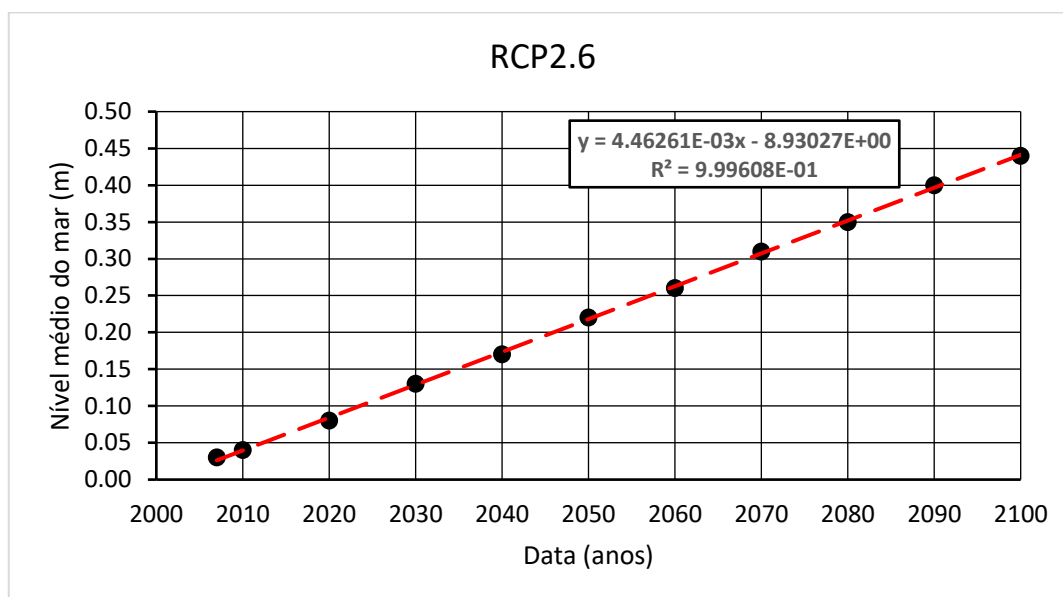


Figura 6.4 - Projeção da posição do NMM no cenário IPCC RCP2.6 em função do tempo com regressão linear

A regressão linear é o tipo de regressão que melhor se ajusta aos pontos marcados no gráfico (posição do nível do mar), como se pode observar pelo valor do  $R^2$  que tende para 1 ( $R^2 = 0.9996^3$ ). Esta reta de regressão pode ser expressa pela Equação 6.1:

$$y = 4.46261 \times 10^{-3}x - 8.93027 \quad (\text{Equação 6.1})$$

A taxa de subida anual do NMM pode ser obtida pela derivada da Equação 6.1:

$$(4.46261 \times 10^{-3}x - 8.93027)' = 4.46261 \times 10^{-3} \text{ m/ano} = 4.463 \text{ mm/ano}$$

Note-se que, nesta situação, a taxa de subida não depende da data (valor de  $x$ ), resultando da utilização de uma reta de regressão linear e que, por isso, assume uma taxa constante (aceleração nula) para todo o período analisado.

Em suma, para este cenário de subida do NMM será aceite uma taxa de subida inicial de 4.463 mm/ano e uma aceleração de 0 mm/ano<sup>2</sup>. Ainda que o relatório faça referência a um valor negativo de aceleração, as cotas disponibilizadas não permitiram o ajuste de uma função que o considerasse.

<sup>3</sup> Independentemente do número de algarismos significativos presentes no texto, no processo de modelação, todos os cálculos foram realizados com 10 algarismos significativos.

### 6.3.1.2. RCP8.5

A Figura 6.5 ilustra lado-a-lado ((a) e (b)) a subida do NMM no cenário RCP8.5 e a evolução da taxa anual até 2100, bem como de todos os fatores considerados – sendo o valor global o somatório de todos os componentes.

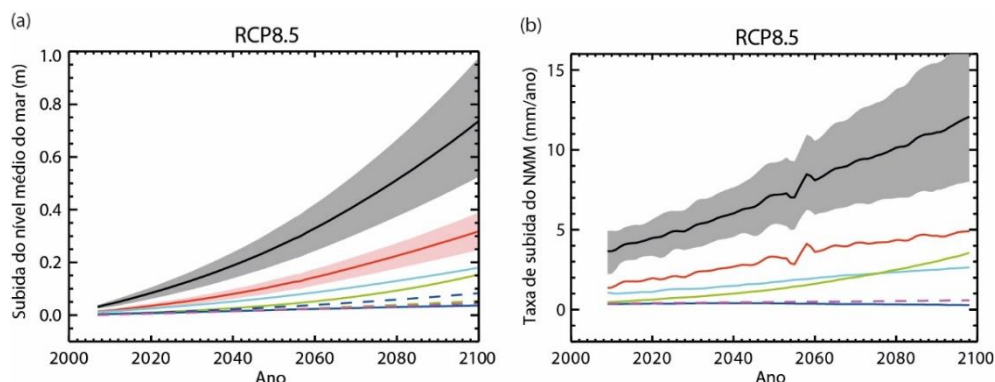


Figura 6.5 - Subida do NMM (a) e variação da taxa anual (b) para o cenário RCP8.5 Adaptado de IPCC (2013)

Tal como no cenário RCP2.6, também no RCP8.5 é considerado um contributo variável entre 30 e 50 % da expansão térmica do oceano para a subida do NMM. No entanto, a influência do degelo de glaciares fora da Antártida tem um peso consideravelmente mais elevado, sendo variável entre 35 % e 85 %. Ao contrário do cenário anteriormente apresentado, a taxa de subida deverá ter um comportamento acelerado durante todo o século.

Para a utilização deste cenário será naturalmente necessária uma taxa inicial de subida do NMM (2016) e um valor de aceleração que poderão ser obtidos através de um exercício de regressão com base nas cotas do NMM disponíveis no Anexo 4. Nesta situação, uma aproximação a um polinómio de 2ª ordem mostrou ser a mais adequada, como se pode observar na Figura 6.6.

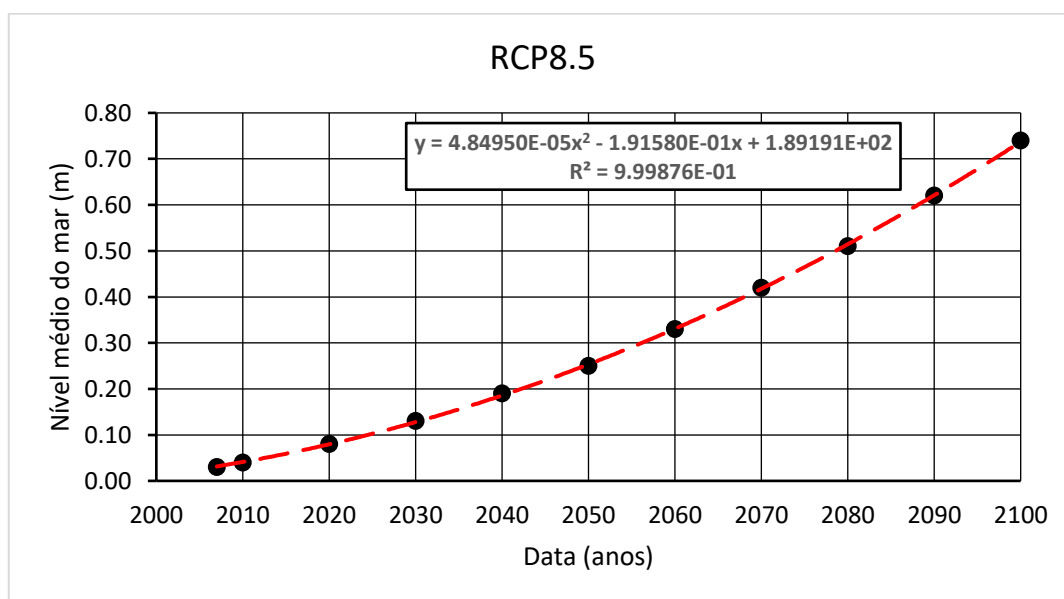


Figura 6.6 - Projeção da posição do NMM no cenário IPCC RCP 8.5 em função do tempo com ajuste a um polinómio de 2ª ordem

A curva de ajustamento selecionada apresenta um  $R^2$  muito próximo de 1 ( $R^2 = 0.9999$ ), revelando um excelente ajustamento aos pontos marcados no gráfico. A curva de regressão pode ser expressa pela Equação 6.2:

$$y = 4.84950 \times 10^{-5} x^2 - 1.91580 \times 10^{-1} x + 1.89191 \times 10^2 \quad (\text{Equação 6.2})$$

Mais uma vez, a taxa de subida do NMM para cada ano é expressa pela derivada da Equação 6.2:

$$\begin{aligned} (4.84950 \times 10^{-5} x^2 - 1.91580 \times 10^{-1} x + 1.89191 \times 10^2)' &= \\ &= 9.6990 \times 10^{-5} x - 1.9158 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

Ao contrário da equação representativa do cenário anterior, neste cenário a taxa varia com a data, algo que pode facilmente ser obtido pela substituição da incógnita ( $x$ ) da Equação 6.2 pelo ano:

$$\text{Taxa}_{2016} = 9.6990 \times 10^{-5} \times 2016 - 1.9158 \times 10^{-1} = 0.00395 \text{ m/ano} = 3.950 \text{ mm/ano}$$

A segunda derivada da Equação 6.3 corresponde ao valor da aceleração:

$$\begin{aligned} \text{Aceleração} &= (4.84950 \times 10^{-5} x^2 - 1.91580 \times 10^{-1} x + 1.89191 \times 10^2)'' = \\ &= (9.6990 \times 10^{-5} x - 1.9158 \times 10^{-1})' = \\ &= 9.6990 \times 10^{-5} \text{ m/ano}^2 = 0.09699 \text{ mm/ano}^2 \end{aligned}$$

A aceleração tem um valor constante, pelo que não dependerá da data e será igual todos os anos até ao final do século.

Para introdução no modelo considera-se que este cenário tem uma taxa inicial de subida do NMM de 3.950 mm/ano e uma aceleração constante de 0.09699 mm/ano<sup>2</sup>.

### 6.3.2. Antunes (2016)

O cenário proposto por Antunes (2016) de natureza empírica foi obtido com base em dados adquiridos pelo marégrafo de Cascais, incluindo cerca de doze anos e meio de registos obtidos pelo marégrafo digital de forma contínua e com alta taxa de registo.

Estes dados tentam representar com a máxima fiabilidade a cota absoluta a que se encontra a coluna de água num dado momento, sendo para isso necessário aplicar correções relativas à velocidade vertical de sítio (consequência dos assentamentos verificados no edifício onde o marégrafo está instalado) e ao forçamento meteorológico (sobreelevação de origem meteorológica).

A primeira correção tem como objetivo apurar qual a altitude exata a que o marégrafo se encontra, valor que não tem um comportamento completamente estável ao longo dos anos por influência do assentamento natural do edifício onde o marégrafo se encontra instalado. Para a segunda correção é necessário ter em consideração o efeito barométrico inverso e o efeito do vento de curto e de longo período.

Este autor apresenta, na sua última revisão (Figura 6.7), um valor de subida do NMM de 2.1 mm para 2000 e uma aceleração constante de 0.079 mm/ano<sup>2</sup>. Estes valores são extraídos de um polinómio de 2ª ordem (Equação 6.3 – Representação genérica de um polinómio de 2ª ordem).

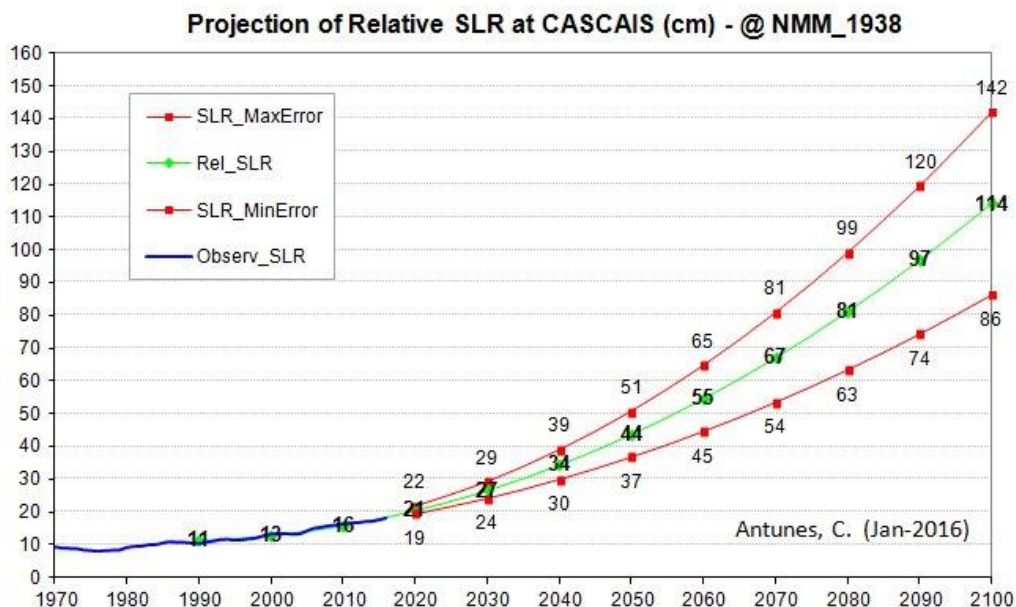


Figura 6.7 - Subida do NMM com observações no marégrafo de Cascais (Antunes, 2016)  
 ([http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro\\_mares.html](http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html), acessado a 17 de abril de 2017)

$$y = ax^2 + bx + c \quad \text{(Equação 6.3)}$$

O valor de  $0.079 \text{ mm/ano}^2$  corresponde a “a” na Equação 6.3. No entanto o valor de aceleração utilizado no modelo é a segunda derivada de um polinómio de segundo grau, como se apresenta na Equação 6.4:

$$(ax^2 + bx + c)'' = (2ax + b)' = 2a \quad \text{(Equação 6.4)}$$

De acordo com esta equação, o valor de aceleração a considerar será de  $0.158 \text{ mm/ano}^2$ .

A taxa de subida do NMM inicial tem de referir-se ao ano de 2016, pelo que é necessário calculá-la (considerando a aceleração de  $0,158 \text{ mm/ano}^2$ ), acrescentando ao valor em 2000 o valor da aceleração multiplicado pelo número de anos decorrentes entre 2000 e 2016:

$$Taxa_{2016} = 2.1 + 0.158 \times 16 = 4.628 \text{ mm/ano}$$

Em suma, neste cenário considera-se uma taxa inicial de  $4.628 \text{ mm/ano}$  e uma aceleração de  $0.158 \text{ mm/ano}^2$ .

### 6.3.3. NOAA (2017)

O último cenário utilizado nesta dissertação é proposto pela NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*), organização integrada no Departamento de Comércio dos Estados Unidos que tem três objetivos fundamentais (<http://www.noaa.gov/about-our-agency>, acessado a 18 de abril de 2017):

- Compreender e prever alterações no clima, meteorologia, oceano e costa;
- Partilhar informação e conhecimento;
- Conservar ambientes marinhos e costeiros, bem como os seus recursos.

Esta organização publicou, em janeiro de 2017, um relatório técnico que aborda o tema da subida do NMM e que apresenta projeções para períodos alargados (até 2200) (NOAA, 2017). Este relatório apresenta cenários de subida do NMM com o foco direcionado para a proteção de áreas costeiras à inundação e para a preservação de ecossistemas – sendo este um dos motivos para a apresentação de cenários mais catastróficos.

A Figura 6.8 apresenta a evolução do NMM até 2100 de acordo com seis projeções distintas (da menos para a mais gravosa): *Low*, *Intermediate-low*, *Intermediate*, *Intermediate-high*, *High* e *Extreme*. Estas projeções têm como base os RCP, considerando o aumento da temperatura global – no entanto, são estimadas consequências mais desastrosas destes aumentos de temperatura, tendo em conta a missão a que esta entidade se propõe.

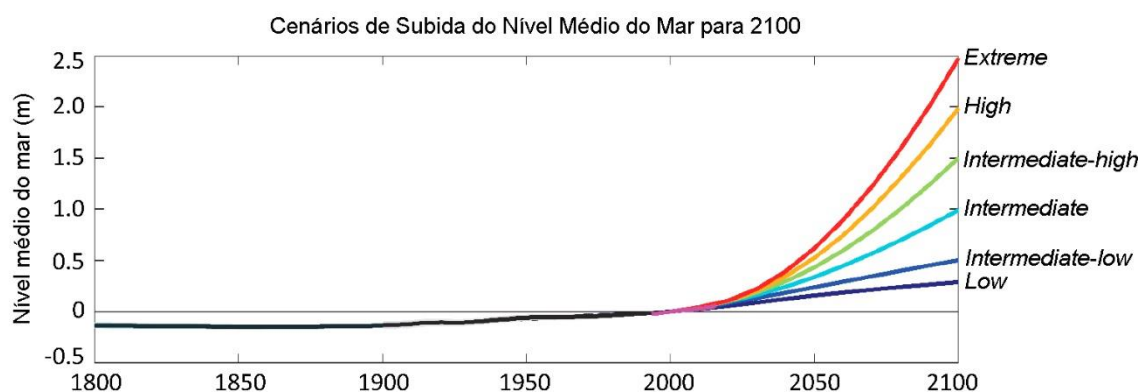


Figura 6.8 - Gráfico com subida do NMM em função do tempo para os diversos cenários apresentados pela NOAA. Os valores são relativos ao ano 2000. Adaptado de NOAA (2017)

Para a utilização no modelo foi selecionado o cenário NOAA *High* que propõe uma subida de 2 m para 2100, assumindo o zero como o NMM no ano 2000. A escolha desta projeção foi motivada pelo seu valor elevado de subida do NMM até ao final do século, sem se afastar demasiado do cenário Antunes (2016), o segundo mais gravoso. Por outro lado, selecionar um cenário mais conservativo iria produzir um resultado semelhante ao que irá ser obtido com as restantes projeções.

Tal como sucedeu nos cenários propostos pelo IPCC, também nesta situação não é disponibilizado um valor inicial de taxa de subida do NMM nem de aceleração, pelo que a solução adotada passou pela realização de um novo exercício de regressão com base nas cotas apresentadas no Anexo 5 e que constam do relatório técnico apresentado por esta entidade. O resultado deste exercício é apresentado na Figura 6.9.

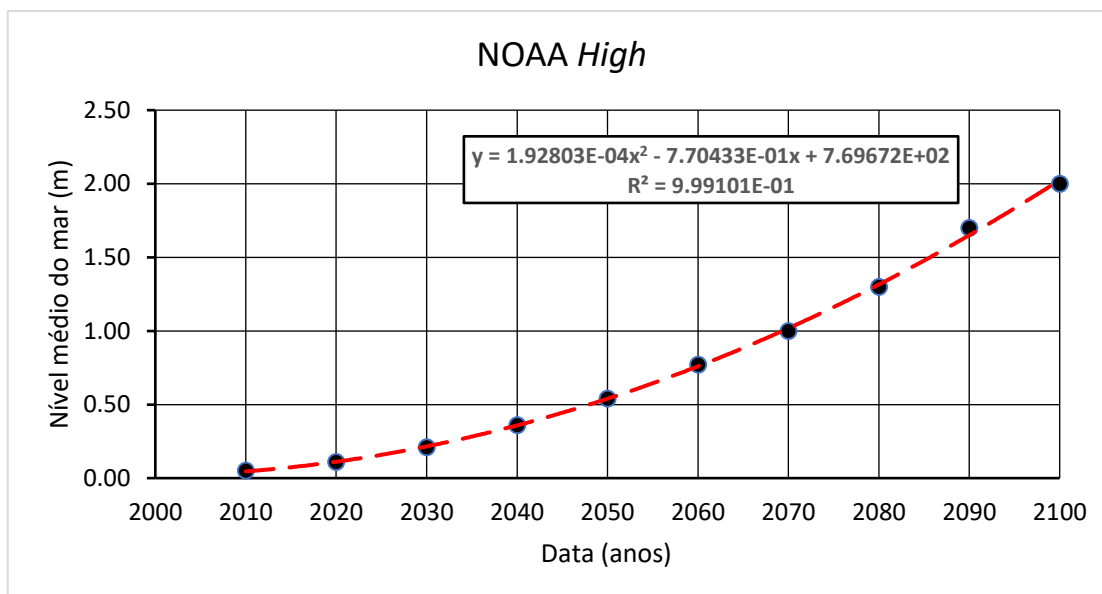


Figura 6.9 - Projeção da posição do NMM no cenário NOAA High em função do tempo com ajuste a um polinómio de 2ª ordem

Para este cenário a curva de melhor ajuste é, tal como no cenário IPCC RCP8.5, um polinómio de segundo grau, pois é neste caso que se obtém um  $R^2$  mais próximo de 1 ( $R^2 = 0.9991$ ). A curva de regressão pode ser expressa pela Equação 6.5:

$$y = 1.92803 \times 10^{-4} x^2 - 7.70433 \times 10^{-1} x + 7.69672 \times 10^2 \quad (\text{Equação 6.5})$$

A partir da Equação 6.5 é possível obter a taxa de subida anual do nível do mar, procedendo ao cálculo da sua derivada:

$$\begin{aligned} (1.92803 \times 10^{-4} x^2 - 7.70433 \times 10^{-1} x + 7.69672 \times 10^2)' &= \\ &= 3.8561 \times 10^{-4} x - 7.70433 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

Mais uma vez, para se obter a taxa inicial de subida do nível do mar, basta substituir o  $x$  pelo ano pretendido (2016) na Equação 6.5:

$$\text{Taxa}_{2016} = 3.8561 \times 10^{-4} \times 2016 - 7.70433 \times 10^{-1} = 0.00695 \text{ m/ano} = 6.950 \text{ mm/ano}$$

Para se obter um valor de aceleração é necessário, tal como no cenário anterior, calcular a segunda derivada da expressão inicial:

$$\begin{aligned} \text{Aceleração} &= (1.92803 \times 10^{-4} x^2 - 7.70433 \times 10^{-1} x + 7.69672 \times 10^2)'' = \\ &= (3.8561 \times 10^{-4} x - 7.70433 \times 10^{-1})' = \\ &= 3.8561 \times 10^{-4} \text{ m/ano}^2 = 0.3856 \text{ mm/ano}^2 \end{aligned}$$

Para introdução no modelo considera-se que este cenário tem uma taxa inicial de subida do NMM de 6.950 mm/ano e uma aceleração constante de 0.3856 mm/ano<sup>2</sup>.

### 6.3.4. Outros cenários de subida do NMM

A utilização de um maior número de cenários de subida do NMM permite, naturalmente, aumentar a quantidade de projeções daquilo que poderá ser a resposta da área de estudo a esta consequência das alterações climáticas.

