

GUILHERME ANDREOLLA MONTEIRO

DISSERTAÇÃO

**REGIMES DE INUNDAÇÃO NA RIA FORMOSA ASSOCIADOS AO FUTURO
NÍVEL DO MAR**

Mestrado em Engenharia Mecânica -
- Energia, Climatização e Refrigeração

Trabalho efetuado sob a orientação de:
Dr. João Janeiro (Orientador)
Prof. Dr. Flávio Martins (Coorientador)



UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Instituto Superior de Engenharia

Ano letivo 2020/2021

**REGIMES DE INUNDAÇÃO NA RIA FORMOSA ASSOCIADOS AO FUTURO
NÍVEL DO MAR**

Declaração da Autoria do trabalho

Declaro ser o(a) autor(a) deste trabalho, que é original e inédito.

Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da lista-
gem de referências incluída.

Nome completo do aluno

© Copyright: Guilherme Andreolla Monteiro.

A Universidade do Algarve tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABELAS	x
LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	4
1.1.1 Objetivo Geral	4
1.1.2 Objetivos Específicos	4
2 ESTADO DA ARTE.....	6
3 METODOLOGIA	12
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 Cenário de Validação	31
4.2 Cenário 2012.....	33
4.2.1 Maré Morta.....	33
4.2.2 Maré Viva.....	41
4.3 Cenário 2050.....	49
4.3.1 Maré Morta.....	49
4.3.2 Maré Viva.....	57
4.4 Cenário 2100.....	64
4.4.1 Maré Morta.....	64
4.4.2 Maré Viva.....	72
4.5 Comparação entre Cenários	81
4.5.1 Maré Morta.....	81
4.5.2 Maré Viva.....	90
4.6 Comparação entre Metodologias para o Cenário de 2100.....	97
5 CONCLUSÕES.....	101
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem de satélite do sistema de sapais da Ria Formosa	1
Figura 2 - Mapa dos sistemas que compõem a Ria Formosa	12
Figura 3 - Batimetria da Ria Formosa criada por Martins e Janeiro, (2018), com uma malha de 345 x 400 células compreendidas em zonas de baixa e alta resolução.	16
Figura 4 - Localização geográfica das estações de recolha de dados.....	19
Figura 5 - Gráfico da elevação teórica do mês de abril para o cenário de 2012.....	23
Figura 6 - Gráfico da elevação teórica do mês de abril para o cenário de 2050.....	24
Figura 7 - Gráfico da elevação teórica do mês de abril para o cenário de 2100.....	24
Figura 8 – Comparação da elevação teórica utilizando as harmónicas de maré para os anos analisados.	25
Figura 9 - Localização das estações de recolha de dados no trabalho de Martins e Janeiro (2018) (em vermelho) e nas estações do presente trabalho (em azul).....	28
Figura 10 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Cais Comercial para o cenário de validação.	31
Figura 11 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Ilha Deserta para o cenário de validação.	32
Figura 12 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Cais Comercial para o Cenário 2012 Maré Morta.	34
Figura 13 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Ilha Deserta para o Cenário 2012 Maré Morta.	34
Figura 14 - Representação da elevação em baixa mar para o Cenário 2012 Maré Morta.	35
Figura 15 - Representação da elevação em preia mar para o Cenário 2012 Maré Morta.	36
Figura 16 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Cais Comercial no cenário de 2012 Maré Morta.....	37
Figura 17 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Ilha Deserta no cenário de 2012 Maré Morta.	37
Figura 18 - Campo de velocidades transientes na situação de enchente para o Cenário 2012 Maré Morta.....	38

Figura 19 - Campo de velocidades transientes na situação de vazante para o Cenário 2012 Maré Morta.	39
Figura 20 - Histograma com a distribuição das áreas submersas por classe de tempo para o Cenário 2012 Maré Morta.	40
Figura 21 - Mapas de distribuição das áreas de inundação para as diversas áreas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o Cenário 2012 Maré Morta.	41
Figura 22 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Cais Comercial para o Cenário 2012 Maré Viva.	42
Figura 23 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Ilha Deserta para o Cenário 2012 Maré Viva.	42
Figura 24 - Representação da elevação em baixa mar para o Cenário 2012 Maré Viva.	43
Figura 25 - Representação da elevação em preia mar para o Cenário 2012 Maré Viva.	44
Figura 26 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Cais Comercial no cenário de 2012 Maré Viva.	45
Figura 27 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Ilha Deserta no cenário de 2012 Maré Viva.	45
Figura 28 - Campo de velocidades transientes na situação de enchente para o Cenário 2012 Maré Viva.	46
Figura 29 - Campo de velocidades transientes na situação de vazante para o Cenário 2012 Maré Viva.	47
Figura 30 - Histograma com a distribuição das áreas submersas por classe de tempo para o Cenário 2012 Maré Viva.	48
Figura 31 - Mapas de distribuição das áreas de inundação para as diversas áreas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o Cenário 2012 Maré Viva.	49
Figura 32 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Cais Comercial para o Cenário 2050 Maré Morta.	50
Figura 33 - - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Ilha Deserta para o Cenário 2050 Maré Morta.	50
Figura 34 - Representação da elevação em baixa mar para o Cenário 2050 Maré Morta.	51
Figura 35 - Representação da elevação em preia mar para o Cenário 2050 Maré Morta.	52

Figura 36 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Cais Comercial no cenário de 2050 Maré Morta.	52
Figura 37 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Ilha Deserta no cenário de 2050 Maré Morta.	53
Figura 38 - Campo de velocidades transientes na situação de enchente para o Cenário 2050 Maré Morta.	54
Figura 39 - Campo de velocidades transientes na situação de vazante para o Cenário 2050 Maré Morta.	54
Figura 40 - Histograma com a distribuição das áreas submersas por classe de tempo para o Cenário 2050 Maré Morta.	56
Figura 41 - Mapas de distribuição das áreas de inundação para as diversas áreas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o Cenário 2050 Maré Morta.	56
Figura 42 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Cais Comercial para o Cenário 2050 Maré Viva.	57
Figura 43 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Ilha Deserta para o Cenário 2050 Maré Viva.	58
Figura 44 - Representação da elevação em baixa mar para o Cenário 2050 Maré Viva.	59
Figura 45 - Representação da elevação em preia mar para o Cenário 2050 Maré Viva.	59
Figura 46 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Cais Comercial no cenário de 2050 Maré Viva.	60
Figura 47 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Ilha Deserta no cenário de 2050 Maré Viva.	60
Figura 48 - Campo de velocidades transientes na situação de enchente para o Cenário 2050 Maré Viva.	61
Figura 49 - Campo de velocidades transientes na situação de vazante para o Cenário 2050 Maré Viva.	62
Figura 50 - Histograma com a distribuição das áreas submersas por classe de tempo para o Cenário 2050 Maré Viva.	63
Figura 51 - Mapas de distribuição das áreas de inundação para as diversas áreas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o Cenário 2050 Maré Viva.	64
Figura 52 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Cais Comercial para o Cenário 2100 Maré Morta.	65

Figura 53 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Ilha Deserta para o Cenário 2100 Maré Morta.	65
Figura 54 - Representação da elevação em baixa mar para o Cenário 2100 Maré Morta.	66
Figura 55 - Representação da elevação em preia mar para o Cenário 2100 Maré Morta.	67
Figura 56 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Cais Comercial no cenário de 2100 Maré Morta.	68
Figura 57 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Ilha Deserta no cenário de 2100 Maré Morta.	68
Figura 58 - Campo de velocidades transientes na situação de enchente para o Cenário 2100 Maré Morta.	69
Figura 59 - Campo de velocidades transientes na situação de vazante para o Cenário 2100 Maré Morta.	70
Figura 60 - Histograma com a distribuição das áreas submersas por classe de tempo para o Cenário 2100 Maré Morta.	71
Figura 61 - Mapas de distribuição das áreas de inundação para as diversas áreas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o Cenário 2100 Maré Morta.	72
Figura 62 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Cais Comercial para o Cenário 2100 Maré Viva.	73
Figura 63 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Ilha Deserta para o Cenário 2100 Maré Viva.	73
Figura 64 - Representação da elevação em baixa mar para o Cenário 2100 Maré Viva.	74
Figura 65 - Representação da elevação em preia mar para o Cenário 2100 Maré Viva.	75
Figura 66 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Cais Comercial no cenário de 2100 Maré Viva.	76
Figura 67 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Ilha Deserta no cenário de 2100 Maré Viva.	76
Figura 68 - Campo de velocidades transientes na situação de enchente para o Cenário 2100 Maré Viva.	77
Figura 69 - Campo de velocidades transientes na situação de vazante para o Cenário 2100 Maré Viva.	78

Figura 70 - Histograma com a distribuição das áreas submersas por classe de tempo para o Cenário 2100 Maré Viva.	79
Figura 71 - Mapas de distribuição das áreas de inundação para as diversas áreas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o Cenário 2100 Maré Viva.	80
Figura 72 - Série temporal da elevação na estação Cais Comercial para o Cenário 2012 (roxo), Cenário 2050 (verde) e 2100 (vermelho) na situação de Maré Morta.....	82
Figura 73 - Série temporal da elevação na estação Ilha Deserta para o Cenário 2012 (roxo), Cenário 2050 (verde) e 2100 (vermelho) na situação de Maré Morta.....	82
Figura 74 - Séries temporais de elevação obtidos por Martins e Janeiro (2018), considerando apenas a harmónica M2.....	84
Figura 75 - Evolução do módulo da velocidade na estação Cais Comercial para o Cenário 2012 (roxo), Cenário 2050 (verde) e Cenário 2100 (vermelho) na situação de Maré Morta.	85
Figura 76 - Evolução do módulo da velocidade na estação Ilha Deserta para o Cenário 2012 (roxo), Cenário 2050 (verde) e Cenário 2100 (vermelho) na situação de Maré Morta.	85
Figura 77 - Mapas de distribuição das áreas de inundação com 0 a 3 horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Morta.	87
Figura 78 - Mapas de distribuição das áreas de inundação com 3 a 6 horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Morta.	87
Figura 79 - Mapas de distribuição das áreas de inundação com 6 a 9 horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Morta.....	88
Figura 80 - Mapas de distribuição das áreas de inundação com 9 a 12 horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Morta.....	88
Figura 81 - Histogramas de distribuição das áreas de inundação em função número de horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Morta.	89
Figura 82 - Série temporal da elevação na estação Cais Comercial para o Cenário 2012 (roxo), Cenário 2050 (verde) e Cenário 2100 (vermelho) na situação de Maré Viva....	90
Figura 83 - Série temporal da elevação na estação Ilha Deserta para o Cenário 2012 (roxo), Cenário 2050 (verde) e Cenário 2100 (vermelho) na situação de Maré Viva....	90

Figura 84 - Evolução do módulo da velocidade na estação Cais Comercial para o Cenário 2012 (roxo), Cenário 2050 (verde) e Cenário 2100 (vermelho) na situação de Maré Viva.	91
Figura 85 - Evolução do módulo da velocidade na estação Ilha Deserta para o Cenário 2012 (roxo), Cenário 2050 (verde) e Cenário 2100 (vermelho) na situação de Maré Viva.	92
Figura 86 - Mapas de distribuição das áreas de inundação com 0 a 3 horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Viva.	93
Figura 87 - Mapas de distribuição das áreas de inundação com 3 a 6 horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Viva.	94
Figura 88 - Mapas de distribuição das áreas de inundação com 6 a 9 horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Viva.	94
Figura 89 - Mapas de distribuição das áreas de inundação com 9 a 12 horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Viva.....	95
Figura 90 - Histogramas de distribuição das áreas de inundação em função número de horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Viva.	95
Figura 91 - Histograma comparando a distribuição das áreas submersas por classes....	98
Figura 92 - Comparação dos mapas de distribuição das áreas de inundação para um período de 0 a 3 horas de imersão.	98
Figura 93 - Comparação dos mapas de distribuição das áreas de inundação para um período de 3 a 6 horas de imersão.	99
Figura 94 - Comparação dos mapas de distribuição das áreas de inundação para um período de 6 a 9 horas de imersão.	99
Figura 95 - Comparação dos mapas de distribuição das áreas de inundação para um período de 9 a 12 horas de imersão.	99

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Valores estimados para o aumento da temperatura do planeta.	7
Tabela 2 - Resultados do aumento relativo do nível do mar (ARNM) da costa europeia. Adaptado de Vousdoukas et al. (2017).	8
Tabela 3 - Dados utilizados pelos autores Martins e Janeiro (2018) para as simulações dos cenários futuros, conforme os dados do 5º relatório do IPCC de 2014.	11
Tabela 4 - Parâmetros utilizados para as simulações hidrodinâmicas e os valores adotados.	18
Tabela 5 - Critérios de classificação para validação de um modelo hidrodinâmico. Adaptado de Sutherland et al. (2004).	20
Tabela 6 – Principais harmônicas de maré	21
Tabela 7 - Harmônicas de maré utilizadas para modelação.	22
Tabela 8 - Datas para as simulações escolhidas, conforme a análise da altura da maré teórica, considerando as hármonicas de maré.	25
Tabela 9 - Classes de imersão para um ciclo de maré.	27
Tabela 10 - Classificação dos resultados RMAE da simulação, conforme os critérios da Tabela 5.	32
Tabela 11 - Distribuição das áreas do modelo da Ria Formosa em função do número de horas de imersão para o Cenário 2012 Maré Morta.	40
Tabela 12 - Distribuição das áreas do modelo da Ria Formosa em função do número de horas de imersão para o Cenário 2012 Maré Viva.	48
Tabela 13 - Distribuição das áreas do modelo da Ria Formosa em função do número de horas de imersão para o Cenário 2050 Maré Morta.	55
Tabela 14 - Distribuição das áreas do modelo da Ria Formosa em função do número de horas de imersão para o Cenário 2050 Maré Viva.	63
Tabela 15 - Distribuição das áreas do modelo da Ria Formosa em função do número de horas de imersão para o Cenário 2100 Maré Morta.	71
Tabela 16 - Distribuição das áreas do modelo da Ria Formosa em função do número de horas de imersão para o Cenário 2100 Maré Viva.	79
Tabela 17 - Elevações máximas e mínimas para as estações consideradas na situação de Maré Morta.	83

Tabela 18 - Velocidades máximas registadas nas estações para os três anos simulados.	86
Tabela 19 - Áreas de inundação dos três cenários simulados em função das horas de imersão.	86
Tabela 20 Elevações e mínimas para as estações consideradas na situação de Maré Viva.	91
Tabela 21 - Velocidades máximas registadas nas estações para os três anos simulados.	92
Tabela 22 - Áreas de inundação dos três cenários simulados em função das horas de imersão.	93
Tabela 26 – Comparação entre metodologias da distribuição das áreas em função das classes de horas de imersão.	97

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

- ARNM - Aumento Relativo do Nível do Mar
- AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
- CFD - *Computational Fluids Dynamics*
- CMIP - *Coupled Model Intercomparison Project*
- IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- NEM - Níveis Extremos do Mar
- PIAAC - Plano Intermunicipal de Adaptações às Alterações Climáticas da AMAL
- PNRF - Parque Nacional da Ria Formosa
- RCP - *Representative Concentration Pathways*

RESUMO

Localizada no sul de Portugal, a Ria Formosa é um estuário composto por sapais, canais, barras e ilhas-barreira que, pelas atividades económicas provenientes da pesca e cultura de bivalves e pela manutenção e preservação do ecossistema e das espécies que usam a Ria Formosa como local de alimentação, desova e habitat, tem uma grande importância local e nacional. Considerando as consequências causadas por fenómenos climáticos como o aquecimento global, espera-se que os seus impactos, nomeadamente o aumento do nível médio do mar, serão refletidos, a uma escala regional, nos sistemas costeiros, como é o caso da Ria Formosa. Utilizando o sistema de modelação numérica MOHID, foram realizadas simulações considerando projeções climáticas regionais para a costa da Europa (*downscaling* climático), divulgadas por Voudoukas et al. (2017), tendo como base o trabalho desenvolvido por Martins e Janeiro (2018) no Plano Intermunicipal de Adaptações às Alterações Climáticas da AMAL (PIAAC). Foram avaliados um cenário de validação, dois cenários de linha de base e quatro cenários de subida do nível médio do mar na Ria Formosa, pondo ênfase nas alterações para elevação do nível médio do mar, velocidade e tempos de inundação nas suas regiões inter-marés. Dos resultados obtidos, notou-se um aumento das áreas submersas em resposta ao aumento relativo do nível médio do mar para cada cenário analisado. Também foi observado uma variação na velocidade causada pela utilização de mais harmónicas de maré. Por fim, realizou-se a comparação entre a metodologia apresentada nesta dissertação e a metodologia proposta por Martins e Janeiro (2018), onde concluiu-se que, apesar de a metodologia de Martins e Janeiro (2018) considerar uma elevação maior do que a metodologia apresentada neste trabalho, a utilização de dados regionais para o aumento do nível médio do mar e a utilização de mais harmónicas de maré reproduziram resultados que indicam uma maior área submersa, mesmo a elevação sendo menor. Os resultados obtidos neste trabalho contribuem para ampliar a perceção das consequências do aumento do nível médio do mar, nomeadamente as áreas mais sensíveis aos maiores ou menores tempos de inundação, em comparação com a situação atual. Sendo assim, o trabalho possibilita uma perspetiva mais ampla sobre os desafios futuros para a gestão da Ria Formosa.

Palavras-chave: subida do nível médio do mar; downscaling climático; Ria Formosa; modelação numérica; MOHID.

ABSTRACT

Ria Formosa is an estuary located in the southern Portugal. It is composed by salt marshes, channels, inlets and barrier islands among another coastal landforms. Ria Formosa performs an important role in the local community by providing economic resources through fishing activities, bivalve molluscs farming and in an environmental aspect, through maintenance and preservation of the area and its species. In a global warming context, it is expected that the impacts in a rise of the mean sea level in a global scale will be reflected in coastal systems as Ria Formosa. These impacts are expected to occur mainly as morphodynamical changes. Therefore, the impacts caused by a mean sea level rise in the Ria Formosa becomes a relevant subject to study and analyze its consequences. Simulations were made to compare and evaluate the sea level rise, in a present situation and in the future, using the data published by Vousdoukas et al. (2017). The simulations were made with MOHID and aimed to evaluate three sea level rise scenarios for the Ria Formosa, with emphasis in sea level rise, water speed and intertidal flood times. The results were analyzed for each scenery in consideration to the sea level rise for the correspondent scenario. An increase in submerged areas was noted in response to the relative sea level rise in all scenarios. It was observed that the use of more tidal harmonics caused a variation in the water speed. Finally, a comparison was made between the methodology presented in this thesis and the methodology proposed by Martins and Janeiro (2018). Despite the methodology of Martins and Janeiro (2018) considers a higher sea level rise, the use of regional data and more tidal harmonics reproduced results that indicates a greater submerged area, even though the elevation been lower. This present thesis aimed to be an overall look about future challenges to manage the complex Ria Formosa lagoon system. By the end of the present work, it was possible to obtain relevant data and information to help understanding the consequences of the mean sea level rise in Ria Formosa. This thesis aimed to reveal the most sensitive areas to the changes in the inundation time in comparison with the actual state. In the end it was discussed the consequences to the local ecosystem and it was presented further studies suggestions.

Key-words: mean sea level rise, climatic downscaling, Ria Formosa, numerical models, MOHID

1 INTRODUÇÃO

Estuários são um tipo de sistema fluvial caracterizado, conforme Prichard (1967 apud Duarte e Vieira, 1997), em três aspectos fundamentais: possuir uma massa costeira semi-fechada, ter contato direto e permanente com o mar e estar sujeito à ação da maré. Essas características permitem que haja um gradiente de densidade de água salgada, provocando oscilações no volume de água e alterando os teores de salinidade e, portanto, alterando e ditando as condições biológicas dos estuários. Martins e Janeiro (2018) enfatizam a importância dos estuários como sendo locais de alimentação, desova e viveiro para diversas espécies de animais, além de ser um ecossistema vital para as mais de 600 milhões de pessoas que vivem em áreas costeiras a menos de 10 metros acima do mar.

Conforme Pérez (2020), a Ria Formosa é um sistema de ilhas barreiras localizada no sul de Portugal e possui uma área húmida de aproximadamente 105 km². Segundo Portela (2012), a Ria Formosa tem um cordão litoral de mais de 50 km de comprimento, o qual engloba sapais, áreas entremarés e canais. A Figura 1 apresenta o sistema que compõe o PNRF.



Figura 1 - Imagem de satélite do sistema de sapais da Ria Formosa. Google Maps (2019).

Conforme SETA (s.d.), os sapais do PNRF sofrem a ação direta do mar, variando constantemente conforme a ação das marés e proporcionando um ambiente altamente nutritivo, tornando os sapais as zonas mais produtivas no ponto de vista da biosfera e

ecossistema. Conforme González-Gorbeña et al. (2018), cerca de 60% da pesca de frutos do mar de Portugal é realizado na região da Ria Formosa. A Ria Formosa é rica em espécies vegetais e animais, possuindo mil trezentos e trinta e sete espécies identificadas (SETA, s.d.). Assim sendo, o PNRF é um local altamente explorado pelas atividades de pesca, cultura de bivalves e turismo em geral.

Segundo Martins e Janeiro (2018), há uma forte ligação dos ambientes estuarinos com fatores climáticos, como é o caso da Ria Formosa. Estes sistemas são altamente sensíveis às mudanças diárias, anuais, seculares e milenares. O clima afeta desde o funcionamento até a geomorfologia da Ria Formosa. Sendo assim, é de se esperar que eventos climáticos em larga escala, como o caso do aquecimento global, influenciarão e modificarão as condições existentes da Ria Formosa. O aquecimento global, pela sua importância ecológica e socioeconômica, é um tema recorrente e dos mais relevantes para a comunidade científica atualmente. Diversos trabalhos têm alertado para os possíveis impactos que estes fenômenos acarretam e suas consequências para a sociedade e ecossistemas. Vousdoukas *et al.* (2017) afirmam que o aquecimento global impactará severamente as regiões costeiras da Europa, nomeadamente através de fenômenos como aumento do nível médio do mar, potencialização dos efeitos do nível do mar extremo e riscos de inundações. Martins e Janeiro (2018) afirmam que as mudanças no clima, devido às alterações climáticas, serão refletidas na dinâmica dos estuários e que a sensibilidade dos mesmos a essas alterações podem ser conhecidas através do estudo dos processos físicos, químicos e ecológicos que regulam os estuários. Vousdoukas *et al.* (2017) dizem que as adaptações às mudanças climáticas e a redução dos riscos de desastres tem sido reconhecidas como prioridades pelas autoridades e organizações. O 5º relatório do *The Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014) aponta que o risco de inundações nas regiões costeiras do planeta poderá surgir como consequência das alterações climáticas. Conforme Hinkel et al. (2010), os impactos causados pelo aumento do nível do mar na Europa podem acarretar em um prejuízo de 17 mil milhões de dólares até 2100.

Em um contexto local, a subida do nível médio do mar em regiões costeiras, segundo Ferreira et al. (2008), tem maior impacto na inundação e desenvolvimento de uma tendência natural em haver deslocamentos dessas áreas no sentido da terra, além de, em uma situação de evolução futura desses sistemas, haver uma redução das áreas de cidades costeiras como as que estão localizadas próximas à Ria Formosa, sendo elas: Faro, Olhão e Tavira. Dias *et al.* (2004) alertam que a ocupação das áreas das ilhas-barreiras da Ria

Formosa tem apresentado uma tendência crescente, que tem se intensificado a cada ano. A ocupação de áreas vulneráveis às mudanças morfológicas é um risco devido aos possíveis impactos causados pelo aumento do nível médio do mar, nomeadamente a nível de inundações, conforme evidenciado por Ferreira *et al.* (2008). Por fim, os autores alertam que o risco de inundação afetará as atividades económicas desenvolvidas na Ria Formosa, onde incluem-se a navegação, recreação, pesca e mariscultura.

No caso da Ria Formosa, o cultivo de bivalves pode ser fortemente afetado pelas mudanças climáticas. O tempo de descobertura (período onde não há água) de um viveiro de bivalves é um fator de muita importância no que tange às condições dos habitats de bivalves (Neves e Martins, 1996). Além disso, os sedimentos dos quais os bivalves se alimentam são condicionados às temperaturas, que podem atingir os 40 °C devido à incidência direta do sol sob o viveiro. Isso significa que, em uma situação de aumento do nível médio do mar, haverá uma mudança nos tempos de exposição dos viveiros, podendo ser maiores ou menores, dependendo do ciclo de maré.

Diante de tamanha importância, não só do ponto de vista económico proveniente da pesca e extração de bivalves, mas também das espécies que lá habitam, torna-se muito relevante estudar os impactos causados pelas possíveis mudanças climáticas no sistema lagunar da Ria Formosa, nomeadamente no aumento do nível médio do mar e os seus efeitos na alteração das áreas de inundação, bem como as consequências desse aumento para o sistema e para o tecido socioeconómico regional que dele depende. Modelos matemáticos, que simulam o comportamento hidrodinâmico destes sistemas, são ferramentas chave para estudar as potenciais alterações provocadas pela subida do nível médio do mar na Ria Formosa. Essas ferramentas, conhecidas como CFD (*Computational Fluids Dynamics*) tem sido cada vez mais aceites como ferramentas de previsão e simulação de sistemas. Através da criação de uma malha computacional e de uma batimetria, é possível dividir o domínio de estudo em células, que são calculadas individualmente pelo modelo numérico. A batimetria é a tarefa de determinação das profundidades do objeto de estudo, seja através de campanhas topográficas submarinas ou de iterações com base em uma nuvem de pontos.

Martins e Janeiro (2018), no âmbito do Plano Intermunicipal de Adaptação às Alterações Climáticas (PIAAC) da AMAL (AMAL, 2019), desenvolveram um trabalho em que foram realizadas simulações, a fim de determinar alterações nos tempos de inundação e na salinidade em resposta a cenários globais futuros de aumento do nível médio do mar

aplicados à Ria Formosa. As conclusões obtidas pelos autores foram de que a salinidade não irá sofrer alterações significativas devido ao fraco caudal de água doce que chega ao sistema lagunar anualmente, mas que se prevê uma alteração significativa na hidrodinâmica da Ria Formosa potenciada pela subida do nível médio do mar. Assim, os autores apontam que diferenças entre os tempos de inundação das áreas inter-maré do presente e dos vários cenários considerados durante o estudo têm capacidade de alterar a ecologia e aquacultura do sistema, áreas de elevada importância para a região. O estudo iniciado pelos autores foi um avanço para compreender os efeitos do aumento do nível médio do mar na Ria Formosa, porém, algumas simplificações numéricas foram adotadas, pois o tempo das simulações foi um fator determinante na escolha do modelo, além de o objetivo do PIAAC não ser somente a Ria Formosa, mas sim o Estuário Guadiana e a Ria Formosa. Além disso, durante a realização do PIAAC, ainda não haviam sido divulgados dados que envolvessem uma percepção regional (*downscaling* climático) do aumento do nível médio do mar, sendo assim, os autores tinham a disposição somente dados globais publicados pelo IPCC.

Nesse sentido, esta dissertação de mestrado pretende aprofundar o estudo iniciado por Martins e Janeiro (2018), sendo mais um olhar sobre os desafios futuros para a gestão do complexo sistema lagunar da Ria Formosa.

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho podem ser divididos em geral e específicos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi estudar os efeitos da subida do nível médio do mar na Ria Formosa, considerando os dados em *downscaling* climático para o aumento relativo do nível do mar proposto por Voudoukas *et al.* (2017) e tendo por base o trabalho exploratório desenvolvido por Martins e Janeiro (2018).

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- Realizar a calibração e validação do modelo para batimetria presente da Ria Formosa desenvolvida por Martins e Janeiro (2018);
- Simular em modelação numérica o aumento relativo do nível do mar para os cenários estabelecidos com base no *downscaling* climático proposto por Vousdoukas et al. (2017);
- Comparar os resultados obtidos para cada cenário;
- Estimar as variações nos tempos de imersão das áreas inter-marés;
- Comparar a metodologia apresentada nesta dissertação com a metodologia proposta por Martins e Janeiro (2018).

2 ESTADO DA ARTE

Este capítulo tem como objetivo apresentar, de forma geral, parte dos estudos e pesquisas desenvolvidas no âmbito das simulações de escoamento aberto, nomeadamente simulações da subida do nível médio do mar em regiões costeiras semelhantes à Ria Formosa, para embasar o presente trabalho e justificar a importância do mesmo.

Church e White (2006) relataram uma aceleração no aumento global do nível médio do mar, a partir de 1870 até dezembro de 2004, de 1,95 centímetros. Ao extrapolar os resultados para 2100, os autores apontam que o nível global do mar poderia aumentar entre 2,8 a 3,4 centímetros.

O mais recente relatório publicado pela organização científico-política IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, traduzido para Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) (2019) apresenta um capítulo inteiro dedicado ao estudo do aumento do nível médio do mar e as implicações para ilhas, regiões costeiras e comunidades. De acordo com esse relatório, o nível médio global do mar está a aumentar. Entre 1901 e 1990, o aumento observado foi de 1,4 milímetros ao ano. De 1970 até 2015, o nível do mar subiu para 2,1 milímetros ao ano e, de 2006 até 2015, o aumento foi de 8,6 milímetros ao ano. A principal causa desse aumento, segundo IPCC (2019), é a expansão termal do oceano e, também, o ganho de massa devido à diminuição da massa de gelo. Já para cenários futuros, as projeções indicam um aumento do nível global do mar entre 29 e 59 centímetros para um cenário de emissões de carbono moderadas, e 84 centímetros a 1,1 metros para um cenário de emissões de carbono intensas. Os problemas causados pelo aumento do nível médio do mar também são evidenciados no relatório, sendo eles: imersão permanente de áreas de terra; inundações litorâneas mais frequentes e intensas; intensificação da erosão litorânea; perda e/ou mudança dos ecossistemas litorâneos; salinização do solo e impossibilidade de dragagens. Entretanto, o relatório enfatiza que as mudanças devidas ao aumento do nível médio do mar acontecem em escalas locais e em diferentes intensidades e consequências, evidenciando, assim, a importância dos estudos de eventos globais em escalas regionais, o chamado *downscaling* climático.

O trabalho desenvolvido por Voudoukas *et al.* (2017) busca preencher uma lacuna do conhecimento existente no que diz respeito à projeções futuras do fenómeno de níveis extremos do mar (NEM), em tradução livre de *extreme sea levels* (ESLs), para a costa da Europa. Tais NEM, em conjunto com o aumento relativo do nível mar e o risco

de inundações, são um dos impactos causados pelo aquecimento global. Os chamados NEM são a soma das componentes do nível do mar, marés, flutuações do nível da água e eventos climáticos como o *storm surge*. Conforme NOAA (2019), entende-se *storm surge* como um aumento anormal do nível da água do mar durante uma tempestade, causado pelos ventos. Dessas componentes, a que mais afeta o NEM é o aumento relativo do nível do mar (tradução livre de *relative sea level rise*) e, portanto, constitui papel fundamental no trabalho de Vousdoukas *et al.* (2017). Os autores combinaram diversas simulações dinâmicas das componentes mais importantes do NEM com os dados do CMIP (RGCM, s.d.), que é um trabalho colaborativo na área da climatologia, envolvendo o IPCC e investigadores do mundo todo, para averiguar e aprofundar os conhecimentos no que diz respeito às mudanças climáticas. Como não é o foco da presente dissertação discutir a fundo os trabalhos realizados pelo projeto CMIP, será apresentado apenas o que foi utilizado no trabalho de Vousdoukas *et al.* (2017).

A maneira utilizada por Vousdoukas *et al.* (2017) para averiguar os potenciais impactos foi a observação das mudanças de magnitude e frequência de ocorrência dos NEM, da situação presente para daqui 100 anos. Para realização das simulações, os autores usaram como base dados históricos e compararam com os dados de dois possíveis cenários, chamados RCP's (*Representative Concentration Pathways*), que, em resumo, são cenários em que se prevê um aumento ou diminuição na temperatura média do planeta, relativo a valores pré era industrial. Os cenários RCP4.5 e RCP 8.5 relacionam-se com o forçamento radiativo do planeta Terra e representam 4,5 e 8,5 W/m² de acréscimo, respectivamente. Conforme Chandler (2010), de maneira simples, o forçamento radiativo é uma medida do desequilíbrio da quantidade de energia que entra na atmosfera da Terra, através dos raios solares, e é refletida de volta para o espaço ou absorvida pela superfície terrestre.

A Tabela 1 é um resumo dos valores para o aumento de temperatura usados por Vousdoukas *et al.* (2017), conforme descrito no CMIP.

Tabela 1 - Valores estimados para o aumento da temperatura do planeta. Adaptado de Intergovernmental Panel on Climate Change (2013 apud Vousdoukas *et al.*, 2017).

Cenário	Período (anos)	Aumento da Temperatura do planeta (°C)
RCP4.5	1850-2081	2 – 3,6
RCP8.5	1900-2100	3,2 – 5,4

A metodologia usada por Vousdoukas *et al.* (2017) envolveu a divisão da costa europeia em 10 regiões geográficas e a utilização de diversas ferramentas de cálculo numérico e modelos, tais como Delft3D-FLOW e WaveWatch 3, além de dados da sonda espacial TOPEX/POSEIDON (Egbert e Erofeeva, 2002 apud Vousdoukas et al., 2017). Dados de outros satélites também foram utilizados para validação do modelo. Nomeia-se esse tipo de metodologia de *downscaling* climático, onde os dados globais são reduzidos em escala para simulações de regiões menores, como o caso da Europa. Os autores, então, calcularam os valores para cada componente do NEM, nomeadamente o aumento relativo do nível do mar, maré, flutuação do nível da água e o *storm surge*. Tendo em conta que o foco da presente dissertação é estudar os impactos do aumento do nível médio do mar na Ria Formosa, a componente do aumento relativo do nível do mar, calculada por Vousdoukas et al. (2017), será a única a ser utilizada como base para as simulações a serem realizadas, sendo que, a partir deste ponto, o aumento relativo do nível do mar será abreviado para ARNM. Os Resultados para o ARNM em toda costa europeia encontram-se resumidos na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Resultados do aumento relativo do nível do mar (ARNM) da costa europeia. Adaptado de Vousdoukas et al. (2017).

Cenário	ARNM (m)	
	2050	2100
RCP4.5	0,21	0,53
RCP8.5	0,24	0,77

A respeito de estudos sobre o aumento do nível médio do mar numa perspetiva local da Ria Formosa, destacam-se os trabalhos feitos por Carrasco *et al.* (2018) e por Pérez (2020), cujos focos foram simulações para prever o comportamento da circulação das marés na Ria Formosa, induzidas pela subida do nível médio do mar. Os estudos conduzidos por Carrasco *et al.* (2018) simularam o comportamento da circulação das marés, para um cenário de subida do nível médio do mar no ano de 2100, utilizando as projeções feitas pelo 5º relatório do IPCC de 2014. Os resultados indicaram a dominância de inundação da barra principal da Ria Formosa e também o estreitamento das duas barras secundárias. Os autores concluem que o estudo salienta a necessidade de pesquisas focadas na quantificação dos impactos físicos e socioeconómicos decorrentes do aumento do nível médio do mar em sistemas costeiros, bem como facilita o desenvolvimento de

estratégias de adaptações a esses eventos. No trabalho feito por Pérez (2020), foi utilizado o sistema de modelação Delft3D. O estudo considerou um nível médio do mar estático, com quatro cenários de subida do nível médio do mar. O modelo exibiu resultados que indicam mudanças no padrão da circulação de sedimentos causadas pela subida do nível médio do mar em um período de 89 anos, sendo a intensidade dos impactos diretamente influenciada pela intensidade da subida do nível médio do mar. Os resultados encontrados por Pérez (2020) contribuem para o conhecimento científico a respeito dos impactos causados pela subida do nível médio do mar na hidrodinâmica e morfodinâmica de lagoas costeiras, nomeadamente a Ria Formosa.

O trabalho realizado por Martins e Janeiro (2018) teve como premissa estudar a intrusão de água salgada em estuários, resultante dos impactos causados pela subida do nível médio do mar, através das projeções feitas pelo CMIP e o IPCC. Foram estudados o estuário do Rio Guadiana e também a Ria Formosa, porém, como o foco desta dissertação é somente a Ria Formosa, não serão apresentadas as conclusões obtidas para o estuário do Rio Guadiana.