O IPCC (2013) propõe dois cenários que não foram abordados nesta dissertação: RCP4.5 e RCP6.0; para além disso, também a NOAA (2017) propõe diversos cenários com diferentes níveis de gravidade. O cenário mais gravoso proposto pela NOAA (2017) não foi considerado por se afastar demasiado das projeções já consideradas. Por outro lado, os restantes cenários propostos por estas duas entidades deverão produzir resultados semelhantes aos obtidos com os restantes cenários, não tendo por isso sido considerados.

No entanto, há algumas publicações que devem ser referenciadas como interessantes para obter resultados no modelo de evolução morfológica do sapal. Destaca-se a projeção proposta por Jevrejeva *et al.* (2014) que tem como princípio o cenário IPCC RCP8.5 abordado nesta dissertação, mas explora as suas incertezas, de modo a compreender qual o limite de subida do NMM que este cenário pode, na realidade, significar. Assim, estes autores referem que existe uma probabilidade de 5 % de ser excedida uma subida de 180 cm do nível do mar até 2100 – um valor inferior aos valores mais catastróficos propostos no relatório da NOAA (em particular do NOAA *High*, abordado nesta dissertação), mas consideravelmente superior ao cenário IPCC RCP8.5.

No entanto, esta publicação não inclui valores para uma taxa inicial e aceleração, nem mesmo posições do nível do mar ao longo do século, para que se pudesse aproximar o seu comportamento a uma equação de 2º grau, motivo pelo qual este cenário não foi incluído nos resultados.

Rahmstorf (2007) aborda esta questão com projeções semi-empíricas que são frequentemente comparadas com os cenários que têm vindo a ser apresentados pelo IPCC, mas tal como na situação anterior, não são disponibilizados dados suficientes para a incorporação no modelo morfológico.

### 6.3.5. Nivelamento e comparação de cenários

#### 6.3.5.1. Nivelamento

O datum altimétrico de referência em Portugal continental (NMM1938) foi estabelecido a partir de observações do nível do mar registadas no antigo marégrafo de Cascais entre 1882 e 1938.

Como é natural, o nível do mar há quase oitenta anos era inferior ao atual e, por isso, existe a necessidade de compreender qual o ponto de partida para os cenários de subida do NMM aplicados atualmente. Antunes (2016) tem monitorizado a subida do nível do mar em Portugal continental, observando registos do marégrafo de Cascais e, com base nestes registos, é possível concluir que o NMM encontra-se, atualmente, a cerca de 18 cm acima do zero altimétrico definido em 1938 - Figura 6.7.

Com o objetivo de aplicar os cenários de subida à área de estudo é fundamental posicionar todos os cenários apresentados por entidades estrangeiras de acordo com o NMM de Portugal continental. Por exemplo, os cenários IPCC RCP2.6 e IPCC RCP8.5 apresentam valores de subida do NMM relativamente à média de observações entre 1986 e 2005, ao passo que o cenário NOAA *High* apresenta valores de subida em relação ao ano 2000. O resultado deste alinhamento de cenários pode ser observado na Figura 6.10, onde se comparam os resultados finais de subida do nível do mar.

### 6.3.5.2. Resumo e comparação de cenários

A Tabela 6.2 reúne os valores de taxas de subida do NMM e aceleração para cada cenário considerado. Estes valores serão introduzidos no modelo numérico, através das Equações 6.6 e 6.7, para o cálculo da taxa de subida e da posição do NMM em cada ano, respetivamente.

Tabela 6.2 - Compilação de taxas de subida do NMM para 2016 e aceleração para os quatro cenários estudados

Cenário	Taxa inicial (2016) (m/ano)	Aceleração (m/ano <sup>2</sup> )
<b>IPCC RCP2.6</b>	$4.463 \times 10^{-3}$	0
<b>IPCC RCP8.5</b>	$3.950 \times 10^{-3}$	$9.699 \times 10^{-5}$
<b>Antunes (2016)</b>	$4.628 \times 10^{-3}$	$1.580 \times 10^{-4}$
<b>NOAA High</b>	$6.950 \times 10^{-3}$	$3.856 \times 10^{-4}$

$$Taxa_{(t)} = Taxa_{(2016)} + A \times (t - 2016) \quad \text{(Equação 6.6)}$$

$$NMM_{(t)} = NMM_{(t-1)} + Taxa_{(t)} \quad \text{(Equação 6.7)}$$

*t* – Ano

*Taxa<sub>(t)</sub>* – Taxa de subida do NMM no ano *t* (m/ano)

*A* – Aceleração (m/ano<sup>2</sup>)

*NMM<sub>(t)</sub>* – Nível médio do mar (m)

Considerando uma cota para o NMM, em 2016, superior ao zero altimétrico em 18 cm, é possível projetar todos os cenários considerados, tendo o mesmo nível como ponto de partida.

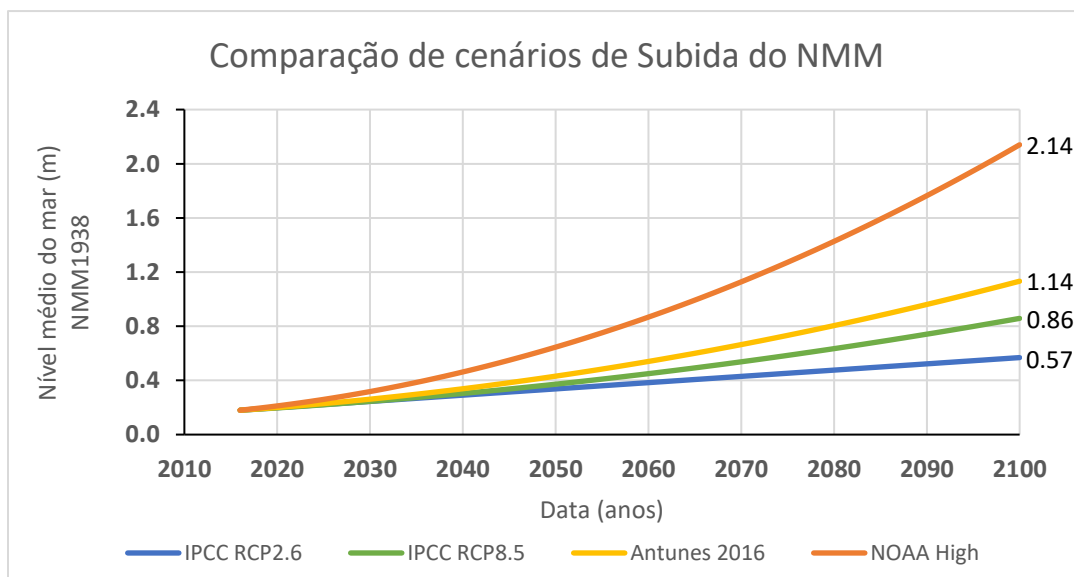


Figura 6.10 - Variação do NMM em função do tempo para os quatro cenários estudados, considerando, para todos os cenários, o NMM 18 cm acima do zero altimétrico em 2016

Os cenários apresentados na Figura 6.10 podem dividir-se em dois tipos: uniforme e acelerado. O RCP2.6 é o único que apresenta uma taxa de subida do NMM constante, enquanto os restantes são acelerados. Como resultado, este cenário mantém um valor de subida próximo do IPCC RCP8.5 e mesmo do cenário proposto por Antunes (2016) até 2050. No entanto, na segunda metade do século o efeito da aceleração potencia o seu distanciamento – resultando, para 2100, num NMM apenas 57 cm acima do zero altimétrico (NMM1938). Por outro lado, considerar uma aceleração  $0.3856 \text{ mm/ano}^2$  no cenário NOAA *High* faz com que este comece a manifestar diferenças em relação aos restantes cenários ainda durante a primeira metade do século XXI.

Outro ponto que deve ser notado é o facto da taxa de subida inicial ser da mesma magnitude nos cenários do IPCC e em Antunes (2016), sendo o resultado final diferente apenas pelo efeito da aceleração.

Para 2100, para além das diferenças quanto à posição do NMM, é possível antever comportamentos distintos nos anos seguintes, resultado da taxa de subida que estará associada a cada cenário nessa data. O IPCC RCP2.6 irá manter a taxa de 4.6 mm/ano em 2100, enquanto no IPCC RCP8.5 a taxa em 2100 poderá ser de 12.1 mm/ano e em Antunes (2016) de 18.1 mm/ano. A situação mais alarmante é sugerida pelo cenário NOAA *High*, onde a taxa de subida poderá situar-se em 37.6 mm/ano – um valor que poderá ser suficientemente elevado para poder ser observado no campo e que será, naturalmente, catastrófico para a manutenção e equilíbrio de áreas húmidas como os sapais.

Estas diferenças entre os diversos cenários fazem antever uma forte influência da velocidade de subida do NMM para o processo de modelação do sapal para as próximas décadas.

## 6.4. Taxas de sedimentação

A evolução da sedimentação de um sapal pode ser quantificada pela sua taxa de sedimentação, cuja definição pode ser expressa pela espessura de sedimento que é depositada num local, num determinado intervalo temporal – valor que é normalmente expresso em mm/ano ou, nos casos em que a taxa é elevada, cm/ano.

Existem diversos métodos para obter taxas de sedimentação para um determinado local, os quais têm o nome de marcadores temporais e que consistem em encontrar pelo menos duas cotas às quais seja possível atribuir uma data – tendo em consideração que a cota da superfície serve como datação para o presente.

Os marcadores temporais de aplicação direta no terreno mais utilizados são estacas, pó de tijolo e armadilhas sedimentares. Na prática, estes métodos consistem em introduzir um marcador no ambiente que permita, a partir da data de instalação, medir qual a espessura de sedimento que se depositou, fazendo medições regulares. Uma estaca introduzida no terreno, desde que marcada, permite averiguar o nível do sedimento acima da marca realizada. Quanto ao pó de tijolo, consiste em espalhar pó corado no terreno, esperar que ocorra sedimentação por cima desse pó e, ao realizar uma sondagem no local, observar a espessura de sedimento depositada desde a colocação do marcador. A utilização de armadilhas sedimentares deve ter em consideração a livre circulação do sedimento, ou seja, esta deve permitir a deposição de sedimento no seu interior, mas não o seu aprisionamento forçado, de modo a não enviesar o resultado e sobrestimar a taxa de sedimentação.

Em todos eles é possível obter duas datas: a da colocação do marcador e a data da última leitura, tipicamente associada à superfície topográfica. Estes marcadores são normalmente utilizados para obter taxas de sedimentação em períodos de tempo relativamente curtos, da ordem de alguns anos.

Existem outros marcadores menos convencionais que podem ser utilizados, ainda que normalmente não sejam introduzidos intencionalmente. A presença de fragmentos plásticos, cordas ou outros objetos de origem antropogénica que sejam passíveis de datar, podem servir como marcadores temporais.

Para além destes, podem ainda ser utilizados métodos de datação associados a isótopos, com particular destaque para a combinação dos isótopos  $^{210}\text{Pb}/^{137}\text{Cs}$  – note-se que estes métodos só são úteis para intervalos de tempo curtos, tipicamente limitados a 120 anos. Para intervalos temporais mais longos, e na impossibilidade de utilizar o método anteriormente referido, pode ser realizada uma datação com o isótopo  $^{14}\text{C}$ , normalmente para a base da sondagem, admitindo uma taxa de sedimentação regular média até à superfície topográfica – metodologia que pode revelar-se menos vantajosa num estudo como este.

No capítulo 5, ao apresentar os dados de entrada necessários para a execução do modelo, referiu-se que seriam necessárias três taxas de sedimentação adequadas aos três subambientes presentes: alto sapal, baixo sapal e raso de maré. No entanto, durante a elaboração desta dissertação de mestrado, apenas foi possível apurar taxas de sedimentação locais para o baixo sapal (através do da análise isotópica da sondagem CTBS1).

### 6.4.1. Sondagem CTBS1

A análise da atividade isotópica do  $^{210}\text{Pb}$  e  $^{137}\text{Cs}$ , quando interpretadas em conjunto, permite estimar taxas de sedimentação médias para as últimas décadas adequadas ao baixo sapal, pois a sondagem CTBS1 foi recolhida neste ambiente. A Figura 6.11 (a) e (b) mostra a variação da atividade de  $^{210}\text{Pb}$  total e do  $^{210}\text{Pb}$  não suportado – os valores utilizados para a construção dos gráficos encontram-se no Anexo 6.

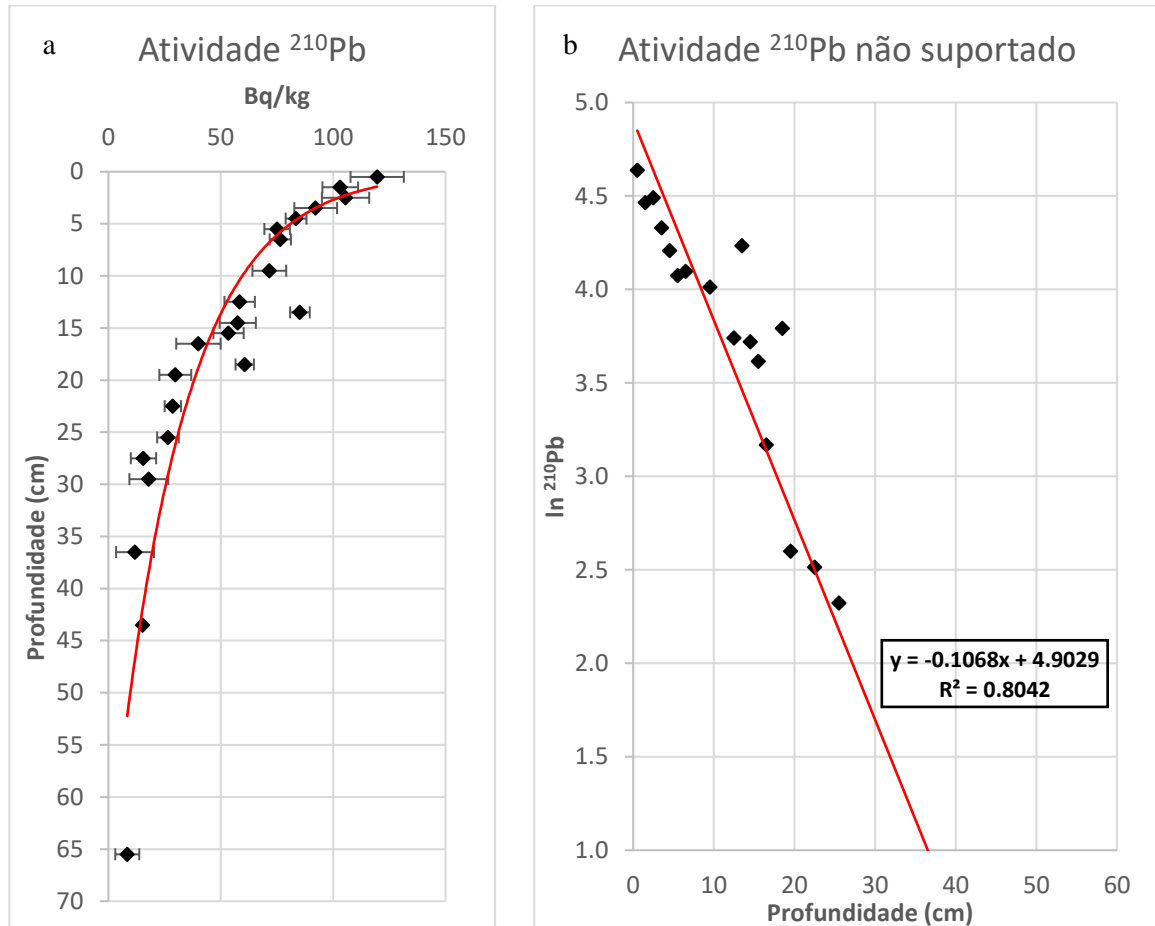


Figura 6.11 - (a) Variação da atividade de  $^{210}\text{Pb}$  em função da profundidade; (b) variação do logaritmo natural de  $^{210}\text{Pb}$  não suportado com a profundidade e reta de regressão linear

Estão, finalmente, reunidos os dados necessários para a aplicação da Equação 4.2, de modo a determinar a taxa de sedimentação média relativa à sondagem CTBS1:

$$r = \frac{\lambda}{a} = \frac{0.03118}{0.1068} = 0.292 \text{ cm/ano} = 2.92 \text{ mm/ano}$$

A Figura 6.12 mostra a variação da atividade do isótopo  $^{137}\text{Cs}$  em profundidade com a associação das seguintes datas prováveis (valores utilizados disponíveis no Anexo 6):

1. 1954 (29.5 cm): Início dos testes termonucleares;
2. 1963 (16.5 cm): Máximo de testes nucleares;
3. 1986 (2.5 cm): Acidente nuclear de Chernobyl;
4. 2016 (0.0 cm): Recolha da sondagem CTBS1.

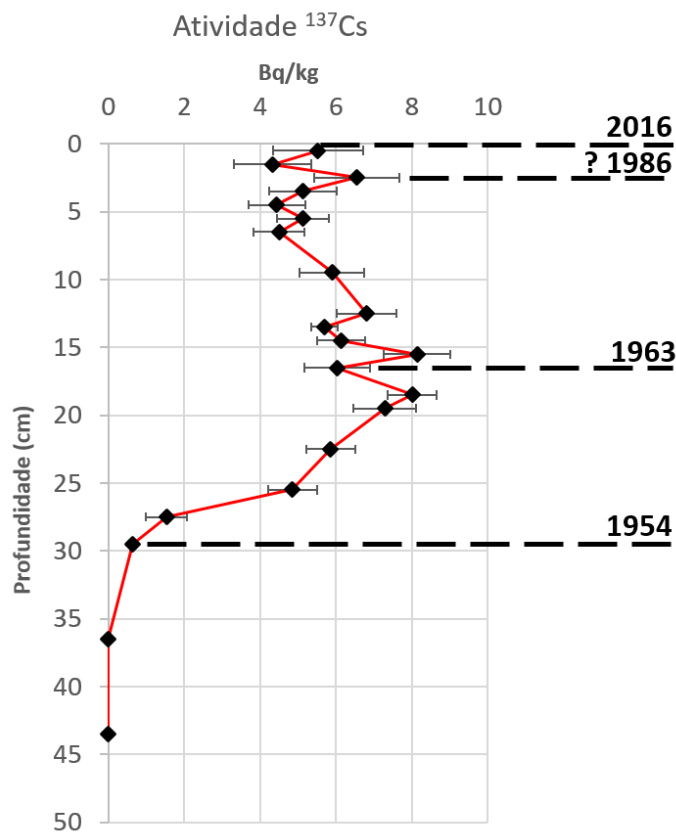


Figura 6.12 - Variação da atividade de  $^{137}\text{Cs}$  em função da profundidade com a data no topo e profundidades prováveis para 1954, 1963 e 1986

1963 deverá corresponder, teoricamente, ao pico de maior atividade de  $^{137}\text{Cs}$ . No entanto, é provável que este pico não esteja representado na variação da atividade deste isótopo, como consequência da incorporação de sedimento mais antigo. Esta hipótese foi avançada pelo facto de, à mesma profundidade, serem identificados pontos de atividade de  $^{210}\text{Pb}$  mais baixas do que o expectável (Figura 6.11) e que correspondem a um desvio em relação à curva exponencial adaptada à distribuição de atividade em função da profundidade. Por isso, foi considerado um valor médio entre os dois pontos com maior atividade do isótopo  $^{137}\text{Cs}$ .

A identificação do pico de atividade correspondente ao acidente nuclear de Chernobyl deve ser encarada com precaução, pois o elevado erro associado à medição ( $\pm 1.131 \text{ Bq/kg}$ ) da atividade a esta profundidade poderá levar a uma interpretação errada.

Se se tomarem como certos os picos de atividade nuclear identificados, é possível calcular taxas de sedimentação de acordo com a Equação 6.8. Os resultados do cálculo das taxas de sedimentação entre cada data e o topo da sondagem encontram-se expressos na Tabela 6.3.

$$\text{Taxa de sedimentação} = \frac{\text{Espessura de sedimento}}{\text{Intervalo temporal}} \quad (\text{Equação 6.8})$$

Tabela 6.3 - Taxas de sedimentação com base nos picos de atividade nuclear identificados na projeção da atividade do isótopo  $^{137}\text{Cs}$  em função da profundidade

<b>Intervalo (anos)</b>	<b>Espessura de sedimento (mm)</b>	<b>Taxa de sedimentação (mm/ano)</b>
1954 – 2016	295	4.73
1963 – 2016	165	3.11
1986 – 2016	25	0.83

Note-se que seria válido calcular as taxas de sedimentação para intervalos que não envolvam a superfície da sondagem (ex. 1954 a 1963), no entanto, os resultados obtidos não são consistentes com os anteriormente apresentados. No intervalo entre 1954 a 1963 estão contidos 130 mm de sedimento, resultando numa taxa de sedimentação de 14.4 mm/ano; no intervalo entre 1963 e 1986 estão contidos 140 mm de sedimento, resultando numa taxa de sedimentação de 6.1 mm/ano.

Os resultados obtidos pela análise de  $^{137}\text{Cs}$  são muito variáveis com a profundidade considerada, pelo que se optou por considerar o valor de taxa obtida com a análise de  $^{210}\text{Pb}$ : 2.92 mm/ano – o valor mais aproximado deste na análise de  $^{137}\text{Cs}$  foi com o intervalo 1963-2016 (3.11 mm/ano).

#### 6.4.2. Alto sapal e raso de maré

Não foi possível realizar análises da atividade isotópica de  $^{210}\text{Pb}$  e  $^{137}\text{Cs}$  para o alto sapal e raso de maré em tempo útil, pelo que se optou por utilizar taxas de sedimentação disponíveis na bibliografia.

Freitas et al. (2008) apresentaram um estudo sobre a influência antrópica do ponto de vista geoquímico em vários sapais do estuário do Sado, onde determinaram, entre outros parâmetros, taxas de sedimentação com base na análise da atividade de  $^{210}\text{Pb}$  e  $^{137}\text{Cs}$ .

Estes autores propõem, para o alto sapal da Malha da Costa (localizado na margem estuarina da restinga de Tróia, a 9 km da área em estudo – Figura 6.13), taxas de sedimentação de 3.4 mm/ano pela análise de  $^{210}\text{Pb}$  e de 3.8 mm/ano (1954 – 2003) e 2.9 mm/ano (1963 – 2003) pela análise de  $^{137}\text{Cs}$  – valores semelhantes ou ligeiramente mais elevados do que os obtidos na análise da sondagem CTBS1.



Figura 6.13 - Localização do sapal da Malha da Costa em relação à área em estudo

O alto sapal encontra-se a cotas mais elevadas do que o baixo sapal, tendo como consequência um tempo de submersão anual consideravelmente inferior e uma taxa de sedimentação que, no mínimo, não será superior à de baixo sapal. Por isso, considerou-se uma taxa de sedimentação para o alto sapal próxima da taxa obtida para o baixo sapal na sondagem CTBS1: 2.90 mm/ano.

Por oposição, o raso de maré terá tempos de submersão anuais mais elevados do que os dois ambientes anteriormente referidos, por isso é expectável que a sua taxa de sedimentação seja também superior. Por falta de informação bibliográfica sobre taxas de sedimentação no raso de maré, optou-se por considerar uma taxa de sedimentação média anual superior em duas vezes à obtida para a sondagem CTBS1: 5.84 mm/ano.

A Tabela 6.4 reúne os valores de taxas de sedimentação utilizadas para cada subambiente estudado e correspondem aos valores a introduzir na execução do modelo de evolução morfológica do sapal.

Tabela 6.4 - Taxas de sedimentação consideradas para cada subambiente da Caldeira de Tróia

Taxa de sedimentação (mm/ano)		
Raso de maré	Baixo sapal	Alto sapal
5.84	2.92	2.90



---

# 7. EVOLUÇÃO DO SAPAL

---

A apresentação dos resultados da evolução do sapal do setor norte da Caldeira de Tróia está dividida em cinco subcapítulos: o primeiro relativo à morfologia atual e os restantes relativos à morfologia e comportamento que o sapal pode ter no futuro com cada cenário de subida do NMM. Esta organização em cenários foi escolhida por este ser o único parâmetro variável, sendo os restantes invariáveis no ponto de partida.

## 7.1. Morfologia atual

A utilização de um MDT permite realizar as operações de modelação com elevada resolução horizontal e apresentar resultados desse processo. No entanto, de modo a poder comparar os resultados obtidos, é necessário caracterizar a situação atual desta mancha de sapal, de modo a padronizar todas as comparações – ou seja, garantir que os resultados apresentados (em particular as variações) são comparados com a morfologia atual, quando obtida pelo mesmo método. Assim, a Figura 7.1 apresenta a distribuição das áreas de alto sapal, baixo sapal e raso de maré do sapal do setor norte da Caldeira de Tróia, tendo como base altimétrica o mesmo MDT e limites de transição utilizados no processo de modelação (cotas de maré).

É importante ter em consideração que a utilização de um MDT tem limitações na representação da superfície do sapal, pois apesar da sua resolução horizontal ser elevada (2 m), não é suficiente para considerar todas as variações de cota presentes. O exemplo mais flagrante é a identificação de canais, estrutura típica de sapais e rasos de maré e cuja largura é invariavelmente inferior a 2 m. Como consequência, é identificada uma mancha de baixo sapal na zona NE do sapal que corresponde, na realidade, a alto sapal com uma elevada densidade de canais que, por não terem uma largura compatível com a resolução do MDT, são interpretados como quadrados com 2 m de lado com cotas mais baixas do que as reais.

Importa referir que todas as projeções para o futuro são realizadas com base no ponto de partida apresentado na Figura 7.1, o que poderá minimizar o erro nos exercícios de comparação. No entanto, em trabalhos futuros pretende-se delimitar manualmente as zonas com elevada densidade de canais, de modo a que estas não sejam identificadas erradamente como baixo sapal.

### Sapal C. Tróia (N)

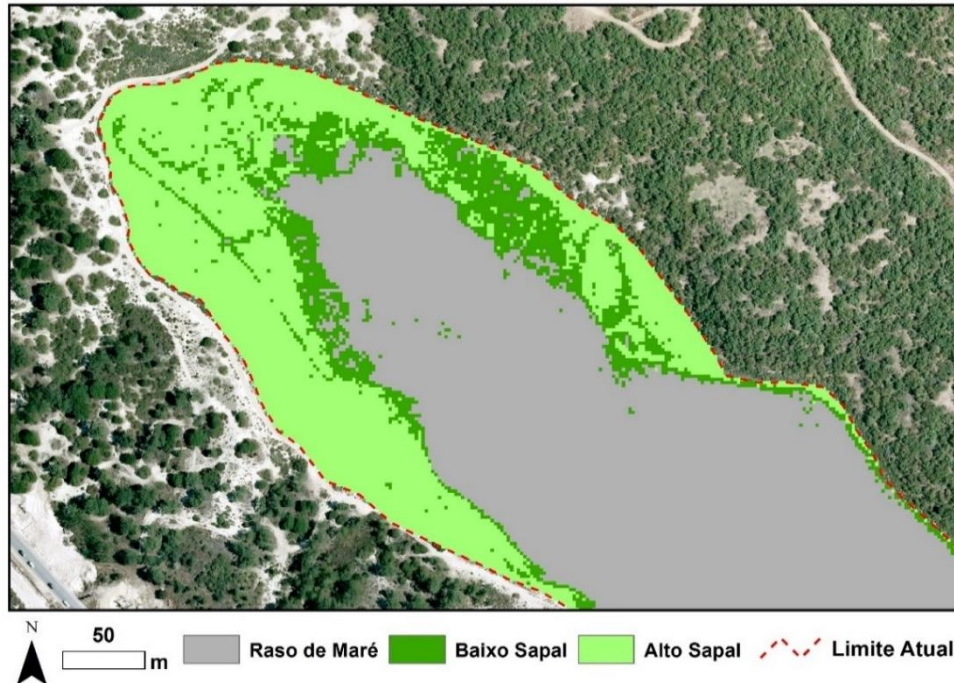


Figura 7.1 - Configuração atual do sapal do setor norte da Caldeira de Tróia com base no MDT e nos limites de maré

O sapal do setor norte da Caldeira de Tróia apresenta uma área total de cerca de 41 000 m<sup>2</sup>, dos quais 30 000 m<sup>2</sup> são classificados como alto sapal (73 %) e 11 000 m<sup>2</sup>, como baixo sapal (27 %), resultando num rácio AS/BS de 2.79. Apesar de se tratar de um sapal com uma área moderada, apresenta um nível de maturidade bastante elevado, com uma superfície de alto sapal muito superior à de baixo sapal.

De modo a identificar zonas onde a expansão do sapal poderá estar limitada, foi construído um mapa de declives com base no MDT, que pode ser observado na Figura 7.2. O facto de um sapal ser, por definição, um ambiente pouco inclinado, faz com que as zonas de maior declive sejam uma limitação natural à sua expansão.

O sapal da área em estudo encontra-se rodeado por dunas responsáveis pelas manchas de maior declive identificadas na Figura 7.2. Com esta configuração é expectável que o sapal possa expandir-se, nas zonas de menor declive, destacando-se uma clareira a norte e outra a sudoeste da área em estudo. Por outro lado, as zonas de declive mais elevado destacadas a nordeste e a oeste são limitações naturais à sua expansão.

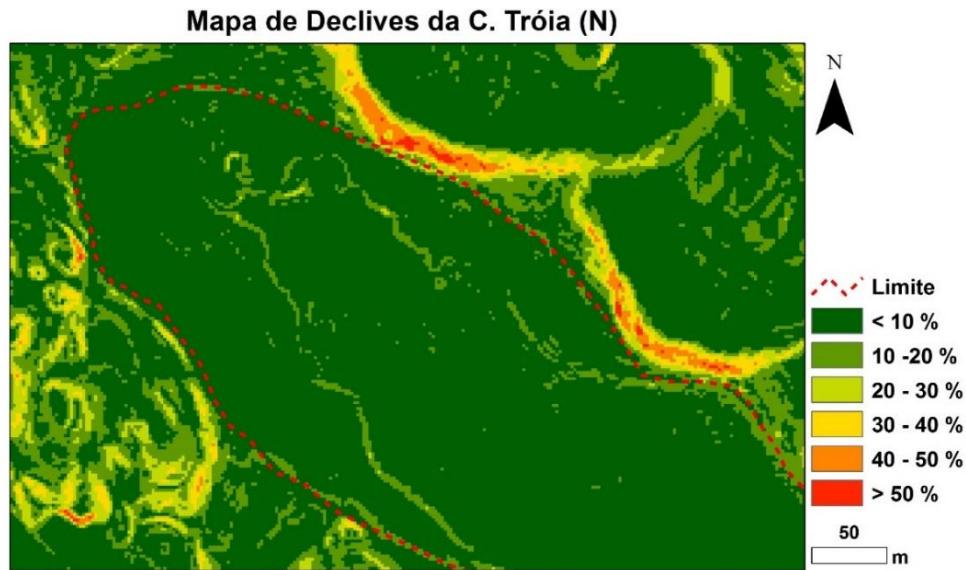


Figura 7.2 - Mapa de declives do sapal do setor norte da Caldeira de Tróia

## 7.2. IPCC RCP2.6

O cenário RCP2.6 proposto pelo IPCC (2013) é o mais conservativo, proposto por esta entidade e o mais conservativo, estudado ao longo desta dissertação. A equação que modela a subida do nível do mar neste cenário aproxima-se de uma função linear e, portanto, considera uma aceleração nula.

Em primeiro lugar, optou-se por comparar a evolução da superfície média do sapal com a subida do NMM. Para isso, como ponto de partida foram utilizadas as cotas médias de alto e baixo sapal extraídas do MDT (Anexo 2) – 1.43 m e 1.00 m, respetivamente. A cada uma destas cotas foi incrementado o valor de taxa de sedimentação, tendo em consideração que sempre que a superfície média intersejar um nível de maré e transitar para outro subambiente, passa a ser aplicada a taxa de sedimentação correspondente. Aos níveis de maré foram igualmente acrescentados os valores de subida do NMM para cada ano. O resultado encontra-se na Figura 7.3.

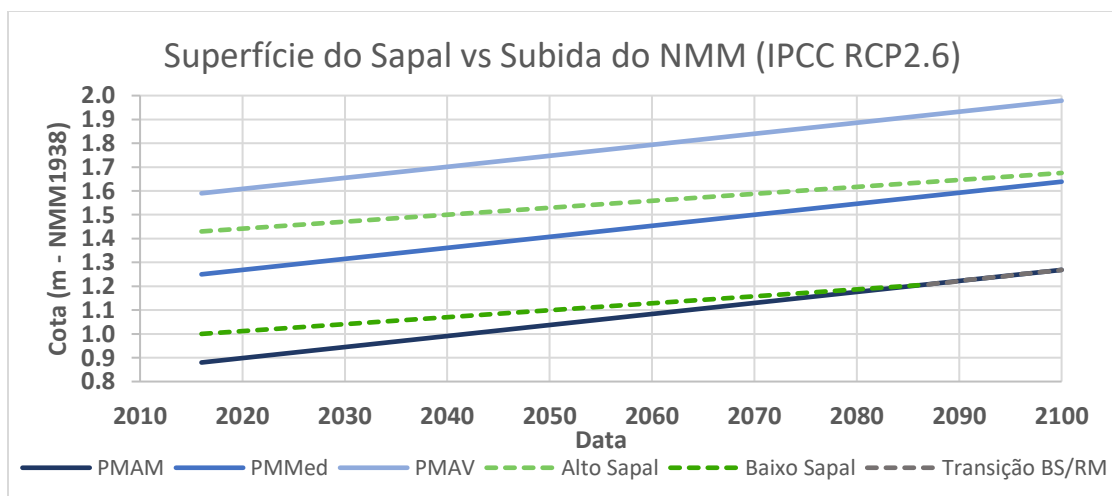


Figura 7.3 - Comparação entre a evolução da superfície média de alto e baixo sapal e os limites de maré com base no cenário de subida do NMM IPCC RCP2.6

A superfície média de alto sapal, por se encontrar mais próxima do limite de crescimento do sapal do que do limite de transição entre o alto sapal e baixo sapal, tem a capacidade de manter-se dentro da amplitude entre o PMAV e o PMMed, ainda que se observe uma clara aproximação do limite de transição inferior e, por isso, uma clara tendência para passar a baixo sapal.

A cota média atual de baixo sapal, pela proximidade com o limite de transição inferior, acaba por intersejar o PMAM e, por isso, mostrar incapacidade de acompanhar a subida do NMM. No entanto, pelo facto da taxa de sedimentação considerada para o baixo sapal ser consideravelmente mais elevada do que as taxas para o sapal, a superfície média mantém-se num estado de transição entre estes dois subambientes, não sendo claro se a superfície que é atualmente baixo sapal passará a raso de maré.

Tendo como base o modelo de evolução morfológica apresentado no capítulo 5 e os parâmetros do capítulo 6 (em particular o cenário IPCC RCP2.6), foi elaborado um gráfico com a evolução das áreas de baixo e alto sapal em função do tempo, bem como do Rácio AS/BS – Figura 7.4 (informação complementar no Anexo 7).

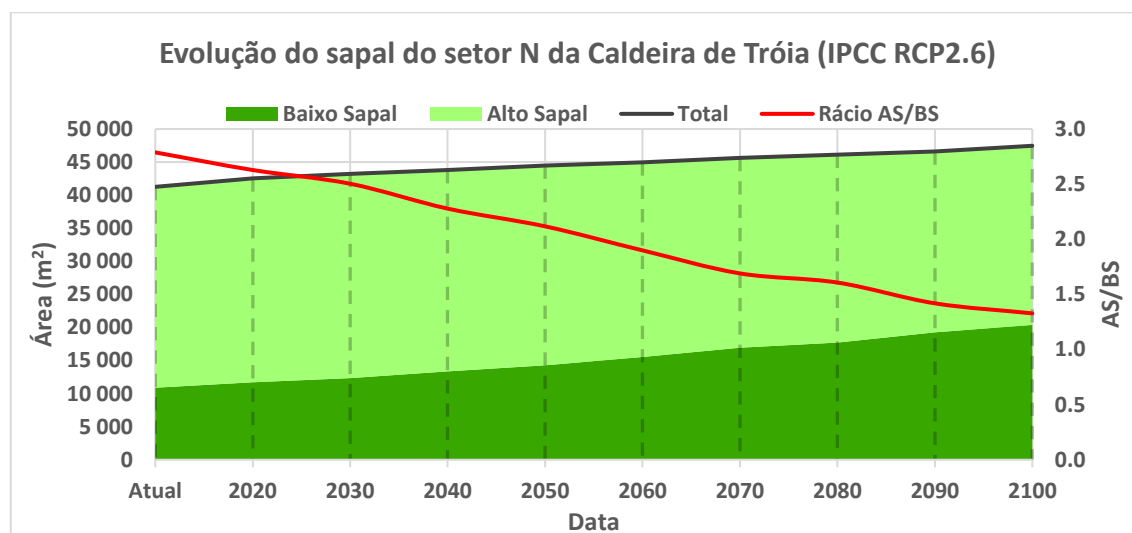


Figura 7.4 - Evolução do sapal da C. Tróia (N) utilizando o cenário de subida do NMM IPCC RCP2.6

O sistema apresenta uma evolução linear e a área total de sapal no final do século, poderá ser de, aproximadamente, 47 500 m<sup>2</sup>, um valor 15 % superior ao atual e que representa um incremento de área variável entre 1 e 2 % por década (3 % para 2020).

No entanto, apesar da aparente elevada resiliência do sapal neste cenário, o rácio AS/BS é reduzido em cerca de 50 % até 2100, situando-se em 1.33 (ainda acima do limiar para um sapal maturo). Esta redução do rácio AS/BS pode ser explicada por uma progressiva redução da área de alto sapal para 27 100 m<sup>2</sup> em 2100 (- 11 % do que em 2016) e por um progressivo, mas considerável aumento da área de baixo sapal para a mesma data de referência (20 400 m<sup>2</sup> em 2100; + 87 % do que em 2016).

### 7.2.1. Mapas de referência: 2050 e 2100

A Figura 7.5 e a Figura 7.6 representam a distribuição espacial do alto sapal, baixo sapal e raso de maré para os dois anos de referência estudados: 2050 e 2100, respectivamente.

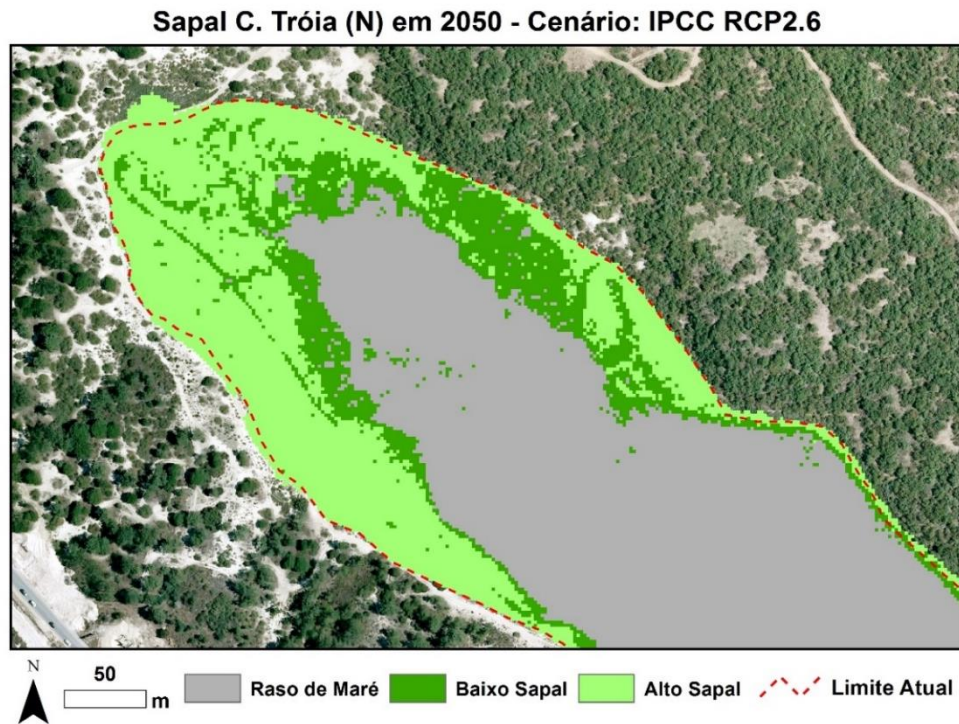


Figura 7.5 - Mapa morfológico do sapal da C. Tróia (N) em 2050, utilizando o cenário de subida do NMM IPCC RCP2.6

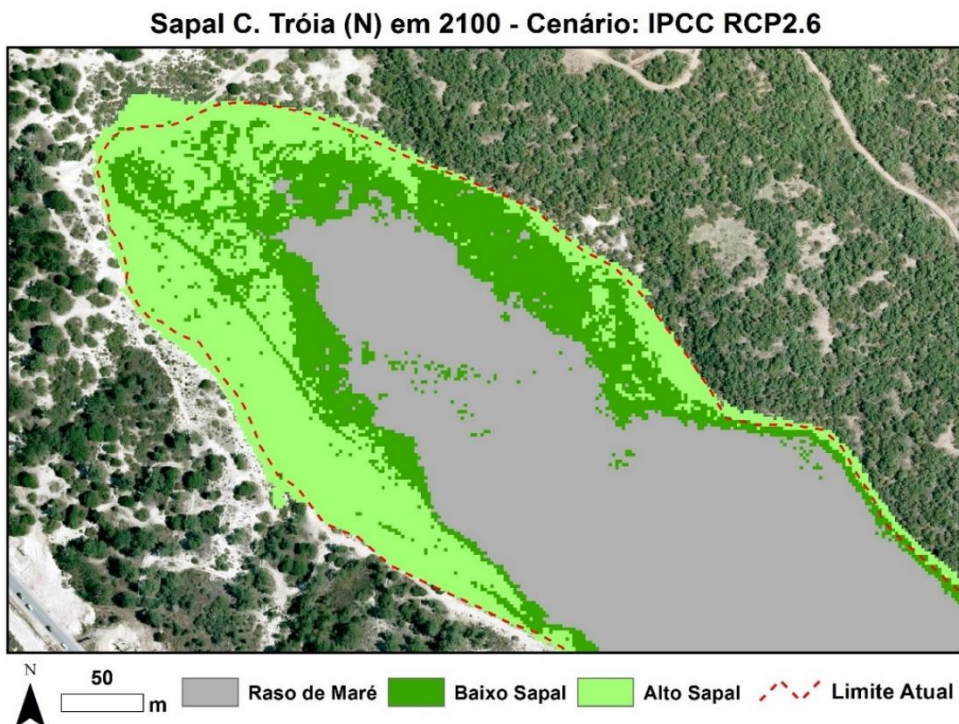


Figura 7.6 - Mapa morfológico do sapal da C. Tróia (N) em 2100, utilizando o cenário de subida do NMM IPCC RCP2.6

Apesar do nível do mar subir ao longo do tempo e a tendência ser a inundação de novas áreas, observa-se que a configuração global e a posição do sapal mantêm-se quase inalteradas em relação à atualidade – facto que pode ser explicado por o cenário IPCC RCP2.6 contemplar valores de subida francamente conservativos. Existe, no entanto, uma ligeira expansão do sapal na clareira a norte, observável em ambas as datas.

A utilização deste cenário permite obter valores muito positivos para o meio do século, sendo a área total de sapal 8 % superior à atual (44 500 m<sup>2</sup>). O rácio AS/BS é reduzido em 24 %, passando para 2.12, valor que pode ser justificado pela forte contribuição do baixo sapal (14 300 m<sup>2</sup>; + 31 % do que em 2016) para a área total, enquanto o alto sapal mantém a sua área praticamente inalterada (30 200 m<sup>2</sup>; - 1 % do que em 2016).

Os valores calculados para o final do século coincidem, naturalmente, com os apresentados na descrição da evolução do sapal até 2100: 47 500 m<sup>2</sup> de área total, 27 000 m<sup>2</sup> de alto sapal e 20 400 m<sup>2</sup> de baixo sapal, resultando em variações de + 15 %, - 11 % e + 87 % em relação a 2016, respetivamente. O rácio AS/BS de 1.33 revela um sapal maturo, mas com um valor 52 % inferior ao atual.

### 7.3. IPCC RCP8.5

O cenário RCP8.5 proposto pelo IPCC (2013) é o mais gravoso proposto por esta entidade e, por isso, é expectável que a capacidade de resposta do sapal a este cenário seja inferior ao que se observou no subcapítulo anterior. O facto de se tratar de um cenário com uma taxa de subida que sofre aceleração ao longo do tempo faz com que o comportamento do sistema possa variar em função do tempo, tornando, por isso, a sua análise mais complexa.

Tal como na análise ao cenário IPCC RCP2.6, foi comparada a evolução da superfície média de alto e baixo sapal em função do tempo, como se observa na Figura 7.7, tendo como base os mesmos pontos de partida (superfície média e nível do mar atuais).