O estudo realizado por Martins e Janeiro (2018) foi publicado na forma de relatório, compondo o chamado Plano Intermunicipal de Adaptação às Alterações Climáticas (PIAAC) da AMAL (AMAL, 2019). Os dados base de salinidade para comparação, obtidos por meio de campanhas de monitorização, levaram a concluir que “do ponto de vista da salinidade essas campanhas confirmaram o que se poderia depreender da caracterização geral do sistema. A salinidade da Ria Formosa é persistentemente constante e igual ao valor da salinidade da região costeira (exterior)” (Martins e Janeiro, 2018, p. 23). Sendo assim, a Ria Formosa já se encontra inundada pelas águas do oceano, logo, a salinidade presente na Ria Formosa tem a mesma concentração que as águas exteriores (correspondente a 36). Dessa maneira, não há como estudar os efeitos do aumento da salinidade, pois os dados das previsões futuras não compreendem um aumento da salinidade dos oceanos. Por isso, os autores optaram por analisar os efeitos nas áreas de inundação, a alteração da hidrodinâmica e os tempos de imersão frente ao aumento do nível médio do mar causado pelas alterações climáticas, conforme mostrado pelo 5º relatório do IPCC (2014).

Para a modelação e realização dos cálculos de simulação dos tempos de inundação e das áreas de imersão, foi utilizado o sistema numérico MOHID, no módulo de duas dimensões (2D). Tal solução foi adotada, em detrimento da modelação 3D, por limitações

computacionais, sendo considerada a Ria Formosa como uma “lagoa costeira bem misturada” (Newton e Mudge, 2003). Entende-se como bem misturada a situação onde não são encontradas estratificações a nível de salinidade ou temperatura ao longo da profundidade do estuário estudado.

Como as alterações do nível do mar afetam a morfologia do fundo, seria necessário um módulo específico para o cálculo da evolução do fundo, nomeadamente chamado de modelo morfodinâmico. Este modelo, ainda que importante para compreender corretamente a dinâmica da resposta da subida do nível médio do mar na Ria Formosa, é demasiado complexo e computacionalmente exigente para ser integrado no âmbito do estudo do PIAAC. Desta maneira, os autores optaram por adotar a premissa de que sempre haverá a intervenção humana para manutenção do estado atual da Ria Formosa, nomeadamente nas entradas da principal barra, a Barra de Faro-Olhão. Este é um cenário realista tendo em conta a dimensão socioeconómica da Ria Formosa, bem como a importância da Barra de Faro-Olhão, que é responsável por 60% da entrada de água na Ria Formosa (Pacheco, 2010).

Os cenários simulados representam situações comuns do sistema, não estando associados a nenhum evento de maré específico. Os cálculos simularam um período de 48 horas, equivalente à quatro ciclos de maré. Na primeira fase dos trabalhos realizados por Martins e Janeiro (2018), a simulação teve como foco estabelecer a situação presente, para então realizar uma nova simulação com os impactos das alterações no sistema. Os resultados da primeira fase indicaram que as “barras do Ancão, Faro-Olhão e Armona são responsáveis por cerca de 90% das trocas com o exterior” (Martins e Janeiro, 2018, p. 33).

A segunda etapa das simulações envolveu a utilização dos dados apresentados pelo 5º relatório do IPCC de 2014. A Tabela 3 mostra os valores, em metros, utilizados pelos autores para previsão de subida do nível global médio do mar, com base nos dados publicados pelo IPCC.

Tabela 3 - Dados utilizados pelos autores Martins e Janeiro (2018) para as simulações dos cenários futuros, conforme os dados do 5º relatório do IPCC de 2014.

Cenário	Aumento do nível médio do mar (m)
2040	0,24
2070	0,48
2100	0,72

Os resultados indicaram que “todos os cenários de subida de nível médio do mar simulados se traduzem no aumento progressivo das áreas submersas” (Martins e Janeiro, 2018, p. 12) para tempos mais elevados.

Pode-se concluir que o trabalho realizado por Martins e Janeiro (2018) é de suma importância para compreensão dos efeitos da subida do nível médio do mar na Ria Formosa, porém não foi aprofundada uma discussão das consequências do aumento dessa subida. O relatório mostrou que haverá um aumento nas áreas de imersão, mesmo com as devidas considerações assumidas. É de se esperar que uma análise mais detalhada, com a adição de componentes de marés realistas, e os dados do *downscaling* climático, conforme descrito por Vousdoukas *et al.* (2017), apresentem resultados mais próximos do real que possam evidenciar as consequências para os sapais da ria, nomeadamente a nível da sensibilidade de determinadas áreas ao aumento ou diminuição dos tempos de inundação.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como foco apresentar a metodologia utilizada para estudar os efeitos da subida do nível médio do mar na Ria Formosa, tendo por base o trabalho exploratório desenvolvido por Martins e Janeiro (2018) e o *downscaling* climático apresentado por Vousdoukas *et al.* (2017). Para isso é definido o objeto de estudo e suas características. Depois é apresentado o sistema de modelação numérica a ser utilizado, as considerações adotadas e a relação com os trabalhos base.

A Ria Formosa, conforme Ceia (2009), é composta de duas penínsulas delimitando a porção ocidente e oriente do sistema e são nomeadas, respetivamente, de Ancão e Cacela. Além disso, é também composta por cinco ilhas-barreiras, que são: Deserta, Culatra, Armona, Tavira e Cabanas. De acordo com Neves e Martins (1996), as ilhas formam um cordão de proteção para o mar aberto. Entre essas ilhas e a porção de terra permanentemente seca, encontra-se a região dos sapais e dos canais. Todo o sistema é cortado por seis barras ou canais de maré: Ancão ou São Luís, Faro-Olhão, Armona ou Grande, Fuseta, Tavira e Lacém ou Cacela. Os principais sistemas da Ria Formosa podem ser observados na Figura 2.



Figura 2 - Mapa dos sistemas que compõem a Ria Formosa. Adaptado de ICNF (s.d.a)

Segundo Ceia (2009), os canais viabilizam trocas hídricas, sedimentares, químicas e de nutrientes entre o meio lagunar e o oceano. Desses canais de maré, dois deles foram criados artificialmente, são eles: Faro-Olhão e Tavira (Pacheco *et al.* 2008). Com relação

à direção do fluxo de água, González-Gorbeña *et al.* (2018) apontam que o canal de Tavira apresenta um comportamento predominante de vazante, onde o nível do mar decresce durante a maior parte do período, enquanto o canal de Faro-Olhão apresenta um comportamento predominantemente de enchente. Tal característica de enchente é evidenciada pelo transporte e depósito de sedimentos, visto que são realizadas operações regulares de dragagem para manutenção da navegabilidade do canal (Portela, 2012).

Conforme Martins e Janeiro (2018), a hidrodinâmica da Ria Formosa pode ser definida como um sistema mesotidal (ondas entre 2 e 4 metros), com uma amplitude média de maré de aproximadamente 2,8 metros durante a maré viva e 1,3 metros em maré morta. Segundo ICNF (s.d.b), a profundidade média dos canais beira os 2 metros, além disso, cerca de 14% da área dos sapais permanece permanentemente inundada e cerca de 80% dos fundos emergem quando há os efeitos conjugados de maré baixa e maré viva.

No que diz respeito à importância socioambiental, as atividades mais importantes para a região são a aquacultura, onde se destaca a cultura de bivalves, e o turismo (Convié, 1994 apud Neves e Martins, 1996). O relatório mais recente do DGRM (DGRM, 2019) aponta que 87,6% dos viveiros para produção de moluscos bivalves, em Portugal, estão localizados na Ria Formosa.

A principal ferramenta para levar a cabo este trabalho científico é um sistema computacional de modelação numérica (CFD). A dinâmica dos fluidos computacional, amplamente conhecido através da sigla CFD (*computational fluids dynamics*), é a “ciência em determinar uma solução numérica para as equações que governam o comportamento de um fluido no espaço e tempo” (Gawande et al., 2016, p. 544). Essas equações são derivações matemáticas dos três princípios fundamentais da física: Equação da Continuidade (conservação de massa); Equação da Quantidade de Movimento (segunda lei de Newton); e Equação da Conservação de Energia. Juntas, essas equações são chamadas Equações de Navier-Stokes e são aplicadas para simular o comportamento de fluidos em áreas como AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado), aeroespacial, marítima, hidráulica, entre outras. Conforme Zawawi *et al.* (2018), o CFD tem sido amplamente usado com sucesso em muitas áreas da mecânica dos fluidos, fazendo com que se obtenha solução para os problemas de escoamento de fluido, sejam eles compreensíveis ou incompreensíveis, laminares ou turbulentos, com reações químicas ou sem. Ainda, o CFD é utilizado em áreas como oceanografia, previsão do tempo, fluxo de sangue no corpo humano, dentre outras.

Embora não seja possível resolver analiticamente as equações de Navier-Stokes, é possível sua discretização na forma de equações diferenciais parciais e resolvê-las através de um modelo numérico. Os modelos numéricos são variados e construídos para diferentes situações e propósitos. No âmbito da modelação de escoamentos de superfície livre, como o caso de oceanos, rios, lagos e estuários, é necessária a utilização de um modelo numérico que permita a inserção de parâmetros que se relacionam com este tipo de regime. Dentre os modelos numéricos, destaca-se o sistema MOHID de modelação.

Conforme Kenov *et al.* (2012), o MOHID é um sistema de modelação numérica, com foco em corpos de água, desenvolvido pelo MARETEC (*Marine Technology Research Centre*), no Instituto Superior Técnico (IST), que integra a Universidade Técnica de Lisboa (UTL), em Portugal. O MOHID tem se mostrado, ao longo dos anos, uma confiável e estável ferramenta para previsão e simulação de fenómenos físicos que envolvam a interação de corpos de água com superfície livres, tais como rios, estuários e zonas costeiras. O sistema MOHID possui, na sua versão atual – isto é, até a data da publicação desde trabalho –, mais de 60 módulos, capazes de gerir e simular determinado tipo de função ou processo específico envolvendo dinâmica dos fluidos. Dentro do MOHID, destaca-se o módulo chamado MOHID Water (MohidWiki, s.d.), desenvolvido para simular corpos de água superficiais, como rios, reservatórios, estuários, áreas costais ou oceanos. O MOHID Water compreende um modelo hidrodinâmico 3D, desenvolvido em linguagem FORTRAN, cujo método de cálculo utilizado é o Método dos Volumes Finitos no domínio real, sem qualquer transformação espacial, conforme Quesada *et al.* (2019). Os módulos de simulação do MOHID Water são responsáveis pela simulação de processos físicos e bioquímicos de fenómenos que ocorrem em corpos de água. Conforme Mills *et al.* (2020) o sistema MOHID resolve as equações de Navier-Stokes através de aproximações hidrostáticas e pela aproximação de Boussinesq. As equações são as seguintes:

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = 0$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{\partial(u_j u_1)}{\partial x_j} = f u_2 - g \frac{\rho_n}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial x_1} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_s}{\partial x_1} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial x_1} dx_3 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(A_j \frac{\partial u_1}{\partial x_j} \right)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + \frac{\partial(u_j u_2)}{\partial x_j} = f u_1 - g \frac{\rho_n}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial x_2} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_s}{\partial x_2} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial x_2} dx_3 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(A_j \frac{\partial u_2}{\partial x_j} \right)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_3} = -\rho g$$

Onde u_i é a componente da velocidade em todas as direções; f é o parâmetro de Coriolis; $\rho = \rho_0 + \rho'$ é a densidade decomposta no seu valor de referência acrescida da anomalia, e A_i é a viscosidade turbulenta em cada direção.

O MOHID tem sido usado em diversos trabalhos em Portugal tais como os realizados por Martins e Janeiro (2018), Kenov et al. (2012), Quesada et al. (2019), Mills et al. (2020) e também no Brasil, por meio de estudos realizados por Telles et al. (2012) e Seiler, Fernandes e Siegle (2020). Além disso, o MOHID foi utilizado em estudos na Coreia do Sul, tendo como exemplo o trabalho de Chang et al. (2020).

Para utilizar o sistema de modelação MOHID aplicado à Ria Formosa, é necessário a criação de uma batimetria computacional que discretize o sistema lagunar em células calculáveis, simulando a hidrodinâmica da mesma. No âmbito dos trabalhos do PIAAC, Martins e Janeiro (2018), usaram uma batimetria bidimensional para a simulação do modelo, sendo que os dados batimétricos foram adquiridos através de campanhas de monitorização, realizadas para a empresa Águas do Algarve, em 2006, pelo Centro de Investigação Marinha e Ambiental (CIMA) no qual os autores fazem parte. Posteriormente, em 2012, esta batimetria foi atualizada usando observações LIDAR (*Light Detection and Ranging*). No entanto, a batimetria não foi validada pelos autores pela falta de observações de dados reais. A Figura 3 a seguir apresenta a batimetria criada para o PIAAC e que será utilizada no presente trabalho.

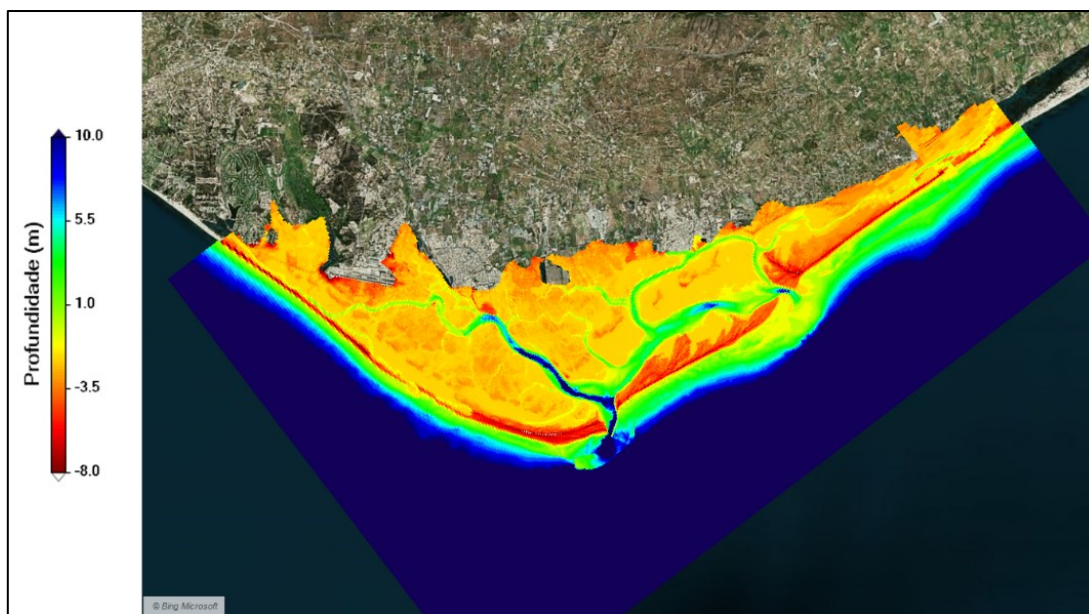


Figura 3 - Batimetria da Ria Formosa criada por Martins e Janeiro, (2018), com uma malha de 345 x 400 células compreendidas em zonas de baixa e alta resolução.

A batimetria criada por Martins e Janeiro (2018) apresenta o que há de mais recente em termos de levantamento de dados. Conforme os autores, em se tratando de um contexto de uma análise a 100 anos do impacto das alterações climáticas, estes dados podem ser considerados representativos para a situação atual da Ria Formosa, apesar de se ter o conhecimento de que o sistema da Ria Formosa é altamente dinâmico. Para a criação de uma nova batimetria, seriam necessários novos levantamentos de dados e novas campanhas de monitorização, algo que está muito além dos objetivos deste trabalho, devido à quantidade de tempo necessária para realização de tais recolhas de dados. Portanto, neste trabalho, utilizou-se a mesma batimetria criada por Martins e Janeiro (2018), conforme a Figura 3. Tem-se por justificativa também o fato de a utilização da mesma batimetria permitir a comparação entre os resultados obtidos pelos autores e os resultados do presente trabalho.

A batimetria possui uma malha de 345 x 400 células, compreendida entre duas zonas, uma de baixa resolução para o exterior da Ria Formosa e outra de alta resolução para os canais interiores. A zona de baixa resolução possui uma resolução de 200 metros. Para a zona de alta resolução, a malha possui 20 metros de resolução. A utilização de uma resolução variável gera certa consequência a nível dos resultados, que podem não ser tão expressivos caso mudanças sejam manifestadas nas zonas de alta resolução. No caso do cálculo das áreas de imersão, tal consequência é a apresentação de um valor

expressivamente menor nas áreas de alta resolução com relação aos valores em uma zona de baixa resolução. Entretanto a escolha de uma resolução variável justifica-se devido aos tempos de computação serem significativamente inferiores do que modelos encaixados, possibilitando mais simulações, visto que o tempo para realização das simulações podem ultrapassar vários dias. A próxima etapa é a da calibração e validação do modelo com a batimetria em estudo.

Conforme Hsu et al. (1999), a calibração e a validação da simulação da hidrodinâmica de um estuário é um requerimento antes de por o modelo em uso prático, apesar de não haver um procedimento padrão para realização de tal calibração e validação. A calibração consiste no processo de ajuste de vários parâmetros numéricos do modelo para que este consiga reproduzir, com o menor erro possível, a realidade observada através de um conjunto de dados medidos. A validação é o processo de utilização de um novo conjunto de dados medidos para verificar se os parâmetros usados na calibração são capazes de reproduzir um novo conjunto de observações. A diferença entre as observações e os resultados do modelo é a incerteza do modelo, sendo esta de importância fulcral para interpretar e entender os resultados obtidos. Segundo Hsu et al. (1999), os parâmetros de calibração mais importantes são a fricção e a difusão/dispersão turbulenta. Conforme assumido anteriormente, pela falta de um modelo morfodinâmico, será considerado que o fundo possui sempre as mesmas características ao longo do tempo, logo é possível assumir que a rugosidade do fundo é um dos fatores de calibração, já que esta é nada mais do que uma fricção entre a água e o fundo, e não sofre alterações com a maré, devido à não consideração do modelo morfodinâmico. Conforme Relvas (2018), além do atrito do fluido com o fundo, ocorre um atrito entre o vento e a superfície do oceano. Tal atrito entre o vento e a superfície do oceano representa a transferência de energia mecânica através da tensão do vento na superfície do oceano e é um dos principais fatores que regem a circulação dos oceanos. A propriedade que lida com tais tensões é a viscosidade molecular, porém, se a transferência de energia se desse apenas pela viscosidade molecular, o oceano levaria cerca de dois meses para reagir a um determinado vento. Entretanto, através de observações, é possível verificar que as camadas superiores reagem ao vento um ou dois dias depois. Portanto, é necessário a introdução de coeficientes de ajustes para que a aproximação possa ser feita e represente o fenômeno de transferência de energia de forma real. O coeficiente que lida com tais difusões e dispersões turbulentas são as chamadas viscosidades turbulentas (do inglês *eddy viscosity*), que, segundo Relvas (2018),

são propriedades do escoamento, e não do fluido em si, e possuem coeficientes de grandeza na ordem de 10^{11} , em comparação com a viscosidade molecular. Portanto, o ajuste da viscosidade turbulenta permite calibrar o modelo, visto que a viscosidade turbulenta, por si só, é um parâmetro de ajuste para a transferência de energia entre o vento e a superfície do oceano. Assim, os parâmetros de calibração foram a rugosidade do fundo e a viscosidade horizontal.

Devido ao processo de calibração ser iterativo, ou seja, serem necessárias diversas simulações com diversos valores a fim de encontrar a combinação ideal para a rugosidade e viscosidade, possuir valores pré-estabelecidos é uma forma de economizar tempo. Caso contrário, seria necessário realizar diversas simulações e, de forma iterativa, encontrar a combinação dos coeficientes que garantissem a estabilidade do modelo. No trabalho de referência realizado por Martins e Janeiro (2018), a rugosidade na qual o modelo atingiu estabilidade foi de 0,0025 metros e a viscosidade horizontal foi de 0,050 m^2/s . Simulações preliminares foram realizadas, a fim de verificar se os parâmetros de calibração adotados por Martins e Janeiro (2018) produziram bons resultados para a nova modelação. Verificou-se que o modelo se manteve estável, com os mesmos parâmetros adotados pelos autores. Sendo assim, a Tabela 4 a seguir resume todos os coeficientes adotados para a simulação do modelo da Ria Formosa.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados para as simulações hidrodinâmicas e os valores adotados.

Parâmetro	Valor utilizado
Rugosidade de fundo	0,0025 (m)
Viscosidade horizontal	0,050 (m^2/s)
Massa específica da água	1026,7 (kg/m^3)
Temperatura	18 ($^{\circ}C$)
Salinidade	36

A validação da simulação ocorre por meio do conhecimento de dados reais, retirados de campanhas de observações, e comparação com os dados gerados pela simulação, desde que o modelo possa ser capaz de simular com o máximo de exatidão possível as condições observadas por meio das campanhas. Se os resultados apresentados pelo modelo forem muito próximos aos resultados reais, tem-se o modelo validado. Para a validação da batimetria da Ria Formosa, teve-se a disposição dados reais do nível do mar colhidos por meio de campanhas de observações realizadas pelo pesquisador PhD. José Jacob, do

Centro de Investigação Marinha e Ambiental (CIMA), no âmbito dos trabalhos do Projeto COALA “Dinâmica dos nutrientes e da matéria particulada – Trocas entre uma lagoa costeira e o oceano adjacente através de um sistema de múltiplas barras: O caso da Ria Formosa, Sul de Portugal”, referência “PTDC/MAR/114217/2009-COALA”.

O projeto teve início em março de 2011 e buscou compreender a dinâmica dos nutrientes e trocas de massa entre a Ria Formosa e o oceano. Foram realizadas medições em duas estações, nomeadamente Cais Comercial e Ilha Deserta, com as seguintes localizações: Cais Comercial - 37° 00' 10.585" N, 7° 55' 08.517"W e; Ilha Deserta - 36° 57' 57.170"N, 7° 52' 15.273"W. A Figura 4 a seguir ilustra a localização das estações.



Figura 4 - Localização geográfica das estações de recolha de dados. Adaptado de Google Maps (2021).

As sondas realizaram uma medição de 10 em 10 minutos e com uma filtragem em frequência correspondente a 3 horas para a remoção de energia associada à ondulação e vaga. Os dados utilizados para o nível do mar foram registados no dia 01/04/2012.

Realizou-se, então, uma simulação do modelo para a mesma data das medições, afim de avaliar se o modelo seria capaz de apresentar resultados próximos ao da campanha de observação. Definiu-se a data de início da simulação para o dia 01/04/2012 às 00:00, com duração total de 14 dias. A simulação levou aproximadamente 28 horas para ser concluída e os resultados podem ser vistos a seguir, no Capítulo 4.

Ao utilizar dois conjuntos de dados, como é o caso dos dados reais e os dados simulados pelo modelo, pode-se comparar qualitativamente os resultados através dos

gráficos de velocidades e elevação, porém é necessário avaliar, de forma quantitativa, a eficácia dos resultados. Tal etapa é chamada de cálculo de erros. Existem diversas ferramentas e metodologias para o cálculo do erro, no entanto neste trabalho, para estimar os erros associados à validação, optou-se pela utilização do método RMAE (*Relative Mean Absolute Error*). Tal método tem sido adotado para verificação dos erros associados a validações de batimetrias, como no modelo utilizado no trabalho realizado por Janeiro et al. (2008) e também para o modelo utilizado no trabalho feito por Martinho (2010). O método RMAE foi desenvolvido por Sutherland, et al. (2004) e consiste em usar ferramentas de estatística para avaliação de modelos hidrodinâmicos de forma mais objetiva. Através de uma tabela de critérios de classificação, é possível definir e categorizar os resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico. A tabela de classificação pode ser vista na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Critérios de classificação para validação de um modelo hidrodinâmico. Adaptado de Sutherland et al. (2004).

Classificação	RMAE
Excelente	<0,2
Bom	0,2 – 0,4
Razoável	0,4 – 0,7
Ruim	0,7 – 1,0
Péssimo	> 1,0

Para o cálculo do RMAE, foi utilizada a seguinte equação:

$$RMAE = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{m(i)} - V_{c(i)})}{\sum_{i=1}^n V_{m(i)}} \quad (1)$$

Onde V_m é o valor medido e V_c é o valor calculado. No caso deste trabalho, $\sum V_m$ é o somatório do nível do mar medido através das campanhas de observações e $\sum V_c$ é o somatório dos resultados para o nível do mar obtidos através do modelo. Para calcular o RMAE, primeiramente é necessário realizar o ajuste do espaçamento temporal, visto que as medições realizadas pela sonda foram de 10 em 10 minutos e os dados obtidos pelo modelo, de minuto a minuto. Após a filtragem dos dados, realizou-se o somatório e os

resultados foram aplicados na Equação 1. Os resultados podem ser observados no Capítulo 4 a seguir.

Após a validação do modelo, os resultados em *downscaling* climático do ARNM, descritos em Vousdoukas et al. (2017) e apresentados na Tabela 2, foram usados como condição de forçamento no modelo hidrodinâmico da Ria Formosa e foram realizadas as devidas simulações. O uso de tal metodologia se justifica em razão de que os dados apresentados em Vousdoukas et al. (2017) representam de forma mais real os fenômenos relacionados com o aumento do nível médio do mar, em contexto regional, do que os dados globais utilizados por Martins e Janeiro (2018). Os resultados foram analisados para estimar as variações nos tempos de inundação das áreas inter-marés. Além disso, os resultados obtidos através da utilização dos dados de *downscaling* climático foram comparados com os obtidos por Martins e Janeiro (2018).

Em comparação com o trabalho realizado por Martins e Janeiro (2018), a principal diferença, além da mudança na fonte de dados para o aumento do nível médio do mar, é a utilização de um modelo de maré completo, com todas as harmónicas. Godinho (2011) define as harmónicas de maré como sendo uma maneira de modelar a maré relacionando o efeito que as orbitas do sol e da lua produzem na superfície oceânica. A Tabela 6 apresenta as principais constituintes de marés, também chamadas de harmónicas.

Tabela 6 – Principais harmónicas de maré. Adaptado de Oceanteacher (s.d.)

Símbolo	Constituinte	Período (horas)
M2	Lunar Semidiurno	12,42
S2	Solar Semidiurno	12,00
K1	Lunissolar Diurna	23,93
O1	Declinação Lunar Diurna	25,82
N2	Elíptico Lunar Semidiurno Maior	12,66
M4	Primeira Sobre Maré de M2	6,21
S4	Primeira Sobre Maré de S2	6,00
MS4	Lunissolar Composta	6,10
M6	Segunda Sobre Maré de M2	4,14

Segundo Pugh e Woodworth (2014), a harmónica M2 representa o tempo necessário para a Terra girar uma vez em relação à lua, ou seja, o seu período consiste na metade de um dia lunar de maré. No trabalho realizado por Martins e Janeiro (2018), foi utilizada

somente harmónica do tipo M2. Conforme os autores, a utilização da harmónica M2 teve como objetivo filtrar as altas frequências do sinal de maré, uma vez que os dados para representação do nível médio do mar usados foram estimados para o oceano global, conforme o 5º relatório do IPCC.

Para esse trabalho, tem-se a disposição os dados regionais para o nível médio do mar, conforme o *downscaling* climático realizado por Vousdoukas et al. (2017). Dessa forma, é possível a utilização de mais harmónicas de maré, a fim de tornar a modelação mais realista. Para gerar as harmónicas, foi utilizado o modelo de maré FES (*Finite Element Solution*). Maiores detalhes acerca deste modelo podem ser consultados em AVISO+ (s.d.).

A Tabela 7 descreve as harmónicas de maré utilizadas no presente trabalho.

Tabela 7 - Harmónicas de maré utilizadas para modelação.

Harmónicas	Amplitude (m)	Fase (°)
MS4	0,009	290,3
M4	0,017	206,9
2SM2	0,001	317,6
S2	0,354	107
K2	0,096	109
R2	0,003	108
T2	0,021	106
L2	0,027	99,2
M2	0,999	82,8
N2	0,219	65,9
LDA2	0,008	97,5
NU2	0,042	68,2
2N2	0,029	49
MU2	0,041	44,4
OO1	0,006	149,7
J1	0,003	144,7
K1	0,064	67,2
P1	0,021	59,3
O1	0,064	322,1
Q1	0,019	277,4
RHO1	0,004	283,3
2Q1	0,005	155,4

A utilização de mais harmónicas de maré possibilita resultados mais próximos da realidade, ao custo de um aumento no tempo necessário para os cálculos do modelo. Visto que o tempo necessário para o cálculo das simulações não foi um fator prejudicial para a

presente dissertação, foi adotada a utilização das harmônicas de maré demonstradas na Tabela 7. Simulações preliminares, realizadas para teste da metodologia, mostraram que as harmônicas de maré possuem forte influência no comportamento da maré, alterando completamente a amplitude e a altura da maré com o decorrer dos anos. A observação dos efeitos causados pelas harmônicas de maré é de suma importância, pois, através da observação das séries temporais da elevação para os anos em estudo, é possível retirar as datas para a realização de simulações que possam ser comparadas entre si. Portanto, usando as harmônicas de maré descritas na Tabela 7, foram reconstruídas as alturas da maré teóricas (sem o efeito da batimetria) esperadas para um mês. O período considerado para estas simulações foi de 01 de abril a 01 de maio em 2012, 2050 e 2100, respectivamente. Esse período de abril a maio corresponde justamente ao período utilizado pelo projeto COALA para a aquisição dos dados em 2012. Nessas simulações o nível médio do mar manteve-se o mesmo para todos os cenários. O objetivo principal destas simulações foi a obtenção da altura da maré teórica para um mês, sendo que, ao fim das simulações, foi possível observar graficamente a evolução da elevação e identificar em quais datas ocorrerão as situações de maré morta e maré viva para cada ano, ou seja, encontrar as datas de início equivalentes entre os anos. As Figuras 5, 6 e 7 mostram a elevação teórica para o mês de abril, para cada ano considerado neste trabalho.

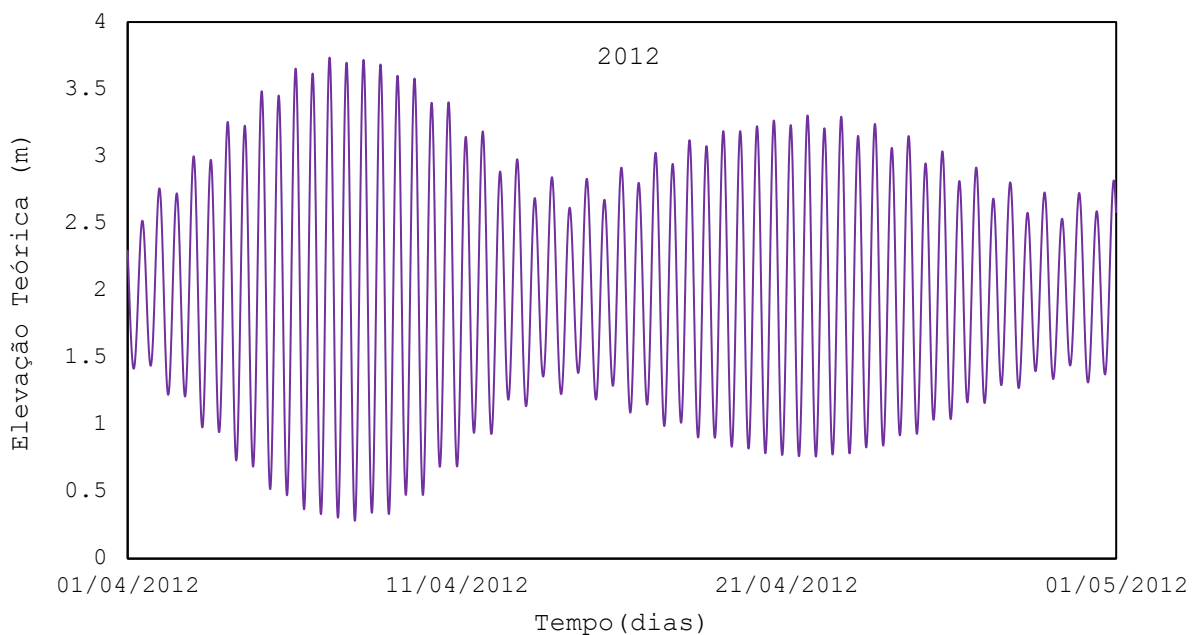


Figura 5 - Gráfico da elevação teórica do mês de abril para o cenário de 2012.

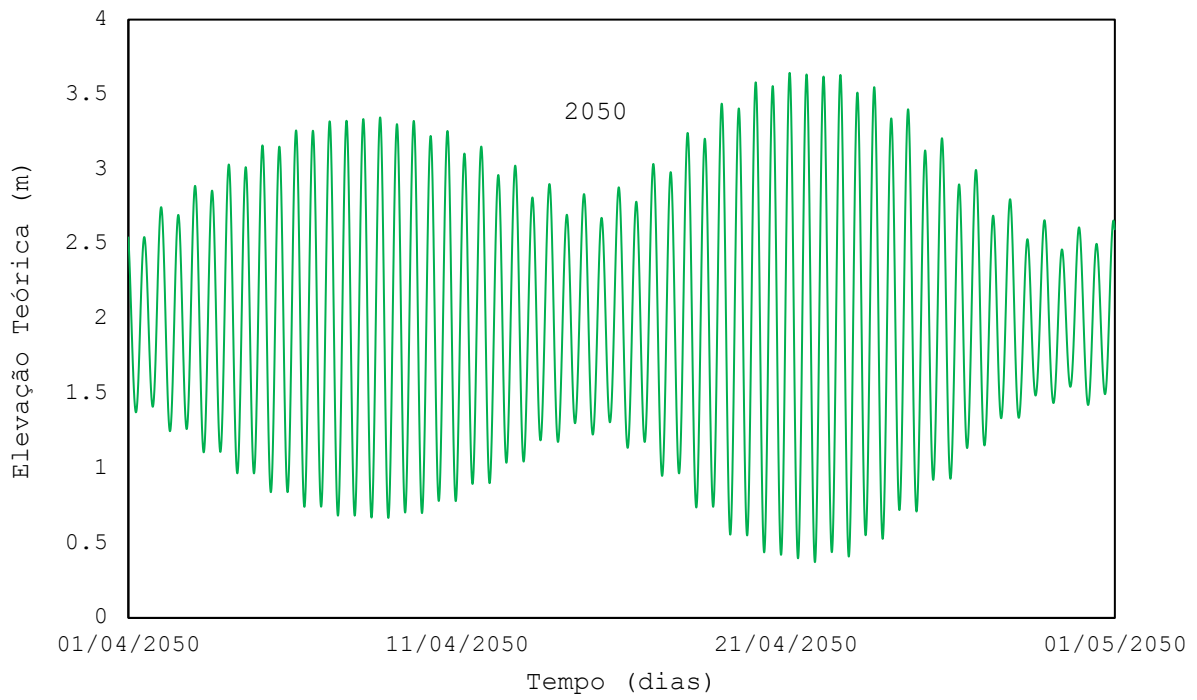


Figura 6 - Gráfico da elevação teórica do mês de abril para o cenário de 2050.

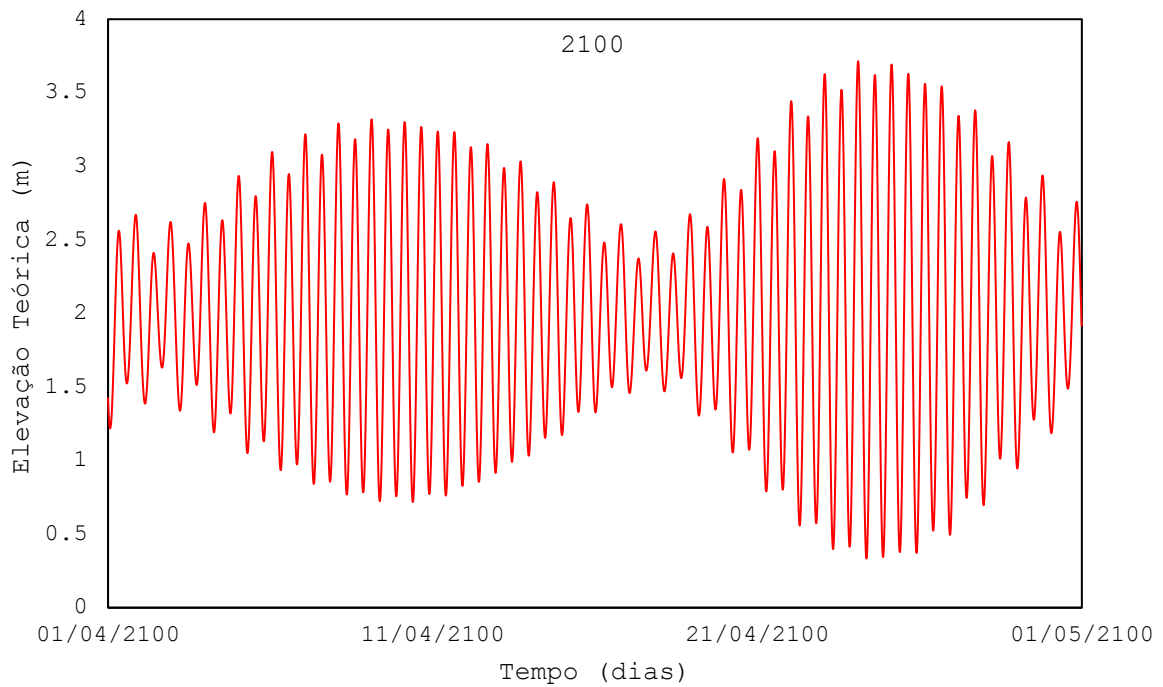


Figura 7 - Gráfico da elevação teórica do mês de abril para o cenário de 2100.

Como observado nos gráficos das Figuras 5, 6 e 7, a altura da maré viva e morta se desloca em função do ano. Na Figura 8, é possível observar o gráfico comparativo da elevação teórica para os anos em estudo.

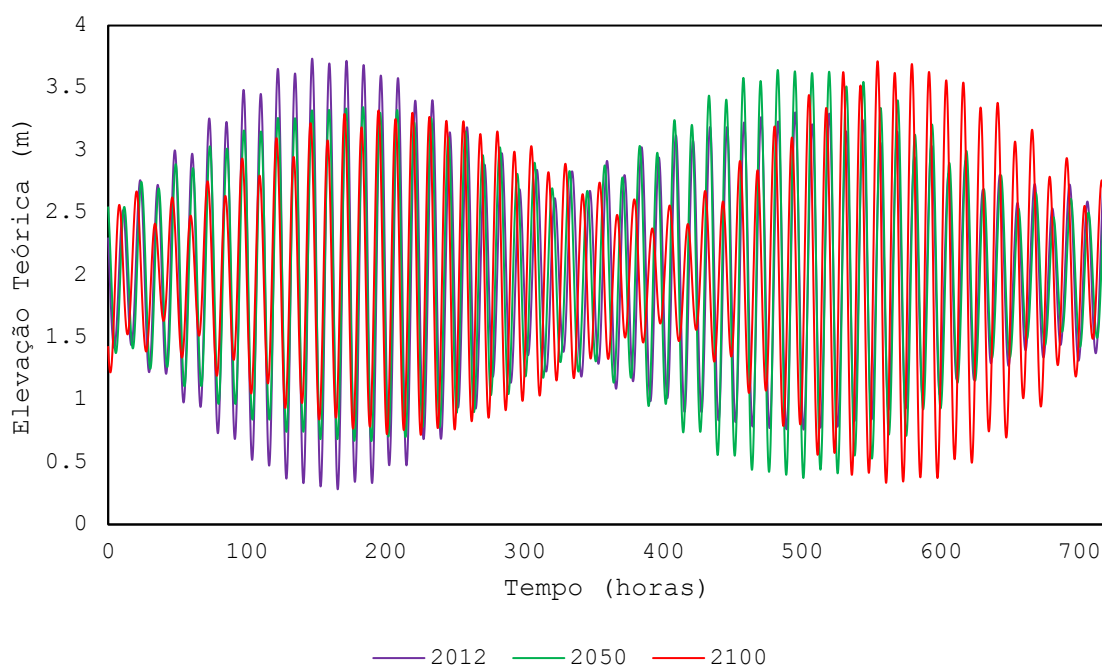


Figura 8 – Comparação da elevação teórica utilizando as harmônicas de maré para os anos analisados.

De forma a poder existir comparação entre os vários cenários em estudo, foram escolhidas datas que representam situações de altura de maré similares (para a maré morta e viva) ao longo dos anos considerados. A Tabela 8, a seguir, apresenta as datas escolhidas, considerando a situação de maré viva e maré morta das Figuras 5, 6, 7 e 8, apresentadas acima.

Tabela 8 - Datas para as simulações escolhidas, conforme a análise da altura da maré teórica, considerando as harmônicas de maré.

Cenário	Início	Fim
2012 Maré Morta	14/04/2012 – 04:00	14/04/2012 – 17:00
2012 Maré Viva	03/04/2012 – 21:00	04/04/2012 – 10:00
2050 Maré Morta	29/04/2050 – 04:00	29/04/2050 – 17:00
2050 Maré Viva	20/04/2050 – 21:00	21/04/2050 – 10:00
2100 Maré Morta	17/04/2100 – 03:00	17/04/2100 – 16:00
2100 Maré Viva	23/04/2100 – 20:00	24/04/2100 – 09:00

Assim, foi possível identificar as datas para a realização das simulações considerando o ARNM. Ao todo foram realizadas seis simulações, onde foram consideradas a situação de maré morta e maré viva para cada ano, as quais são as situações mais expressivas para

elevação do nível médio do mar. Cada simulação compreendeu um período de 13 horas, equivalente a um ciclo de maré.

Após os terminos das simulações, passou-se para etapa de análise dos dados resultantes e as discussões pertinentes. Foram analisados os seguintes descritores: módulo da velocidade, nível do mar e tempos de imersão. O módulo da velocidade e o nível do mar são extraídos diretamente do arquivo final gerado e podem ser observados sob a forma de distribuições espaciais.

O tempo de imersão foi considerado como um descritor neste trabalho devido à importância em perceber como o aumento do nível médio do mar influenciará na área total do sapal que estará imersa em cada cenário, pois, conforme Martins e Janeiro (2018), a Ria Formosa possui elevada área ocupada por regiões inter-marés, o que sugere que as percentagens de tempo de imersão para cada região sofrerão alterações com o aumento do nível médio do mar. Conforme mencionado por Neves e Martins (1996), o tempo de descobertura de um viveiro de bivalves é um fator de muita importância para as condições dos habitats de bivalves. Tais viveiros são altamente sensíveis às mudanças, pois os sedimentos dos quais os bivalves se alimentam são condicionados às temperaturas, que podem atingir os 40 °C devido à incidência direta do sol sob o viveiro. Isso significa que, em uma situação de aumento do nível médio do mar, haverá uma mudança nos tempos de exposição dos viveiros, podendo ser maiores ou menores, dependendo das condições do ciclo de maré. Por essa razão, optou-se por analisar o tempo de imersão através de classes de imersão, compreendidas entre um ciclo de maré. Para obtenção das áreas e seus respectivos tempos de imersão, foi usado um algoritmo python para fazer a leitura e extração da percentagem de tempo individual de imersão de cada célula da batimetria. A Tabela 9 apresenta a divisão das classes de imersão consideradas.

Tabela 9 - Classes de imersão para um ciclo de maré. Adaptado de Martins e Janeiro (2018).

Classe	Intervalo (horas)
1	0 – 1,2
2	1,2 – 2,4
3	2,4 – 3,7
4	3,7 – 4,9
5	4,9 – 6,1
6	6,1 – 7,3
7	7,3 – 8,6
8	8,6 – 9,8
9	9,8 - 11
10	11 – 12,2

A Tabela 9 pode ser interpretada como sendo a quantidade de horas em que uma determinada área (em quilómetros quadrados) estará submersa ao longo de um ciclo de maré, sendo que para cada intervalo de horas é atribuída uma classe de inundação com valor de 0 a 10. Além disso, através do algoritmo python, é gerado um arquivo contendo as informações da distribuição espacial das áreas de imersão, de forma cumulativa, para intervalo de três horas. Posteriormente, este arquivo é inserido no software MOHID GIS, que permite o pós-processamento dos dados e a visualização sob a forma de figuras. Os resultados e as discussões pertinentes podem ser observados no Capítulo 5 seguinte.

Por fim, a última componente deste trabalho tem como objetivo realizar a comparação entre a metodologia presente neste trabalho com a metodologia realizada por Martins e Janeiro (2018). No que diz respeito às diferenças, tem-se como a principal delas a escolha dos dados para forçamento da maré. Martins e Janeiro (2018) utilizaram os dados fornecidos pelo 5º relatório do IPCC de 2014. Tal relatório apresentou três cenários para aumento do mar: 2040, 2070 e 2100. Em 2100, o relatório do IPCC previu um aumento de 0,72 metros no nível médio do mar. No que tange ao presente trabalho, foram considerados os dados apresentados por Vousdoukas et al. (2017), que realizaram o *downscaling* climático para o aumento do nível médio do mar na costa da Europa. O resultado para 2100 é um aumento de 0,53 metros no ARNM. Portanto, ao utilizar os dados em *downscaling* climático, tem-se um modelo mais realista, do ponto de vista regional.

A comparação entre as metodologias é possível, pois a batimetria utilizada é a mesma, além de ambas as metodologias possuírem um cenário em comum, nomeadamente o cenário para o ano de 2100. Para além do mesmo ano, outro fator que possibilita a comparação é a localização das estações para as séries temporais. No trabalho de

Martins e Janeiro (2018), foram utilizadas as seguintes estações: Barra Ancão, Barra Armona, Barra Faro-Olhão, Barra Fuseta, Cais Comercial Faro, Canal Armona Fuseta, Canal Olhão e Ponte Praia Faro. A localização das estações pode ser vista na Figura 9 abaixo.



Figura 9 - Localização das estações de recolha de dados no trabalho de Martins e Janeiro (2018) (em vermelho) e nas estações do presente trabalho (em azul).

É possível dizer, com base na observação da Figura 9, que a estação Cais Comercial Faro está localizada muito próxima da estação Cais Comercial utilizada para a recolha de dados das séries temporais no presente trabalho. Além disso, a estação Barra Faro-Olhão está localizada muito próximo de onde está a estação Ilha Deserta da presente dissertação. Então, é possível comparar as séries temporais das estações Cais Comercial e Ilha Deserta com as estações Cais Comercial Faro e Barra Faro-Olhão, respetivamente. A fim de facilitar a compreensão, a nomenclatura adotada para as estações é a nomenclatura do presente trabalho, ou seja, Cais Comercial e Ilha deserta.

Para realização da comparação, teve-se acesso aos resultados do modelo obtidos por Martins e Janeiro (2018) para o cenário de 2100. A data da simulação utilizada pelos autores foi 15/03/2100 às 07:00 e o modelo simulou 24 horas a seguir da data de início, englobando dois ciclos de marés. Em seguida, foi realizada uma nova simulação com a mesma data, porém desta vez utilizando a metodologia do presente trabalho, a qual foi

descrita acima. Os descritores comparados foram o módulo da velocidade, a elevação e as áreas inundadas consoante ao tempo de imersão. Os resultados podem ser vistos no capítulo seguinte. A fim de facilitar a compreensão do leitor, durante a apresentação dos resultados, a metodologia usada por Martins e Janeiro (2018) será chamada de Metodologia PIAAC e a metodologia do presente trabalho será chamada de Metodologia *Downscaling*.

A seguir, são apresentados os resultados do modelo para o cenário de 2012 (cenário de validação) e os cenários considerando o ARNM para 2050 e 2100, bem como os resultados da comparação entre metodologias. Também é realizada a discussão pertinente dos resultados obtidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos das simulações para os sete cenários considerados, sendo eles: cenário de validação, cenário 2012 maré morta, cenário 2012 maré viva, cenário 2050 maré morta, cenário 2050 maré viva, cenário 2100 maré morta e cenário 2100 maré viva. A simulação dos cenários de 2012 teve como objetivo a validação da batimetria face aos dados do nível médio do mar obtido pelas campanhas de observação do projeto COALA. Além disso, os cenários de 2012 servirão como “linha de base” para comparação com os cenários 2050 e 2100. Os cenários 2050 e 2100 (maré morta e maré viva) representam a situação para a Ria Formosa para o ano de 2050 e 2100 no que diz respeito à velocidades e elevação do mar, considerando o forçamento imposto pelo ARNM de Voudoukas et al. (2017) de 0,21 metros para 2050 e 0,53 metros para 2100, conforme descrito anteriormente na Tabela 2.

É importante ressaltar que, para a correta interpretação dos resultados, é necessário considerar a premissa de que sempre haverá a intervenção humana para manutenção do estado atual da Ria Formosa. Tal premissa é adotada devido ao fato de ser demasiado complexa a criação e inserção de um modelo morfodinâmico para a Ria Formosa. Portanto, por mais que seja de conhecimento geral que, no futuro (como no cenário 2100), certamente haverá mudanças morfológicas na Ria Formosa, para a presente dissertação, considerou-se que o ser humano irá manter o estado morfológico atual. Tal consideração é, de certa forma, realista, uma vez que manter as barras e os canais abertos é importante, pois muitas atividades dependem dessas passagens, como a pesca e o turismo. Além disso, a manutenção do estado atual da Ria Formosa é uma forma de evitar inundações nas zonas habitadas por seres humanos, causada pelo aumento relativo do nível do mar (ARNM).

É importante ressaltar também que a batimetria utilizada possui uma resolução variável de 200 metros na zona exterior da Ria Formosa e 20 metros nos canais interiores, fazendo com que células com diferentes resoluções apresentem áreas diferentes dependendo da região analisada e, por consequência, que os resultados visualizados para a zona de alta resolução não sejam tão expressivos quanto os resultados das zonas de baixa resolução, em comparação.

4.1 Cenário de Validação

O objetivo desta simulação é a validação do modelo face aos dados fornecidos pelo projeto COALA. O modelo simulou um período de 336 horas, equivalente a 14 dias, iniciando no dia 01 de abril de 2012 e terminando no dia 14 de abril de 2012.

Nas Figura 10 e 11 são apresentados os gráficos relativos à evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Cais Comercial e Ilha Deserta, respetivamente, ao longo do tempo total da simulação que foi de 336 horas.

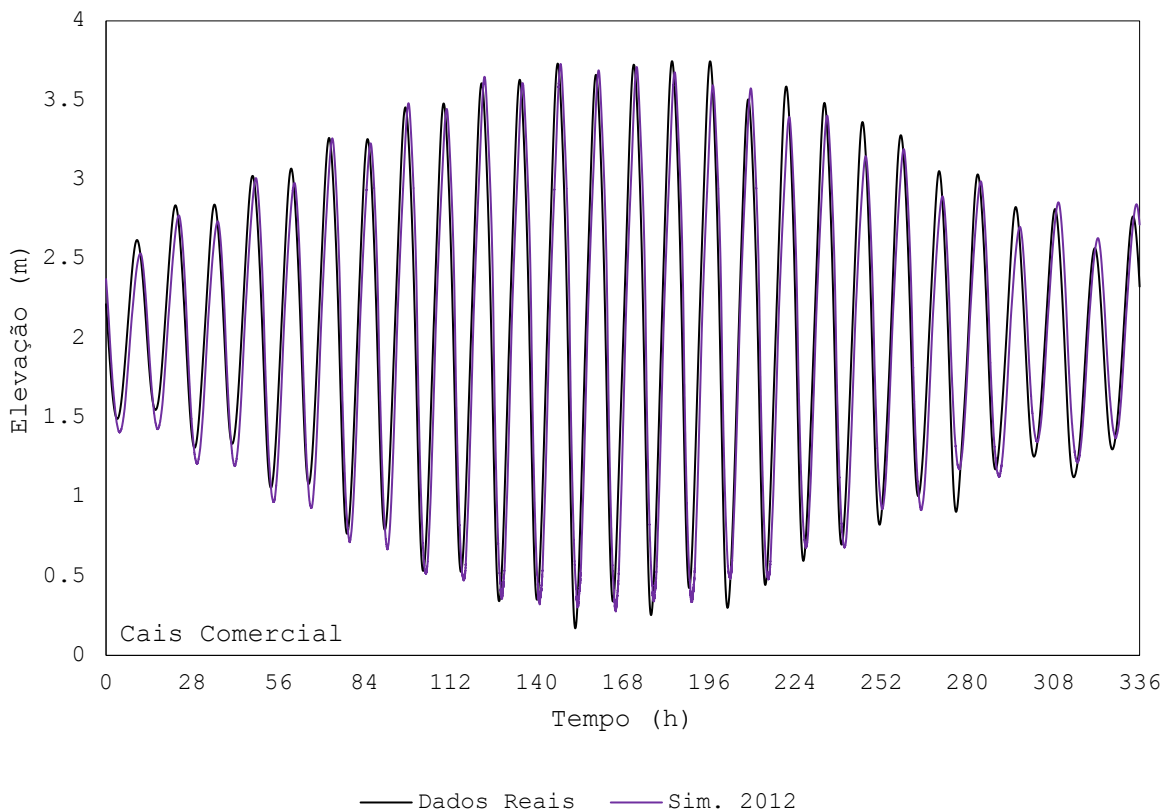


Figura 10 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Cais Comercial para o cenário de validação.

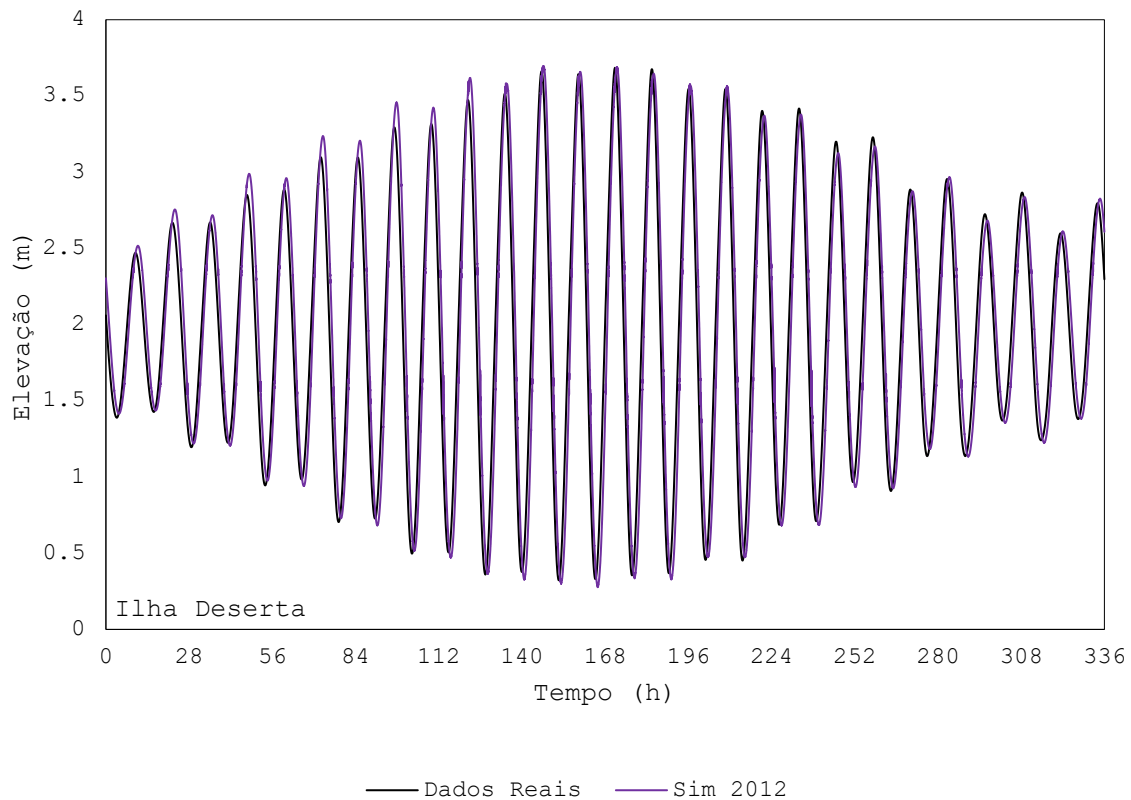


Figura 11 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Ilha Deserta para o cenário de validação.

Nas Figuras 10 e 11, é possível observar que o modelo foi capaz de simular com precisão a elevação do nível do mar face aos dados reais. Para a estação Cais Comercial, nota-se apenas um pequeno desfasamento, possivelmente causado pela diferença no intervalo da recolha de dados, em que os dados reais foram recolhidos em um intervalo de 10 minutos (600 segundos), enquanto que a simulação foi efetuada com um intervalo de 60 segundos. Portanto, pela análise dos gráficos do nível do mar apresentados nas Figuras 10 e 11, é possível considerar o modelo como qualitativamente validado.

A Tabela 10 mostra os resultados obtidos para a verificação dos erros, conforme o método RMAE, para validação quantitativa do modelo.

Tabela 10 - Classificação dos resultados RMAE da simulação, conforme os critérios da Tabela 5.

Estação	RMAE	Qualificação RMAE
Cais Comercial	0,01723	Excelente
Ilha Deserta	0,01192	Excelente

Segundo os critérios da Tabela 5, para valores de RMAE menores que 0,2, a simulação é classificada como excelente. O resultado de 0,01723 e 0,01192 para a estação Cais Comercial e Ilha Deserta, respectivamente, são classificados como excelentes, provando que os erros entre os resultados não são significativos, o que significa que o modelo está quantitativamente validado. A seguir são apresentados os resultados para as simulações dos cenários 2012, 2050 e 2100, nas situações de maré viva e maré morta para cada um dos anos.

4.2 Cenário 2012

O objetivo principal para a simulação dos cenários de 2012 (Maré Morta e Maré Viva) é a criação de uma “linha de base” para comparação com os cenários onde ocorre o ARNM. Os cenários 2012 Maré Morta e 2012 Maré Viva não levam em consideração nenhum aumento na elevação do nível do mar, sendo considerada esta a situação “presente” do estado atual da Ria Formosa. Foram simulados um total de 13 horas, equivalente a um ciclo de maré.

4.2.1 Maré Morta

Conforme a Tabela 8, a data escolhida para a maré morta é 14/04/2012 com início às 4 horas e término às 17 horas, totalizando 13 horas, ou um ciclo de maré.

Nas Figuras 12 e 13 são apresentados os gráficos relativos à evolução temporal da elevação do nível do mar nas estações Cais Comercial e Ilha Deserta, respectivamente.

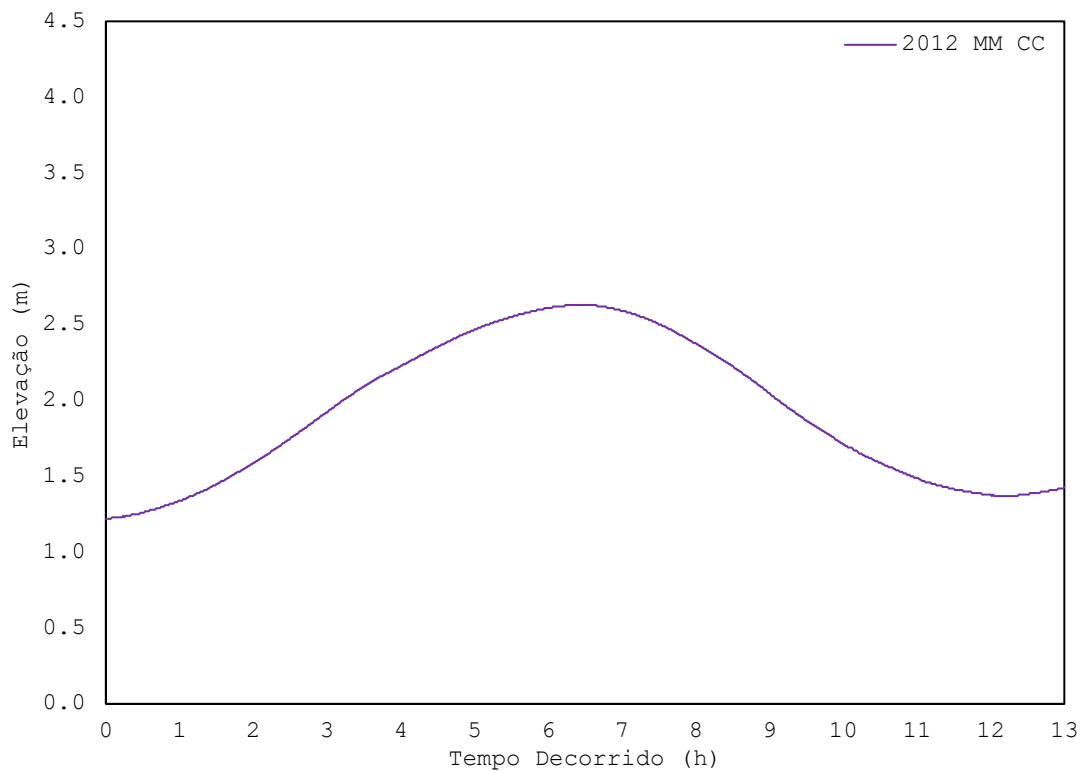


Figura 12 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Cais Comercial para o Cenário 2012 Maré Morta.

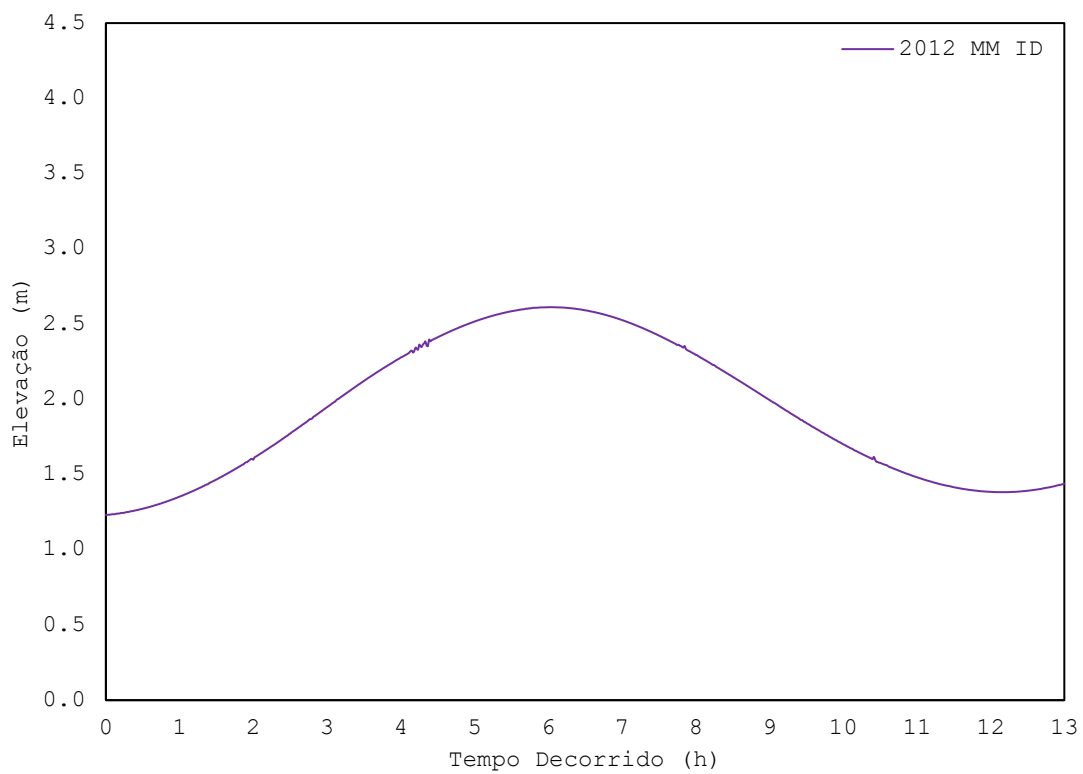


Figura 13 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Ilha Deserta para o Cenário 2012 Maré Morta.

Conforme as Figuras 12 e 13, na estação Cais Comercial a elevação mínima foi de 1,22 metros e a elevação máxima foi de 2,63 metros, totalizando uma amplitude de 1,41 metros. Para a estação Ilha Deserta, a elevação mínima foi de 1,23 metros e a elevação máxima foi de 2,61 metros. A amplitude para a estação Ilha Deserta foi de 1,38 metros.

É possível observar visualmente a elevação através dos gráficos hidrodinâmicos na situação de baixa mar e preia mar, conforme a Figura 14 e 15, respectivamente.

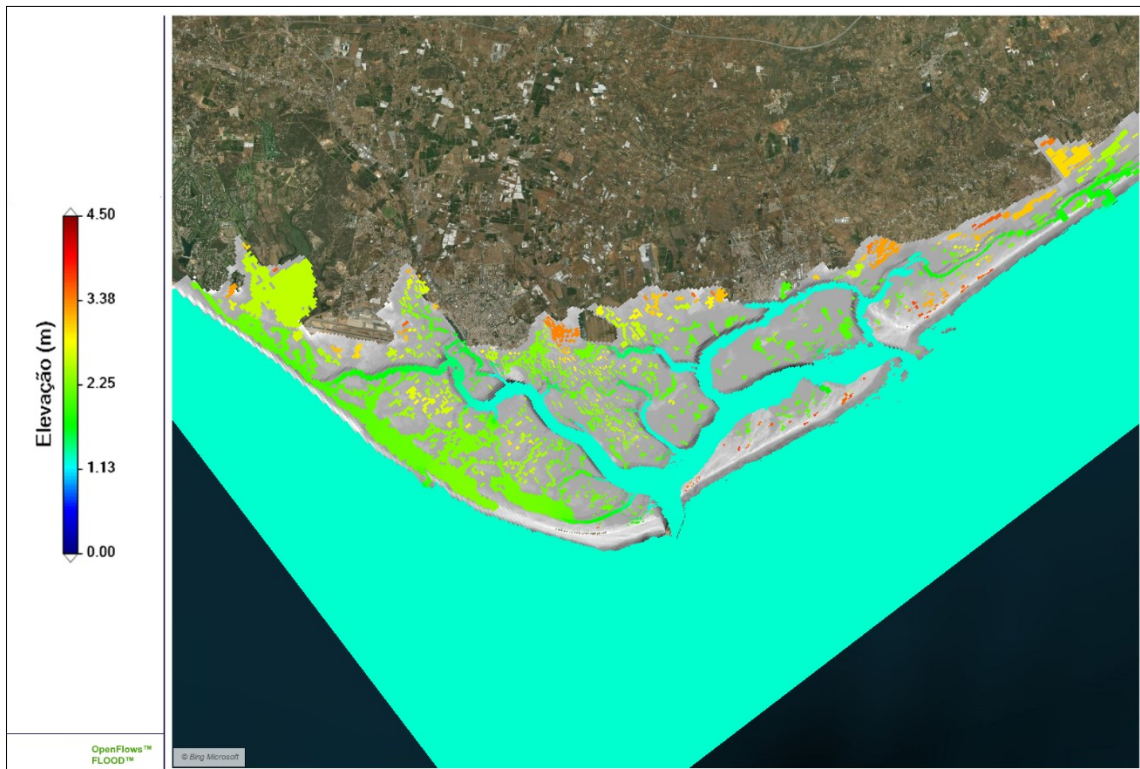


Figura 14 - Representação da elevação em baixa mar para o Cenário 2012 Maré Morta.

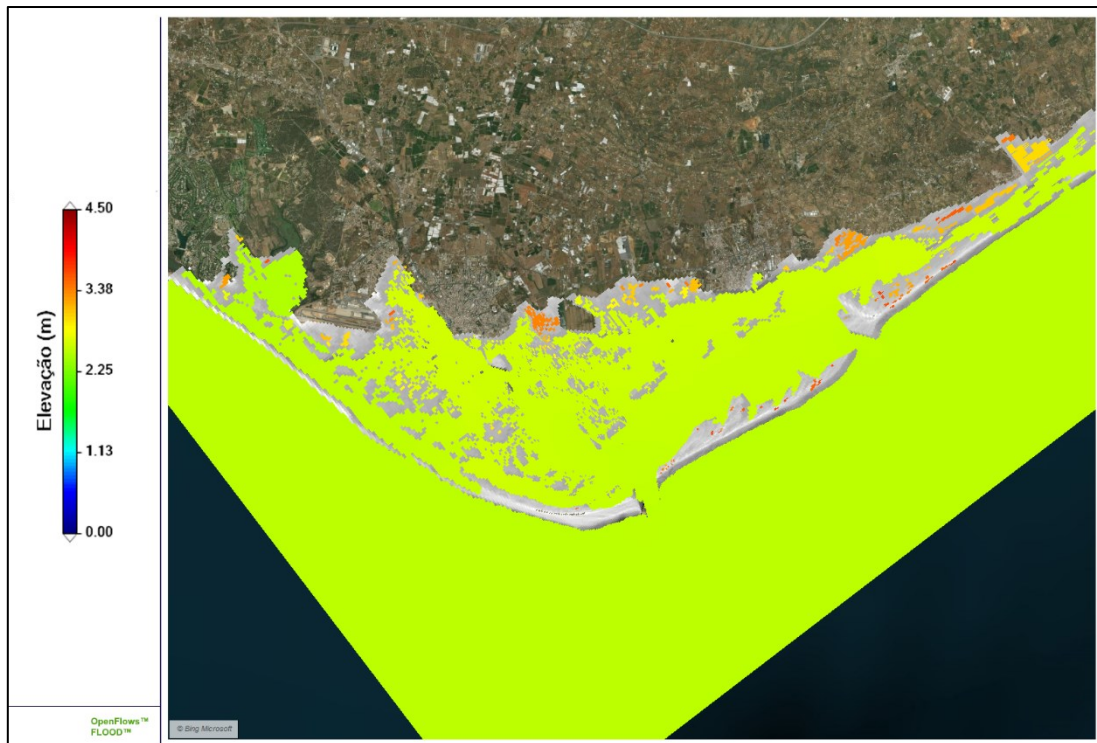


Figura 15 - Representação da elevação em preia mar para o Cenário 2012 Maré Morta.

A representação da elevação através das Figuras 14 e 15 possibilitam visualizar o resultado para cada célula do domínio, diferentemente da série temporal das estações, que exibe o resultado específico para aquele ponto. A representação serve para visualizar o sistema como um todo, ilustrando o comportamento do nível do mar na Ria Formosa em função da baixa mar e preia mar.

A seguir, nas Figuras 16 e 17, são apresentados os gráficos para a evolução do módulo da velocidade através das séries temporais para a estação Cais Comercial e Ilha Deserta, respetivamente.

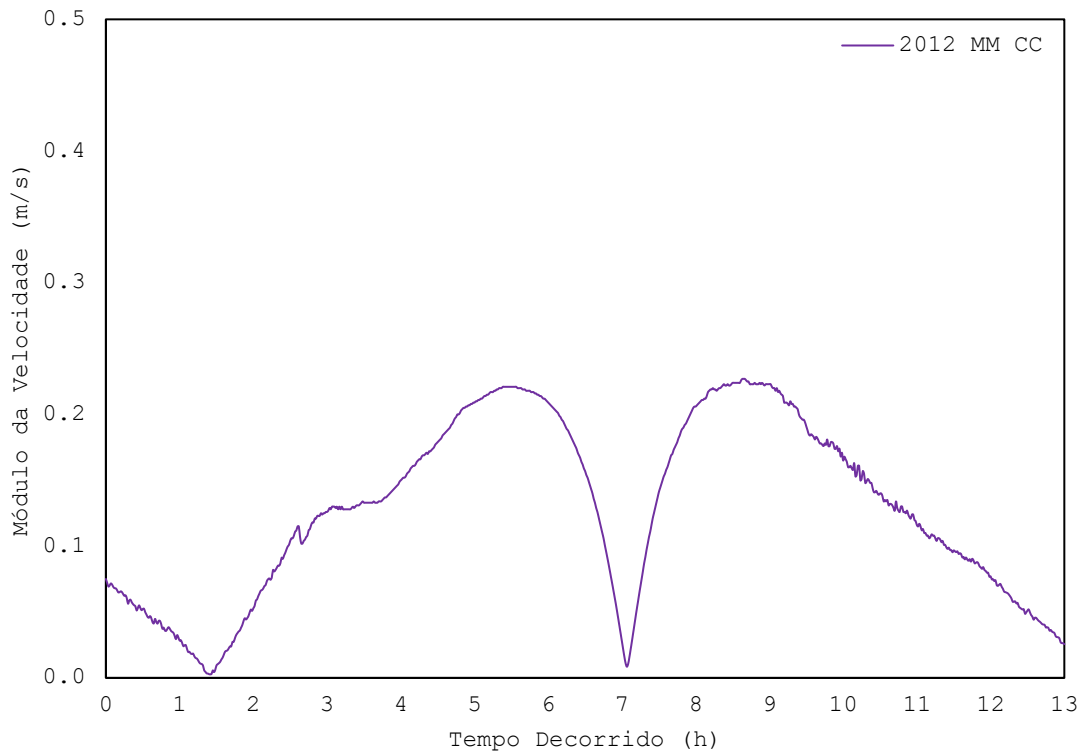


Figura 16 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Cais Comercial no cenário de 2012 Maré Morta.