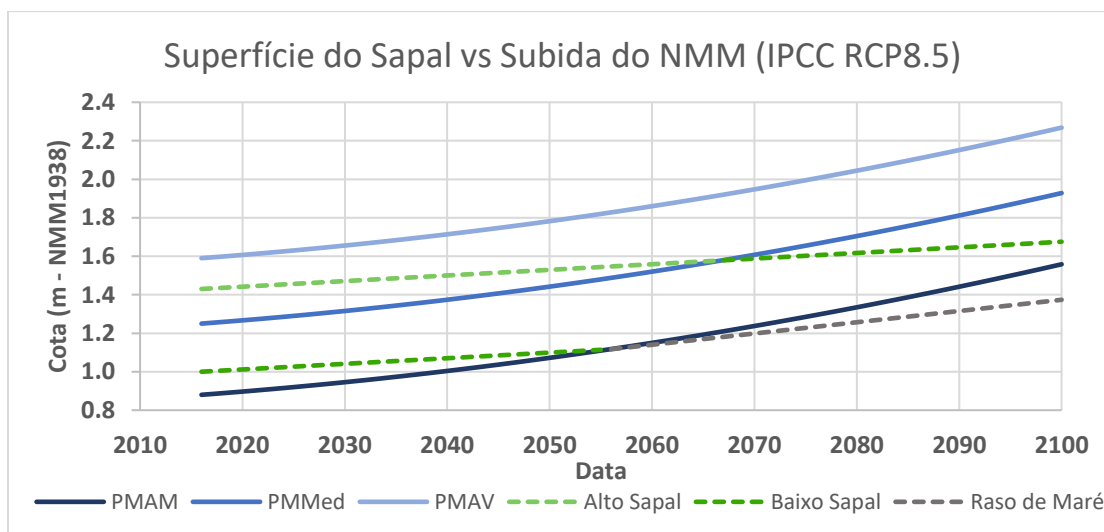


Figura 7.7 - Comparação entre a evolução da superfície média de alto e baixo sapal e os limites de maré com base no cenário de subida do NMM IPCC RCP8.5

Quer a superfície média de alto sapal quer a de baixo sapal acabam por ser intersetadas pelos limites de maré que fazem a transição para os ambientes inferiores – isto ocorre com um desfasamento de aproximadamente 10 anos, com o alto sapal a intersetar o PMMed mais tardiamente. Nenhum dos subambientes do sapal mostra capacidade de acompanhar a subida do NMM durante o século XXI e, ao contrário do cenário considerado anteriormente, nem a taxa de sedimentação associada ao raso de maré é suficiente para manter a superfície que é atualmente baixo sapal a uma cota coincidente com o PMAM. Por outro lado, não é expectável que a superfície que é atualmente alto sapal desapareça por completo até ao final do século XXI, esta deve passar a estar em cotas concordantes com os intervalos de maré considerados para o baixo sapal.

Depois desta abordagem, foram introduzidos no modelo de evolução morfológica os parâmetros iniciais estabelecidos para a área em estudo, incluindo o cenário de subida do NMM IPCC RCP8.5, de modo a gerar mapas da morfologia do sapal para as datas de referência (2050 e 2100), bem como a evolução das áreas de alto e baixo sapal e Rácio AS/BS em função do tempo, como se observa na Figura 7.8 (informação complementar no Anexo 8).

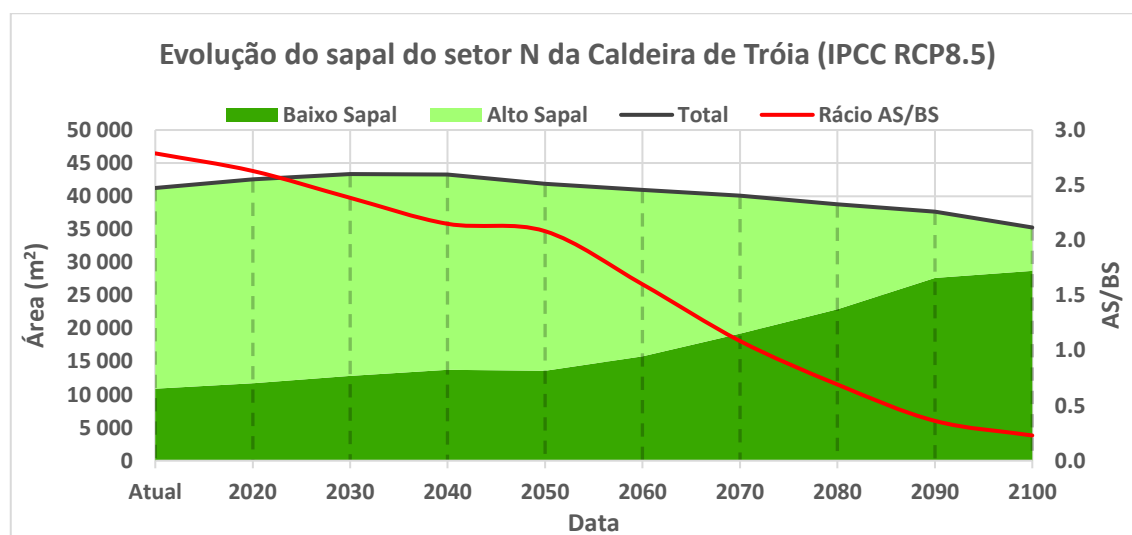


Figura 7.8 - Evolução do sapal da C. Tróia (N) utilizando o cenário de subida do NMM IPCC RCP8.5

Até 2030 haverá um crescimento dos dois subambientes e, consequentemente, da área total (43 300 m<sup>2</sup>; + 5 % do que em 2016). Nesta data, o alto sapal terá uma área ligeiramente superior à atual (30 500 m<sup>2</sup>; + 1 % do que em 2016), enquanto o baixo sapal terá um aumento considerável de área (12 800 m<sup>2</sup>; + 18 % do que em 2016). O rácio AS/BS poderá ser de 2.38 em 2030, um valor 14 % inferior ao atual, o que pode ser explicado por um aumento da área de baixo sapal, mas não por uma submersão do alto sapal.

A partir de 2030 e até ao final do século, o alto sapal vê a sua área reduzida a uma taxa superior à taxa de expansão do baixo sapal, resultando numa redução da área total. A área total será reduzida em 15 % face a 2016 (35 300 m<sup>2</sup>), valor que não é mais do que o peso final da balança entre a influência da submersão do alto sapal (6 600 m<sup>2</sup>; - 78 % do que em 2016) e a expansão do baixo sapal (28 700 m<sup>2</sup>; + 164 % do que em 2016). Ainda que a área total sofra uma variação moderada, a maturidade do sapal ficará extremamente reduzida (0.23; - 92 %), indicando uma dominância quase total do baixo sapal.

### 7.3.1. Mapas de referência: 2050 e 2100

A Figura 7.9 e a Figura 7.10 representam a distribuição espacial do alto sapal, baixo sapal e raso de maré para os dois anos de referência estudados: 2050 e 2100, respectivamente.

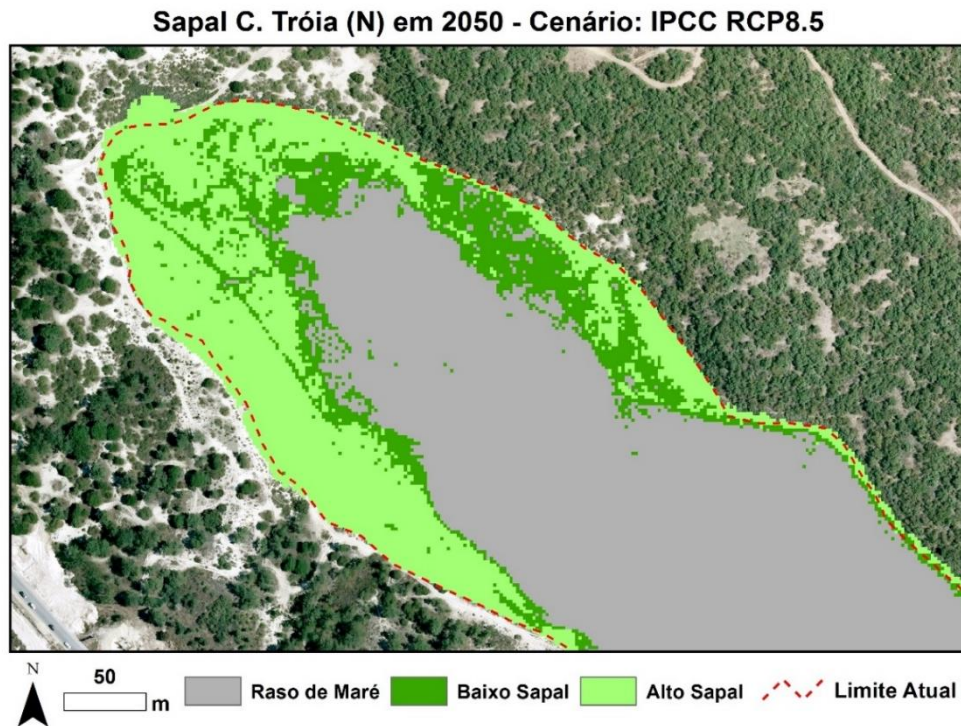


Figura 7.9 - Mapa morfológico do sapal da C. Tróia (N) em 2050, utilizando o cenário de subida do NMM IPCC RCP8.5

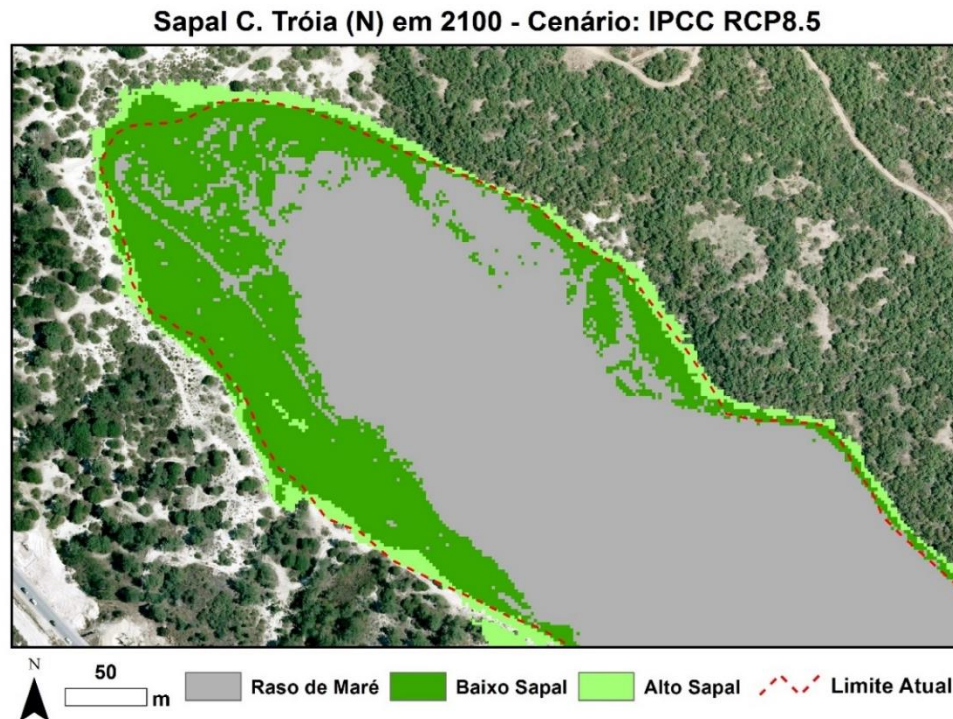


Figura 7.10 - Mapa morfológico do sapal da C. Tróia (N) em 2100, utilizando o cenário de subida do NMM IPCC RCP8.5

A configuração e posição do sapal da área em estudo não deverá sofrer alterações significativas até 2050, ainda que esta seja, provavelmente, a última década em que se observará alguma estabilidade do sistema. A área total estimada será de 41 900 m<sup>2</sup> (+ 2 % do que em 2016), sendo 28 300 m<sup>2</sup> ocupados por alto sapal (- 7 % do que em 2016) e 13 600 m<sup>2</sup> por baixo sapal (+ 25 % do que em 2016). O resultado será um sapal bastante maturo, com um rácio AS/BS de 2.08, valor ainda assim 25 % inferior ao atual.

2100 poderá marcar a área em estudo por uma morfologia um pouco atípica e em que o sapal poderá adquirir uma configuração muito distinta da atual, quer pela forma como os subambientes se distribuem, quer pela colonização de novas áreas, em particular a clareira a norte. A área total deverá ser reduzida em apenas 15 % (35 300 m<sup>2</sup>), mas o rácio AS/BS é de 0.23, um valor extremamente baixo e muito distante de um sapal maturo ou mesmo intermédio. Esta situação pode ser explicada com a passagem da maior parte das manchas de alto sapal para baixo sapal, resultando numa área de apenas 6 600 m<sup>2</sup> para o primeiro ambiente e de 28 700 m<sup>2</sup> para o segundo, valores inferiores em 78 % e superiores em 164 % relativamente a 2016, respetivamente.

## 7.4. Antunes (2016)

O cenário Antunes (2016) é o único cenário local de subida do NMM apresentado, pelo que é expectável que seja o que melhor se adapta às particularidades da área em estudo. Este cenário, apesar de local, é proposto com base em observações do marégrafo de Cascais.

A Figura 7.11 representa a comparação entre a superfície média de alto e baixo sapal em função do tempo, considerando os limites de maré que fazem a transição entre ambientes adaptados ao cenário em estudado.

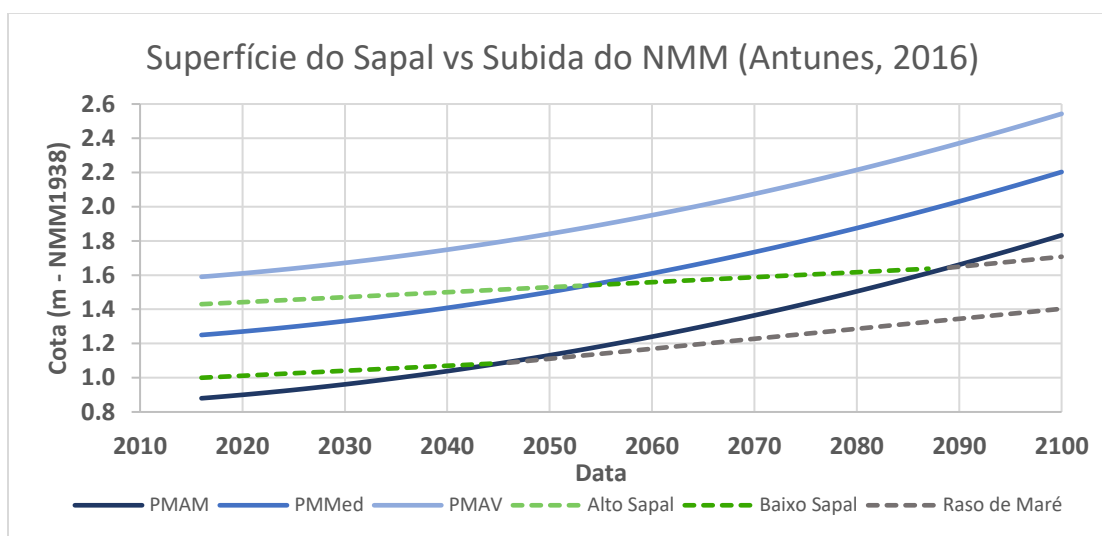


Figura 7.11 - Comparação entre a evolução da superfície média de alto e baixo sapal e os limites de maré com base no cenário de subida do NMM Antunes (2016)

O comportamento da superfície média de cada subambiente é semelhante ao observado com a utilização do cenário IPCC RCP8.5, sendo a maior diferença a velocidade com que a submersão de cada ambiente ocorre (e consequente passagem ao ambiente inferior).

Até pouco depois de meados do século XXI, a superfície média de alto sapal e de baixo sapal já deverão ter transitado para os ambientes inferiores, indicando uma fraca capacidade do sapal de acompanhar a subida do NMM. A taxa de subida aplicada ao raso de maré não é suficiente para manter a superfície média dentro da amplitude de maré do sapal (entre o PMAM e o PMAV), pelo que a tendência é para que, no final do século, quer a superfície média de alto sapal quer a de baixo sapal se encontrem niveladas dentro das cotas típicas do raso de maré.

A Figura 7.12 traduz a forma como é expectável que as áreas de sapal evoluam até ao final do século (o Anexo 9 corresponde aos valores utilizados para a projeção do gráfico). Pela observação deste gráfico podem ser identificados três comportamentos distintos: até 2040; de 2040 a 2080; de 2080 a 2100.

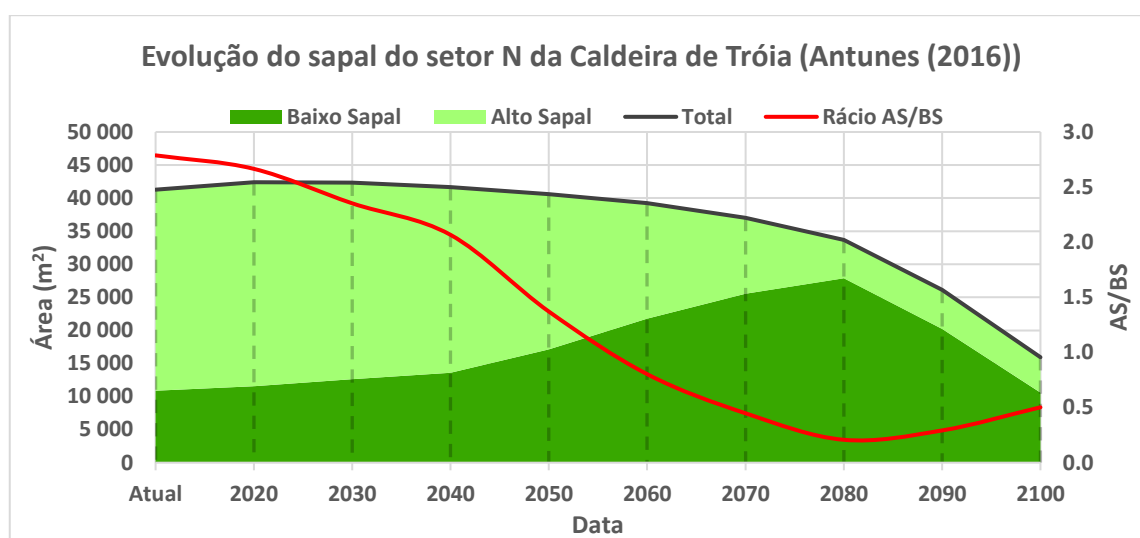


Figura 7.12 - Evolução do sapal da C. Tróia (N) utilizando o cenário proposto por Antunes (2016)

Até 2040 os resultados do processo de modelação indicam um sapal com uma área relativamente estável, com ganhos e perdas na ordem de 1 % (1 % de ganho para 2040). No entanto, este sistema irá sofrer uma redução de maturidade (2.07 em 2040), com o alto sapal (28 000 m<sup>2</sup>; - 8 % do que em 2016) a representar pouco mais do dobro da área de baixo sapal (13 500 m<sup>2</sup>; + 25 % do que em 2016). Em suma, apesar da área global não sofrer variações, a maturidade reduz-se em cerca de 26 %.

A partir de 2040, o alto sapal começa a ser substituído por baixo sapal a uma taxa superior à possibilidade de expansão horizontal do primeiro ambiente. Como resultado, a área total em 2080 será de 33 700 m<sup>2</sup> (- 18 % do que em 2016) e a área de alto sapal de 5 800 m<sup>2</sup> (- 81 % do que em 2016), enquanto a área de baixo sapal será consideravelmente superior: 27 900 m<sup>2</sup> (+ 156 % do que em 2016). Como consequência, o rácio AS/BS apresenta um valor muito baixo (0.20), indicando uma maturidade do sapal extremamente inferior à atual e com uma clara dominância do baixo sapal.

Entre 2080 e 2100, o sapal poderá sofrer variações profundas. O alto sapal não deverá perder mais área durante este período, enquanto o baixo sapal irá perder toda a área que foi incrementada ao longo dos anos anteriores, chegando ao final do século com menos 2 % de área do que tem atualmente, resultando numa diminuição da área total em cerca de 61 % em relação a 2016 (< 16 000 m<sup>2</sup>). O rácio AS/BS apresenta uma ligeira recuperação para valores na ordem de 0.50.

### 7.4.1. Mapas de referência: 2050 e 2100

A Figura 7.13 e a Figura 7.14 representam a distribuição espacial do alto sapal, baixo sapal e raso de maré para os dois anos de referência: 2050 e 2100, respetivamente.