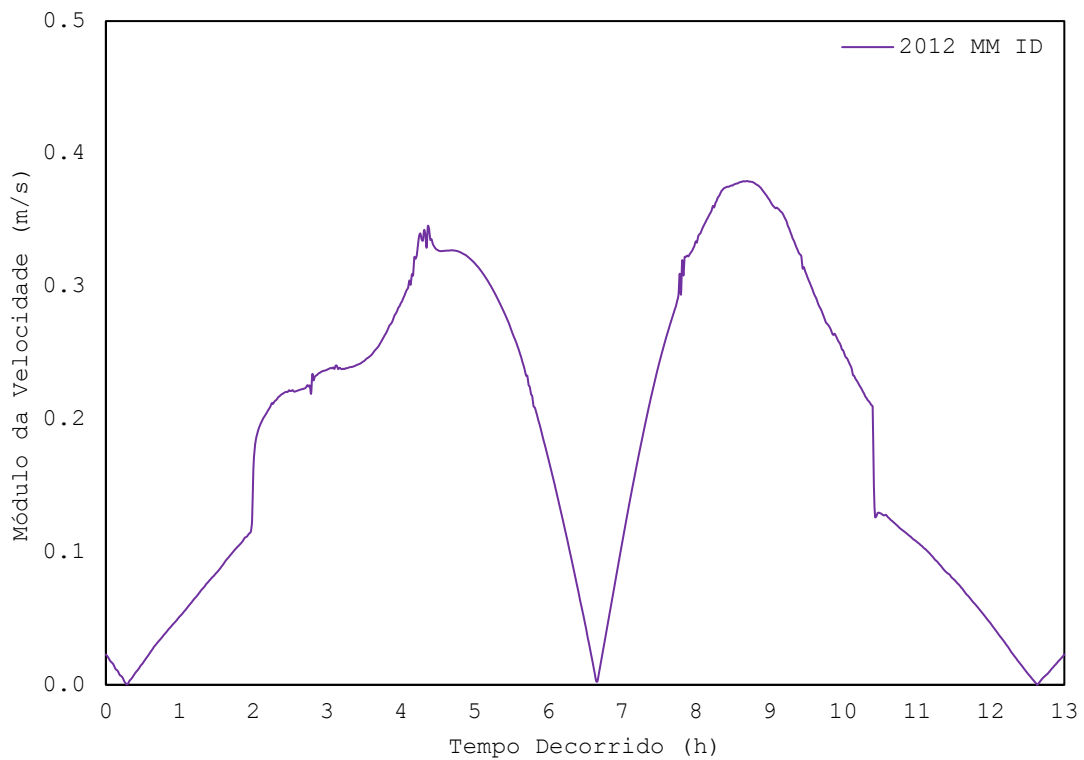


Figura 17 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Ilha Deserta no cenário de 2012 Maré Morta.

Conforme a análise dos gráficos das Figuras 16 e 17, na estação Cais Comercial a velocidade máxima foi de 0,23 metros por segundo. Na estação Ilha Deserta a velocidade máxima foi de 0,38 metros por segundo. As maiores velocidades ocorrem na estação Ilha Deserta, onde está localizada a barra de Faro-Olhão. Tal resultado era esperado, visto que a barra de Faro-Olhão é o principal canal de troca de água entre a Ria Formosa e o oceano. Observou-se que os resultados obtidos para as séries temporais das velocidades nas estações apresentam uma certa instabilidade em pontos específicos, porém, observa-se que o modelo foi capaz de dissipar a instabilização. Tal instabilidade é atribuída, possivelmente, à batimetria, já que pode haver pequenos erros na profundidade de determinadas células. Tal instabilidade não altera os resultados e, portanto, foi considerada como sendo uma característica normal da modelação.

A seguir são apresentadas as Figuras 18 e 19, que representam o campo de velocidades das situações de enchente e vazante. Tais figuras possuem um caráter ilustrativo dos fenómenos de baixa mar e preia mar que ocorrem na Ria Formosa, sendo mais uma forma de verificar se o modelo foi capaz de simular de maneira correta as situações de enchente e vazante do sistema lagunar.

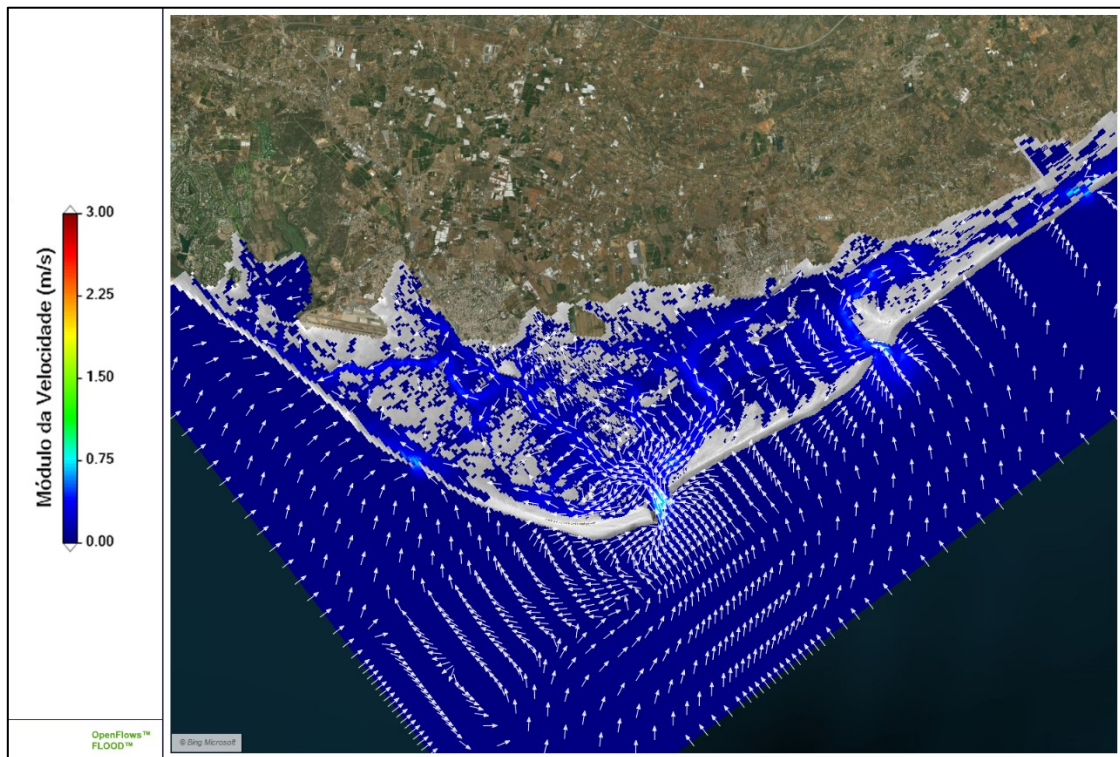


Figura 18 - Campo de velocidades transientes na situação de enchente para o Cenário 2012 Maré Morta.

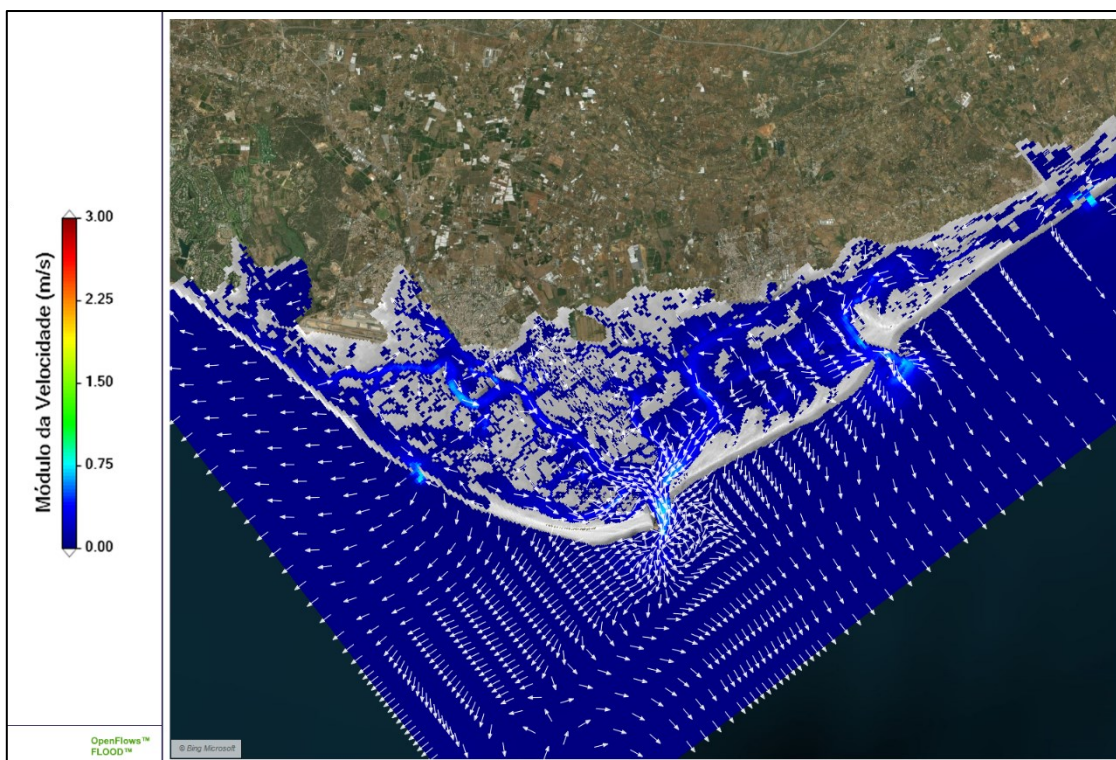


Figura 19 - Campo de velocidades transientes na situação de vazante para o Cenário 2012 Maré Morta.

Através da análise das Figuras 18 e 19 é possível confirmar a contribuição da barra de Faro-Olhão para o fluxo de água na Ria Formosa, sendo ela a principal barra do sistema. Além disso, é possível observar que a barra da Armona e de Ancão também contribuem, de forma menos expressiva, para o fluxo de água entre a Ria Formosa e o oceano.

Os resultados das áreas de inundação são observáveis através das classes de inundação (Tabela 11) e das classes de tempo de imersão, que são apresentadas na forma de histograma (Figura 20). Na Figura 21 é apresentada a distribuição espacial dos resultados, obtidos de forma cumulativa para intervalos de imersão de três horas

Tabela 11 - Distribuição das áreas do modelo da Ria Formosa em função do número de horas de imersão para o Cenário 2012 Maré Morta.

Classe	Intervalo (horas)	Área (km ²)
1	0 – 1,2	1.45
2	1,2 – 2,4	2.85
3	2,4 – 3,7	6.45
4	3,7 – 4,9	4.27
5	4,9 – 6,1	13.49
6	6,1 – 7,3	6.81
7	7,3 – 8,6	1.38
8	8,6 – 9,8	1.28
9	9,8 – 11	0.64
10	11 – 12,2	0.90

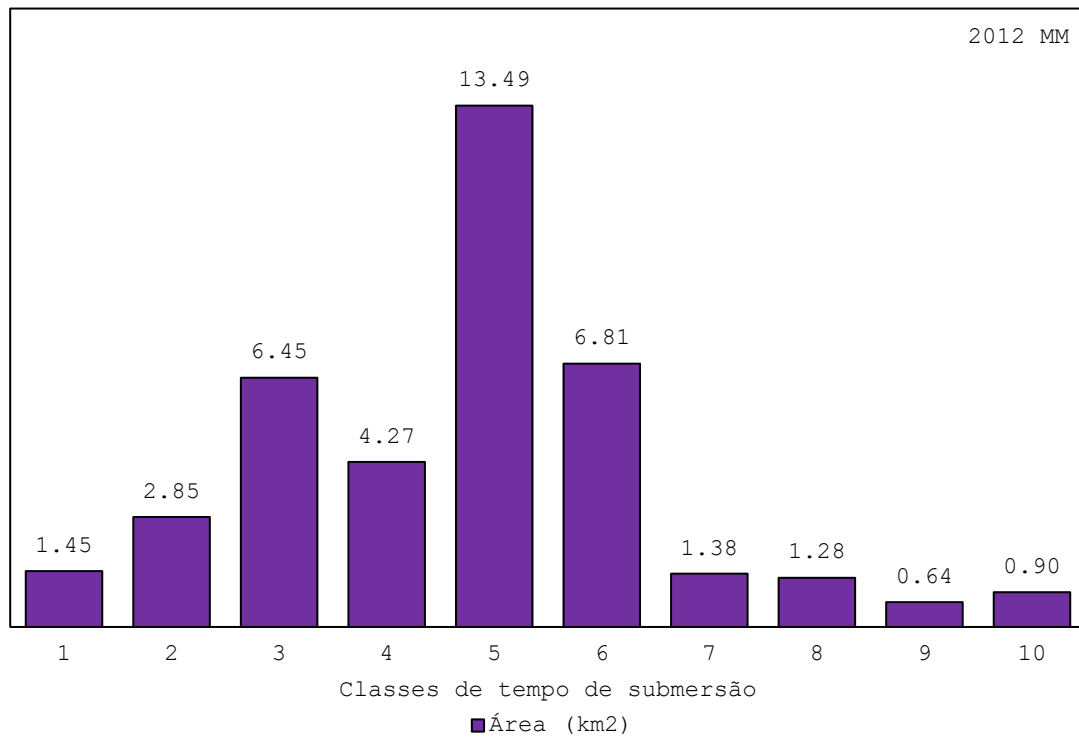


Figura 20 - Histograma com a distribuição das áreas submersas por classe de tempo para o Cenário 2012 Maré Morta.

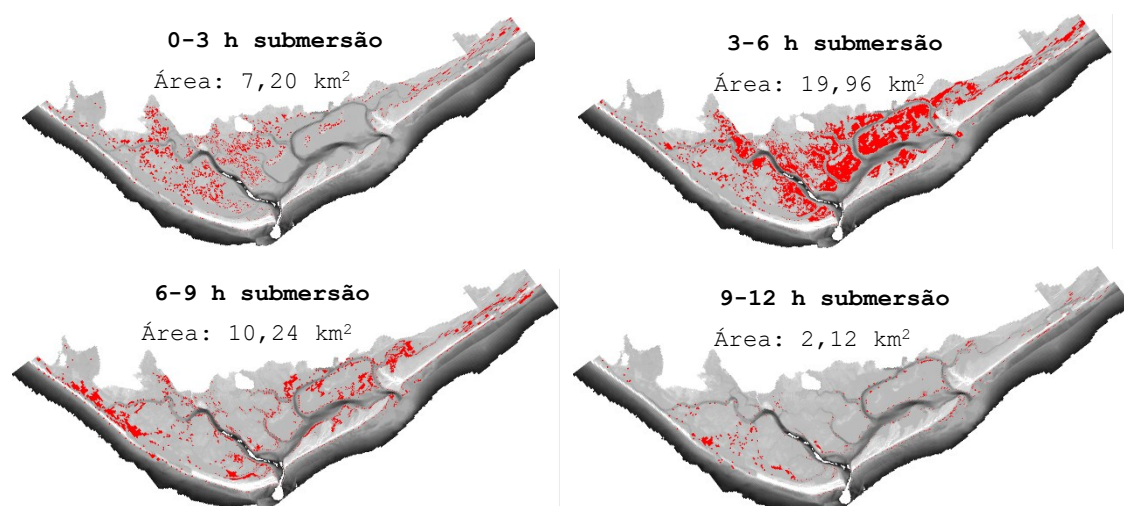


Figura 21 - Mapas de distribuição das áreas de inundação para as diversas áreas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o Cenário 2012 Maré Morta.

Por fim, com base nos resultados obtidos para as áreas de inundações, é possível observar que, para um ciclo de maré (13 horas), a maior área de sapal da Ria Formosa, cerca de 13,5 quilómetros quadrados, encontra-se imersa por um intervalo entre 4,9 a 6,1 horas, sendo a Classe 5 a mais predominante para o Cenário de 2012 Maré Morta. Tal área corresponde principalmente aos canais interiores da Ria Formosa e a área de sapal entre a Barra de Faro-Olhão e Armona.

4.2.2 Maré Viva

Conforme a Tabela 8, a data escolhida para a maré viva é 03/04/2012, com início às 21 horas e término às 10 horas do dia 04/04/2012, totalizando 13 horas, ou um ciclo de maré.

Nas Figuras 22 e 23 são apresentados os gráficos relativos à evolução temporal da elevação do nível do mar nas estações Cais Comercial e Ilha Deserta, respetivamente.

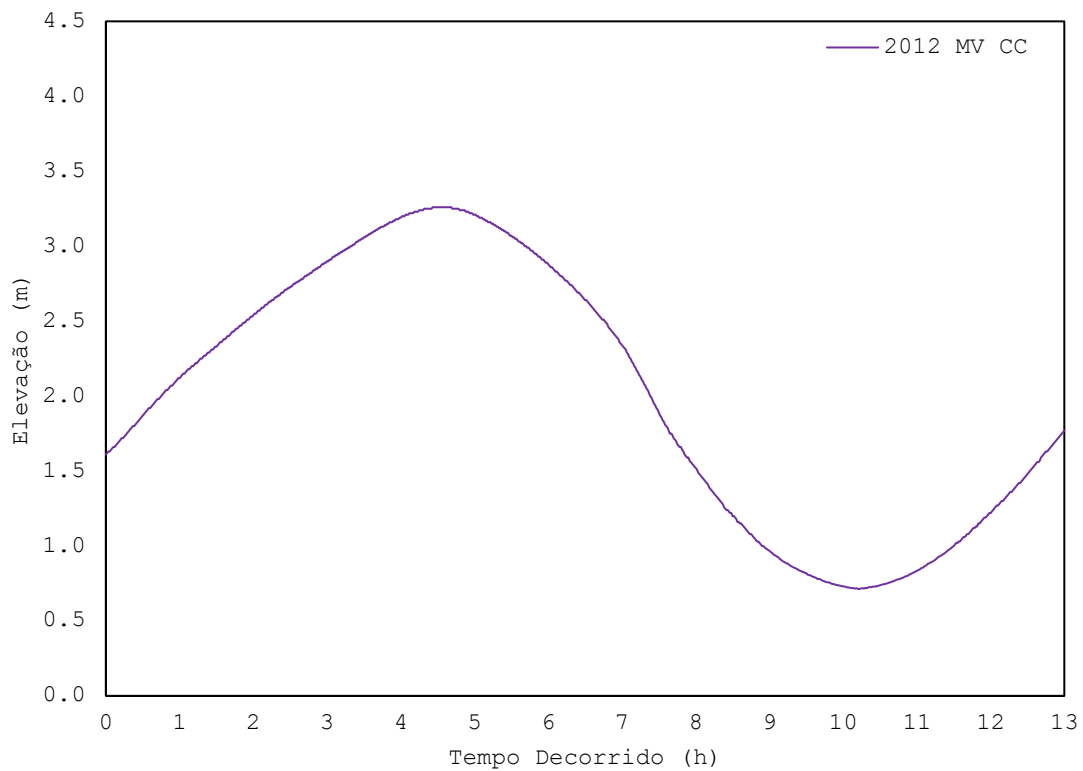


Figura 22 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Cais Comercial para o Cenário 2012 Maré Viva.

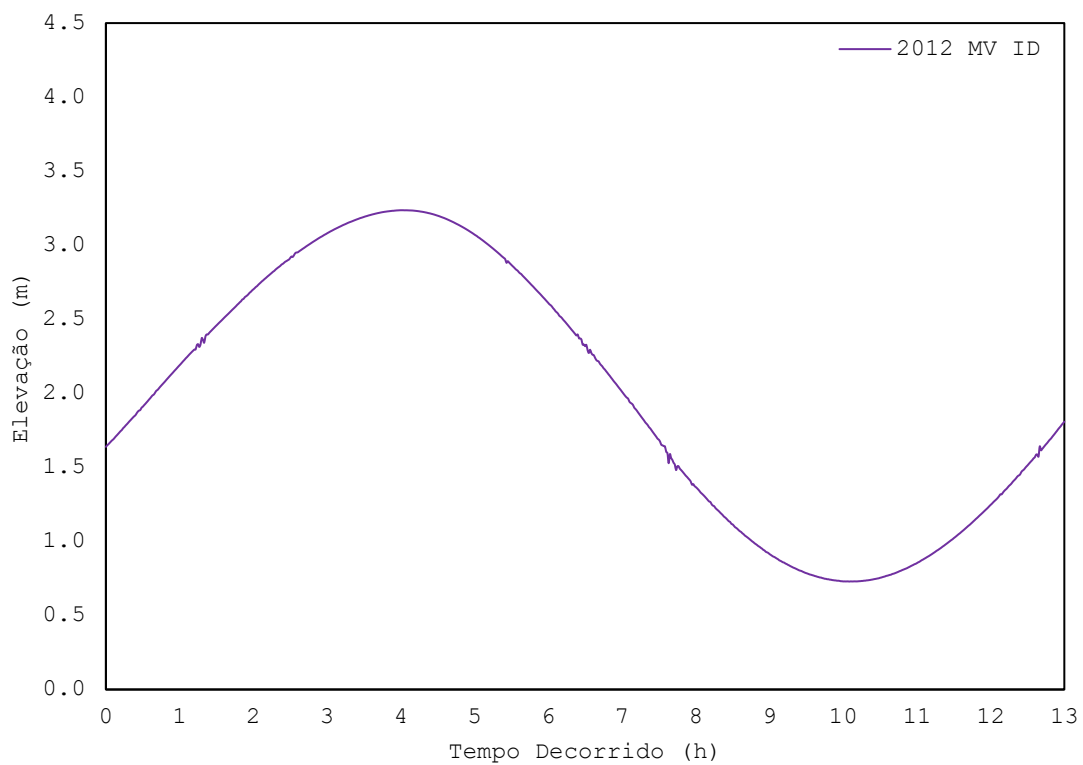


Figura 23 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Ilha Deserta para o Cenário 2012 Maré Viva.

Conforme as Figuras 22 e 23, na estação Cais Comercial a elevação mínima foi de 0,71 metros e a elevação máxima foi de 3,26 metros, totalizando uma amplitude de 2,55 metros. Em comparação com a situação de Maré Morta, tem-se um aumento na amplitude de 1,14 metros. Para a estação Ilha Deserta a elevação mínima foi de 0,73 metros e a elevação máxima foi de 3,24 metros e a amplitude é de 2,51 metros. Em comparação com a situação de Maré Morta, tem-se um aumento na amplitude de 1,13 metros.

É possível observar visualmente a elevação através dos gráficos hidrodinâmicos na situação de baixa mar e preia mar, conforme a Figura 24 e 25, respectivamente.



Figura 24 - Representação da elevação em baixa mar para o Cenário 2012 Maré Viva.

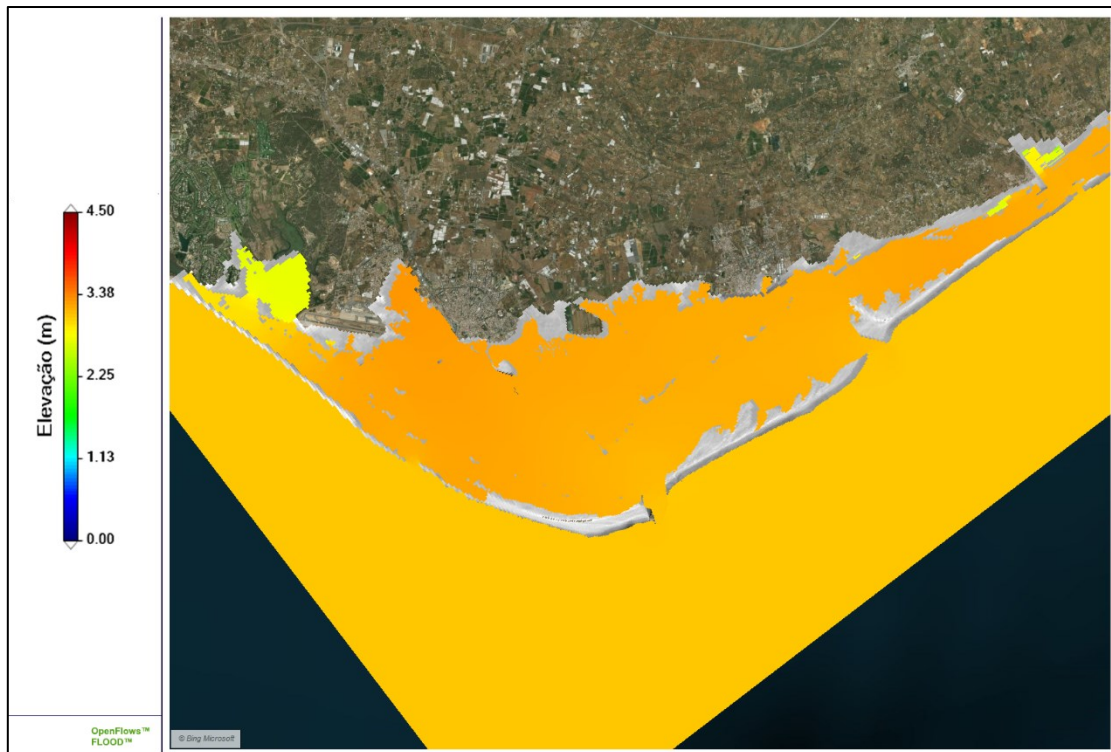


Figura 25 - Representação da elevação em preia mar para o Cenário 2012 Maré Viva.

A seguir, nas Figuras 26 e 27, são apresentados os gráficos para a evolução do módulo da velocidade através das séries temporais para a estação Cais Comercial e Ilha Deserta, respetivamente.

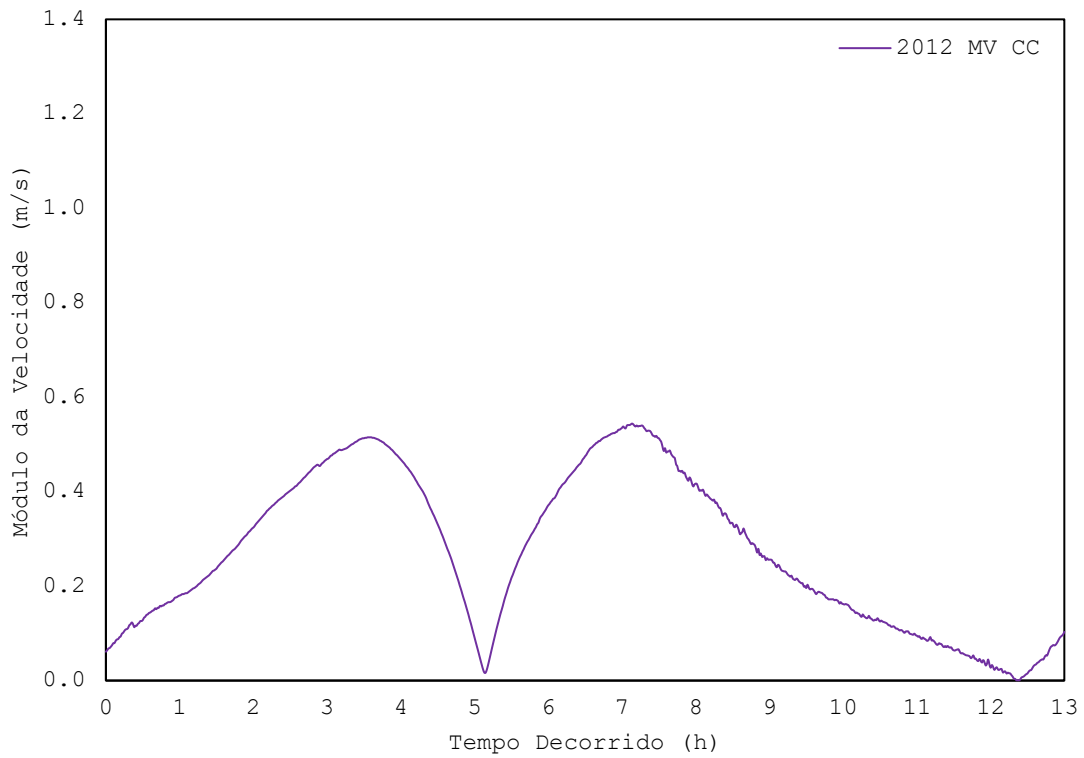


Figura 26 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Cais Comercial no cenário de 2012 Maré Viva.

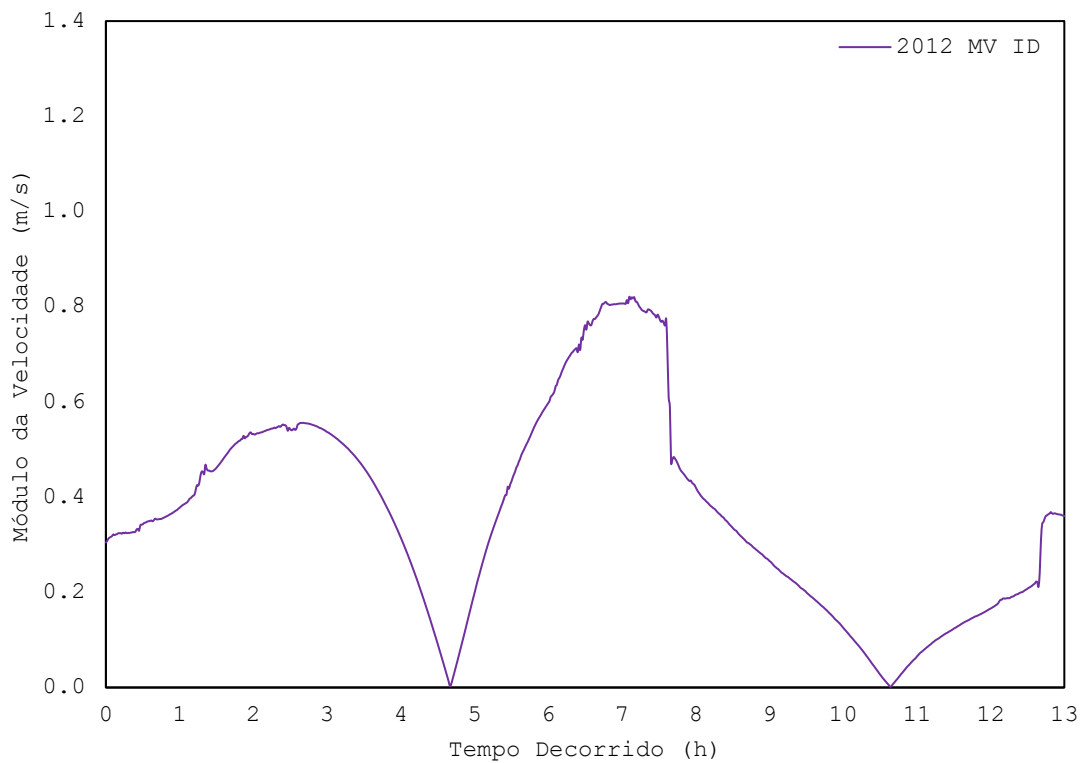


Figura 27 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Ilha Deserta no cenário de 2012 Maré Viva.

Conforme a análise dos gráficos das Figuras 26 e 27, na estação Cais Comercial a velocidade máxima foi de 0,54 metros por segundo. Na estação Ilha Deserta, a velocidade máxima foi de 0,82 metros por segundo. Novamente, as maiores velocidades encontram-se na estação Ilha Deserta, onde está localizada a barra de Faro-Olhão. Da mesma forma, novamente ocorre instabilidades pontuais, na qual o modelo foi capaz de dissipar.

A seguir são apresentadas as Figuras 28 e 29, que representam o campo de velocidades das situações de enchente e vazante.

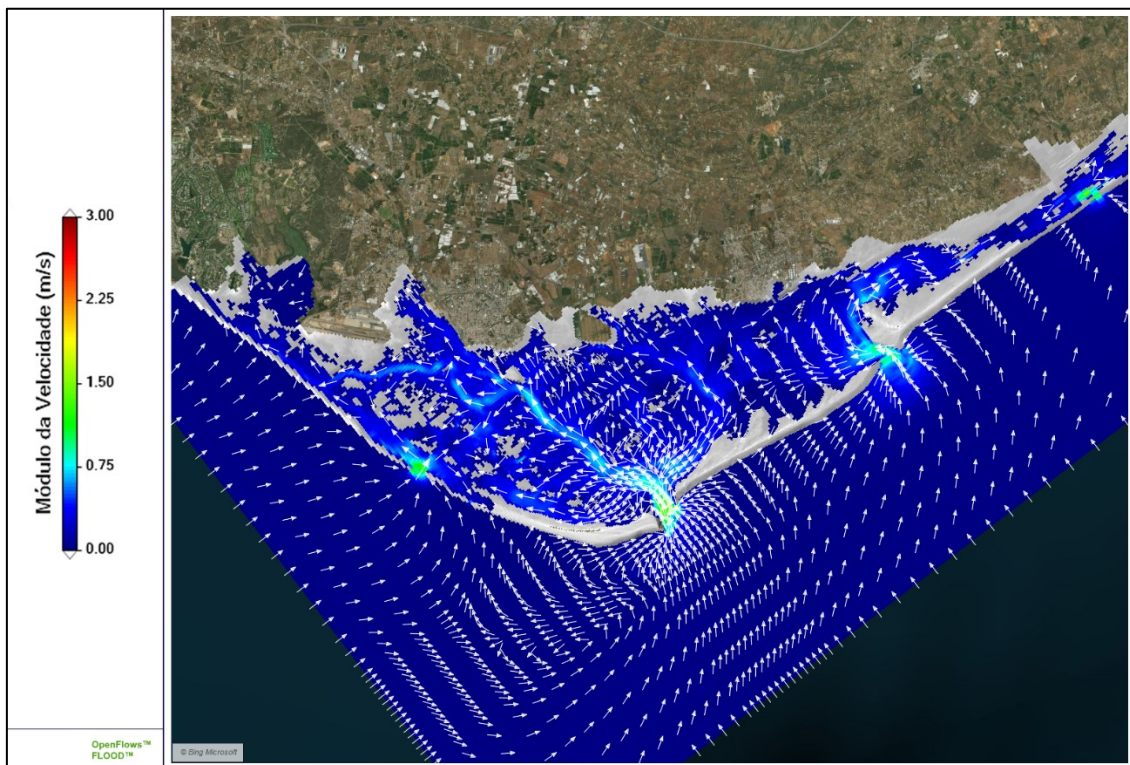


Figura 28 - Campo de velocidades transientes na situação de enchente para o Cenário 2012 Maré Viva.

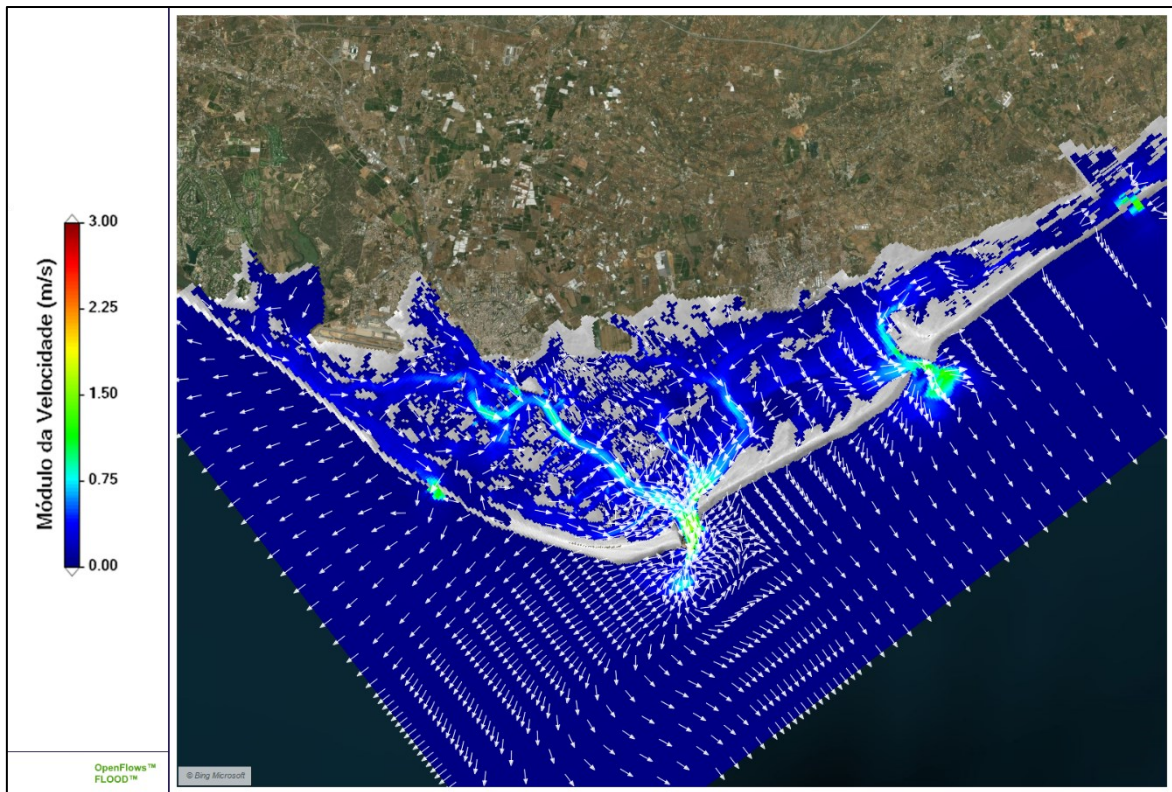


Figura 29 - Campo de velocidades transientes na situação de vazante para o Cenário 2012 Maré Viva.

Na situação de Maré Viva, representadas nas Figuras 28 e 29, fica evidente a influência da barra de Faro-Olhão para o fluxo de água na Ria Formosa. Além disso, durante a Maré Viva a barra de Armona também possui importância, sendo responsável por todo escoamento na seção leste.

Os resultados das áreas de inundação são observáveis através das classes de inundação e, também, através dos mapas de distribuição. A Tabela 12 apresenta os resultados para as classes de inundação.

Tabela 12 - Distribuição das áreas do modelo da Ria Formosa em função do número de horas de imersão para o Cenário 2012 Maré Viva.

Classe	Intervalo (horas)	Área (km ²)
1	0 – 1,2	1.63
2	1,2 – 2,4	3.96
3	2,4 – 3,7	8.48
4	3,7 – 4,9	4.12
5	4,9 – 6,1	8.33
6	6,1 – 7,3	18.01
7	7,3 – 8,6	4.20
8	8,6 – 9,8	5.48
9	9,8 – 11	2.38
10	11 – 12,2	1.10

A seguir é apresentada a Figura 30 com o gráfico para as classes de inundação para o Cenário 2012 Maré Viva.

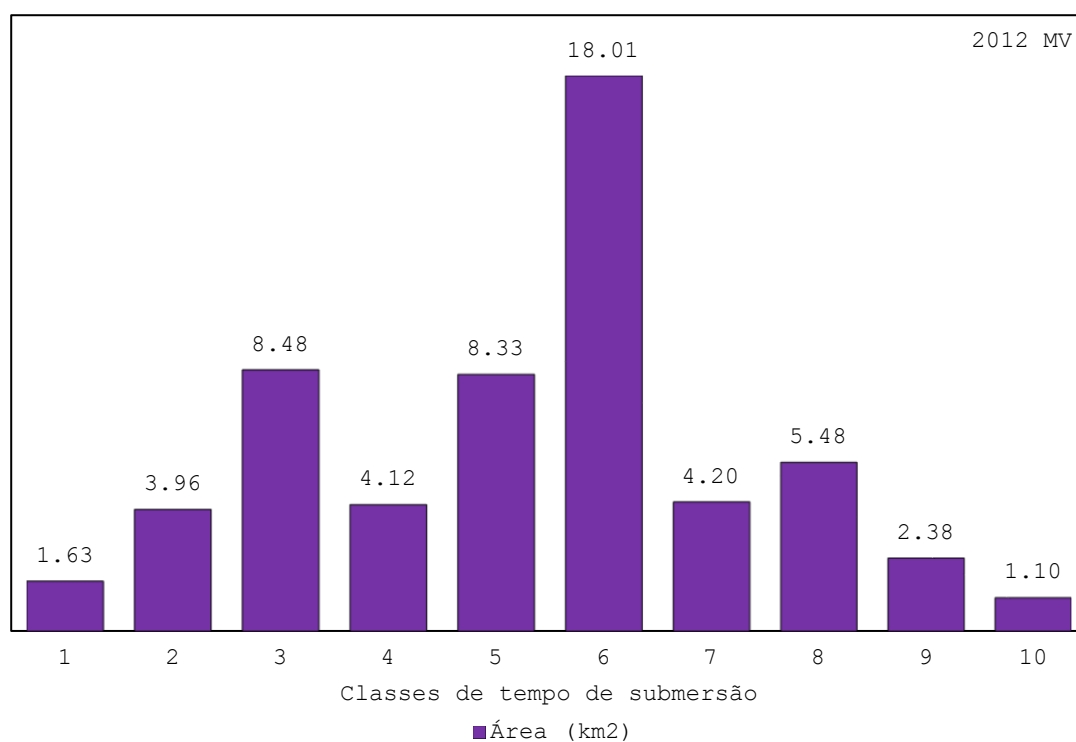


Figura 30 - Histograma com a distribuição das áreas submersas por classe de tempo para o Cenário 2012 Maré Viva.

A Figura 31 apresenta os mapas de distribuição das áreas de inundações.

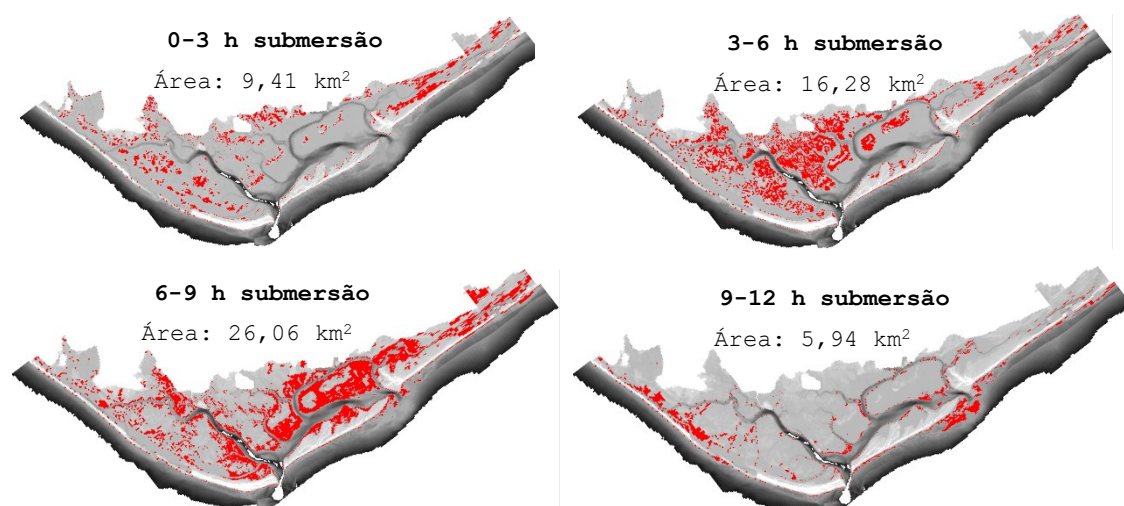


Figura 31 - Mapas de distribuição das áreas de inundação para as diversas áreas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o Cenário 2012 Maré Viva.

Para as áreas de inundações, é possível observar que, para um ciclo de maré (13 horas), cerca de 18 quilômetros quadrados, correspondendo à maior área imersa, encontra-se imersa por um intervalo entre 6,1 a 7,3 horas, sendo a Classe 6 a mais predominante para o Cenário de 2012 Maré Viva.

A observação individual dos resultados para o cenário de 2012 não apresenta muita significância. Os resultados obtidos para esse cenário servem como medida para comparar os próximos cenários, onde há o aumento do nível médio do mar. Dessa forma será possível avaliar quantitativamente os efeitos causados pela subida do nível médio do mar na Ria Formosa na variação das áreas de inundação.

4.3 Cenário 2050

O cenário 2050 é o primeiro cenário modelado com base na projeção do ARNM de Vousdoukas et al. (2017), com um aumento relativo do nível do mar de 0,21 metros para a projeção RCP4.5.

4.3.1 Maré Morta

Da Tabela 8, a data escolhida para a maré morta é 29/04/2050, com início às 4 horas e término às 17 horas, totalizando 13 horas ou um ciclo de maré.

Nas Figuras 32 e 33 são apresentados os gráficos relativos à evolução temporal da elevação do nível do mar nas estações Cais Comercial e Ilha Deserta, respetivamente.

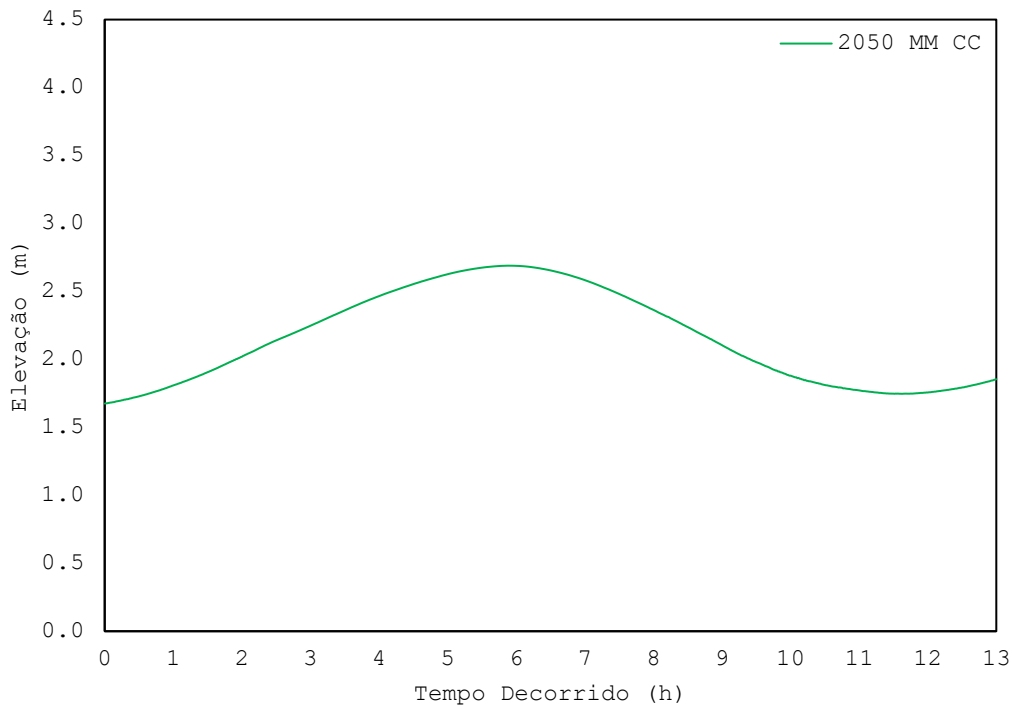


Figura 32 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Cais Comercial para o Cenário 2050 Maré Morta.

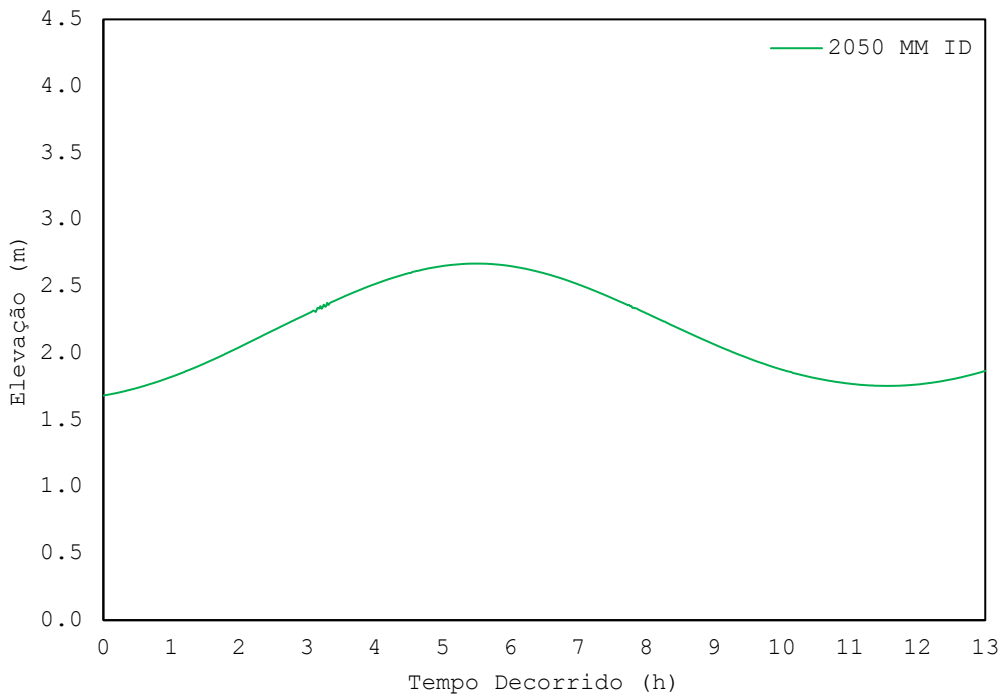


Figura 33 - - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Ilha Deserta para o Cenário 2050 Maré Morta.

Conforme as Figuras 32 e 33, no Cenário 2050 Maré Morta, na estação Cais Comercial, a elevação mínima foi de 1,68 metros e a elevação máxima foi de 2,69 metros, totalizando uma amplitude de 1,01 metros. Para a estação Ilha Deserta, a elevação mínima foi de 1,68 metros e a elevação máxima foi de 2,67 metros, com uma amplitude de 0,99 metros. Em comparação com o Cenário 2012 Maré Morta, ocorre um aumento de aproximadamente 0,45 metros na elevação mínima do nível do mar para ambas as estações, porém o nível máximo não sofre mudanças significativas, aumentando, apenas, 0,06 metros em ambas as estações. As comparações entre cenários serão discutidas em detalhes posteriormente.

Os gráficos hidrodinâmicos das Figuras 34 e 35 representam visualmente a elevação, na situação de baixa mar e preia mar, respectivamente, para os demais pontos do modelo.



Figura 34 - Representação da elevação em baixa mar para o Cenário 2050 Maré Morta.

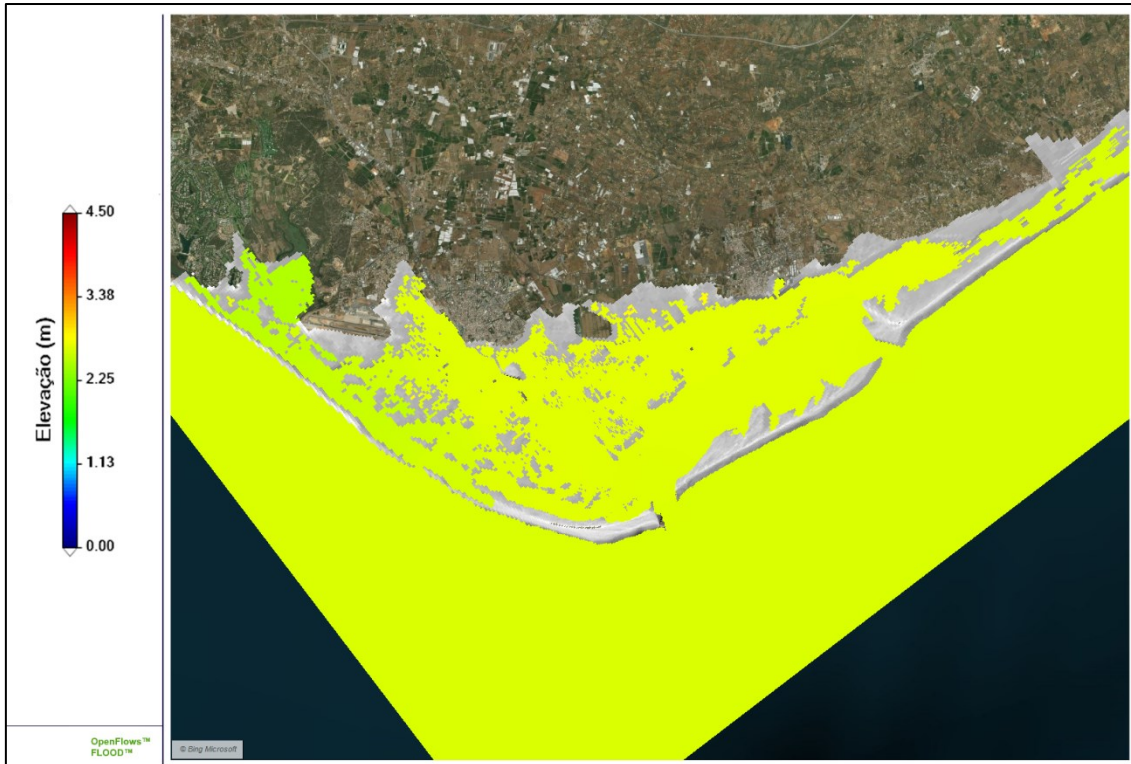


Figura 35 - Representação da elevação em preia mar para o Cenário 2050 Maré Morta.

A seguir, nas Figuras 36 e 37, são apresentados os gráficos para a evolução do módulo da velocidade através das séries temporais para a estação Cais Comercial e Ilha Deserta, respetivamente.

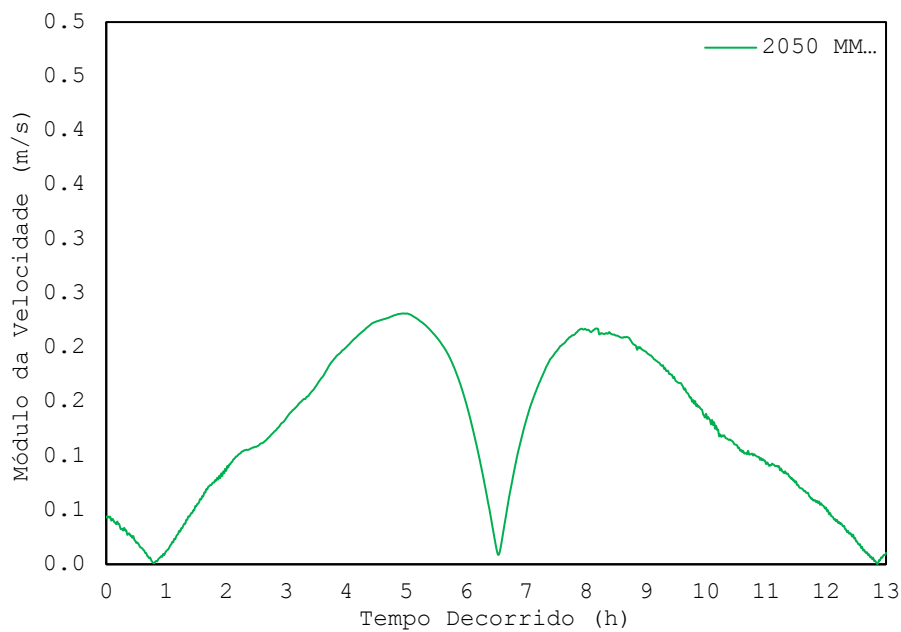


Figura 36 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Cais Comercial no cenário de 2050 Maré Morta.

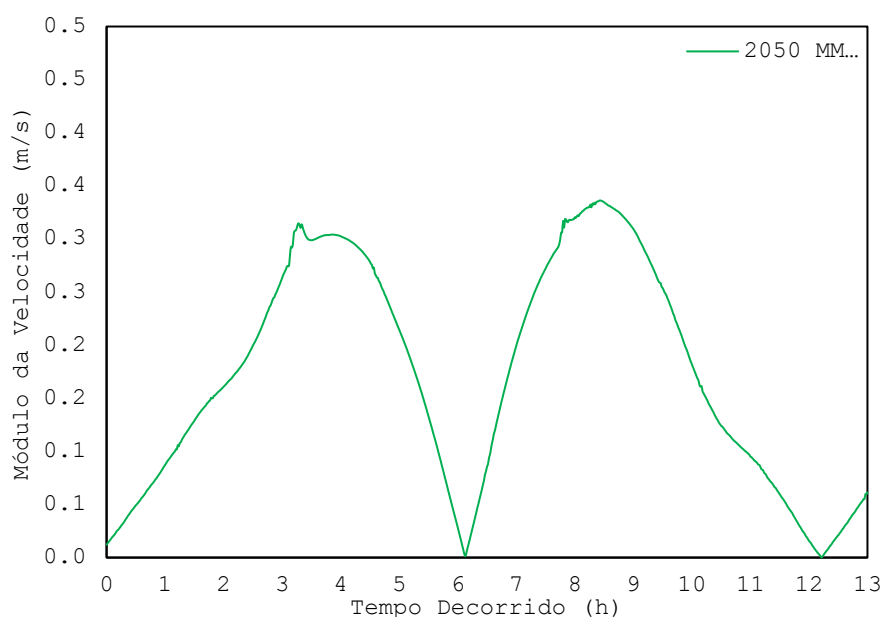


Figura 37 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Ilha Deserta no cenário de 2050 Maré Morta.

Conforme a análise dos gráficos das Figuras 36 e 37, na estação Cais Comercial, a velocidade máxima foi de 0,23 metros por segundo. Na estação Ilha Deserta, a velocidade máxima foi de 0,34 metros por segundo. Neste cenário, ocorre uma menor diferença entre as velocidades na entrada do canal (Ilha Deserta) e no interior da Ria Formosa (Cais Comercial). Nota-se que o modelo sofreu instabilidades pontuais, porém as mesmas foram dissipadas pelo modelo.

A seguir são apresentadas as Figuras 38 e 39, que representam o campo de velocidades das situações de enchente e vazante do Cenário 2050 Maré Morta.

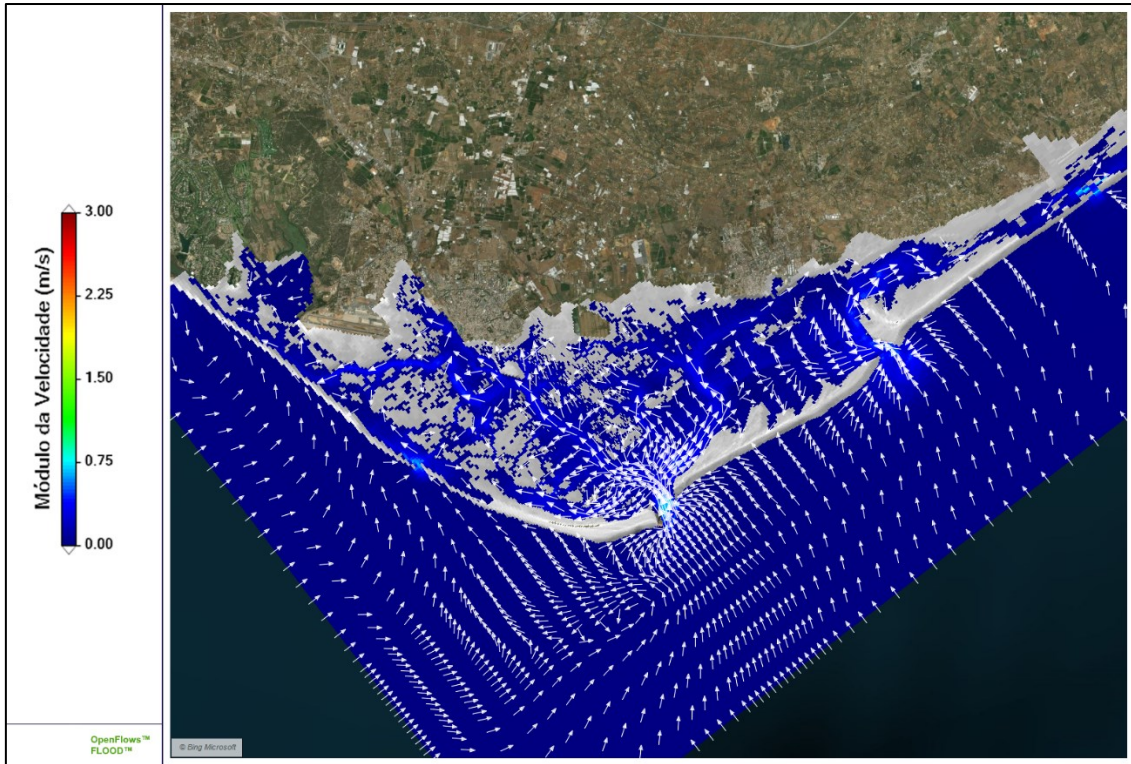


Figura 38 - Campo de velocidades transientes na situação de enchente para o Cenário 2050 Maré Morta.

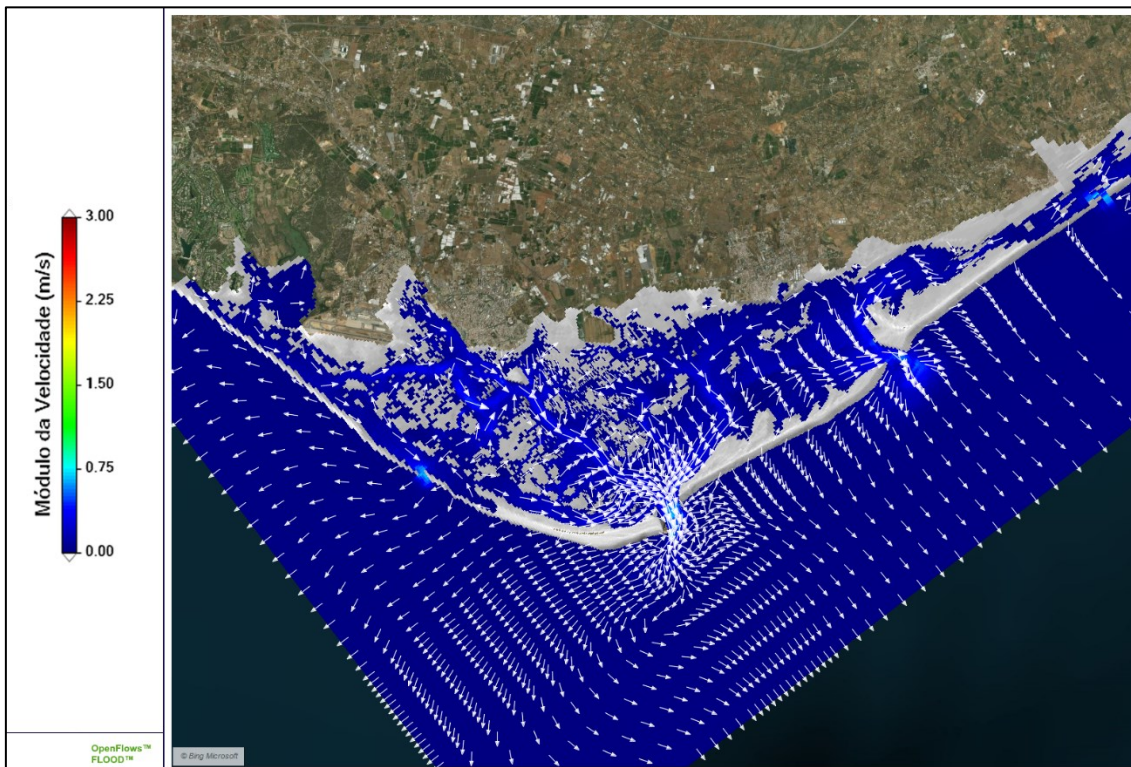


Figura 39 - Campo de velocidades transientes na situação de vazante para o Cenário 2050 Maré Morta.

Percebe-se uma diminuição das velocidades com relação ao Cenário 2012 Maré Morta, possivelmente causado pelo aumento da utilização das barras de Ancão e Armona, conforme mostrado nas Figuras 18 e 19, que resultam em uma maior distribuição das áreas de inundação, fazendo com que haja uma melhor distribuição do escoamento nos demais canais, e por consequência, menos concentração do escoamento no canal da Ilha Deserta e na estação Cais Comercial.

É importante lembrar que não foi considerado qualquer impacto que a velocidade traz sobre os canais, nomeadamente a nível de erosão destes. Admitiu-se sempre a intervenção humana para manutenção do estado atual da Ria Formosa.

Os resultados das áreas de inundação são observáveis através das classes de inundação (Tabela 13) e também através do histograma das classes do tempo de imersão (Figura 40).

Tabela 13 - Distribuição das áreas do modelo da Ria Formosa em função do número de horas de imersão para o Cenário 2050 Maré Morta.

Classe	Intervalo (horas)	Área (km ²)
1	0 – 1,2	1.28
2	1,2 – 2,4	1.82
3	2,4 – 3,7	5.37
4	3,7 – 4,9	3.59
5	4,9 – 6,1	3.27
6	6,1 – 7,3	17.95
7	7,3 – 8,6	1.47
8	8,6 – 9,8	2.42
9	9,8 – 11	0.42
10	11 – 12,2	0.94

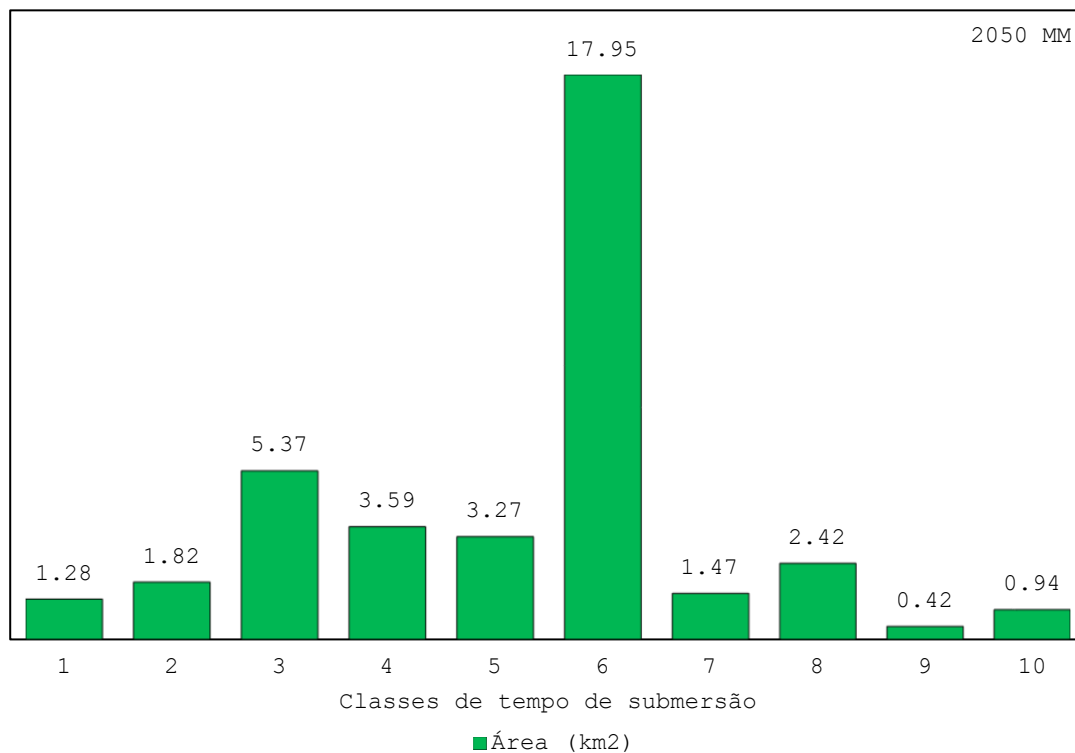


Figura 40 - Histograma com a distribuição das áreas submersas por classe de tempo para o Cenário 2050 Maré Morta.

A seguir é apresentada a Figura 41 com os mapas de distribuição das áreas de inundações para o Cenário 2050 Maré Morta.

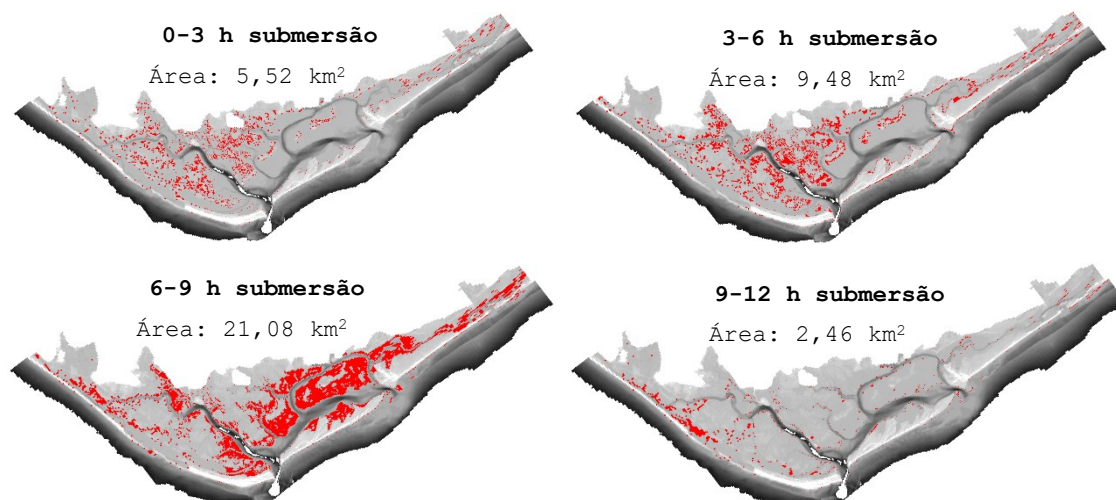


Figura 41 - Mapas de distribuição das áreas de inundações para as diversas áreas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o Cenário 2050 Maré Morta.

Na modelação do Cenário 2050 Maré Morta para um ciclo de maré, a maior área de sapal da Ria Formosa que se encontra submersa é de 17,95 quilómetros quadrados, por um período de 6,1 a 7,3 horas, sendo a Classe 6 a mais predominante para este cenário. As comparações entre cenários serão descritas adiante. A seguir são apresentados os resultados para o Cenário 2050 considerando os efeitos da Maré Viva.

4.3.2 Maré Viva

A data que representa a maré viva para o Cenário 2050 é 20/04/2050, com início às 21 horas e término às 10 horas do dia 21/04/2050, totalizando 13 horas ou um ciclo de maré.

São apresentados os gráficos relativos à evolução temporal da elevação do nível do mar nas estações Cais Comercial e Ilha Deserta, respetivamente, nas Figuras 42 e 43.

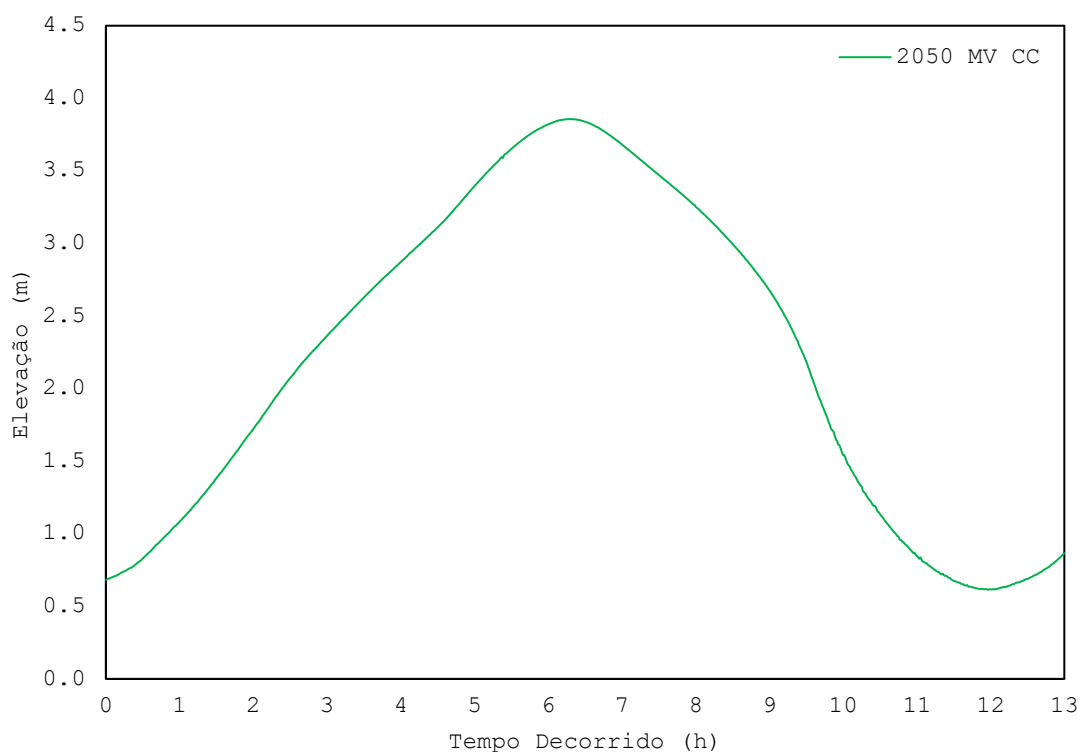


Figura 42 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Cais Comercial para o Cenário 2050 Maré Viva.