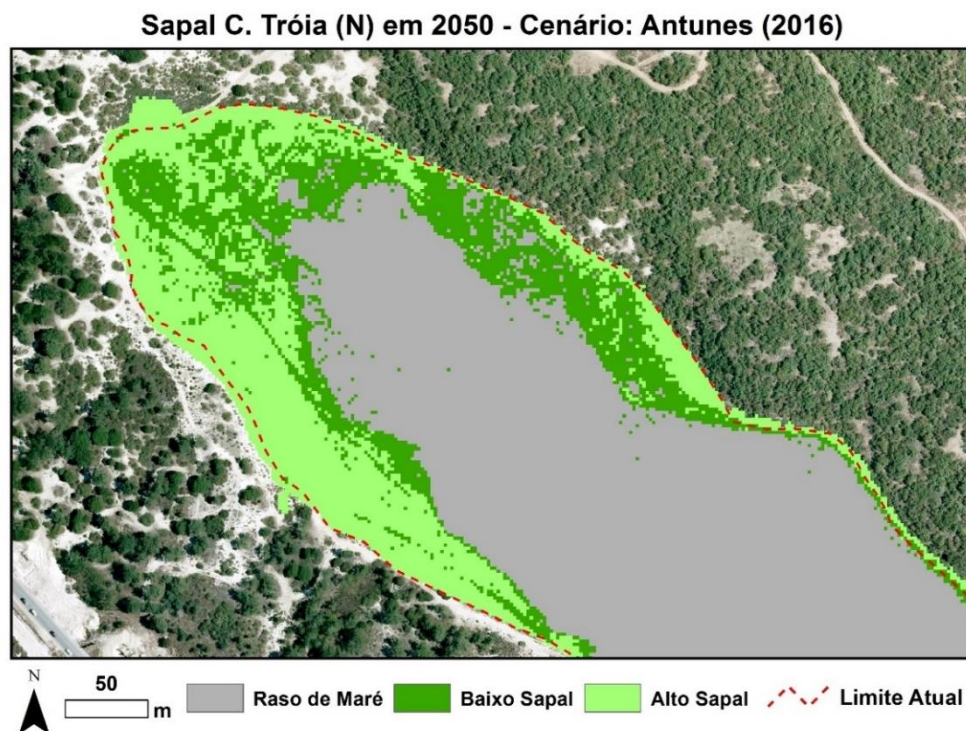


Figura 7.13 - Mapa morfológico do sapal da C. Tróia (N) em 2050, utilizando o cenário de subida do NMM Antunes (2016)

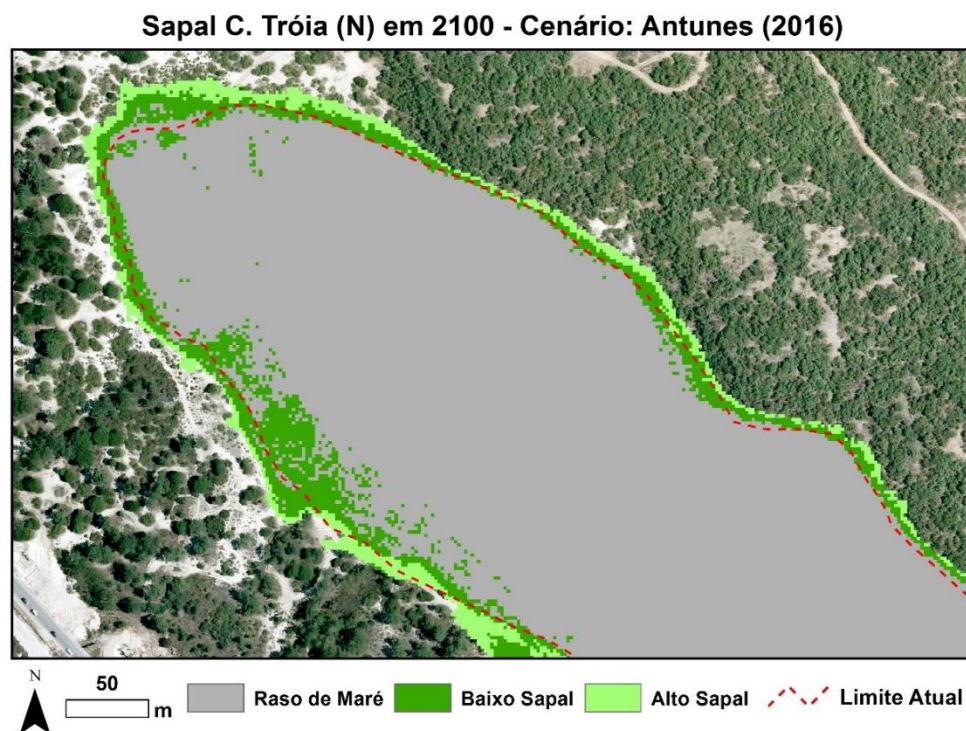


Figura 7.14 - Mapa morfológico do sapal da C. Tróia (N) em 2100, utilizando o cenário de subida do NMM Antunes (2016)

A utilização deste cenário de subida do NMM permite estimar duas configurações distintas para 2050 e 2100. Em 2050 não é expectável que a configuração e localização do sapal se altere em relação à atualidade. O caminho que circunda o sapal poderá ser colonizado por alto sapal, incluindo uma pequena clareira que existe a norte. Ainda assim, esta colonização não é suficiente para a manutenção da área de alto sapal, que acaba reduzida em 23 %. O baixo sapal aumenta a sua área, quer pelas manchas de alto sapal que passam a baixo sapal, quer pelas zonas de raso de maré que atingem cotas suficientemente elevadas para serem colonizadas por vegetação de baixo sapal. O resultado final é um sapal com maturidade consideravelmente inferior à configuração atual (1.37), mas com uma área que pouco difere dos 42 000 m<sup>2</sup>.

A contrário do que se prevê para 2050, 2100 poderá ter uma representação mínima do sapal em estudo, com a sua maioria a localizar-se externamente ao limite atual e com uma área francamente menor – resultado do desaparecimento de manchas de alto sapal, entre 2040 e 2080, e de baixo sapal no fim do século. A área final poderá ser inferior a 16 000 m<sup>2</sup> (- 61 % do que em 2016) e o baixo sapal irá ocupar uma área duas vezes maior do que o alto sapal: 5 300 m<sup>2</sup> e 10 300 m<sup>2</sup>, respetivamente.

## 7.5. NOAA High

A projeção *High* apresentada pela NOAA é a que maior impacto deverá produzir na evolução do sistema, pois é a que considera uma maior subida do NMM. A Figura 7.15 representa a comparação entre a superfície média de alto e baixo sapal em função do tempo, considerando os limites de maré adaptados ao cenário em estudo.

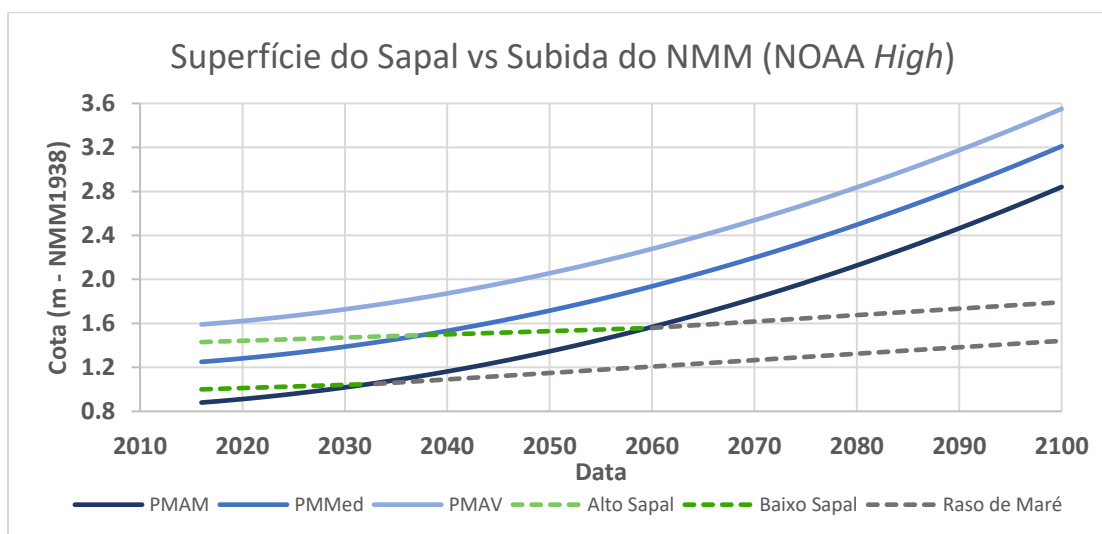


Figura 7.15 - Comparação entre a evolução da superfície média de alto e baixo sapal e os limites de maré com base no cenário de subida do NMM NOAA High (2017)

A influência da aceleração nesta projeção é flagrante, na medida em que durante a primeira metade deste século, as cotas médias do atual alto e baixo sapal já deverão ter sido submersas e, como consequência, regredindo para o ambiente inferior. A superfície média de alto sapal atual deverá, até 2060, passar a raso de maré. No final do século, os níveis de maré estarão muito distantes das superfícies médias e só com uma taxa de sedimentação anormalmente elevada seria possível ver o sapal acompanhar a subida do NMM.

Note-se que a incapacidade de resposta do sapal deve-se à elevadíssima aceleração da taxa de subida considerada neste cenário e não à taxa inicial, que pouco difere dos restantes cenários. É ainda possível notar que, quanto maior for a aceleração, menor a influência da taxa de sedimentação, pois, no final do século, o NMM estará a subir a uma taxa incontrolável para qualquer ambiente como este.

Por se tratar do mais gravoso cenário de subida do NMM considerado nesta dissertação, os resultados da modelação devem ser interpretados com precaução. Ainda assim, o resultado deste exercício é semelhante ao apresentado com a utilização do cenário de Antunes (2016), sendo a evolução do sapal consideravelmente mais rápida com a utilização do cenário *High* da NOAA, prevendo-se para 2070 uma morfologia semelhante à proposta com o cenário de Antunes (2016) para o fim do século. O resultado deste exercício de modelação pode ser observado no gráfico da Figura 7.16 (informação complementar no Anexo 10). Podem ser identificadas três fases de evolução: 2016 a 2050; 2050 a 2070; 2070 a 2100.

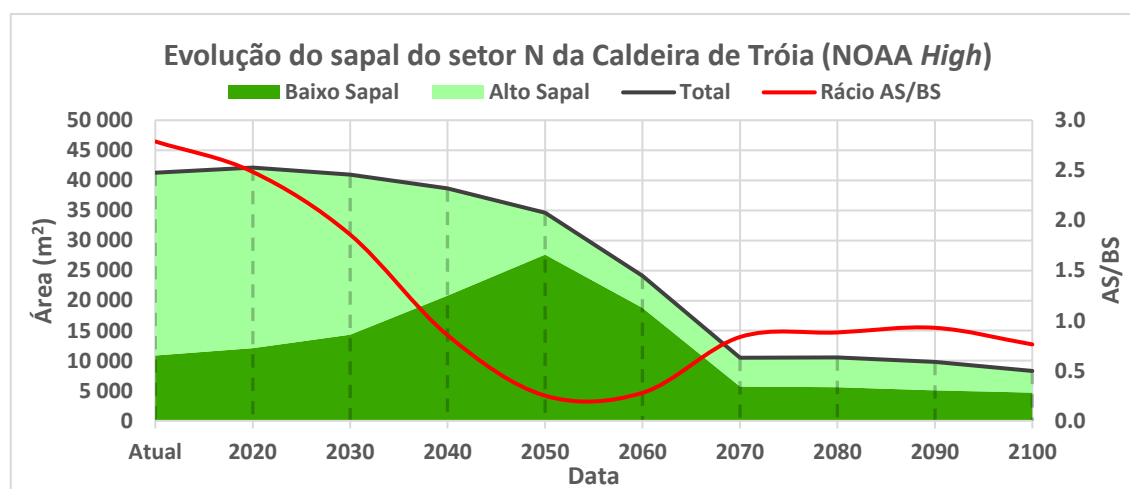


Figura 7.16 - Evolução do sapal da C. Tróia (N) utilizando o cenário de subida do NMM NOAA High

Entre 2016 e 2050, o sapal poderá experimentar uma redução da área global para 34 600 m<sup>2</sup> (- 16 % do que em 2016), provocada por uma intensa redução do alto sapal e uma forte expansão do baixo sapal, com variações de - 77 % e + 154 %, respetivamente. A diferença de comportamento entre os dois ambientes expressa-se por uma redução drástica do valor do rácio AS/BS em 2050: 0.25 (- 91 % do que em 2016).

No intervalo relativamente curto, entre 2050 e 2070, a área em estudo poderá sofrer alterações profundas, com uma forte redução do baixo sapal (- 48 % do que em 2016 e - 79 % em relação ao máximo), enquanto o alto sapal será inundado a uma velocidade bastante inferior à da primeira fase (- 84 % do que em 2016). Como resultado, a área total será de 10 500 m<sup>2</sup> em 2070 (- 75 % do que em 2016), mas o rácio AS/BS será de 0.84, um valor francamente mais elevado do que o observado no final da primeira fase, mas ainda assim insuficiente para classificar o sapal como maturo. Para além disso, a partir desta data, o sapal deverá ter uma representação marginal, tornando pouco coerente a classificação quanto à maturidade proposta neste rácio.

Por fim, não são expectáveis alterações significativas de área ou maturidade durante as últimas três décadas do século XXI, com o alto sapal e o baixo sapal a terem uma representação equilibrada, resultando numa maturidade próxima de um sapal intermédio (mas marginal), apesar do rácio AS//BS apresentar uma tendência descendente, próximo de 2100. Durante estas três décadas, a área total recuperará ligeiramente, mas será cerca de 71 % inferior à atual (12 000 m<sup>2</sup>); o alto sapal manter-se-á inalterado (- 83 % do que em 2016) e o baixo sapal poderá expandir-se ligeiramente em relação a 2070 (mas continuará a ser inferior a 2016 em 37 %).

### 7.5.1. Mapas de referência: 2050 e 2100

A Figura 7.17 e a Figura 7.18 representam a distribuição espacial do alto sapal, baixo sapal e raso de maré para os dois anos de referência: 2050 e 2100, respectivamente.

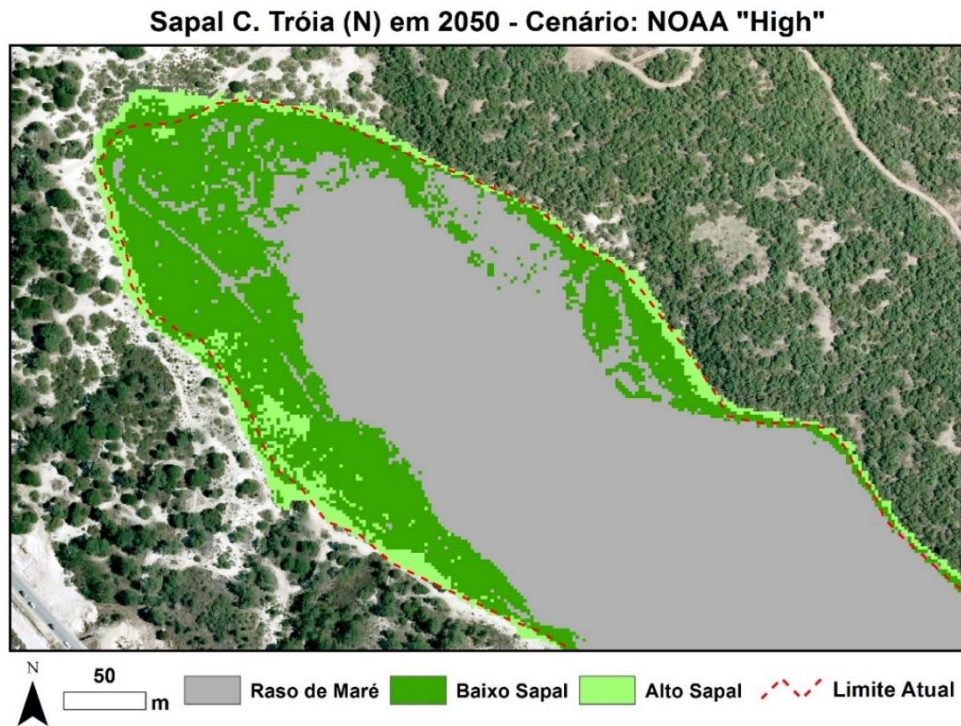


Figura 7.17 - Mapa morfológico do sapal da C. Tróia (N) em 2050, utilizando o cenário de subida do NMM NOAA High

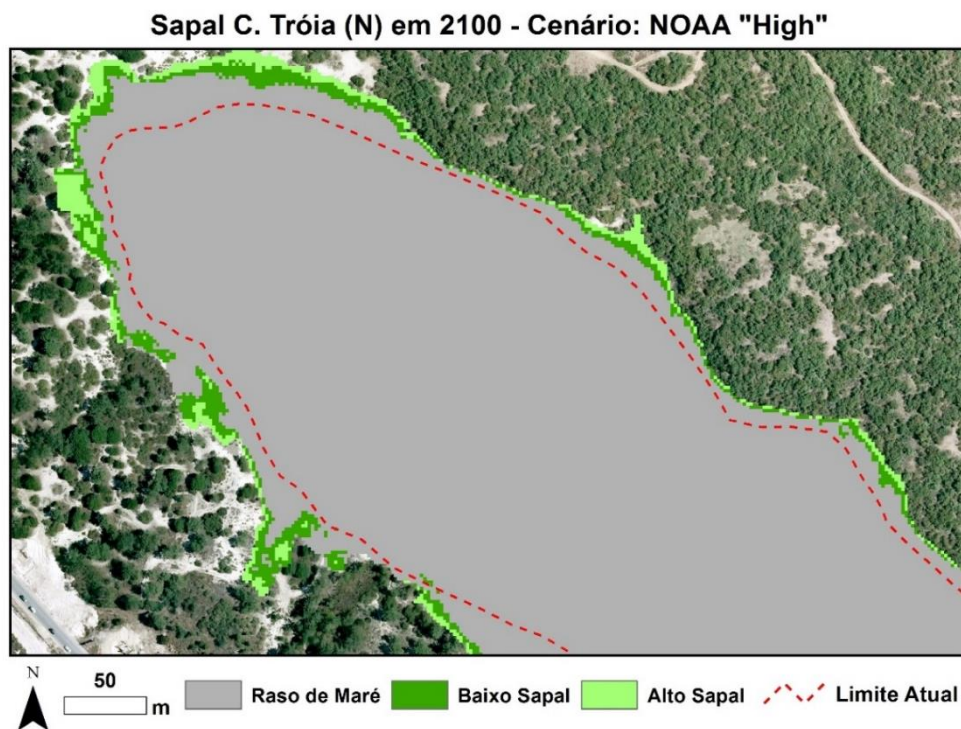


Figura 7.18 - Mapa morfológico do sapal da C. Tróia (N) em 2100, utilizando o cenário de subida do NMM NOAA High

Em 2050, o sapal poderá manter uma localização parecida à atual, com a colonização de novas áreas sobretudo na clareira a norte e caminho que circunda o sapal. No entanto, em 2100, é expectável que o sapal adquira uma localização diferente da atual, sofrendo uma translação para terra, com o limite atual a intersetar, quase na totalidade, zonas de raso de maré.

2050 poderá corresponder a uma fase em que o sapal conseguirá conservar uma grande percentagem da sua área (34 600 m<sup>2</sup>; - 16 % do que em 2016), mas será dominado pelo baixo sapal, que poderá estar representado ao longo de 27 700 m<sup>2</sup>, enquanto o alto sapal ocupará apenas 7 000 m<sup>2</sup>. O resultado poderá ser um rácio AS/BS de apenas 0.25 – um resultado concordante com os obtidos para as fases de menor maturidade, quando utilizados outros cenários de subida do NMM. Note-se que 2050 é, aparentemente, a data a partir da qual a área de alto sapal deixará de sofrer alterações acentuadas, fixando-se entre 4 000 m<sup>2</sup> e 5 000 m<sup>2</sup>.

Apresentar o resultado da evolução morfológica para o sapal nesta data é, na realidade, apresentar o resultado de um comportamento constante que pode ser verificado ao longo das últimas três décadas do século. A área total prevista é de 8 300 m<sup>2</sup>, um valor inferior ao atual em 80 % e mesmo inferior à área atualmente ocupada exclusivamente por baixo sapal. O rácio AS/BS estimado é de 0.76, um valor que apesar de ligeiramente mais baixo do que nas décadas anteriores, encontra-se próximo da classificação de sapal intermédio.



---

# 8. DISCUSSÃO

---

## 8.1. O modelo: vantagens e desvantagens

Neste subcapítulo serão apresentadas diversas vantagens e desvantagens da aplicação deste modelo de evolução morfológica de sapais. A análise destes resultados será, garantidamente, a maior ferramenta para a sua evolução e melhoramento no futuro.

### 8.1.1. Vantagens

#### 1. Variação espacial do sapal

Este modelo considera a variação espacial do sapal, ou seja, tem em consideração a evolução de cada subambiente e também novas áreas colonizadas – ao contrário da comparação da superfície média.

#### 2. Evolução da maturidade

É possível avaliar não só a evolução morfológica do sapal, como também a relação de área entre subambientes: a maturidade. Na prática, um sapal pode estar a aumentar a sua área global com um aumento do baixo sapal, mas uma redução do alto sapal, sendo interpretado como um sistema que não está a conseguir acompanhar a subida do NMM.

#### 3. Avaliação contínua da morfologia do sapal

A utilização de um modelo de evolução morfológica permite acompanhar anualmente as suas características e não apenas em certos momentos. É possível, para qualquer cenário de subida do NMM, prever a morfologia anual do sapal, bem como a sua tendência evolutiva.

#### 4. Aplicação para ordenamento do território

O facto de considerar a evolução horizontal do sapal (variação espacial) pode ser uma ferramenta útil para a delimitação de faixas de risco do ponto de vista do ordenamento do território – quer do ponto de vista de inundação, quer do ponto de vista ecológico, pois poderá permitir a adoção de medidas na área circundante ao sapal que maximizem o seu crescimento.

#### 5. Percepção visual da evolução

Apresentar o resultado final em formato de mapa é uma mais-valia para a percepção de quem está a estudar a evolução de um determinado sapal, pois permite uma interpretação muito mais lógica e visual da sua morfologia. Para além de ser útil no campo da investigação, poderá também ser uma ferramenta vantajosa para a divulgação das consequências das alterações climáticas em áreas ecologicamente muito valiosas.

## 6. Programação simples

Apesar de lidar com códigos desenvolvidos em Matlab, a execução do código requer apenas um claro conhecimento dos seus parâmetros de entrada e não de programação. O código está construído para um utilizador com conhecimento dos fenómenos físicos que influenciam a evolução do sapal e não para um utilizador que domine os *software* utilizados.

### 8.1.2. Desvantagens

#### 1. Não considera a escarpa de transição entre ambientes

Este modelo considera que todos os fenómenos de inundação são consequência de um aumento do tempo de submersão de cada ambiente, ultrapassando o seu limite e forçando-o a transitar para um ambiente adequado aos tempos de submersão que passam a vigorar numa determinada área. Ou seja, fenómenos em que a erosão ocorre por recuo da escarpa que faz a transição entre alto e baixo sapal e entre baixo sapal e raso de maré não são considerados.

#### 2. Assume taxas de sedimentação discretas em vez de contínuas

Não é possível determinar uma taxa de sedimentação para cada cota do sapal (assumindo que a variação apenas depende da cota, o que pode não corresponder à verdade), no entanto não é expectável que estas se comportem como variáveis discretas, mas sim contínuas. A título de exemplo, um ponto que se encontre a 1 cm do limite de transição para o subambiente superior poderá ter uma taxa de sedimentação associada muito diferente de um ponto que se encontre 2 cm acima deste (e, portanto, num subambiente diferente) – o que não deverá estar próximo da realidade.

#### 3. Requer um MDT com elevada resolução

Um dado fundamental para a execução deste modelo é a cobertura altimétrica que lhe serve de base. Esta pode ser obtida recorrendo a MDTs já existentes (aconselhando-se a utilização de um MDT obtido com varrimento LiDAR) ou através do registo de cotas obtidas diretamente no terreno. No entanto, em ambas as situações a obtenção de dados de qualidade não é simples. O acesso a dados LiDAR está ainda muito limitado em Portugal e o registo de pontos cotados diretamente no terreno necessita de um número extremamente elevado e uniforme de registos.

Note-se que a falta de resolução da cobertura altimétrica é particularmente relevante na delimitação dos canais que tipicamente sulcam estas áreas, que muitas vezes são identificadas como manchas de baixo sapal ou raso de maré.

#### 4. Requer um bom conhecimento da área envolvente

Ao longo da execução do modelo, e em particular para horizontes temporais mais alargados, é expectável que o sapal comece a colonizar a área que o circunda. É fundamental que o utilizador tenha um bom conhecimento sobre o que nela existe, podendo assim despistar resultados anómalos relativos à expansão horizontal do sapal.

## 5. Fraca validação de resultados

O facto desta metodologia estar a ser aplicada pela primeira vez tem como grande desvantagem a fraca validação dos resultados obtidos, não existindo termos de comparação na mesma área, nem a sua aplicação em áreas semelhantes. Até que esta validação ocorra, é necessário encarar com prudência os resultados obtidos.

## 8.2. Os dados de entrada do modelo

Os dados de entrada utilizados na execução do modelo podem exercer dois tipos de influência nos resultados finais: influência inicial (MDT e cotas de maré) e influência na evolução (NMM e taxas de sedimentação).