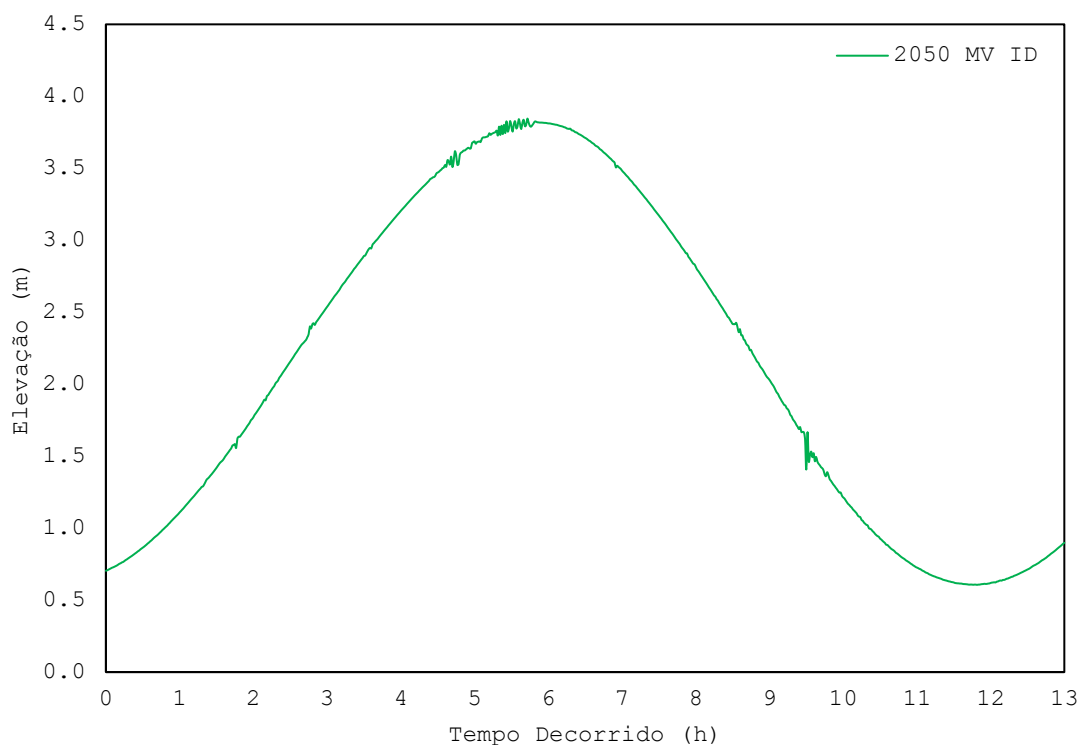


Figura 43 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Ilha Deserta para o Cenário 2050 Maré Viva.

Conforme as Figuras 42 e 43, na estação Cais Comercial, a elevação mínima foi de 0,62 metros e a elevação máxima foi de 3,86 metros, totalizando uma amplitude de 3,24 metros. Para a estação Ilha Deserta, a elevação mínima foi de 0,61 metros e a elevação máxima foi de 3,85 metros e a amplitude é de 3,24 metros.

É possível observar visualmente a elevação através dos gráficos hidrodinâmicos na situação de baixa mar e preia mar, conforme as Figuras 44 e 45, respetivamente.

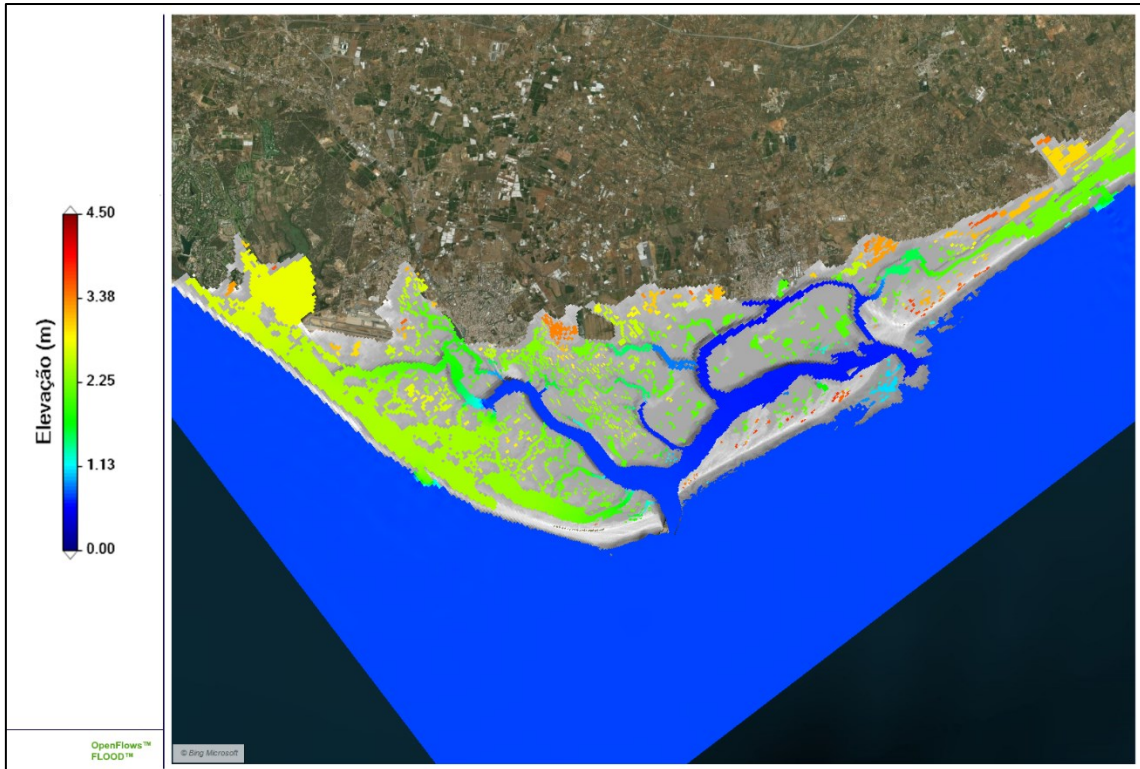


Figura 44 - Representação da elevação em baixa mar para o Cenário 2050 Maré Viva.

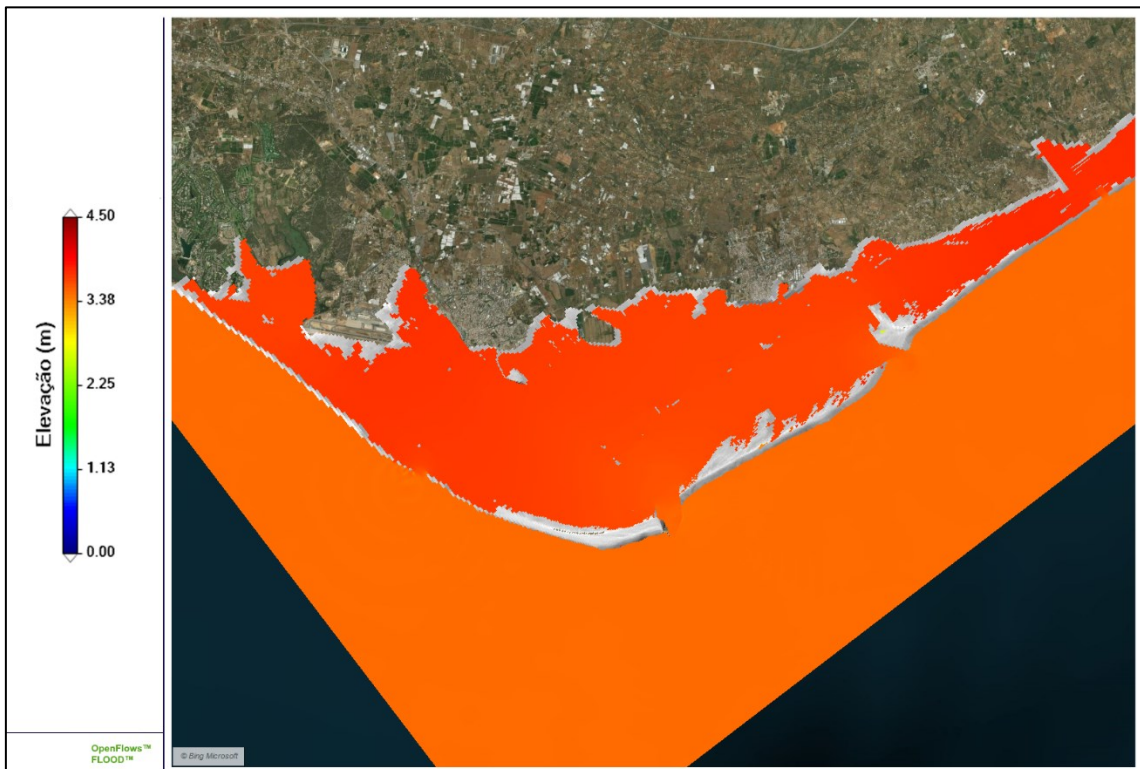


Figura 45 - Representação da elevação em preia mar para o Cenário 2050 Maré Viva.

A seguir, nas Figuras 46 e 47, são apresentados os gráficos para a evolução do módulo da velocidade através das séries temporais para a estação Cais Comercial e Ilha Deserta, respetivamente.

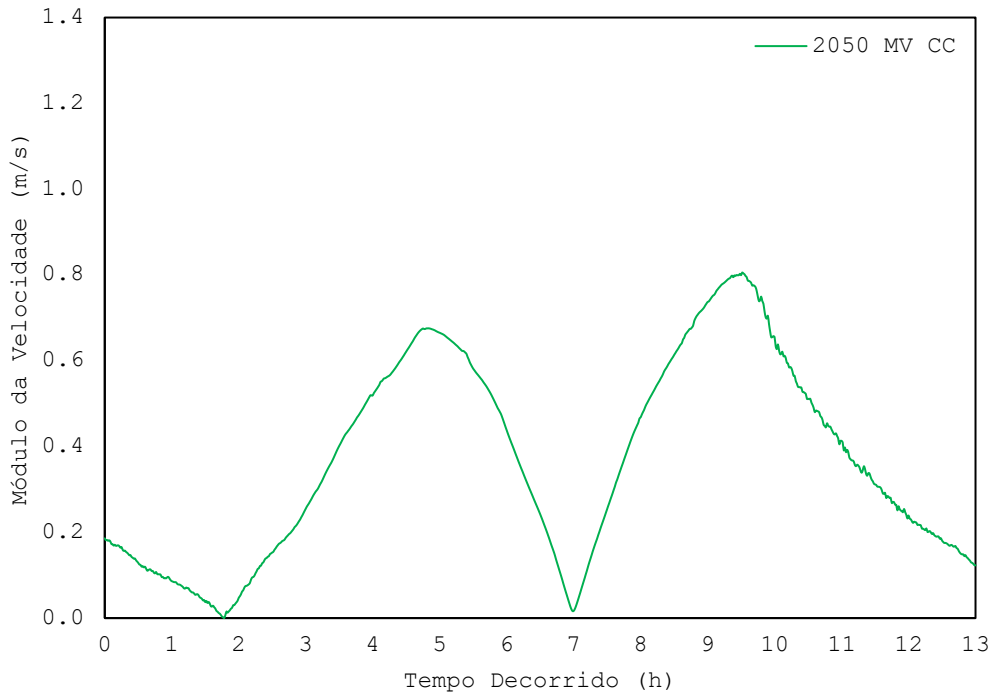


Figura 46 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Cais Comercial no cenário de 2050 Maré Viva.

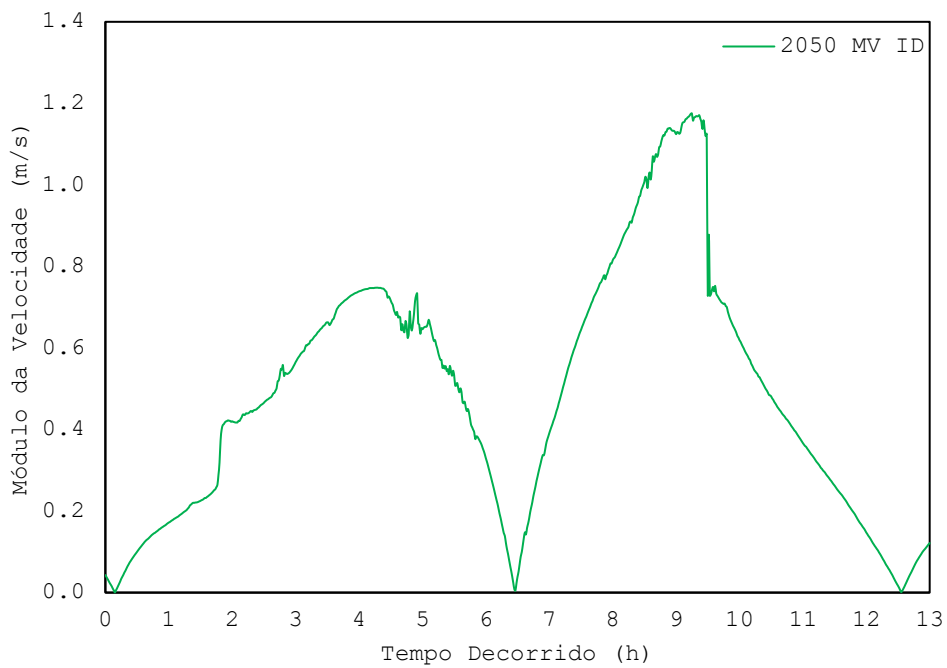


Figura 47 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Ilha Deserta no cenário de 2050 Maré Viva.

Conforme a análise dos gráficos das Figuras 47 e 48, na estação Cais Comercial, a velocidade máxima foi de 0,81 metros por segundo. Na estação Ilha Deserta, a velocidade máxima foi de 1,18 metros por segundo. A seguir, nas Figuras 48 e 49, são apresentados os campos de velocidades da situação de enchente e vazante para as demais células do modelo.

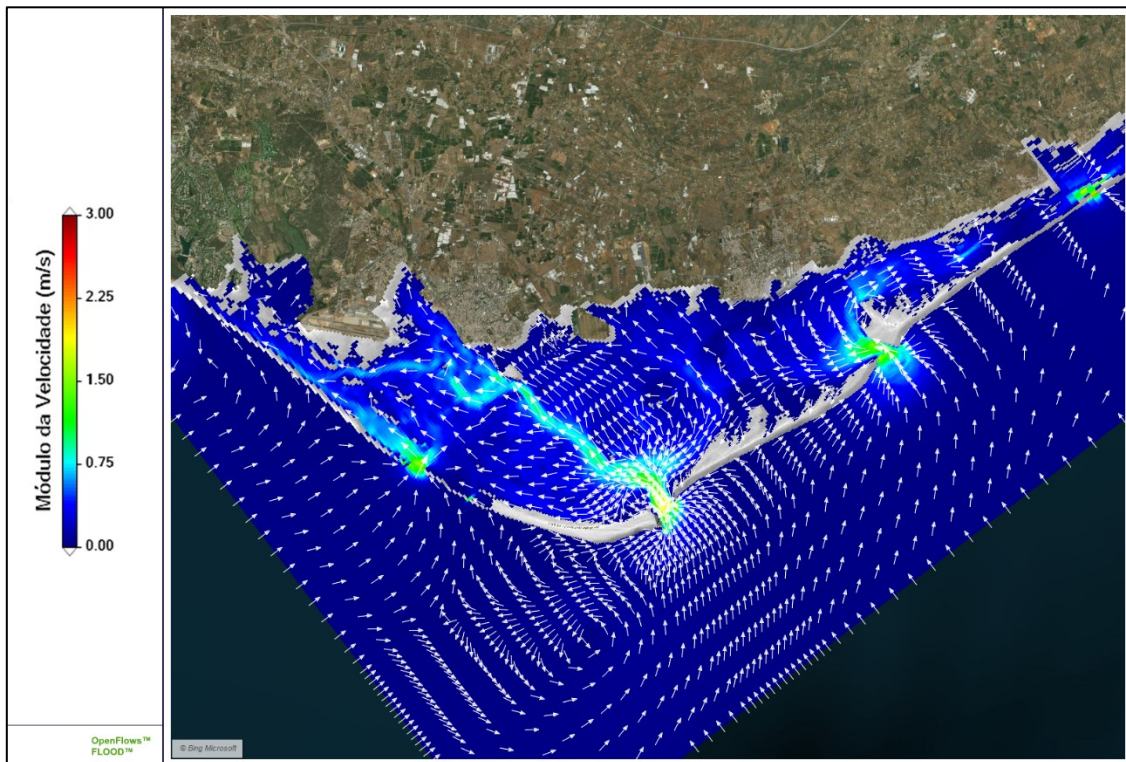


Figura 48 - Campo de velocidades transientes na situação de enchente para o Cenário 2050 Maré Viva.

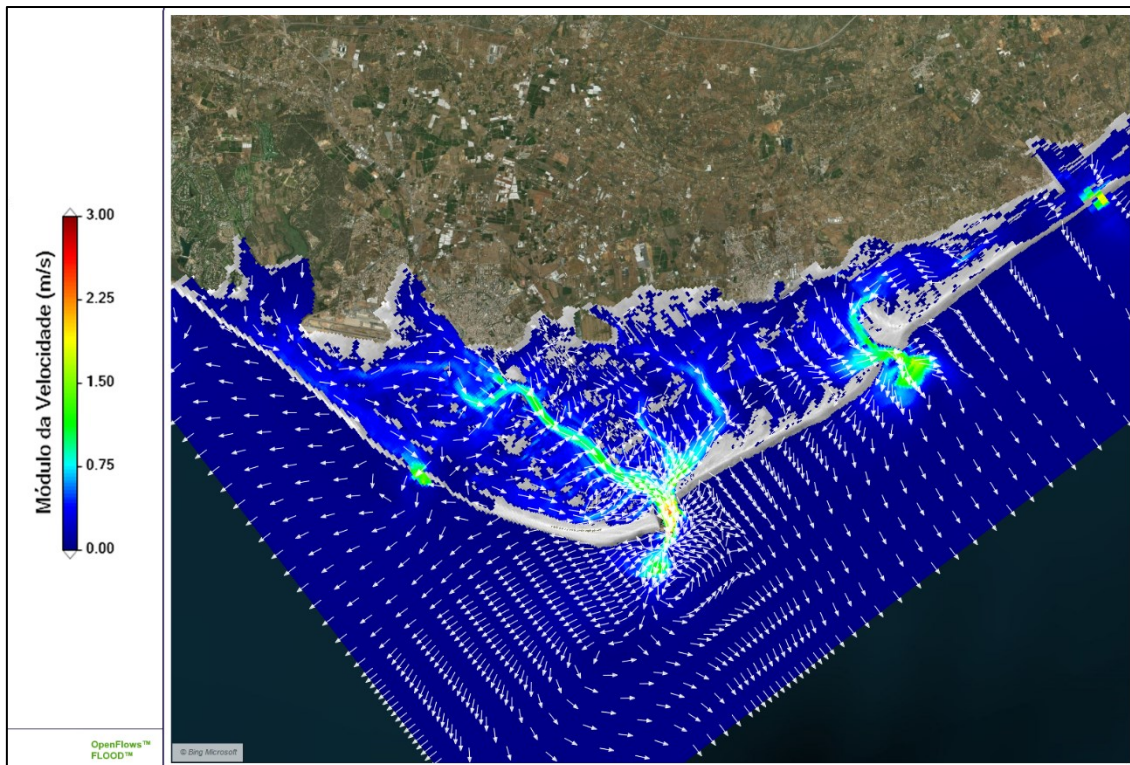


Figura 49 - Campo de velocidades transientes na situação de vazante para o Cenário 2050 Maré Viva.

No Cenário 2050 Maré Viva, a barra mais influente é a barra de Faro-Olhão, juntamente com a barra da Armona. É possível observar que ocorre uma diminuição da influência da barra da Fusetta, em comparação com o Cenário 2012 Maré Viva. Maiores detalhes sobre as comparações entre cenários serão discutidos posteriormente.

A seguir é apresentada a Tabela 14, com os resultados para as classes de inundação, bem como a Figura 50, com o gráfico na forma de histograma para as classes de inundação para o Cenário 2050 Maré Viva.

Tabela 14 - Distribuição das áreas do modelo da Ria Formosa em função do número de horas de imersão para o Cenário 2050 Maré Viva.

Classe	Intervalo (horas)	Área (km ²)
1	0 – 1,2	0.80
2	1,2 – 2,4	1.81
3	2,4 – 3,7	8.15
4	3,7 – 4,9	4.87
5	4,9 – 6,1	7.83
6	6,1 – 7,3	20.18
7	7,3 – 8,6	6.04
8	8,6 – 9,8	5.68
9	9,8 – 11	2.03
10	11 – 12,2	1.10

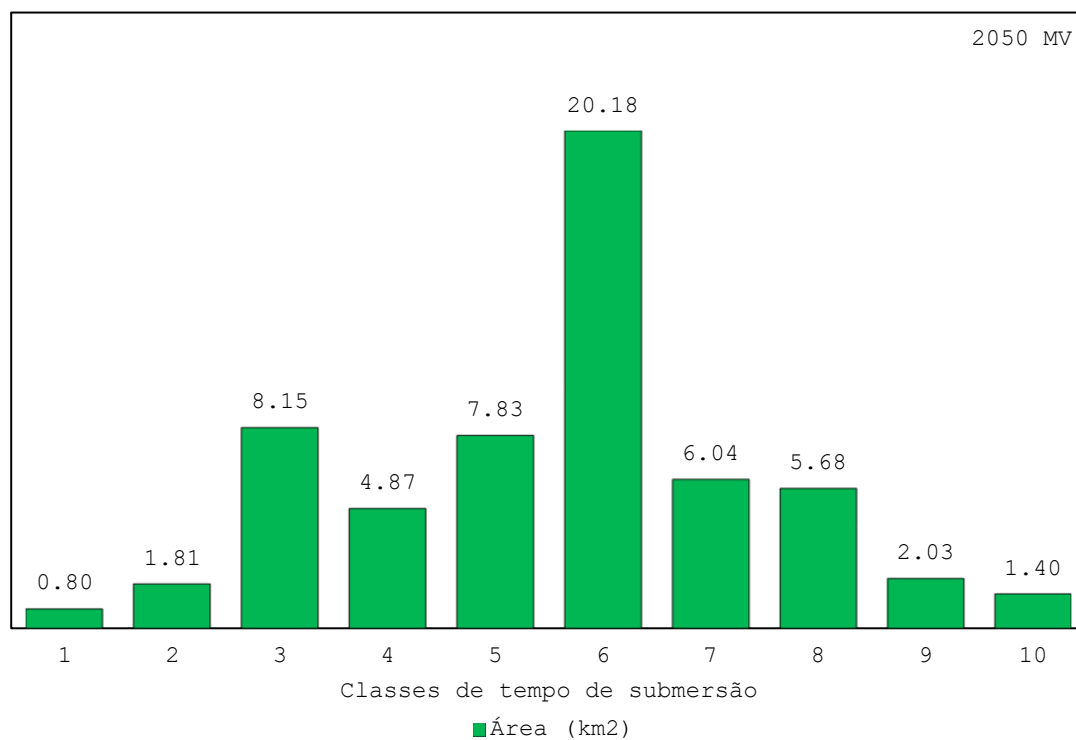


Figura 50 - Histograma com a distribuição das áreas submersas por classe de tempo para o Cenário 2050 Maré Viva.

A Figura 51 apresenta os mapas de distribuição das áreas de inundações do Cenário 2050 Maré Viva.

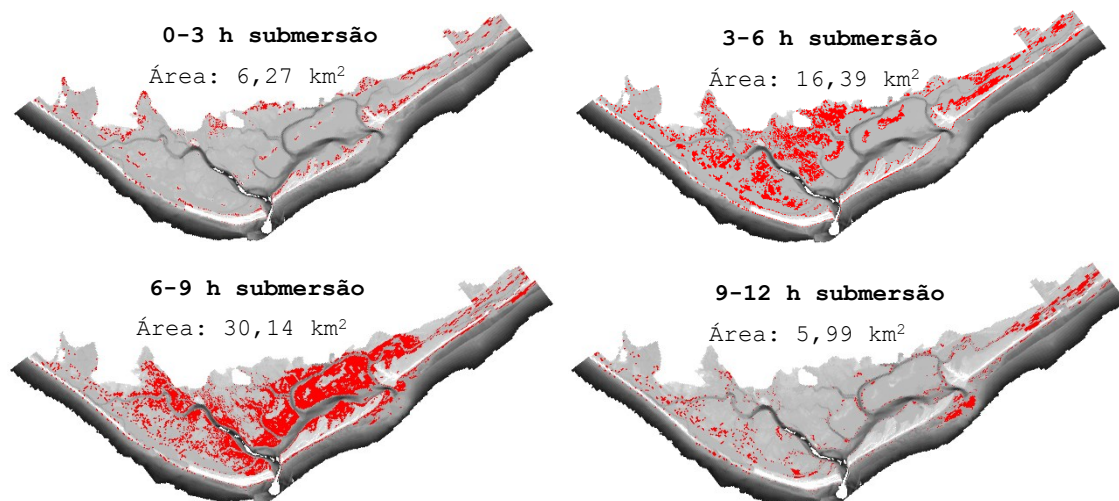


Figura 51 - Mapas de distribuição das áreas de inundação para as diversas áreas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o Cenário 2050 Maré Viva.

Para as áreas de inundações, é possível observar que, para um ciclo de maré (13 horas), 20,18 quilómetros quadrados correspondem à maior área imersa durante um intervalo entre 6,1 a 7,3 horas, sendo a Classe 6 a mais predominante para o Cenário de 2050 Maré Viva.

4.4 Cenário 2100

O Cenário 2100 foi modelado baseado nas projeção do ARNM de Vousdoukas *et al.* (2017), com um aumento relativo do nível do mar de 0,53 metros para a projeção RCP4.5

4.4.1 Maré Morta

Conforme a Tabela 8, a maré morta foi escolhida na data de 17/04/2100, com início às 3 horas e término às 16 horas.

Nas Figuras 52 e 53, são apresentados os gráficos relativos à evolução temporal da elevação do nível do mar nas estações Cais Comercial e Ilha Deserta, respetivamente.

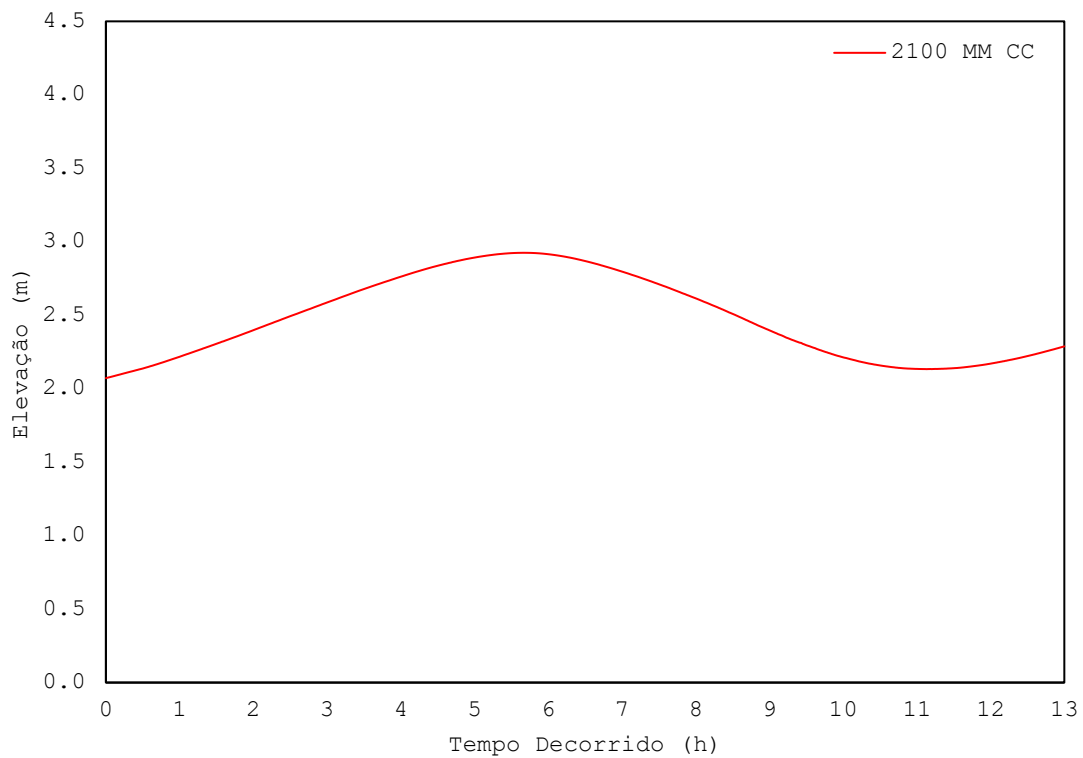


Figura 52 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Cais Comercial para o Cenário 2100 Maré Morta.

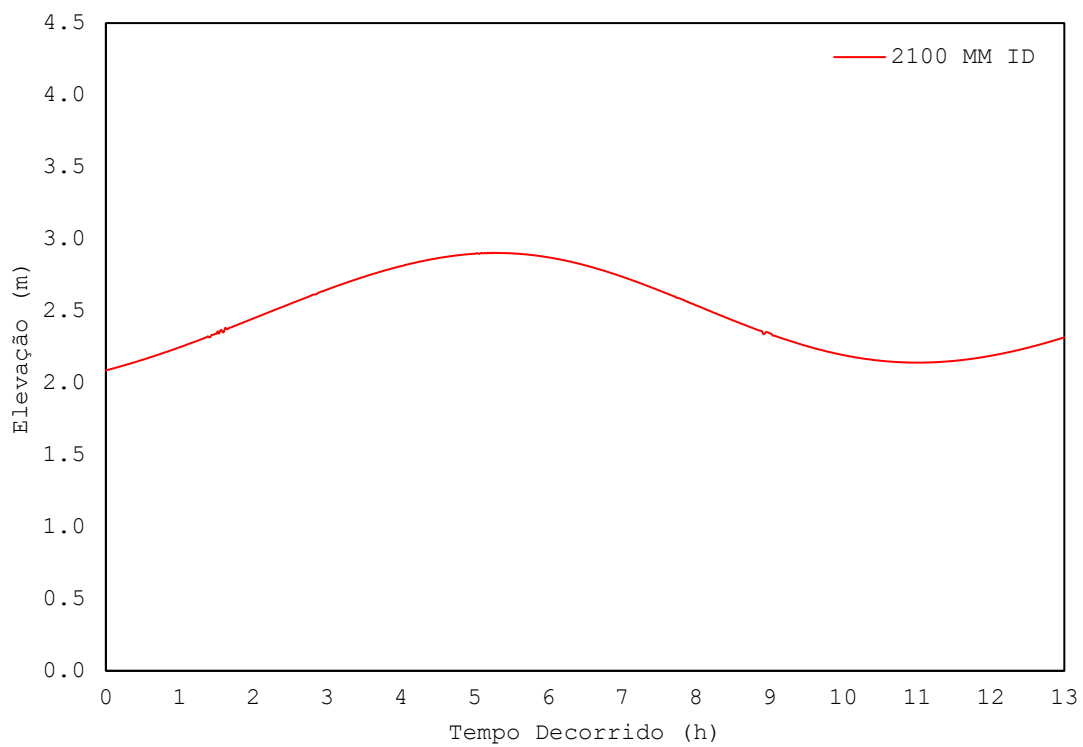


Figura 53 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Ilha Deserta para o Cenário 2100 Maré Morta.

O cenário de 2100 apresenta a situação mais severa com relação ao ARNM. Conforme as Figuras 52 e 53, na estação Cais Comercial, a elevação mínima foi de 2,07 metros e a elevação máxima foi de 2,92 metros, totalizando uma amplitude de 0,85 metros. Para a estação Ilha Deserta, a elevação mínima foi de 2,09 metros e a elevação máxima foi de 2,90 metros. A amplitude para a estação Ilha Deserta foi de 0,81 metros.

Para as demais células do modelo, é possível observar visualmente, a elevação do nível do mar, através dos gráficos hidrodinâmicos na situação de baixa mar e preia mar, conforme as Figuras 54 e 55, respectivamente.



Figura 54 - Representação da elevação em baixa mar para o Cenário 2100 Maré Morta.

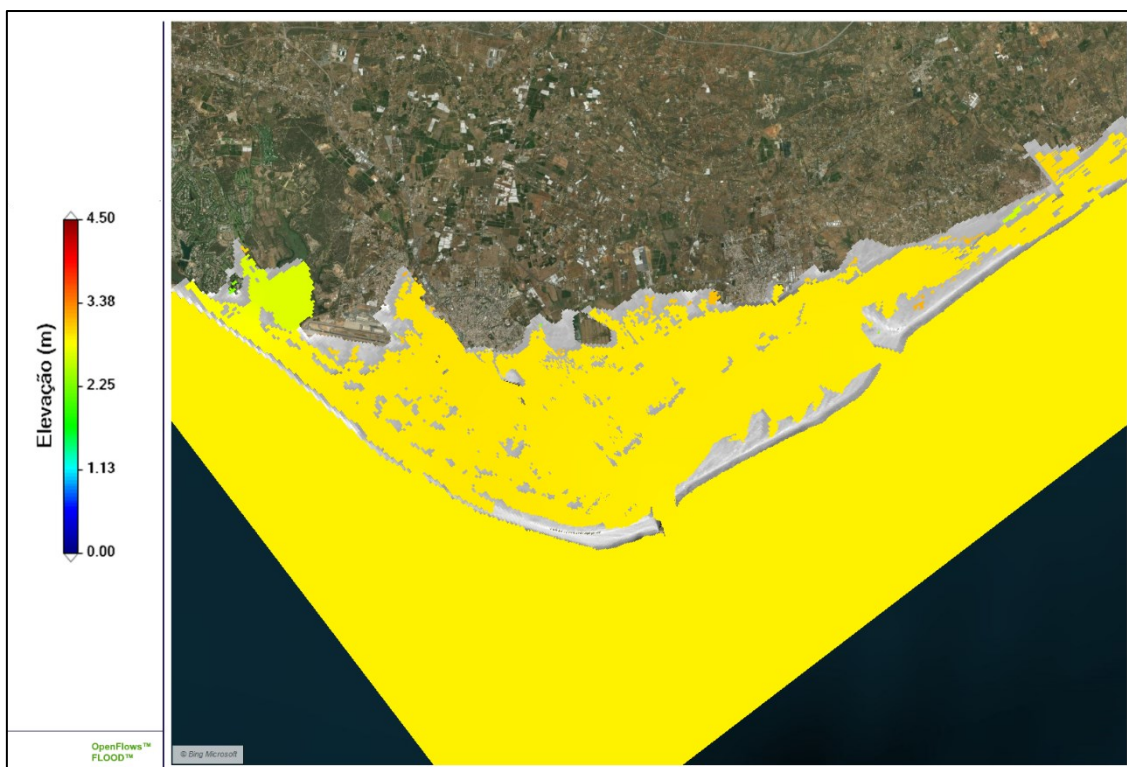


Figura 55 - Representação da elevação em preia mar para o Cenário 2100 Maré Morta.

A representação da elevação mostradas nas Figuras 54 e 55 possibilitam visualizar o resultado para cada célula do domínio, diferentemente da série temporal das estações que exibe o resultado específico para aquele ponto. A representação serve para visualizar o sistema como um todo, ilustrando o comportamento do nível do mar na Ria Formosa em função da baixa mar e preia mar.