### 8.2.1. Influência inicial

A Figura 8.1 ilustra a morfologia do sapal com recurso a um MDT com 30 m de resolução disponibilizado gratuitamente pela ESRI Portugal nos seus servidores e que pode ser acedido através do endereço <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=135067ee417e41e7b9c9f80525f805e6>. Este MDT foi disponibilizado, em 2009, numa parceria entre o Ministério da Economia, Troca e Indústria do Japão e a NASA (<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>, acedido a 12 de maio de 2017).

Como se pode observar, a sua resolução não é compatível com uma área tão reduzida e a sua interpretação está longe de estar correta, pois ilustra apenas o rebaixamento natural de cotas entre o centro e a periferia da restinga de Tróia – justificando a importância de usar uma cobertura altimétrica de elevada resolução e que tenha sido obtida para áreas o mais restritas possível.

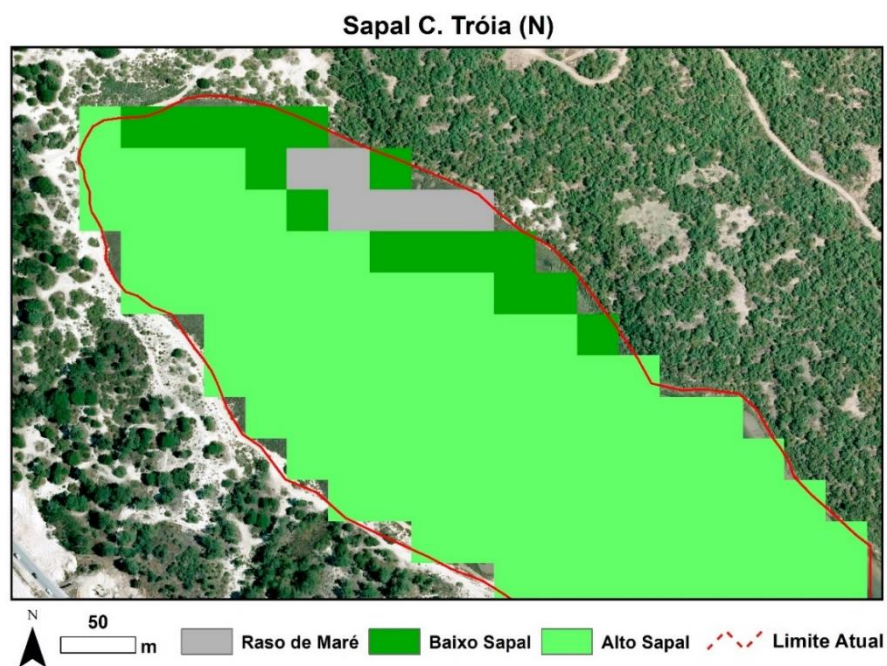


Figura 8.1 - Distribuição espacial do sapal e raso de maré na área de estudo tendo como cobertura altimétrica um MDT com resolução de 30 m

A escolha dos limites de transição entre subambientes é um fator determinante. Sempre que possível, devem utilizar-se dados de marégrafos locais com registos contínuos e tão atualizados quanto possível.

A Carta Hidrográfica da Barra e Porto de Setúbal de 2003 apresenta valores característicos de maré para a área de estudo (Tabela 8.1). No entanto, estes estão desatualizados por não considerarem a subida do NMM que ocorreu até à atualidade, pelo que a sua utilização mostrou-se pouco adequada - Figura 8.2.

Tabela 8.1 - Cotas de maré disponíveis na Carta Hidrográfica da Barra e Porto de Setúbal (2003). O valor de PMMed corresponde à média entre o PMAV e PMAM e não está disponível nesta carta

PMAV (m)	PMMed (m)	PMAM (m)
1.30	0.90	0.60

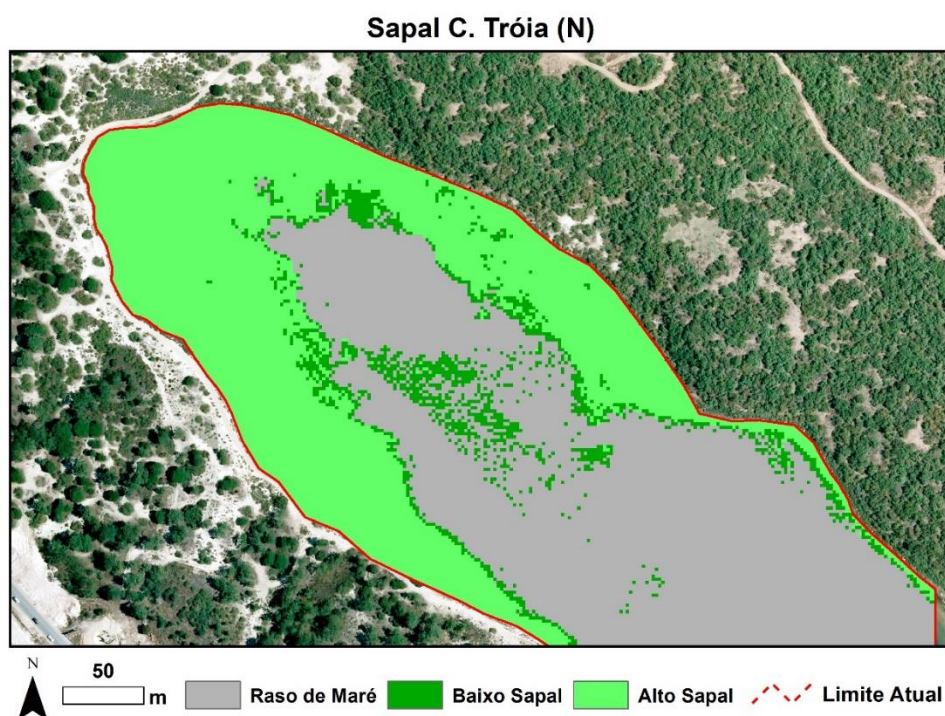


Figura 8.2 - Distribuição espacial do sapal e raso de maré na área de estudo, tendo como limites de maré os valores disponíveis na Carta Hidrográfica da Barra e Porto de Setúbal de 2003

Com estes valores de maré, quase toda a área seria classificada como raso de maré ou alto sapal, não sendo a área de baixo sapal representativa da realidade, originando resultados claramente errados nas projeções para o futuro.

## 8.2.2. Influência na evolução

O cenário de subida do NMM escolhido é, provavelmente, o fator que mais influência tem no resultado final. Isto acontece por normalmente serem considerados cenários com taxas que sofrem aceleração ao longo do tempo, sendo esta a peça chave para determinar o momento em que o sapal deixará de conseguir acompanhar esta consequência das alterações climáticas.

A Figura 6.10 e Tabela 6.2 evidenciam esta influência, pois todos os cenários considerados têm como ponto de partida o NMM atual e taxas dentro da mesma ordem de grandeza. Valores de aceleração distintos produzem resultados distintos – isto significa que se o valor de aceleração for muito elevado, o sapal poderá passar a ser inundado com muito mais frequência e a uma velocidade superior à taxa de sedimentação considerada, resultando num desaparecimento deste ambiente. Como se verá no subcapítulo seguinte, a escolha de um cenário em vez de outro pode ser o suficiente para justificar o desaparecimento quase total do sapal até ao final do século XXI.

A taxa de sedimentação no sapal do setor norte da Caldeira de Tróia revelou-se menos impactante do que seria expectável e só é um fator decisivo quando se assume um cenário linear de subida do NMM. Efetivamente, independentemente da taxa de sedimentação utilizada (dentro da mesma ordem de grandeza dos valores apresentados no subcapítulo 6.4), a taxa de subida do NMM acaba por se tornar mais elevada por efeito da aceleração.

A Figura 8.3 compara as taxas de sedimentação no raso de maré e sapal (alto e baixo sapal) com a evolução da taxa de subida do NMM no cenário IPCC RCP2.6. Nesta situação, observa-se o papel preponderante da taxa de sedimentação, pois a taxa de subida do NMM encontra-se entre as taxas de sedimentação dos dois ambientes e assim irá continuar até ao final do século.

Por outro lado, na Figura 8.4 observa-se que, tendo o mesmo ponto de partida da situação anterior, no cenário IPCC RCP8.5 a taxa de sedimentação para o raso de maré rapidamente é superada pela taxa de subida do NMM, que está a ser elevada anualmente por efeito da aceleração. Assim, o que se compreende é que independentemente da taxa de sedimentação considerada, esta acaba sempre por ser ultrapassada pela taxa de subida do NMM – o mesmo ocorre nos cenários Antunes (2016) (Figura 8.5) e NOAA *High* (Figura 8.6). Tal como seria expectável, quanto maior o valor de aceleração associado a um cenário, mais cedo a taxa de subida do nível do mar supera a taxa de sedimentação em cada subambiente.

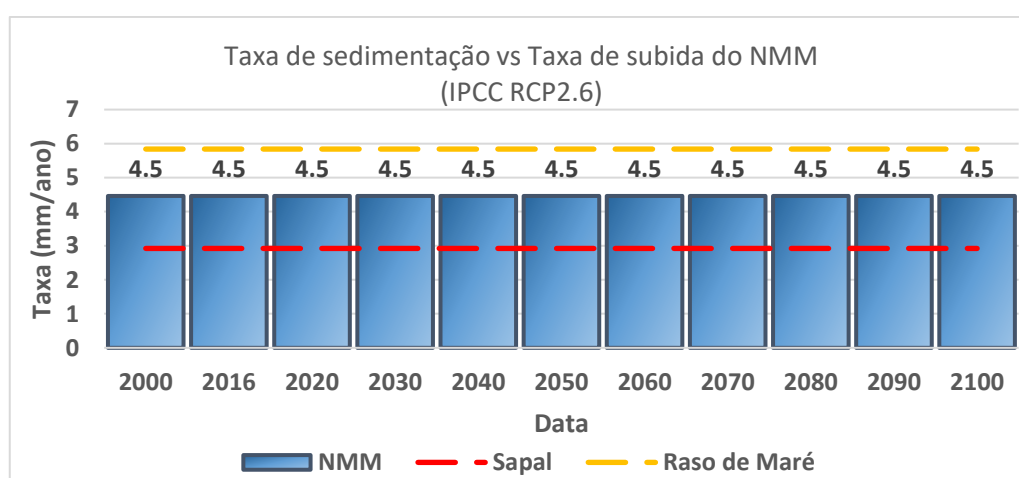


Figura 8.3 - Comparação entre as taxas de sedimentação consideradas e a evolução da taxa de subida do NMM com o cenário IPCC RCP2.6

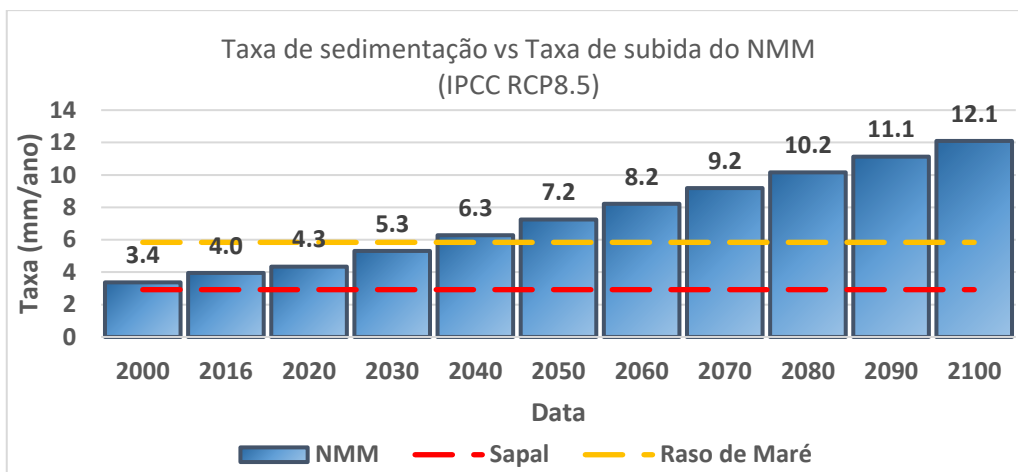


Figura 8.4 - Comparação entre as taxas de sedimentação consideradas e a evolução da taxa de subida do NMM com o cenário IPCC RCP8.5

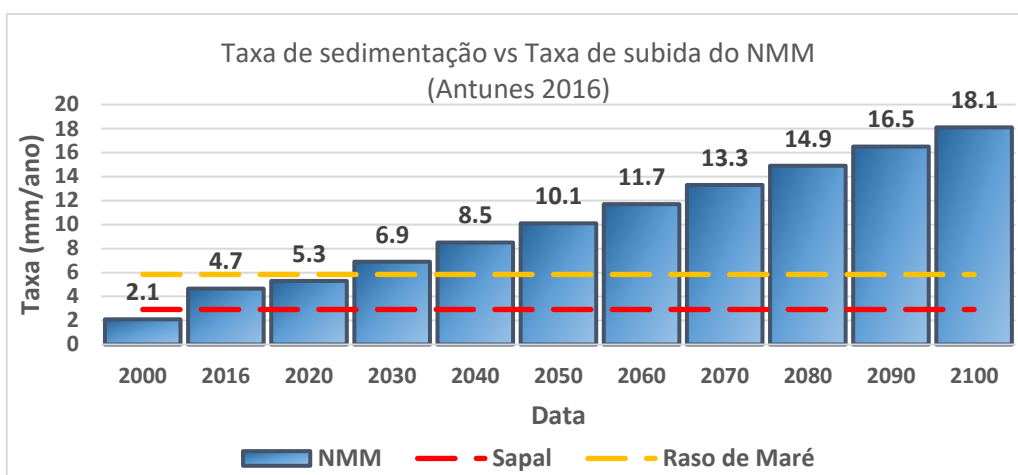


Figura 8.5 - Comparação entre as taxas de sedimentação consideradas e a evolução da taxa de subida do NMM com o cenário Antunes (2016)

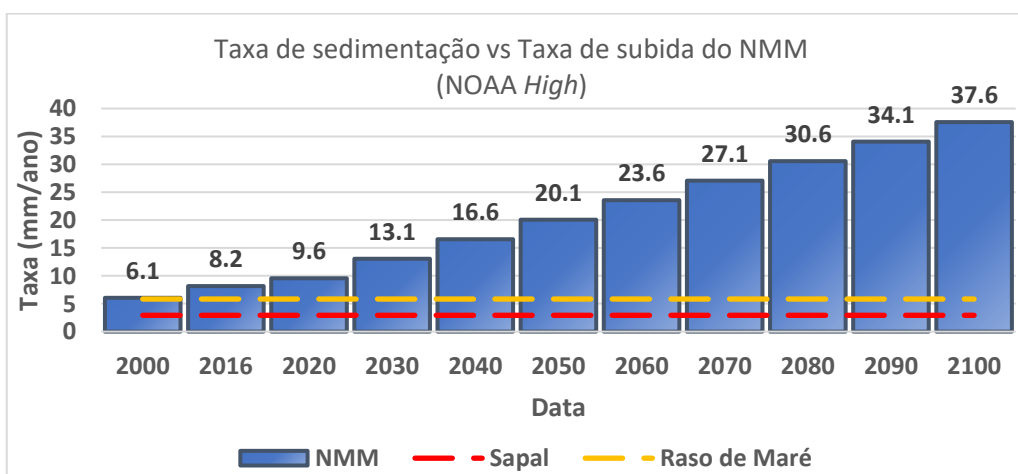


Figura 8.6 - Comparação entre as taxas de sedimentação consideradas e a evolução da subida do NMM com o cenário NOAA High

## 8.3. Evolução do sapal

Ao contrário da apresentação de resultados, em que o capítulo estava dividido nos quatro cenários de subida do NMM, optou-se por discutir a evolução do sapal do setor norte da Caldeira de Tróia em duas partes: uma relativa ao cenário linear e outra relativa aos cenários com aceleração da taxa de subida do nível do mar.

### 8.3.1. IPCC RCP2.6

O facto do cenário IPCC RCP2.6 não contemplar variações na taxa anual de subida do NMM permite ao sapal em estudo ter sempre o mesmo comportamento ao longo do século. Este é o único cenário em que a área final é superior à área inicial.

Importa, então, compreender o que faz o sapal aumentar a sua área, se é o real crescimento vertical do sistema existente (por exemplo, a passagem de raso de maré para baixo sapal) ou se este crescimento é motivado pela expansão horizontal do mesmo.

A Figura 8.7 representa as variações sofridas pelo sapal até ao final do século, considerando este cenário de subida do NMM. De facto, quase toda a área que circunda o sapal é colonizada por alto sapal, sendo este o fator que mais contribui para o seu crescimento. Prevê-se um crescimento de, aproximadamente, 6 000 m<sup>2</sup> da área total até 2100 (+ 15 % em relação a 2016), no entanto, 4 000 m<sup>2</sup> correspondem à expansão horizontal do sapal e apenas 2 000 m<sup>2</sup> à colonização de área de raso de maré por vegetação de baixo sapal.

Para além disso, a área de alto sapal poderá sofrer uma perda próxima de 11 % da área atual até ao final do século, indicando uma lenta e progressiva submersão do sapal por efeito da subida do NMM. Ainda assim, pelo facto da taxa de sedimentação considerada para o raso de maré ser mais elevada do que a taxa de subida do nível do mar, este tem capacidade de crescer, apesar da significativa perda de maturidade provocada pelas áreas de alto sapal que experimentam um aumento do tempo de submersão e regridem para baixo sapal.

Com base nestes dados, é possível afirmar que, se o cenário de subida do NMM mais conservativo for o que mais se aproxima da realidade, o sapal em estudo deverá aumentar a área, mas reduzir a maturidade, indicando um crescimento pouco sustentado do sistema e que o poderá levar a um estado de maturidade semelhante ao de um sapal jovem.

É ainda interessante notar que esta projeção está altamente dependente de uma das maiores incertezas deste estudo: a taxa de sedimentação no raso de maré. Esta taxa não foi determinada e consiste apenas no facto de se esperar um valor mais elevado do que o que ocorre no sapal. Se, eventualmente, a taxa de sedimentação real no baixo sapal for inferior a 4.6 mm/ano, o comportamento do sistema poderá ser bastante diferente e deverá corresponder a uma redução generalizada da área que só poderá ser compensada pela sua expansão horizontal.

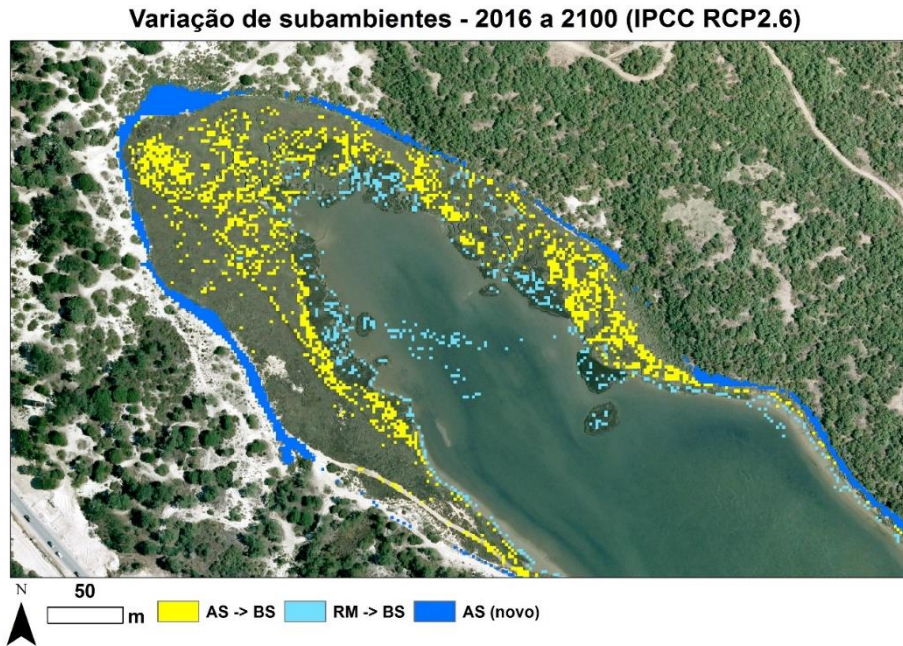


Figura 8.7 - Variação de cada subambiente entre 2016 e 2100, considerando o cenário de subida do NMM IPCC RCP2.6

### 8.3.2. IPCC RCP8.5, Antunes (2016) e NOAA *High*

Optar por discutir os cenários IPCC RCP8.5, Antunes (2016) e NOAA *High* em conjunto tem uma justificação: estes cenários provocam igual resposta do sistema em estudo, alterando apenas a velocidade a que esta resposta ocorre.

A Figura 8.8 representa a evolução da área total de sapal e a Figura 8.9 a variação do Rácio AS/BS ao longo do século XXI para os três cenários com aceleração da taxa anual de subida do NMM estudados.

Pela observação da evolução da área total é interessante notar que as consequências mais evidentes da subida do NMM só deverão começar a manifestar-se na segunda metade do século – sendo a área total ligeiramente aumentada durante as próximas décadas no cenário IPCC RCP8.5.

No entanto, observando a variação do Rácio AS/BS é possível notar um decréscimo acentuado da maturidade do sapal em qualquer dos cenários. Para além disso, é ainda possível concluir que esta perda de maturidade deverá estar a ocorrer atualmente e que a sua tendência será de agravamento durante as próximas décadas.

A principal diferença na morfologia do sapal em função dos cenários considerados não é a forma como este vai evoluir, mas sim a velocidade a que esta transformação poderá ocorrer. Em todos os cenários se observa uma diminuição da área total e em todos os cenários se observa, numa primeira fase, uma diminuição da maturidade.

Considerar o cenário NOAA *High* é, naturalmente, o que terá um impacto mais devastador na morfologia e equilíbrio do sapal, mas é também o que permite tirar mais conclusões. Tendo em consideração o relevo da área circundante ao sapal, é expectável que exista sempre algum espaço para este se expandir, sendo isso o que faz com que o ambiente não desapareça por completo. Para além

disso, é ainda possível aferir que 10 000 m<sup>2</sup> poderá ser a área mínima que o sapal pode atingir, independentemente da aceleração que a subida do NMM possa tomar.

A data em que o sapal atinge 10 000 m<sup>2</sup> pode representar o momento a partir do qual o sapal passa a estar em equilíbrio, ou seja, o momento a partir do qual ele deixa de perder área e passa a sofrer apenas translação (movimentação do sistema para terra). Nesta fase é expectável que o sapal estabilize numa situação de maturidade intermédia, algo que poderá ocorrer antes do final do século, quando se considera o cenário NOAA High, mas que só deverá acontecer posteriormente com a utilização de outros cenários. Note-se que o Rácio AS/BS com a utilização do cenário Antunes (2016) começa a recuperar e a aproximar a maturidade do sapal de valores intermédios, a partir de 2085, embora a área seja muito pequena.

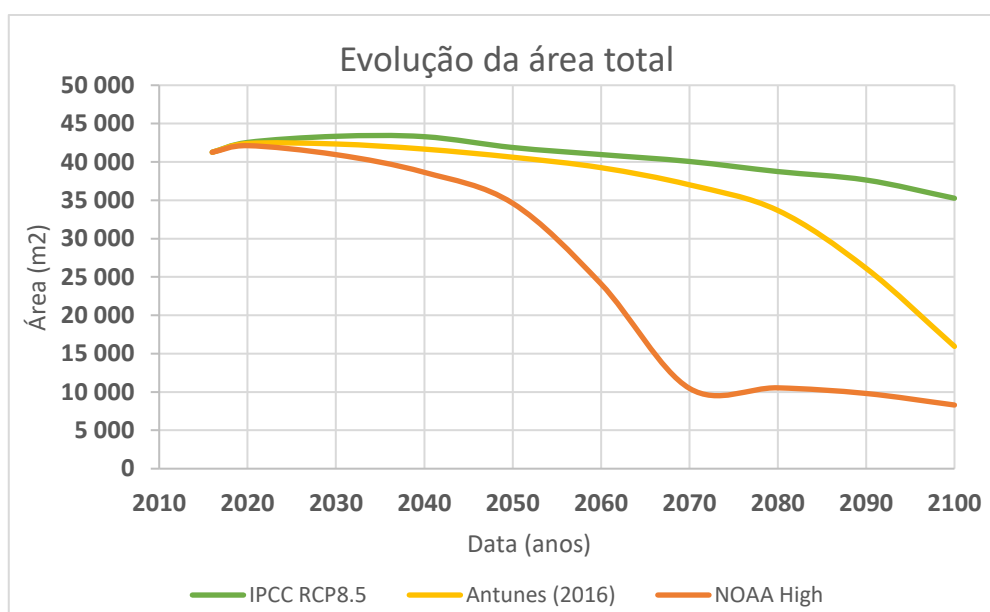


Figura 8.8 - Evolução da área total de sapal para os cenários IPCC RCP8.5, Antunes (2016) e NOAA High

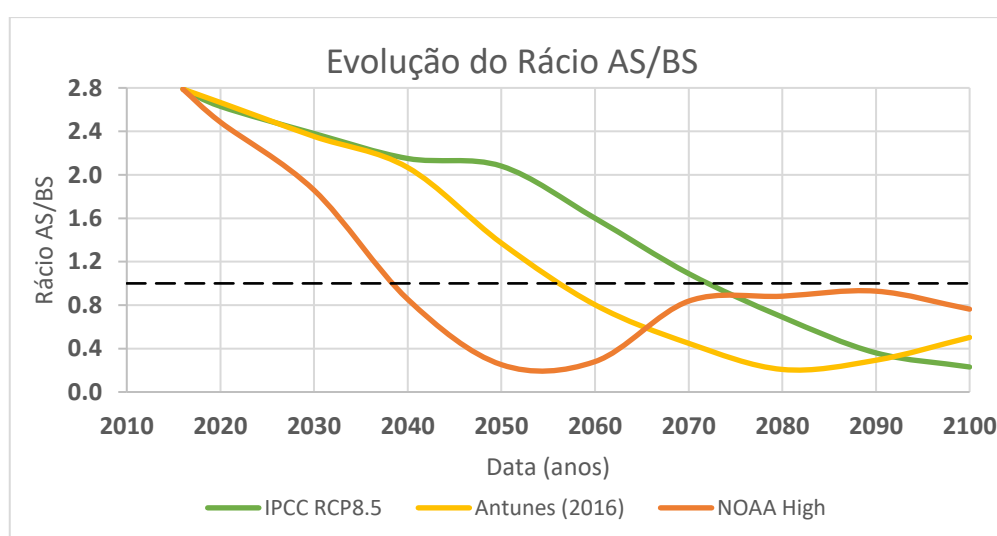


Figura 8.9 - Evolução dos Rácio AS/BS para os cenários IPCC RCP8.5, Antunes (2016) e NOAA High

Tal como no cenário IPCC RCP2.6, importa observar a variação que as diversas áreas podem sofrer ao longo das próximas décadas. A Figura 8.10 mostra a variação das diversas áreas para 2050, considerando o cenário IPCC RCP8.5, a Figura 8.11 apresenta o mesmo exercício para o cenário Antunes (2016) e a Figura 8.12 para o cenário NOAA High.

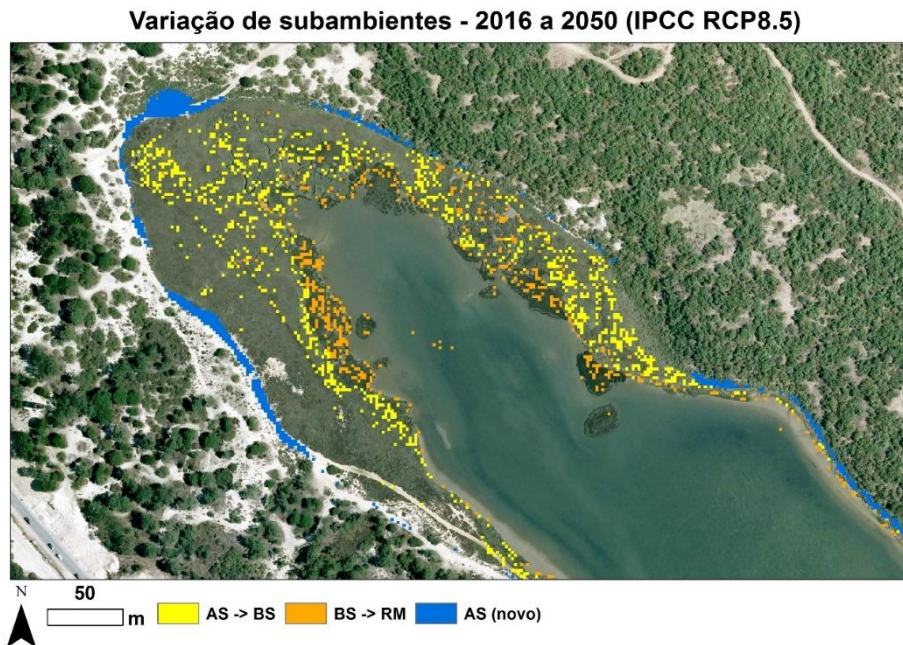


Figura 8.10 - Variação de cada subambiente entre 2016 e 2050, considerando o cenário de subida do NMM IPCC RCP8.5

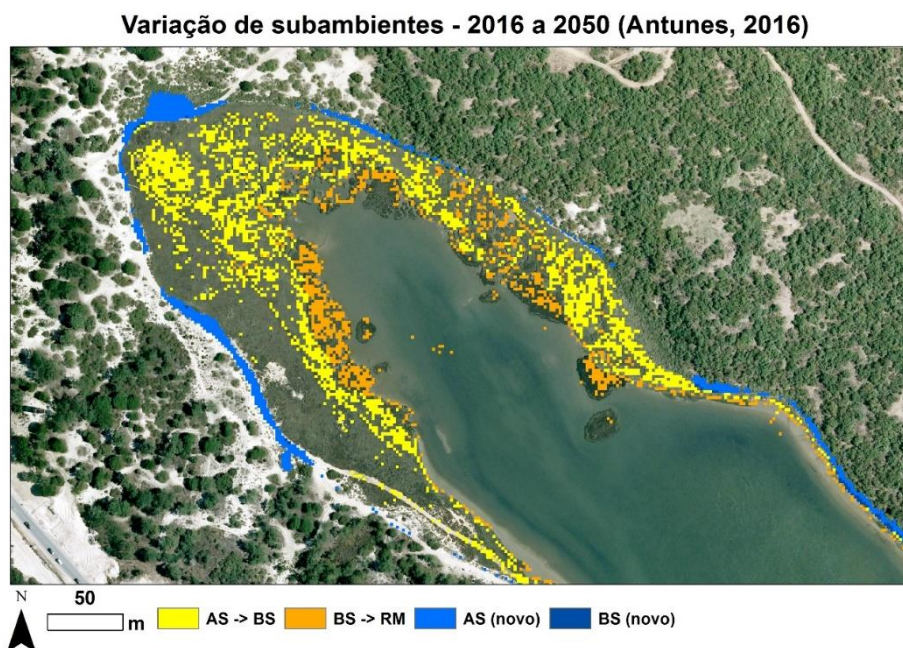


Figura 8.11 - Variação de cada subambiente entre 2016 e 2050, considerando o cenário de subida do NMM Antunes (2016)

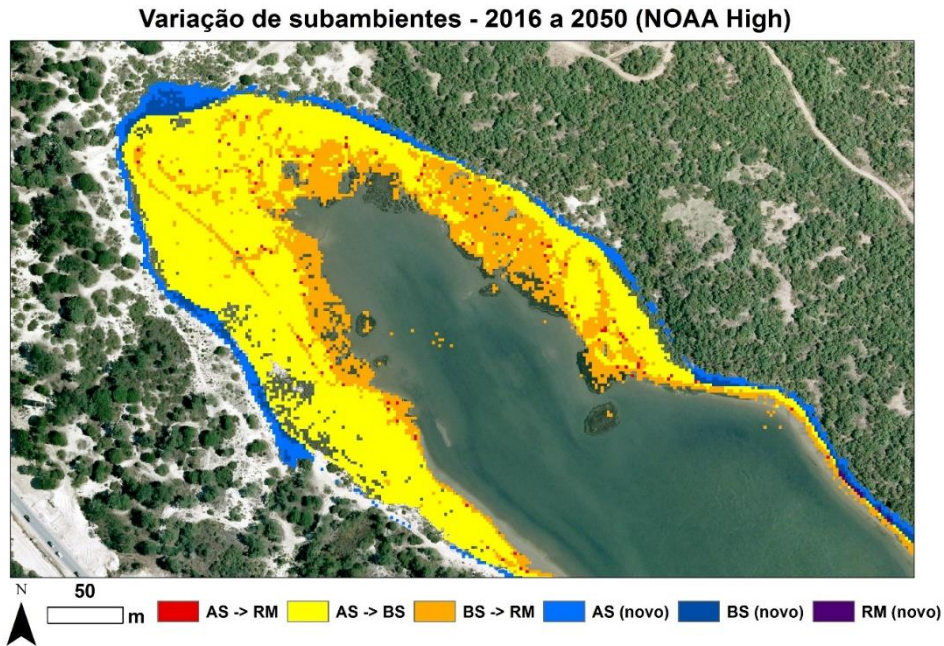


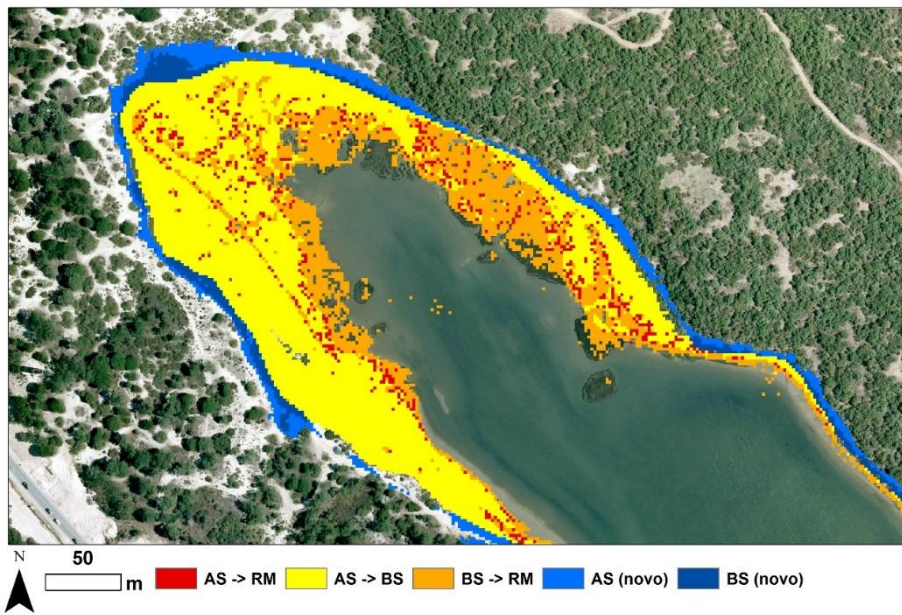
Figura 8.12 - Variação de cada subambiente entre 2016 e 2050, considerando o cenário de subida do NMM NOAA High

Tal como se previa pela observação das variações da área total e da maturidade, a interpretação que pode ser feita nos três cenários é idêntica, alterando apenas a gravidade do impacto da subida do NMM. Em todas as projeções é observável uma inundação do baixo sapal, que passa a raso de maré, bem como do alto sapal, que passa a baixo sapal. No cenário IPCC RCP8.5 o aumento do tempo de submersão no alto sapal provoca um impacto mínimo, enquanto no cenário NOAA *High* este impacto é muito maior.

Para além disto, é notória a expansão horizontal do alto sapal no cenário IPCC RCP8.5 e do alto e baixo sapais nos cenários Antunes (2016) e NOAA *High*. Nos dois primeiros, esta expansão é suficiente para manter a área total praticamente inalterada: até 2050, o sapal deverá sofrer um redução de 1 900 m<sup>2</sup>, no cenário IPCC RCP8.5, 3 600 m<sup>2</sup>, no cenário Antunes (2016) e de 11 300 m<sup>2</sup>, no cenário NOAA *High* – por outro lado, deverá expandir-se, pela mesma ordem de cenários, em 2 300 m<sup>2</sup>, 3 100 m<sup>2</sup> e 5 100 m<sup>2</sup>, resultando em variações totais de área de + 1.5 %, - 1.6 % e - 16.1 %, indicando que apenas no cenário NOAA *High* pode ocorrer uma perda significativa da superfície total de sapal.

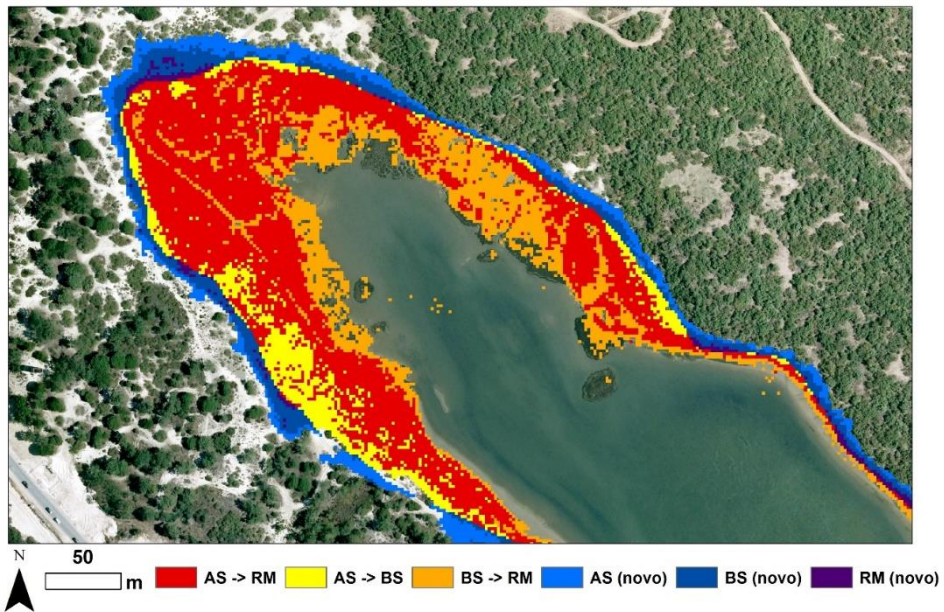
Até 2100, os resultados são menos otimistas. A Figura 8.13 ilustra a variação de ambientes ao considerar o cenário IPCC RCP8.5, a Figura 8.14 para o cenário Antunes (2016) e a Figura 8.15 para o cenário NOAA *High*.

**Varição de subambientes - 2016 a 2100 (IPCC RCP8.5)**



*Figura 8.13 - Variação de cada subambiente entre 2016 e 2100, considerando o cenário de subida do NMM IPCC RCP8.5*

**Varição de subambientes - 2016 a 2100 (Antunes, 2016)**



*Figura 8.14 - Variação de cada subambiente entre 2016 e 2100, considerando o cenário de subida do NMM Antunes (2016)*

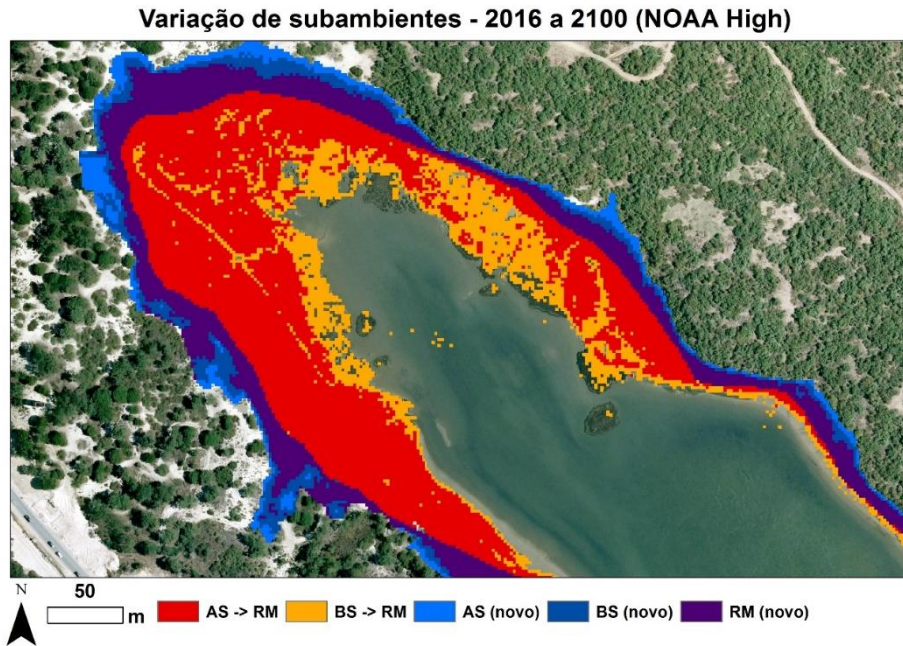


Figura 8.15 - Variação de cada subambiente entre 2016 e 2100, considerando o cenário de subida do NMM NOAA High

Para 2100, é expectável que exista uma diferença considerável entre a morfologia do sapal, considerando o cenário IPCC RCP8.5 e considerando os cenários Antunes (2016) e NOAA High.

A utilização do cenário IPCC RCP8.5 permite prever uma redução da área total de apenas 6 000 m<sup>2</sup> (- 14.5 % do que em 2016), que é na realidade um balanço entre 14 000 m<sup>2</sup> inundados e 8 000 m<sup>2</sup> de novas áreas colonizadas, indicando uma forte contribuição da área que circunda o sapal para a manutenção do sistema.

Quando se considera o cenário Antunes (2016), é expectável que o sapal perca cerca de 30 000 m<sup>2</sup> de área total (- 61.4 % do que em 2016), sendo neste caso o balanço entre a área inundada e a nova área colonizada claramente pendente para o primeiro fator. Prevê-se que sejam colonizados 10 000 m<sup>2</sup> de sapal, o correspondente a cerca de dois terços da área total prevista para 2100, revelando uma importância crucial da área que circunda o sapal para a manutenção da sua existência.

O cenário NOAA High, sendo o mais gravoso, é também o que poderá provocar um maior impacto no ambiente em estudo. Toda a área que é atualmente sapal deverá ser inundada e passar a raso de maré. Para além disso, parte da área colonizada poderá também ver o seu tempo de submersão aumentado e chegar a raso de maré, indicando um movimento de translação do sapal, que, em 2100, já não deverá ter sobreposição com a área de sapal original. Isto significa que a manutenção deste ambiente estará totalmente dependente da sua capacidade de colonizar novas áreas e que poderá deixar de ter significado quando as zonas de maior relevo forem intersetadas, esmagando o sapal numa área que poderá ser cada vez mais reduzida e que deverá mostrar algum equilíbrio entre a área de alto e baixo sapal.



---

## 9. CONCLUSÃO

---

A apresentação das conclusões obtidas durante a realização desta dissertação vai incidir sobre três temas fundamentais: os parâmetros que influenciam a evolução do sapal no tempo; a coerência da metodologia desenvolvida e a evolução do sapal ao longo do século XXI.

Os parâmetros considerados na evolução do sapal foram o MDT, as cotas de transição entre subambientes, os cenários de subida do NMM e as taxas de sedimentação. A utilização do MDT obtido através da técnica de detecção remota LiDAR mostrou-se representativo da área em estudo, apresentando uma razoável concordância com as cotas registadas no campo com o DGPS. A bibliografia propõe limites de transição entre os diversos ambientes baseados nos níveis de maré, no entanto, estes são variáveis com o local e com o tempo, pois são influenciados pela morfologia e pela subida do NMM. Assim, foi necessário determinar cotas de maré adequadas ao local e à data em estudo, sendo o resultado bastante satisfatório e com uma elevada concordância com as reais cotas de transição entre ambientes.

A escolha de um cenário de subida do NMM com melhor ajuste à área de estudo é a tarefa mais complicada, pois não existe forma de validar qual a previsão mais correta. Assim, optou-se por abordar quatro cenários distintos, sendo três propostos por entidades de referência norte-americanas e outro, de natureza empírica, obtido com base em dados registados no marégrafo de Cascais. Efetivamente, o fator que revelou ter maior importância no resultado final foi a aceleração da subida do NMM, sendo a taxa inicial semelhante em todas as situações, não sendo por isso possível aferir qual o cenário mais indicado – no entanto, como será referido nos parágrafos seguintes, a escolha de um cenário em detrimento de outro pode não alterar o comportamento do sapal, mas sim a velocidade a que este se modifica.

As taxas de sedimentação adequadas a cada ambiente são fundamentais e, idealmente, devem ser determinadas com base em análises realizadas aos sedimentos do próprio sapal. Este procedimento não pode ser realizado na totalidade ao longo desta dissertação, pelo que apenas se obtiveram taxas para o baixo sapal com valores na ordem de 3 mm/ano, apresentando uma elevada concordância com outros estudos realizados para diferentes sapais do estuário do Sado.

Depois de analisada a coerência dos dados de entrada, é importante tirar conclusões acerca do modelo morfológico, abstraindo esta análise de interpretações relativas à evolução do próprio ambiente. As conclusões podem ser divididas em pontos fortes e pontos fracos, como explicitado no subcapítulo 8.1.

O principal ponto positivo identificado é a possibilidade de avaliar a evolução horizontal do sapal, ou seja, quantificar a forma como o alto sapal coloniza novas áreas, atenuando assim o efeito de submersão normalmente verificado pela existência de taxas de subida do NMM superiores às taxas de sedimentação. Por outro lado, a fraca validação é o ponto negativo que merece mais atenção e que deverá ser explorado no futuro com a aplicação deste modelo a outras áreas, em particular do estuário do Tejo (pelo elevado número de estudos realizados por outros autores). Para além disso, o exercício mais interessante de validação passará por executar o modelo em sentido inverso, projetando a sua morfologia para o passado e comparando com imagens históricas.