A seguir, nas Figuras 56 e 57, são apresentados os gráficos para a evolução do módulo da velocidade através das séries temporais nas estações Cais Comercial e Ilha Deserta, respetivamente.

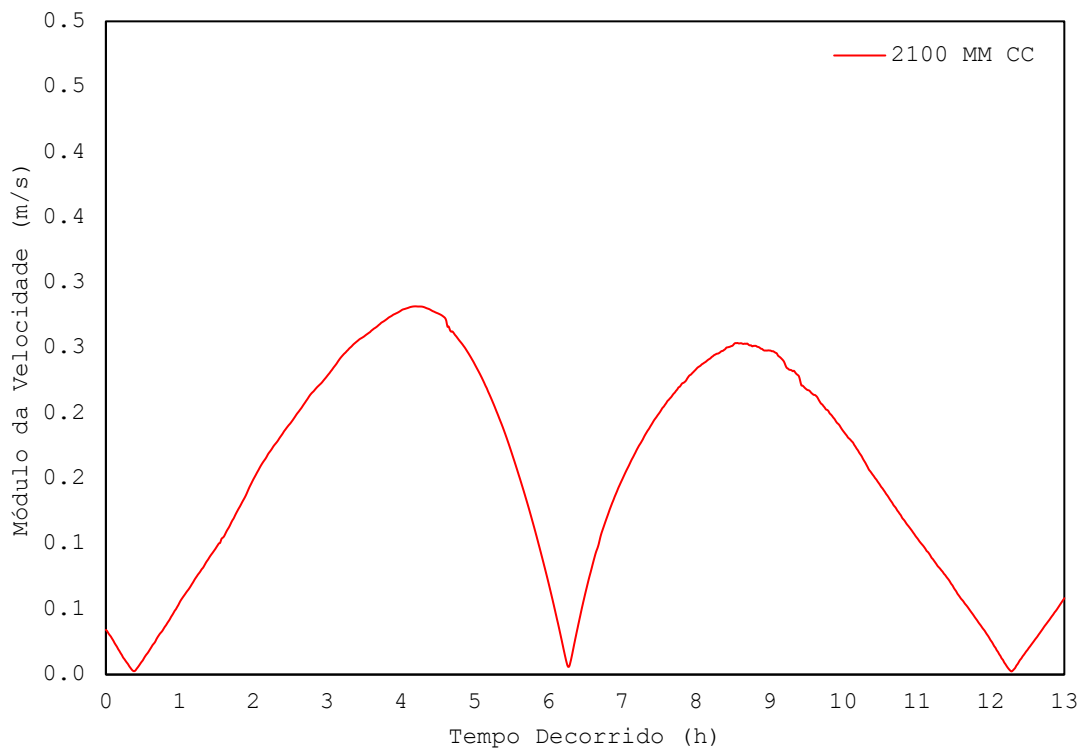


Figura 56 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Cais Comercial no cenário de 2100 Maré Morta.

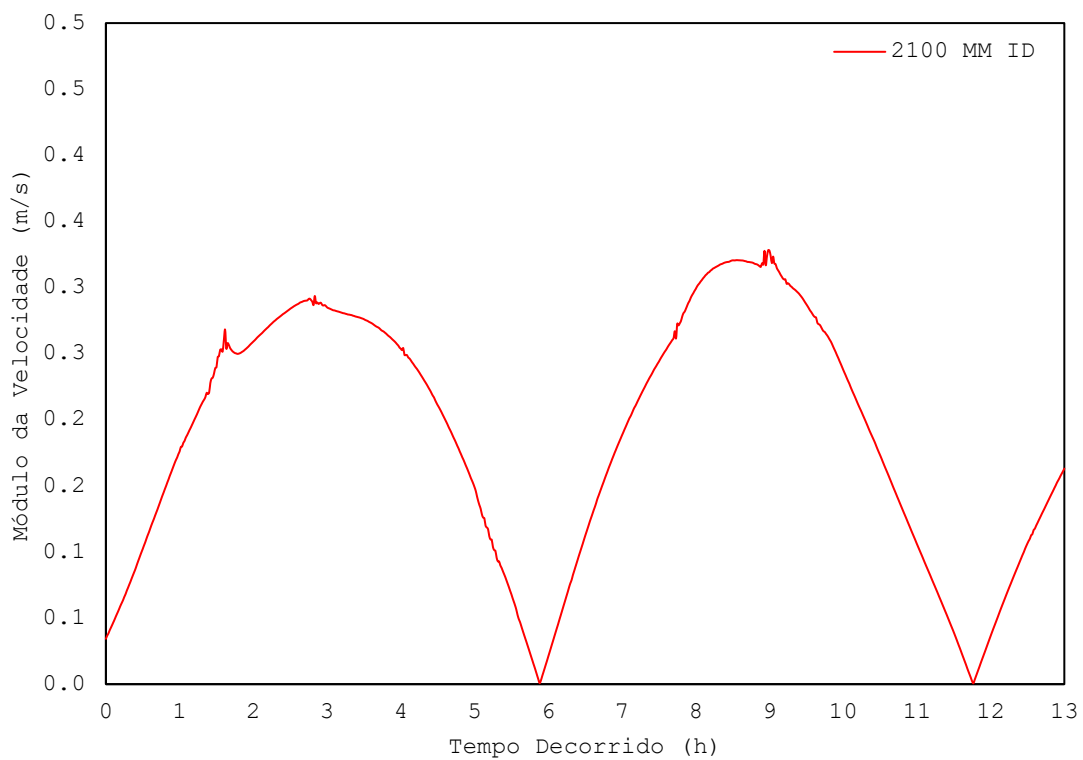


Figura 57 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Ilha Deserta no cenário de 2100 Maré Morta.

Na estação Cais Comercial, a velocidade máxima foi de 0,28 metros por segundo. Na estação Ilha Deserta, a velocidade máxima foi de 0,33 metros por segundo. A seguir são apresentadas as Figuras 58 e 59, que servem para representar o campo de velocidades das situações de enchente e vazante nas demais células do modelo. É importante ressaltar que, neste trabalho, o campo de velocidades possui um caráter ilustrativo dos fenômenos de baixa mar e preia mar que ocorrem na Ria Formosa, sendo mais uma forma de verificar se o modelo foi capaz de simular de maneira correta as situações de enchente e vazante do sistema lagunar. O campo das velocidades também mostra, ainda que de forma simplificada, a influência de cada barra na velocidade dos canais.

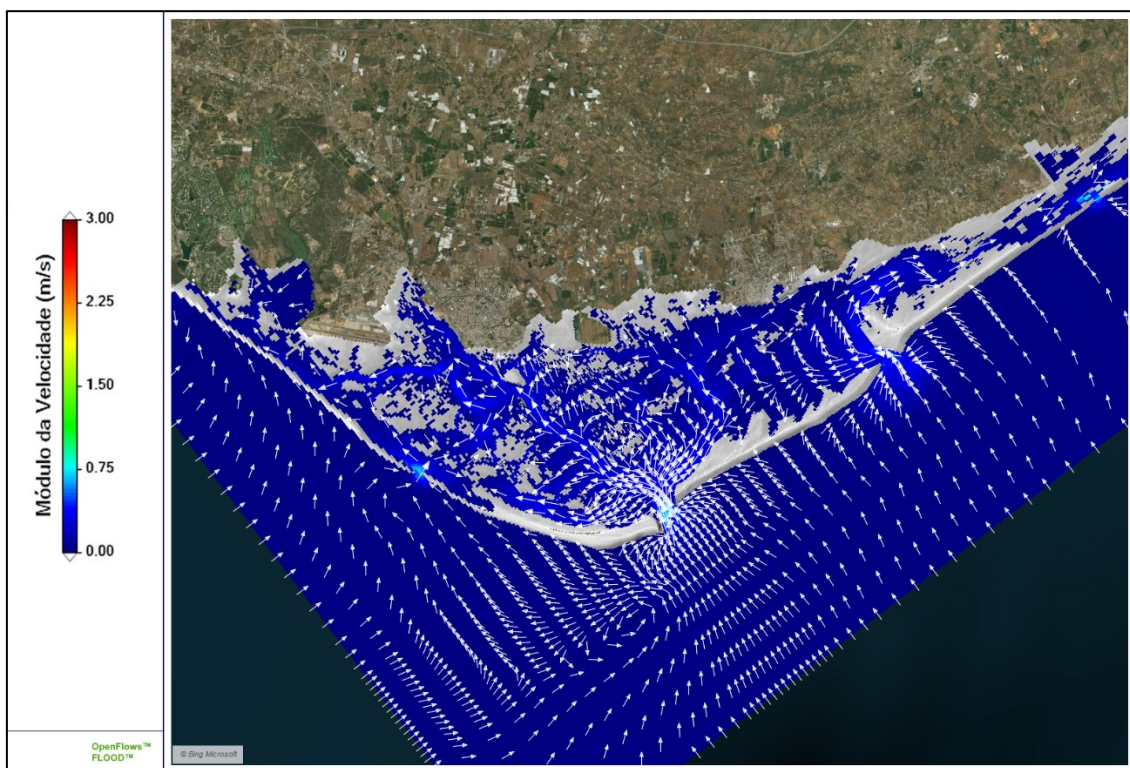


Figura 58 - Campo de velocidades transientes na situação de enchente para o Cenário 2100 Maré Morta.

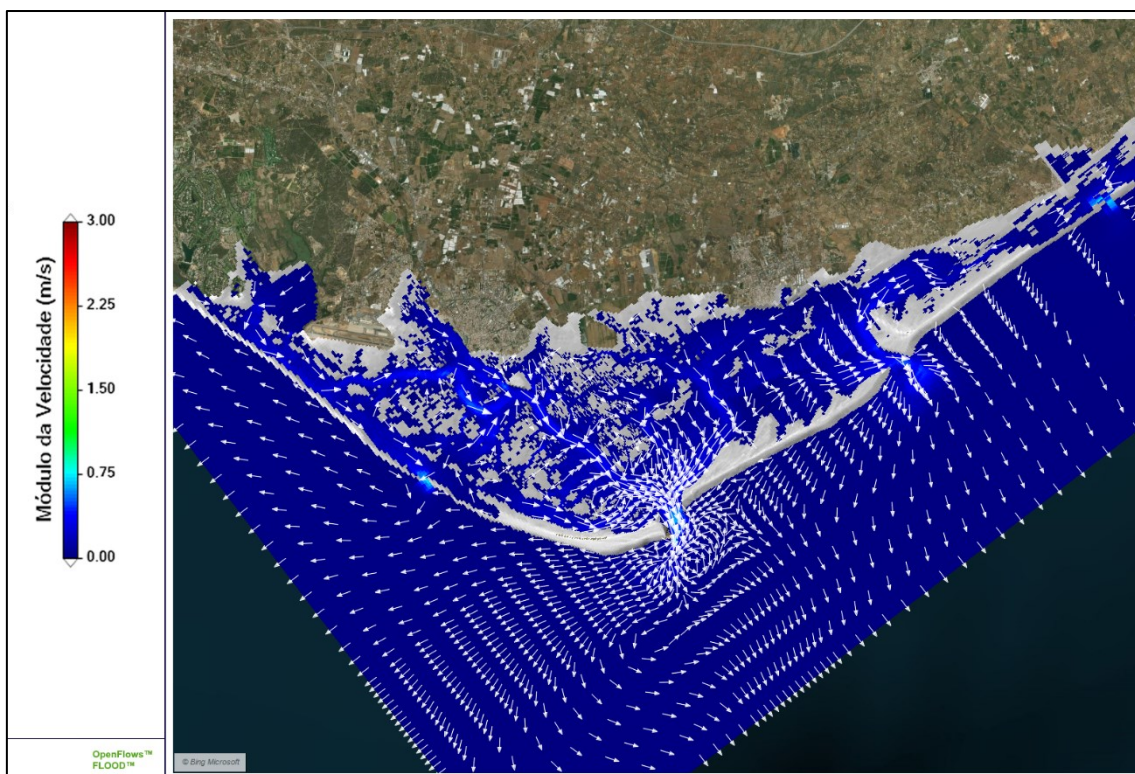


Figura 59 - Campo de velocidades transientes na situação de vazante para o Cenário 2100 Maré Morta.

Através do campo de velocidades das Figuras 58 e 59, nota-se uma utilização ainda maior das demais barras com relação aos cenários anteriores. A barra de Faro-Olhão continua sendo a principal responsável pela entrada e saída de água, porém, nota-se um aumento do módulo da velocidade na barra de Ancão e também uma maior utilização dessa barra no período de vazante, causando mudanças significativas nas áreas descobertas e nas áreas inundadas.

Os resultados das áreas de inundação são observáveis através das classes de inundação e, também, através do histograma dos tempos de imersão, na Tabela 15 e na Figura 60, respetivamente.

Tabela 15 - Distribuição das áreas do modelo da Ria Formosa em função do número de horas de imersão para o Cenário 2100 Maré Morta.

Classe	Intervalo (horas)	Área (km ²)
1	0 – 1,2	0.68
2	1,2 – 2,4	1.57
3	2,4 – 3,7	4.10
4	3,7 – 4,9	2.13
5	4,9 – 6,1	3.08
6	6,1 – 7,3	4.86
7	7,3 – 8,6	1.44
8	8,6 – 9,8	2.64
9	9,8 – 11	1.40
10	11 – 12,2	11.89

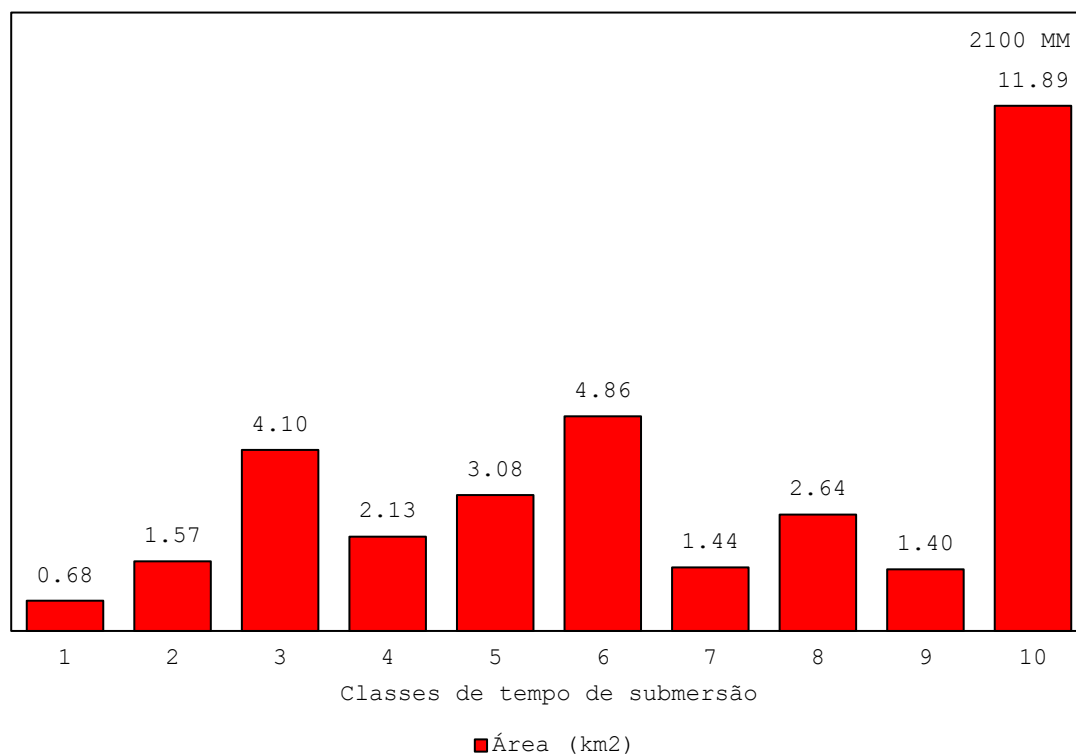


Figura 60 - Histograma com a distribuição das áreas submersas por classe de tempo para o Cenário 2100 Maré Morta.

A seguir, na Figura 61, são apresentados os mapas de distribuição espacial das áreas de inundações, de forma cumulativa, para intervalos de 3 horas de imersão.

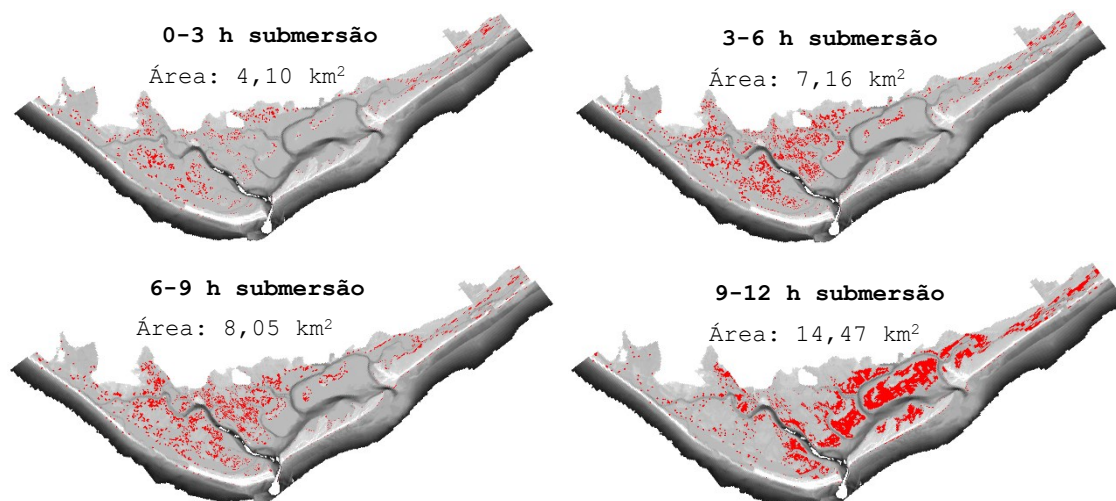


Figura 61 - Mapas de distribuição das áreas de inundação para as diversas áreas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o Cenário 2100 Maré Morta.

Por fim, dos resultados obtidos para as áreas de inundações, é possível observar que, para um ciclo de maré (13 horas), a maior área de sapal da Ria Formosa, aproximadamente 12 quilómetros quadrados, encontra-se imersa por um intervalo entre 11 a 12,2 horas, sendo a Classe 10 a mais predominante para o Cenário de 2100 Maré Morta. Em comparação com os cenários anteriores, nota-se uma grande diferença nas Classes predominantes. Neste cenário, durante as 13 horas do ciclo, a maior parte das áreas encontra-se submersa, tal resultado certamente acarretará em mudanças morfológicas à nível das espécies que utilizam a Ria Formosa.

Por fim, é apresentado o último dos cenários que é o Cenário 2100 considerando o efeito da Maré Viva.

4.4.2 Maré Viva

A data para o Cenário 2100 Maré Viva, conforme a Tabela 8, é o dia 23/04/2100, com a simulação iniciando-se às 20 horas e terminando às 09 horas do dia 24/04/2100, totalizando 13 horas de simulação ou um ciclo de maré.

Nas Figuras 62 e 63, são apresentados os gráficos relativos à evolução temporal da elevação do nível do mar nas estações Cais Comercial e Ilha Deserta, respetivamente, ao longo do tempo total da simulação.

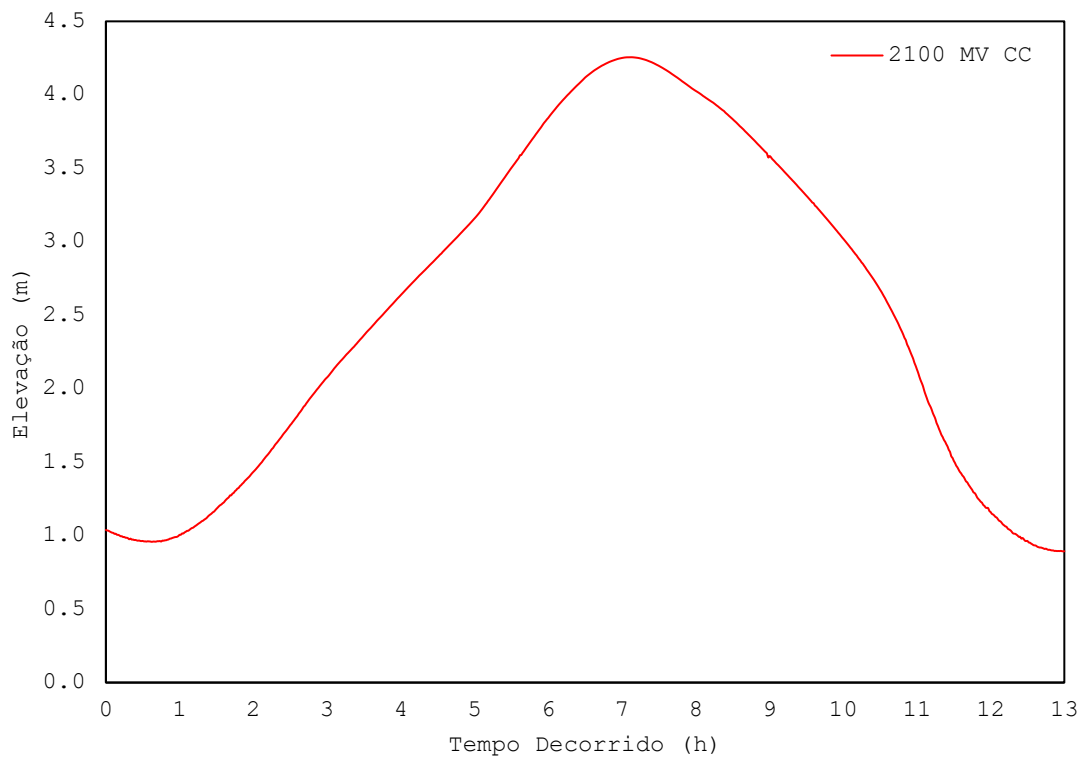


Figura 62 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Cais Comercial para o Cenário 2100 Maré Viva.

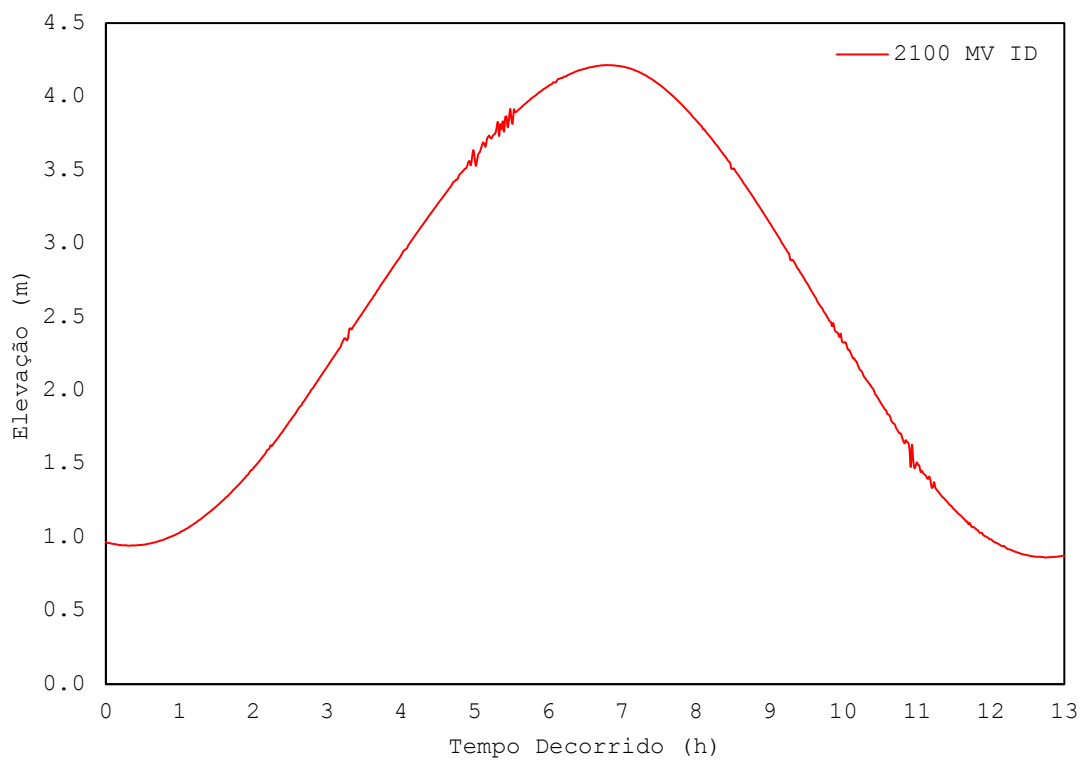


Figura 63 - Evolução temporal da elevação do nível do mar na estação Ilha Deserta para o Cenário 2100 Maré Viva.

A elevação mínima, na estação Cais Comercial, atinge o valor de 0,89 metros e a elevação máxima foi de 4,26 metros, totalizando uma amplitude de 3,37 metros. Para a estação Ilha Deserta a elevação mínima foi de 0,86 metros, a elevação máxima foi de 4,21 metros e a amplitude é de 3,35 metros.

As elevações, através dos gráficos hidrodinâmicos, na situação de baixa mar e preia mar, são apresentadas conforme as Figuras 64 e 65, respectivamente.

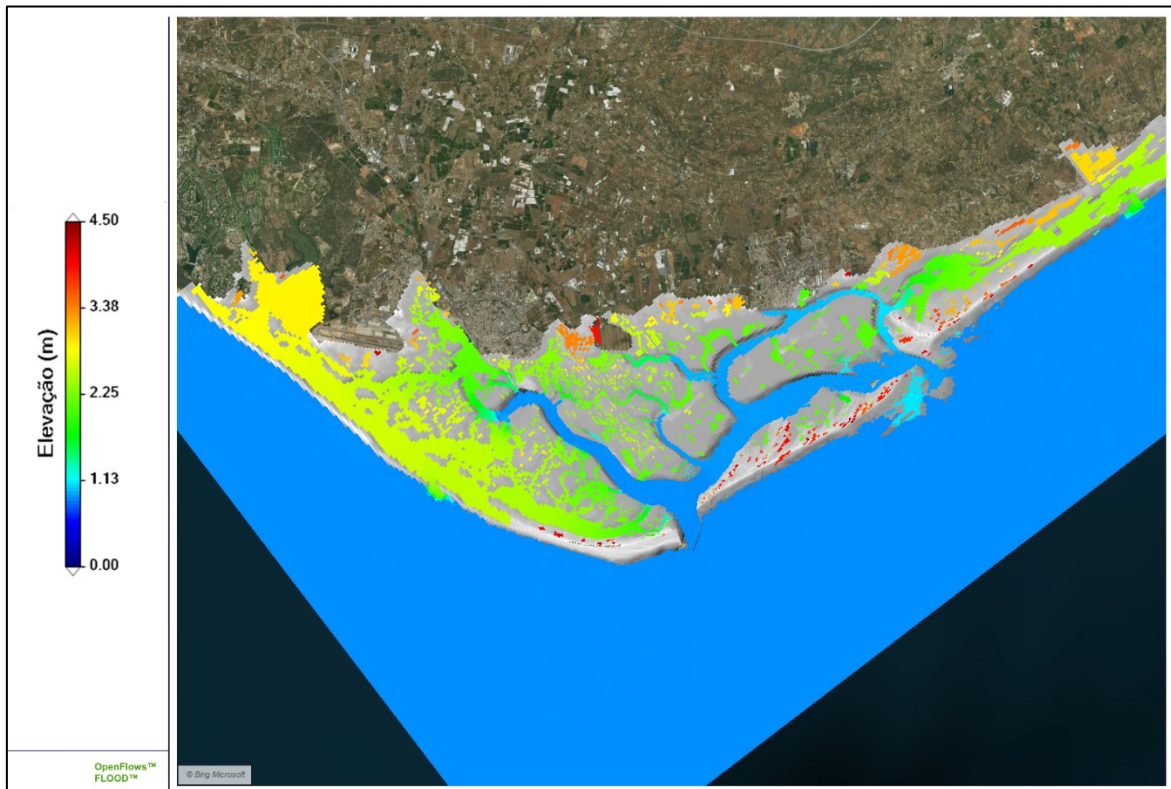


Figura 64 - Representação da elevação em baixa mar para o Cenário 2100 Maré Viva.

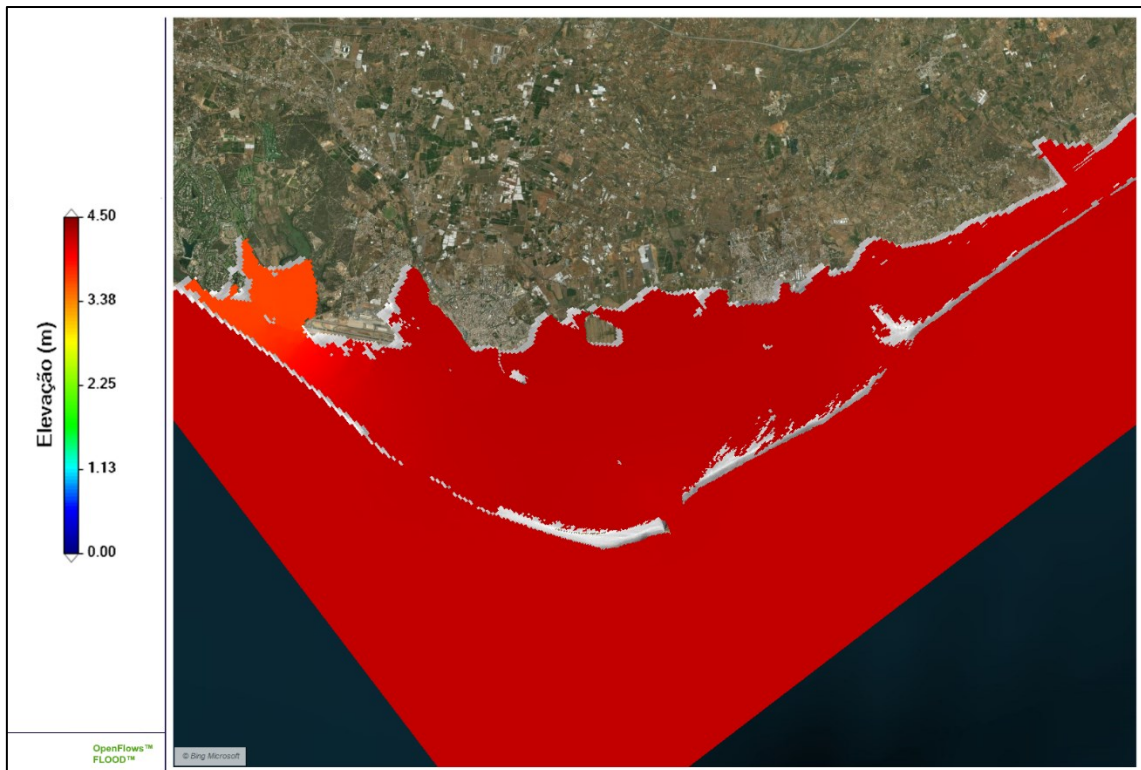


Figura 65 - Representação da elevação em preia mar para o Cenário 2100 Maré Viva.

Nota-se, através da Figura 64, que, na situação de maré viva baixa mar, há quase completa inundação do canal da Armona. Na situação de maré viva preia mar, conforme a Figura 65, há a inundação completa de todos os canais.

A seguir, nas Figuras 66 e 67, são apresentados os gráficos para a evolução do módulo da velocidade através das séries temporais para a estação Cais Comercial e Ilha Deserta, respetivamente.

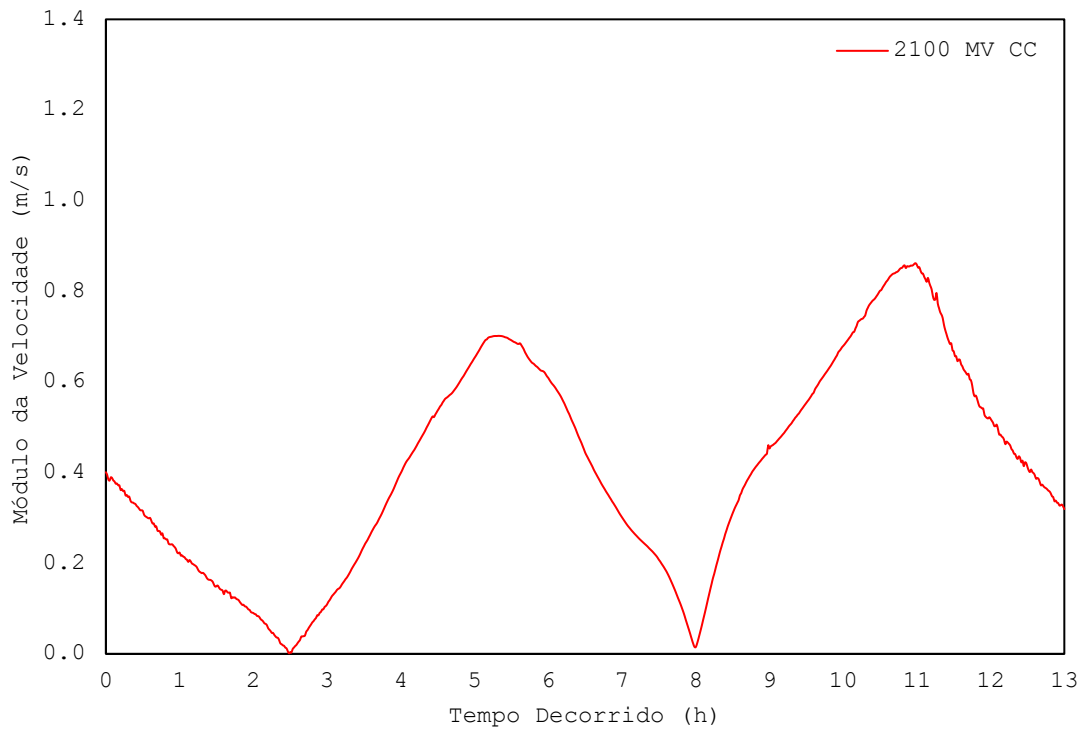


Figura 66 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Cais Comercial no cenário de 2100 Maré Viva.

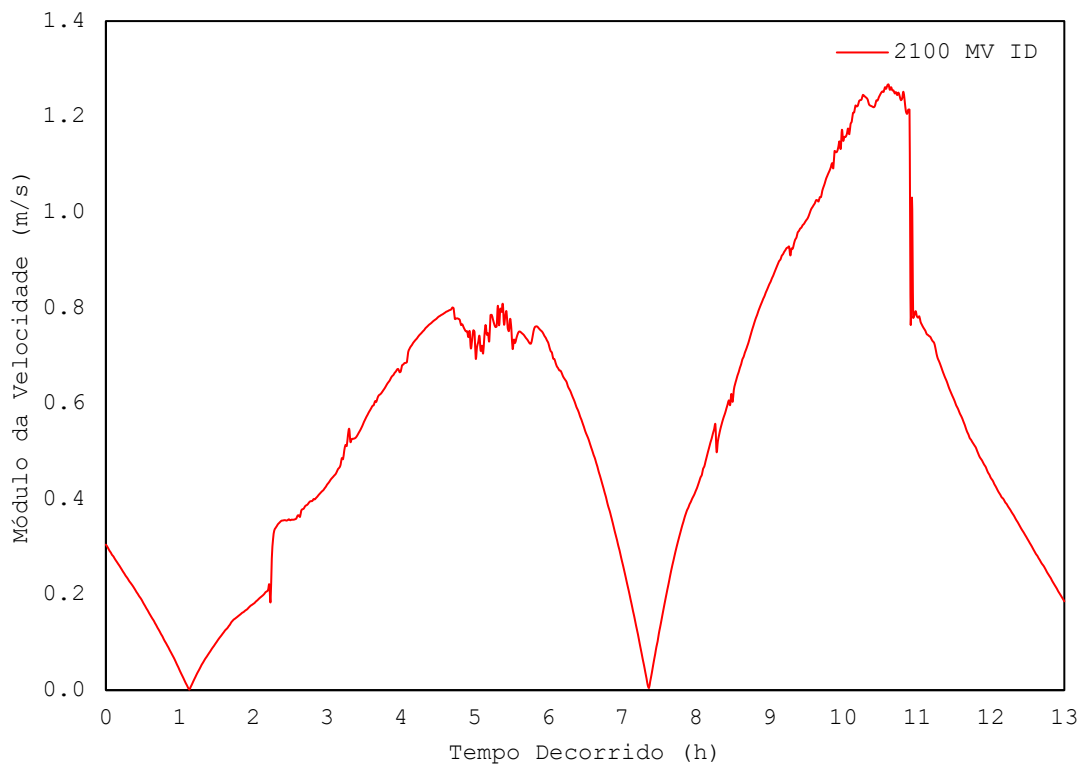


Figura 67 - Série temporal da evolução do módulo da velocidade para estação Ilha Deserta no cenário de 2100 Maré Viva.