Quanto à evolução do sapal: o setor norte da Caldeira de Tróia alberga um sapal de reduzidas dimensões e que é, naturalmente, sensível ao efeito da subida do NMM. O impacto que esta consequência das alterações climáticas pode provocar depende, essencialmente, da aceleração considerada para o cenário de subida e, com menor influência, da taxa de subida inicial. É possível observar nos gráficos de evolução das áreas de sapal (Figura 7.4, Figura 7.8, Figura 7.12 e Figura 7.16) que esta tende a seguir o mesmo padrão: incapacidade de acompanhar a subida do NMM na segunda

metade do século. A progressiva diminuição de maturidade (ainda antes de diminuir a área) é outro indicador de que o sapal não consegue acompanhar a subida do nível do mar.

Por fim, é possível concluir que o sapal do setor norte da Caldeira de Tróia poderá ter uma forte capacidade de resiliência até meados do século, experimentando apenas uma redução de maturidade, mas não necessariamente de área. A segunda metade do século representa a fase em que o sapal deixa efetivamente de conseguir responder à subida do NMM e começa, naturalmente, a submergir. O resultado será um sapal de reduzidas dimensões e maturidade intermédia que irá sofrer uma translação para costa até encontrar a base das dunas que o circundam – sendo esta translação a principal responsável pela manutenção parcial deste ambiente, como se pode observar na Figura 8.13, Figura 8.14 e Figura 8.15. Ao contactar com as linhas de maior declive das dunas, o seu movimento de translação fica extremamente limitado, prevendo-se uma dificuldade de manutenção deste sistema quando a abordagem é realizada com o cenário de subida do NMM mais gravoso.

Do ponto de vista do ordenamento do território, é importante considerar o limite externo de ocupação do sapal, em 2100, com o cenário NOAA *High* para estabelecer a área que não deverá ser ocupada durante as próximas décadas. Caso contrário, a manutenção do sapal em estudo poderá não estar assegurada, pois é para esta zona que o todo o ambiente deverá sofrer um movimento de translação ao acompanhar a subida do NMM.

Esta análise foi realizada com taxas de sedimentação para o raso de maré e alto sapal bibliográficas ou meramente indicativas, pelo que a utilização de taxas de sedimentação médias determinadas diretamente nestes ambientes poderá alterar a forma como o sapal responde à subida do NMM.

---

# 10. BIBLIOGRAFIA

---

- Allen, J.R.L. (2000). Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe. *Quaternary Science Reviews*, 19, 1155-1231;
- Antunes, C. (2016). Subida do Nível Médio do Mar em Cascais, revisão da taxa actual. Actas das 4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Lisboa: Instituto Hidrográfico;
- Aviso n.º 10080/2016, de 16 de agosto. *Diário da República n.º 156 – II Série*;
- Baize, D. (1993). Soil science analyses: a guide to current use. Chichester: John Wiley & Sons;
- Bettencourt, A., Gomes, V., Dias, A., Ferreira, G., Silva, M., & Costa, L. (2003). Estuários Portugueses. Lisboa: Direcção dos Serviços de Planeamento, Instituto da Água, Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente;
- Costas, S., Rebêlo, L., Brito, P., Burbidge, C., Prudêncio, M., & FitzGerald, D. (2015). The Joint History of Tróia Peninsula and Sado Ebb-Delta. Em G. Randazzo, D. Jackson, & J. Cooper, Sand and Gravel Spits (pp. 79-102). Switzerland: Springer;
- Davis Jr, R., & Fitzgerald, D. (2004). Beaches and Coasts. Oxford: Wiley-Blackwell;
- Decreto-Lei n.º 46/89, de 15 de fevereiro. *Diário da República n.º 38/90 – I Série*. Ministério do Planeamento e da Administração do Território. Lisboa;
- Freitas, M., & Andrade, C. (2008). O estuário do Sado. Em J. Soares, Embarcações Tradicionais - Contexto físico-cultural do estuário do Sado. Setúbal: Museu de Arqueologia e Etnografia do Distrito de Setúbal / Assembleia Distrital de Setúbal e Administração dos Portos de Setúbal e Sesimbra;
- Freitas, M., Andrade, C., Cruces, A., Munhá, J., Sousa, M., Moreira, S., Jouanneau, J.M., & Martins, L. (2008). Anthropogenic influence in the Sado estuary (Portugal): a geochemical approach. *Journal of Iberian Geology*, 34 (2), 271-286;
- Heidemann, H. (2014). Lidar base specification (ver. 1.2, November 2014): U.S. Geological Survey Techniques and Methods (Vol. 11). United States: U.S. Geological Survey;
- IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York, USA: Cambridge University Press;
- Jevrejeva, S., Grinsted, A., & Moore, J. (2014). Upper limit for sea level projections by 2100. *Environmental Research Letters*, 1-9;
- Loh, P., Miller, A., Reeves, A., Harvey, S., & Overnell, J. (2008). Assessing the biodegradability of terrestrial-derived organic matter in Scottish sea loch sediments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 811-823;
- Manuppella, G., Antunes, M.T., Pais, J., Ramalho, M.M., Rey, J. (1999). *Carta Geológica de Portugal na Escala 1:50 000 – Notícia Explicativa da Folha 38-B, Setúbal*. Instituto Geológico e Mineiro. Lisboa;
- McFadden, L., Spencer, T., & Nicholls, R. (2007). Broad-scale modelling of coastal wetlands: what is required? *Hydrobiologia*, 577, 5-15;

Moreira, M. (1995). O limite marítimo do Estuário do Sado a partir de imagens satelitais. *Finisterra*, XXX (59-60), 139-148;

NOAA. (2017). NOAA Technical Report NOS CO-OPS 083: Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States. Silver Spring, United States: U.S. Department of Commerce / National oceanic and Atmospheric Administration / National Ocean Service / Center for Operational Oceanographic Products and Services;

Rahmstorf, S. (2007). A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise. *Science*, 315, 368-370;

Sanchez-Cabeza, J., & Ruiz-Fernández, A. (2012). 210Pb sediment radiochronology: An integrated formulation and classification of dating models. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 82, 183-200;

Silva, M., Patrício, M., Mariano, A., Morais, M., & Valério, M. (2012). Obtenção de Dados LiDAR para as Zonas Costeiras de Portugal Continental. *Actas das 2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica* (pp. 19-22). Lisboa, Portugal: Instituto Hidrográfico;

UNEP-WCMC. (2009). *Annual Report - Seizing the Green Opportunity*. Nairobi, Quénia: UNEP Division of Communications and Public Information;

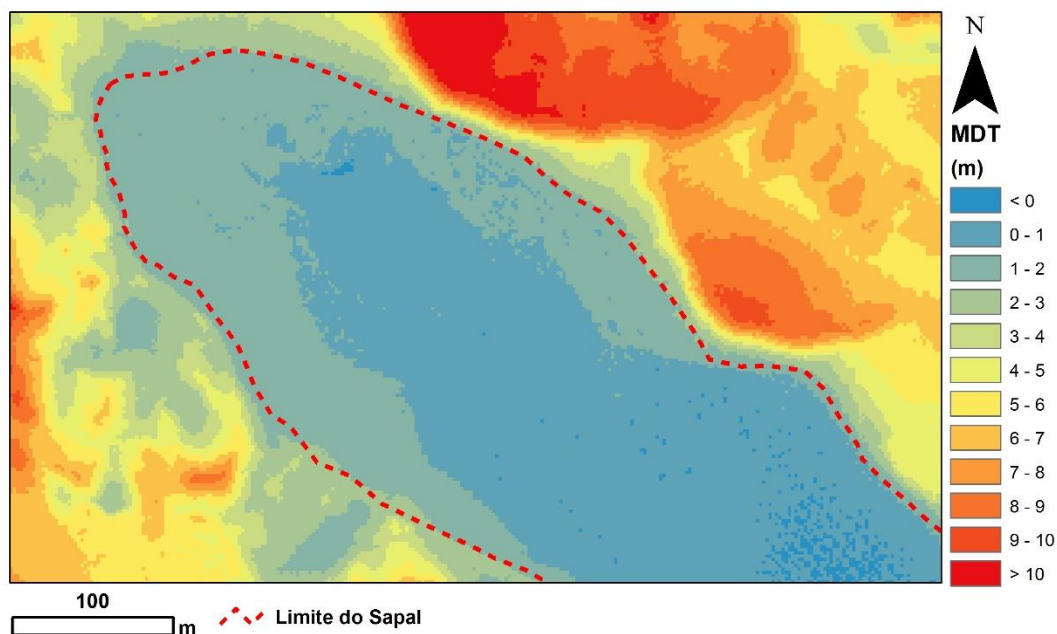
UNEP-WCMC. (2015). *Global distribution of saltmarsh (ver.2.0)*. Cambridge, United Kingdom: UNEP World Conservation Monitoring Centre;

Woodroffe, C. (2003). *Coasts: form, process and evolution*. United Kingdom: Cambridge University Press.

Zbyszewski, G., Antunes, M.T., Ferreira, O.V., Barros e Carvalhosa, A. (1976). *Carta Geológica de Portugal na Escala 1:50 000 – Notícia Explicativa da Folha 39-A, Águas de Moura*. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.

# 11. ANEXOS

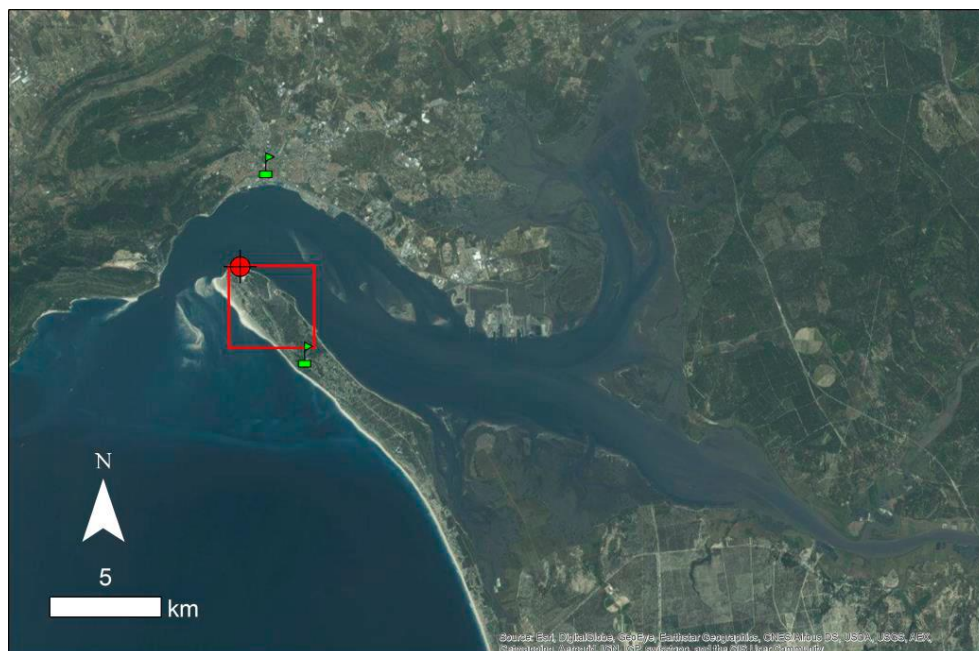
Anexo 1 - MDT do setor norte da Caldeira de Tróia e área envolvente (DGT-APA)



Anexo 2 - Parâmetros estatísticos da distribuição de cotas do MDT e de pontos registados com o DGPS

Parâmetros	Alto Sapal (m)		Baixo Sapal (m)		Raso de Maré (m)		
	DGPS	MDT	DGPS	MDT	DGPS	MDT	
<b>Mínimo</b>	1.05	1.02	0.73	0.60	0.21	0.16	
<b>Q<sub>1</sub> (25%)</b>	1.25	1.33	0.94	0.91	0.48	0.35	
<b>Q<sub>2</sub> (Mediana)</b>	1.39	1.46	1.02	1.00	0.57	0.42	
<b>Q<sub>3</sub> (75%)</b>	1.46	1.54	1.08	1.12	0.66	0.56	
<b>Máximo</b>	1.71	1.77	1.29	1.38	0.93	0.88	
<b>Amplitude Interquartil</b>	0.21	0.21	0.14	0.21	0.18	0.21	
<b>Média</b>	1.37	1.43	1.00	1.00	0.57	0.50	
<b>Desvio padrão</b>	0.12	0.16	0.11	0.17	0.14	0.22	
<b>Outliers</b>	<b>Mín.</b>	---	0.79	0.66	0.49	- 0.36	---
	<b>Máx.</b>	1.76	---	1.31	---	0.96	1.13
<b>Número de pontos</b>	678	458	928	321	238	147	

Anexo 3 - Localização do marégrafo de Tróia em relação à área de estudo (assinalada no quadrado vermelho)



Anexo 4 – Subida do NMM proposto para cada cenário do IPCC. Valores em relação ao NMM médio entre 1986 e 2005 (IPCC, 2013)

Year	SRES A1B	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
2007	0.03 [0.02 to 0.04]	0.03 [0.02 to 0.04]	0.03 [0.02 to 0.04]	0.03 [0.02 to 0.04]	0.03 [0.02 to 0.04]
2010	0.04 [0.03 to 0.05]	0.04 [0.03 to 0.05]	0.04 [0.03 to 0.05]	0.04 [0.03 to 0.05]	0.04 [0.03 to 0.05]
2020	0.08 [0.06 to 0.10]	0.08 [0.06 to 0.10]	0.08 [0.06 to 0.10]	0.08 [0.06 to 0.10]	0.08 [0.06 to 0.11]
2030	0.12 [0.09 to 0.16]	0.13 [0.09 to 0.16]	0.13 [0.09 to 0.16]	0.12 [0.09 to 0.16]	0.13 [0.10 to 0.17]
2040	0.17 [0.13 to 0.22]	0.17 [0.13 to 0.22]	0.17 [0.13 to 0.22]	0.17 [0.12 to 0.21]	0.19 [0.14 to 0.24]
2050	0.23 [0.17 to 0.30]	0.22 [0.16 to 0.28]	0.23 [0.17 to 0.29]	0.22 [0.16 to 0.28]	0.25 [0.19 to 0.32]
2060	0.30 [0.21 to 0.38]	0.26 [0.18 to 0.35]	0.28 [0.21 to 0.37]	0.27 [0.19 to 0.35]	0.33 [0.24 to 0.42]
2070	0.37 [0.26 to 0.48]	0.31 [0.21 to 0.41]	0.35 [0.25 to 0.45]	0.33 [0.24 to 0.43]	0.42 [0.31 to 0.54]
2080	0.44 [0.31 to 0.58]	0.35 [0.24 to 0.48]	0.41 [0.28 to 0.54]	0.40 [0.28 to 0.53]	0.51 [0.37 to 0.67]
2090	0.52 [0.36 to 0.69]	0.40 [0.26 to 0.54]	0.47 [0.32 to 0.62]	0.47 [0.33 to 0.63]	0.62 [0.45 to 0.81]
2100	0.60 [0.42 to 0.80]	0.44 [0.28 to 0.61]	0.53 [0.36 to 0.71]	0.55 [0.38 to 0.73]	0.74 [0.53 to 0.98]

Anexo 5 – Subida do NMM proposto para cada cenário NOAA. Valores em relação ao NMM em 2000 (NOAA, 2017)

GMSL Scenario (meters)	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100	2120	2150	2200
Low	0.03	0.06	0.09	0.13	0.16	0.19	0.22	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.39
Intermediate-Low	0.04	0.08	0.13	0.18	0.24	0.29	0.35	0.4	0.45	0.50	0.60	0.73	0.95
Intermediate	0.04	0.10	0.16	0.25	0.34	0.45	0.57	0.71	0.85	1.0	1.3	1.8	2.8
Intermediate-High	0.05	0.10	0.19	0.30	0.44	0.60	0.79	1.0	1.2	1.5	2.0	3.1	5.1
High	0.05	0.11	0.21	0.36	0.54	0.77	1.0	1.3	1.7	2.0	2.8	4.3	7.5
Extreme	0.04	0.11	0.24	0.41	0.63	0.90	1.2	1.6	2.0	2.5	3.6	5.5	9.7

Anexo 6 - Variação da atividade dos isótopos  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{210}\text{Pb}$  em função da profundidade na sondagem CTBSI

Profundidade (cm)	$^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg)		$^{210}\text{Pb}$ (Bq/kg)	
	Atividade	Incerteza	Atividade	Incerteza
0.5	5.519	1.187	119.590	11.860
1.5	4.327	1.015	103.160	7.939
2.5	6.541	1.131	105.510	10.530
3.5	5.127	0.898	92.240	9.498
4.5	4.440	0.745	83.489	4.637
5.5	5.136	0.685	75.071	5.669
6.5	4.498	0.674	76.482	4.737
9.5	5.898	0.853	71.611	7.509
12.5	6.800	0.781	58.402	6.775
13.5	5.696	0.349	85.221	4.361
14.5	6.133	0.634	57.553	8.048
15.5	8.143	0.878	53.464	6.729
16.5	6.027	0.860	40.064	9.877
18.5	8.012	0.643	60.653	4.086
19.5	7.289	0.824	29.768	7.096
22.5	5.852	0.643	28.676	3.640
25.5	4.848	0.649	26.513	4.809
27.5	1.525	0.542	15.608	5.633
29.5	0.630	0.000	17.992	8.650
36.5	0.000	0.000	11.859	8.432
43.5	0.000	0.000	15.280	0.000
65.5	0.000	0.000	8.408	5.337

Anexo 7 - Áreas e variações de áreas de sapal até 2100, utilizando o cenário IPCC RCP2.6

Data	Sapal		Alto Sapal		Baixo Sapal		Rácio AS/BS	
	Área (m <sup>2</sup> )	Δ (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Δ (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Δ (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Δ (%)
2016	41 260	0.0%	30 368	0.0%	10 892	0.0%	2.79	0.0%
2020	42 536	3.1%	30 812	1.5%	11 724	7.6%	2.63	-5.7%
2030	43 208	4.7%	30 876	1.7%	12 332	13.2%	2.50	-10.2%
2040	43 784	6.1%	30 428	0.2%	13 356	22.6%	2.28	-18.3%
2050	44 488	7.8%	30 216	-0.5%	14 272	31.0%	2.12	-24.1%
2060	44 984	9.0%	29 468	-3.0%	15 516	42.5%	1.90	-31.9%
2070	45 628	10.6%	28 668	-5.6%	16 960	55.7%	1.69	-39.4%
2080	46 136	11.8%	28 440	-6.3%	17 696	62.5%	1.61	-42.4%
2090	46 596	12.9%	27 332	-10.0%	19 264	76.9%	1.42	-49.1%
2100	47 468	15.0%	27 076	-10.8%	20 392	87.2%	1.33	-52.4%

Anexo 8 - Áreas e variações de áreas de sapal até 2100, utilizando o cenário IPCC RCP8.5

Data	Sapal		Alto Sapal		Baixo Sapal		Rácio AS/BS	
	Área (m <sup>2</sup> )	Δ (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Δ (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Δ (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Δ (%)
2016	41 260	0.0%	30 368	0.0%	10 892	0.0%	2.79	0.0%
2020	42 540	3.1%	30 816	1.5%	11 724	7.6%	2.63	-5.7%
2030	43 340	5.0%	30 536	0.6%	12 804	17.6%	2.38	-14.5%
2040	43 292	4.9%	29 544	-2.7%	13 748	26.2%	2.15	-22.9%
2050	41 880	1.5%	28 292	-6.8%	13 588	24.8%	2.08	-25.3%
2060	40 956	-0.7%	25 204	-17.0%	15 752	44.6%	1.60	-42.6%
2070	40 060	-2.9%	20 856	-31.3%	19 204	76.3%	1.09	-61.0%
2080	38 744	-6.1%	15 836	-47.9%	22 908	110.3%	0.69	-75.2%
2090	37 640	-8.8%	9 988	-67.1%	27 652	153.9%	0.36	-87.0%
2100	35 264	-14.5%	6 560	-78.4%	28 704	163.5%	0.23	-91.8%

Anexo 9 - Áreas e variações de áreas de sapal até 2100, utilizando o cenário Antunes (2016)

Data	Sapal		Alto Sapal		Baixo Sapal		Rácio AS/BS	
	Área (m <sup>2</sup> )	Δ (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Δ (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Δ (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Δ (%)
2016	41 260	---	30 368	---	10 892	0.0%	2.79	---
2020	42 404	2.8%	30 836	1.5%	11 568	6.2%	2.67	-4.4%
2030	42 340	2.6%	29 712	-2.2%	12 628	15.9%	2.35	-15.6%
2040	41 672	1.0%	28 084	-7.5%	13 588	24.8%	2.07	-25.9%
2050	40 612	-1.6%	23 484	-22.7%	17 128	57.3%	1.37	-50.8%
2060	39 248	-4.9%	17 480	-42.4%	21 768	99.9%	0.80	-71.2%
2070	37 016	-10.3%	11 456	-62.3%	25 560	134.7%	0.45	-83.9%
2080	33 680	-18.4%	5 788	-80.9%	27 892	156.1%	0.21	-92.6%
2090	26 132	-36.7%	5 912	-80.5%	20 220	85.6%	0.29	-89.5%
2100	15 944	-61.4%	5 332	-82.4%	10 612	-2.6%	0.50	-82.0%

Anexo 10 - Áreas e variações de áreas de sapal até 2100, utilizando o cenário NOAA High

Data	Sapal		Alto Sapal		Baixo Sapal		Rácio AS/BS	
	Área (m <sup>2</sup> )	Δ (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Δ (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Δ (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Δ (%)
2016	41 260	0.0%	30 368	0.0%	10 892	0.0%	2.79	0.0%
2020	42 120	2.1%	30 032	-1.1%	12 088	11.0%	2.48	-10.9%
2030	40 952	-0.7%	26 624	-12.3%	14 328	31.5%	1.86	-33.4%
2040	38 640	-6.3%	17 796	-41.4%	20 844	91.4%	0.85	-69.4%
2050	34 612	-16.1%	6 960	-77.1%	27 652	153.9%	0.25	-91.0%
2060	24 100	-41.6%	5 272	-82.6%	18 828	72.9%	0.28	-90.0%
2070	10 476	-74.6%	4 772	-84.3%	5 704	-47.6%	0.84	-70.0%
2080	10 540	-74.5%	4 940	-83.7%	5 600	-48.6%	0.88	-68.4%
2090	9 804	-76.2%	4 720	-84.5%	5 084	-53.3%	0.93	-66.7%
2100	8 300	-79.9%	3 592	-88.2%	4 708	-56.8%	0.76	-72.6%