Para a estação Cais Comercial, a velocidade máxima foi de 0,86 metros por segundo. Na estação Ilha Deserta, a velocidade máxima foi de 1,27 metros por segundo. Nota-se um aumento na instabilidade do cálculo do modelo, possivelmente causado pelas diferenças entre profundidades das células e o aumento expressivo do nível do mar. Os valores são considerados válidos, pois a instabilidade dissipa-se no decorrer da simulação.

O campo de velocidade, bem como os vetores que indicam as direções do escoamento no domínio, são ilustrados nas Figuras 68 e 69, a seguir

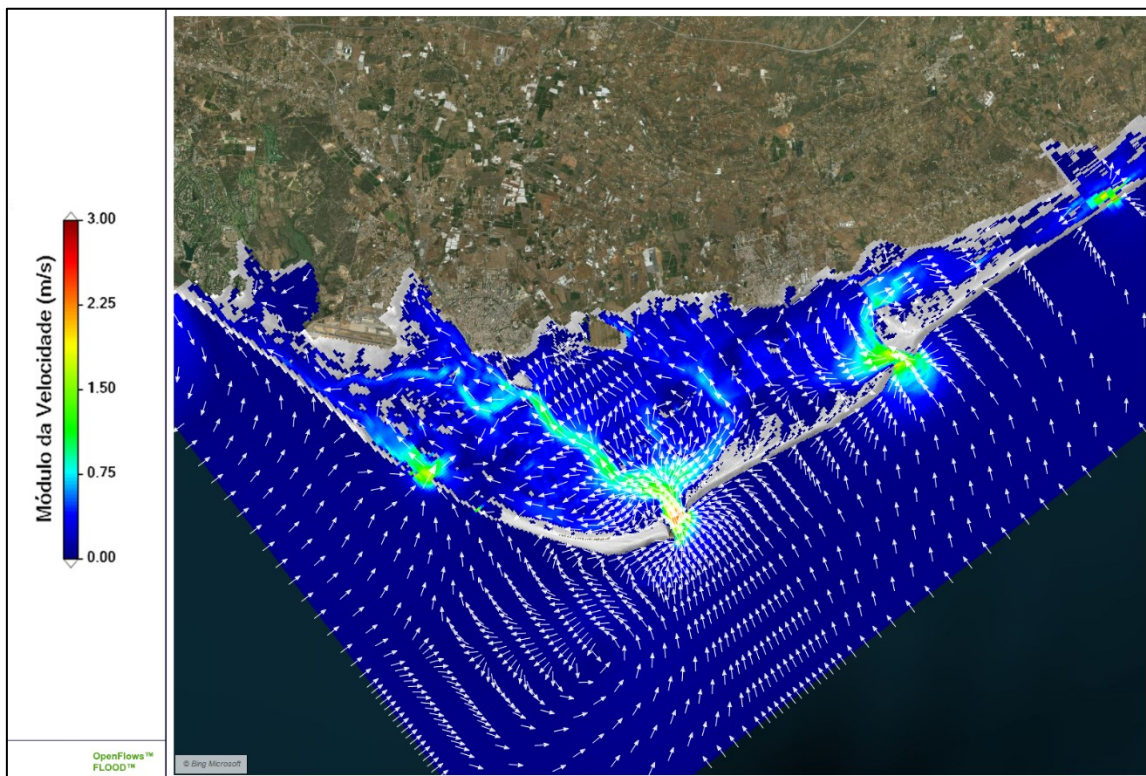


Figura 68 - Campo de velocidades transientes na situação de enchente para o Cenário 2100 Maré Viva.

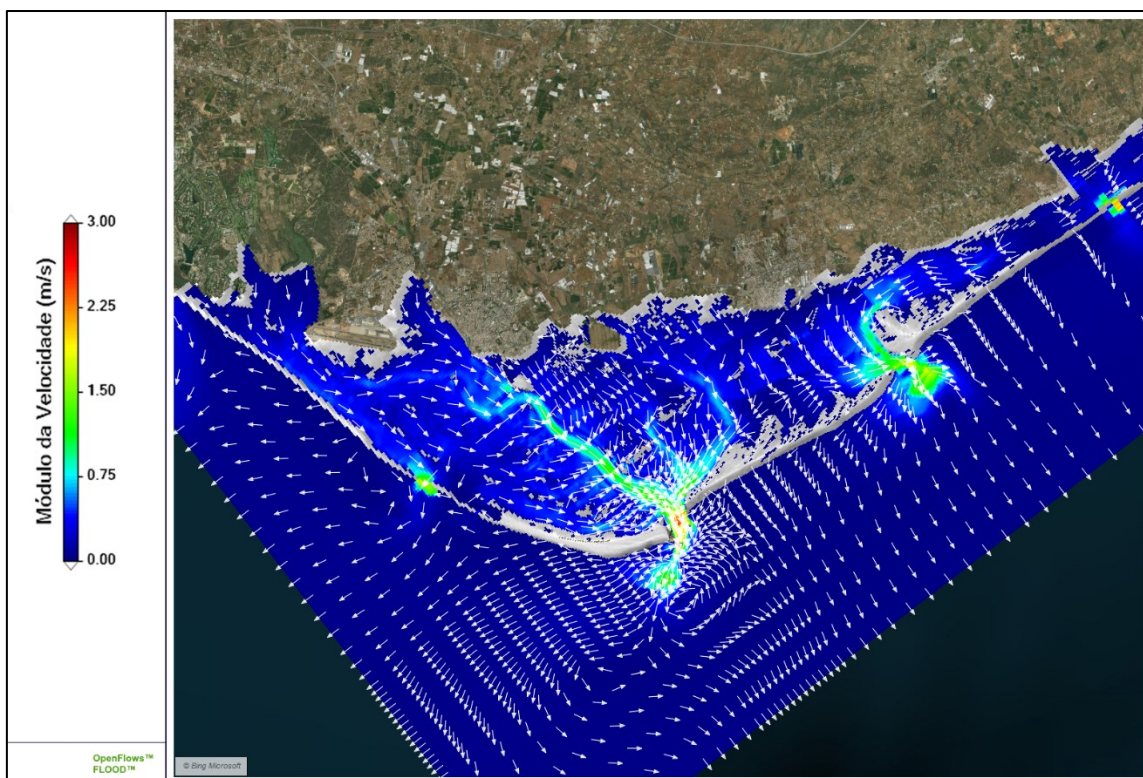


Figura 69 - Campo de velocidades transientes na situação de vazante para o Cenário 2100 Maré Viva.

Do ponto de vista dos resultados do módulo da velocidade, os valores encontrados servem somente para ilustrar o fluxo de água nos canais da Ria Formosa, não podendo ser considerados como uma previsão do comportamento futuro, pois foi assumido anteriormente a manutenção do estado atual dos canais e das barras. O que se sabe, entretanto, é que a velocidade exerce grande influência na forma dos canais e das barras, alterando também o fundo. Para avaliar a influência da velocidade seria necessário um modelo morfodinâmico, que não foi considerado neste estudo.

A seguir são apresentados os resultados para as classes de inundação, sob a forma de tabela, na Tabela 16, e na forma de histograma, na Figura 70.

Tabela 16 - Distribuição das áreas do modelo da Ria Formosa em função do número de horas de imersão para o Cenário 2100 Maré Viva.

Classe	Intervalo (horas)	Área (km ²)
1	0 – 1,2	1.51
2	1,2 – 2,4	1.79
3	2,4 – 3,7	4.63
4	3,7 – 4,9	4.84
5	4,9 – 6,1	6.69
6	6,1 – 7,3	16.20
7	7,3 – 8,6	8.28
8	8,6 – 9,8	8.84
9	9,8 – 11	3.70
10	11 – 12,2	2.96

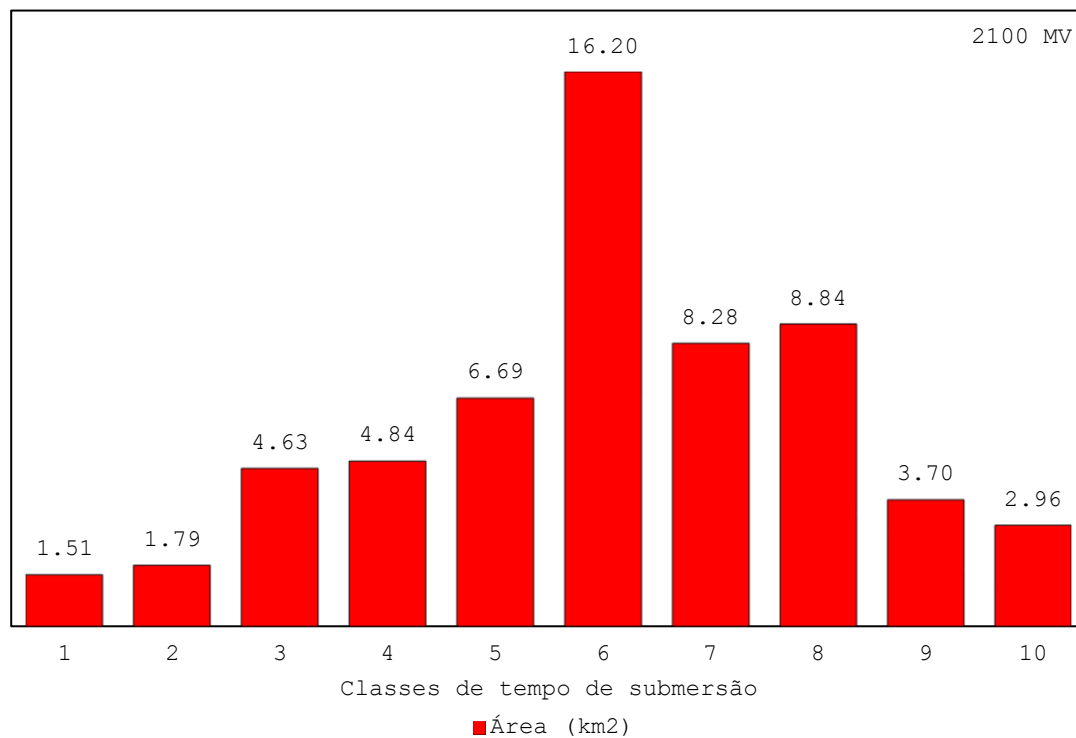


Figura 70 - Histograma com a distribuição das áreas submersas por classe de tempo para o Cenário 2100 Maré Viva.

A Figura 71 apresenta os mapas de distribuição das áreas de inundações para o Cenário 2100 Maré Viva.

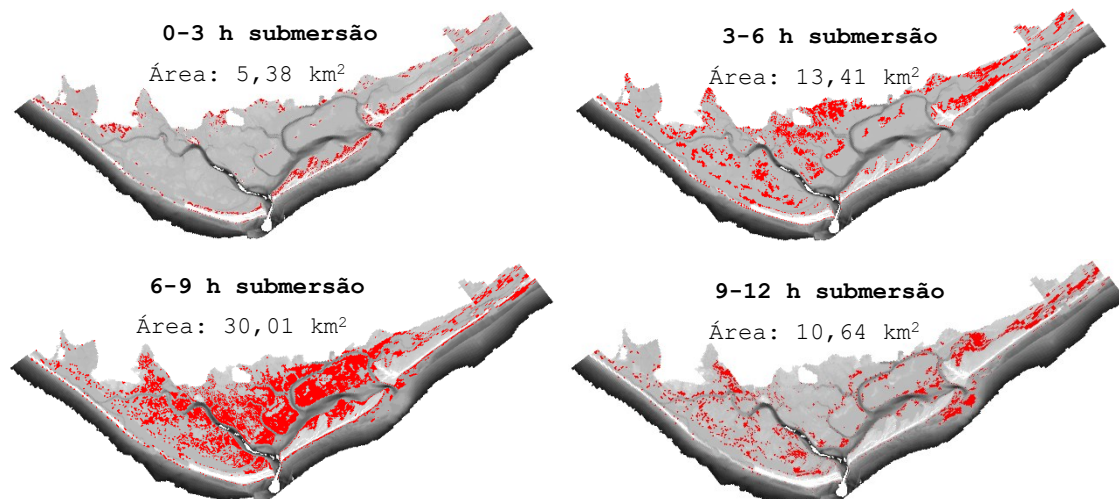


Figura 71 - Mapas de distribuição das áreas de inundação para as diversas áreas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o Cenário 2100 Maré Viva.

Na modelação do Cenário 2100 Maré, para um ciclo de maré (13 horas), a maior área de sapal da Ria Formosa que se encontra submersa é de 16,20 quilómetros quadrados, por um período de 6,1 a 7,3 horas, sendo a Classe 6 a mais destacada neste cenário. Em comparação com o Cenário 2100 Maré Morta, ocorre uma grande diferença entre as Classes. No Cenário 2100, onde considerou-se o efeito da maré morta, a classe predominante foi a Classe 10, com as demais classes com poucas áreas imersas. Já para a situação de maré viva, ocorre uma maior distribuição das áreas entre as classes. Tal resultado é devido aos efeitos extremos que a maré viva proporciona ao ciclo de maré, causando uma grande amplitude, ou seja, para a maré viva, nos momentos onde ocorre a baixa mar, há pouca área imersa e, nos momentos onde ocorre a preia mar, a área imersa é elevada. No entanto, para a maré morta, a situação de baixa mar e preia mar apresentam uma menor amplitude, fazendo com que mais água permaneça no sistema.

Sob o ponto de vista das consequências causadas pelo ARNM, faz sentido comparar os resultados obtidos para os Cenários de 2012 com os Cenários de 2050 e 2100, que consideram o ARNM proposto por Vousdoukas et al. (2017), a fim de compreender melhor os efeitos causados por esse aumento do nível do mar e quais as suas consequências para a hidrodinâmica da Ria Formosa.

4.5 Comparação entre Cenários

Sabe-se que a Ria Formosa é um sistema altamente hidrodinâmico e que mudanças no nível do mar certamente provocarão alterações ao nível morfológico. Os Cenários 2012 Maré Morta e Maré Viva servem como linha de base e representam a situação “presente” da ria Formosa. Todos os demais cenários são uma evolução temporal face ao aumento do nível do mar proposto por Vousdoukas *et al.* (2017). Martins e Janeiro (2018) embasam que, em se tratando de um contexto de uma análise a 100 anos do impacto das alterações climáticas, a batimetria criada pode ser considerada representativa para a situação atual da Ria Formosa. Com a utilização da mesma batimetria para ambos os cenários, é possível realizar a comparação entre os mesmos e evidenciar os efeitos do ARNM na Ria Formosa, face a uma evolução de 88 anos, correspondente aos cenários 2012, 2050 e 2100. É importante ressaltar que, neste estudo, considera-se que sempre haverá intervenção humana para manutenção do estado atual da Ria Formosa, pelo que a batimetria é assumida como sendo constante. Os Cenários no ano de 2012 servem como linha de base e representam a situação “presente” da ria Formosa, na situação de Maré Morta e Maré Viva, respetivamente.

A comparação entre os cenários só é possível em cenários com as mesmas características, por essa razão, as comparações serão feitas em função dos dois eventos de maré simulados: Maré Morta e Maré Viva, para os respetivos anos.

4.5.1 Maré Morta

A seguir, nas Figuras 72 e 73, são apresentados a evolução das séries temporais da elevação do nível do mar na estação Cais Comercial e Ilha Deserta, respetivamente, comparando os três anos, considerando um ciclo de maré (13 horas). Em seguida, é apresentada a Tabela 17 que regista a elevação mínima e máxima em ambas as estações para todos os anos na situação de Maré Morta.

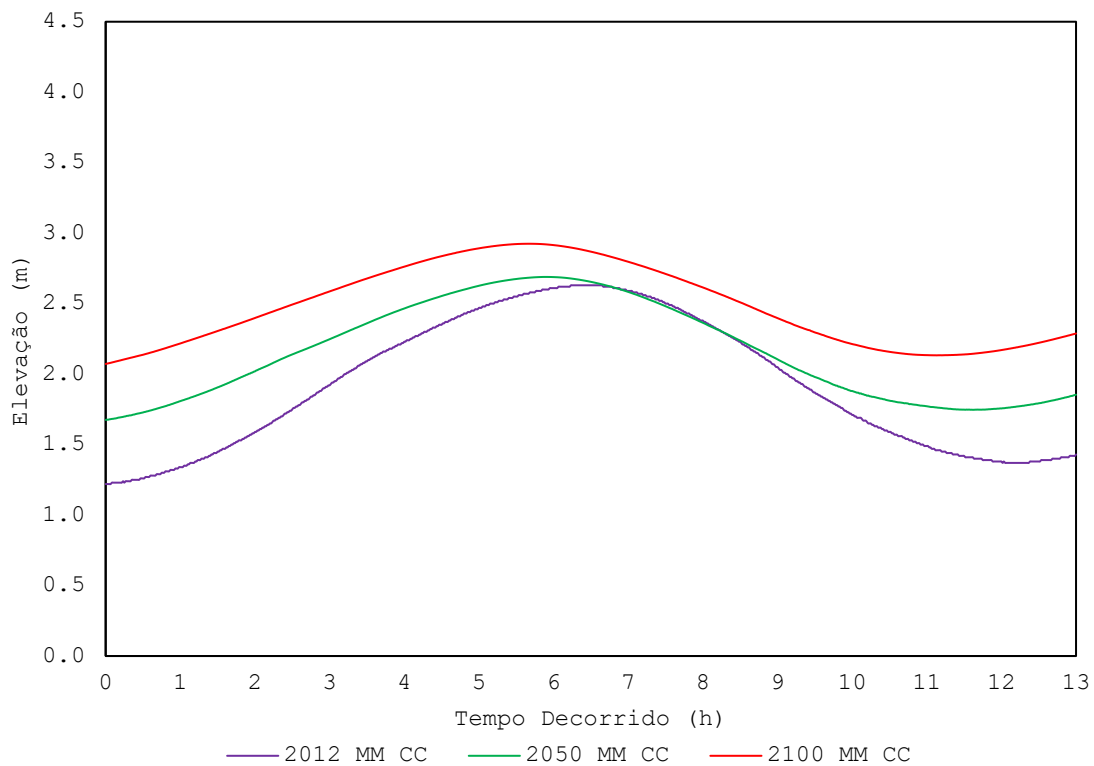


Figura 72 - Série temporal da elevação na estação Cais Comercial para o Cenário 2012 (roxo), Cenário 2050 (verde) e 2100 (vermelho) na situação de Maré Morta.

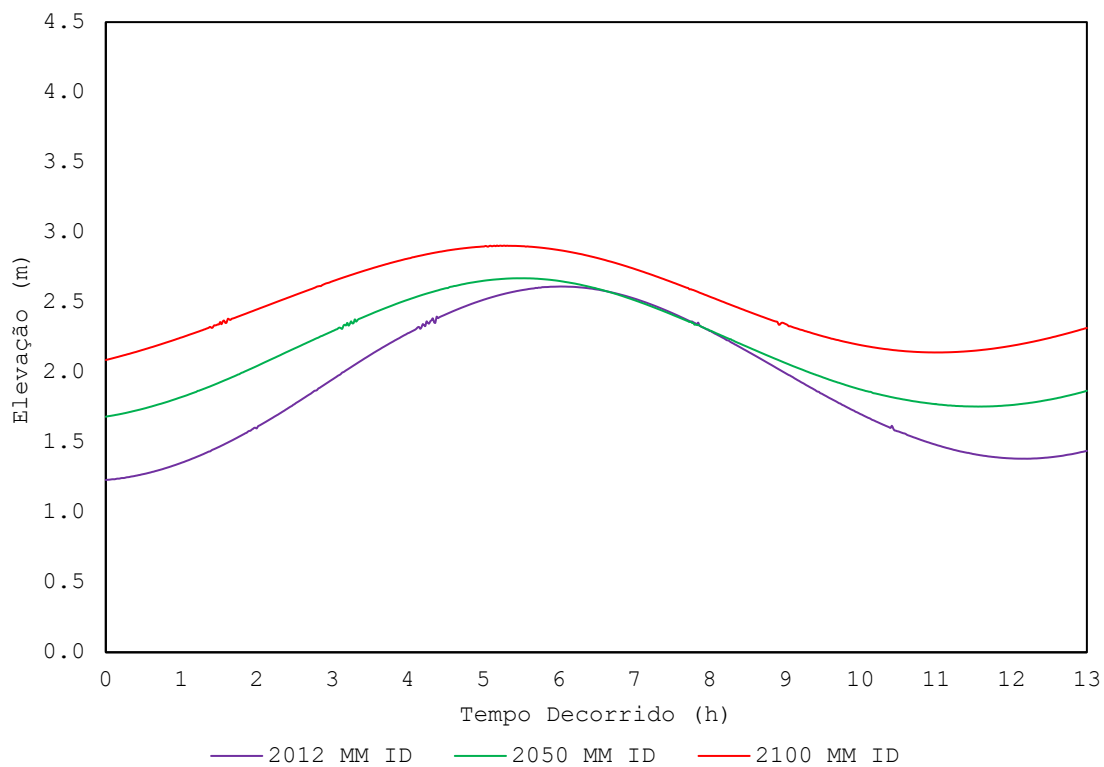


Figura 73 - Série temporal da elevação na estação Ilha Deserta para o Cenário 2012 (roxo), Cenário 2050 (verde) e 2100 (vermelho) na situação de Maré Morta.

Tabela 17 - Elevações máximas e mínimas para as estações consideradas na situação de Maré Morta.

Cenário	Cais Comercial		Ilha Deserta	
	Mínimo (m)	Máximo (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)
2012 MM	1,22	2,63	1,23	2,61
2050 MM	1,68	2,69	1,68	2,67
2100 MM	2,07	2,92	2,09	2,90

Ao analisar a evolução da elevação, conforme a Tabela 17, nota-se um aumento considerável da elevação mínima no decorrer dos cenários. Na situação de Maré Morta, entre 2012 e 2050, há um aumento de 0,46 metros no nível mínimo, na estação Cais Comercial. Ao comparar o cenário 2100 com 2012, o nível mínimo sofre um aumento de 0,85 metros na estação Cais Comercial e 0,86 metros na estação Ilha Deserta. Ou seja, com relação à 2012, para o ano de 2100, o nível mínimo do mar aumentará aproximadamente 1 metro. Tal aumento é consequência direta do ARNM na costa europeia, conforme o *downscaling* climático de Vousdoukas et al. (2017). Já o nível máximo sofre um aumento de 0,29 metros, de 2012 para 2100, em ambas as estações. Notou-se uma grande variação nos valores mínimos para elevação, enquanto que, nos valores máximos, o aumento da elevação não é tão expressivo. Tais valores são resultados da geometria do modelo da Ria Formosa. Como a área de espraiamento (área em que as praias estão descobertas) em preia-mar é muito maior do que a área em baixa-mar, onde a água se restringe aos canais, os aumentos de volume em preia-mar são conseguidos à custa de variações de elevação inferior. Do ponto de vista do impacto da subida do nível do mar, isto revela-se uma resiliência do modelo da Ria Formosa, que não será tão afetada como seria de esperar à primeira vista.

Ainda analisando as Figuras 72 e 73, nota-se um desfasamento nos ciclos de maré com o decorrer dos anos. Tal desfasamento se dá em decorrência da utilização das demais harmónicas de maré que, para o ano de 2100, provocam um deslocamento nos prismas de maré. A título de comparação, nos trabalhos realizados por Martins e Janeiro (2018), onde foi considerada somente uma harmónica do tipo M2, não ocorre nenhum tipo de desfasamento, conforme mostra a Figura 74 a seguir.

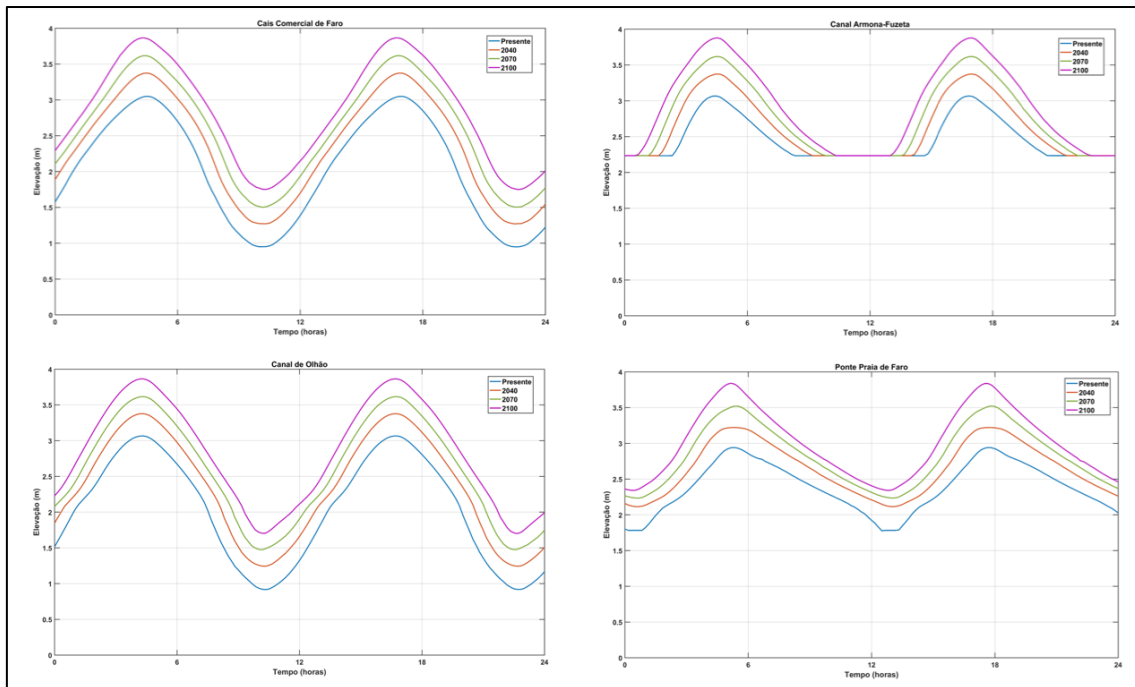


Figura 74 - Séries temporais de elevação obtidos por Martins e Janeiro (2018), considerando apenas a harmônica M2

Maiores comparações com os resultados obtidos por Martins e Janeiro (2018) serão explorados posteriormente. Pelos resultados obtidos, observou-se que a utilização das demais harmônicas de maré no modelo têm grande influência nos mesmos. Pode-se dizer que a utilização das demais harmônicas de maré constituem um elemento chave na simulação de um modelo realista para o sistema lagunar Ria Formosa.

A seguir é apresentada, nas Figuras 75, 76 e na Tabela 18, a comparação da evolução do módulo da velocidade para os anos de 2012, 2050 e 2100 para a estação Cais Comercial e Ilha Deserta, respetivamente, na situação de Maré Morta.

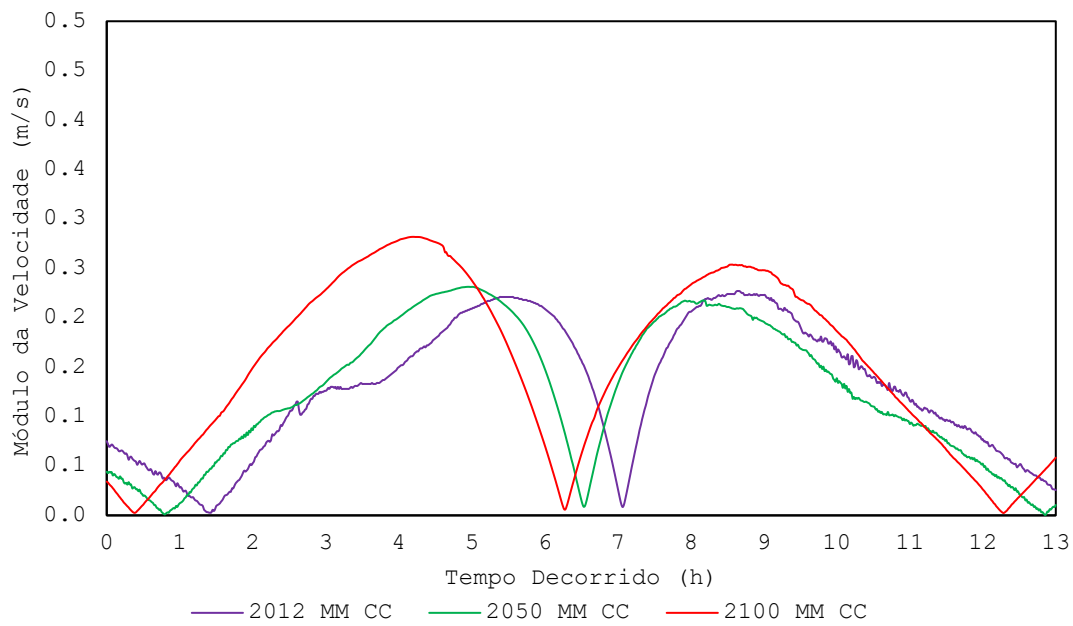


Figura 75 - Evolução do módulo da velocidade na estação Cais Comercial para o Cenário 2012 (roxo), Cenário 2050 (verde) e Cenário 2100 (vermelho) na situação de Maré Morta.

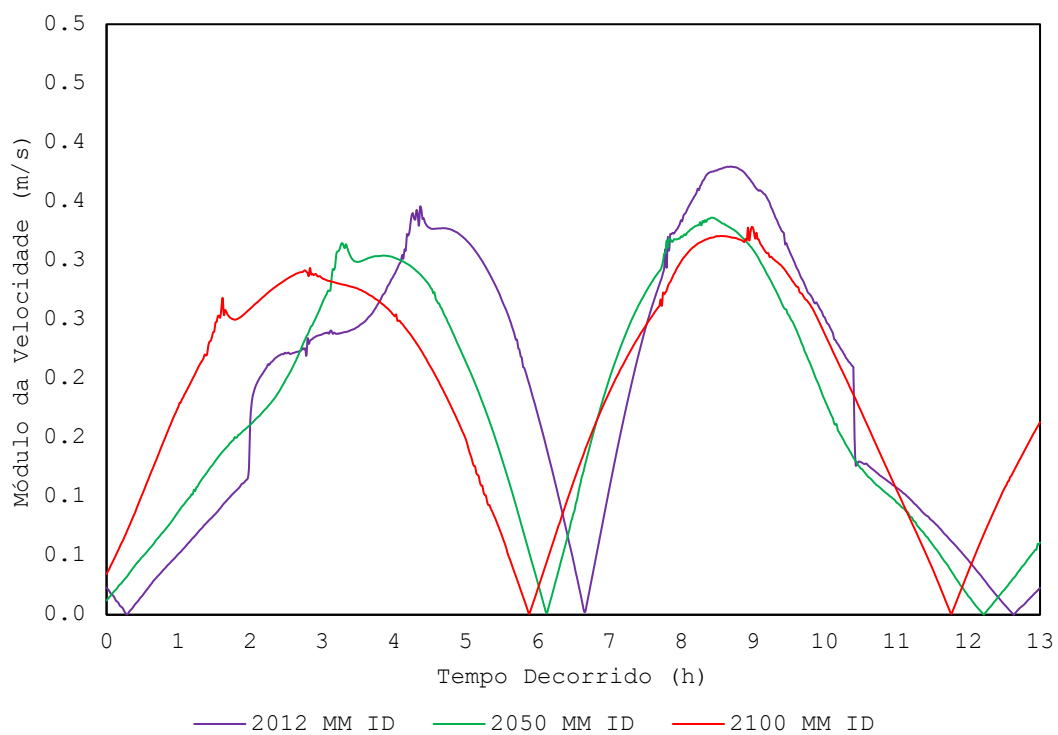


Figura 76 - Evolução do módulo da velocidade na estação Ilha Deserta para o Cenário 2012 (roxo), Cenário 2050 (verde) e Cenário 2100 (vermelho) na situação de Maré Morta.

Tabela 18 - Velocidades máximas registradas nas estações para os três anos simulados.

Cenário	Cais Comercial	Ilha Deserta
	Vel. Máxima (m/s)	Vel. Máxima (m/s)
2012 MM	0,23	0,38
2050 MM	0,23	0,34
2100 MM	0,28	0,33

Ao analisar o módulo da velocidade mostrado nas Figuras 75, 76 e na Tabela 18, percebe-se que, com o aumento do nível do mar, ocorre a diminuição do módulo da velocidade na Estação Ilha Deserta, possivelmente causado pela maior utilização das demais barras. Os resultados na estação Cais Comercial também evidenciam uma maior utilização das barras, pois a velocidade aumenta com o passar dos anos, indicando um maior aporte de água dentro dos canais da Ria Formosa. No trabalho realizado por Mills et al. (2020), também foi evidenciado um decréscimo da velocidade com o aumento do nível do mar.

A seguir é apresentada, na Tabela 19, a distribuição das áreas de inundação em função do número de horas de imersão para um ciclo de maré para os três anos simulados na situação de Maré Morta, bem como as Figuras 77, 78, 79 e 80, que relacionam graficamente as áreas submersas. Por fim, é apresentada a Figura 81 com o histograma da comparação das classes de inundação para os três anos simulados.

Tabela 19 - Áreas de inundação dos três cenários simulados em função das horas de imersão.

Classe	tempo de imersão (h)	Área (km ²)		
		2012 MM	2050 MM	2100 MM
1	0.0 – 1,2	1.45	1.28	0.68
2	1,2 – 2,4	2.85	1.82	1.57
3	2,4 – 3,7	6.45	5.37	4.10
4	3,7 – 4,9	4.27	3.59	2.13
5	4,9 – 6,1	13.49	3.27	3.08
6	6,1 – 7,3	6.81	17.95	4.86
7	7,3 – 8,6	1.38	1.47	1.44
8	8,6 – 9,8	1.28	2.42	2.64
9	9,8 - 11	0.64	0.42	1.40
10	11 – 12,2	0.90	0.94	11.89
Total		39.51	38.53	33.78

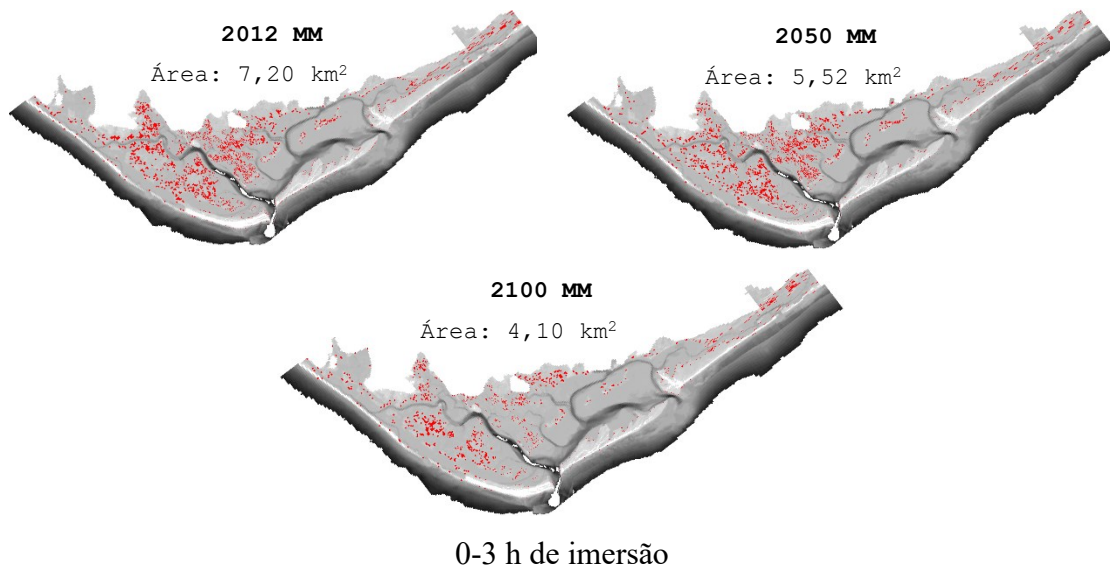


Figura 77 - Mapas de distribuição das áreas de inundação com 0 a 3 horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Morta.

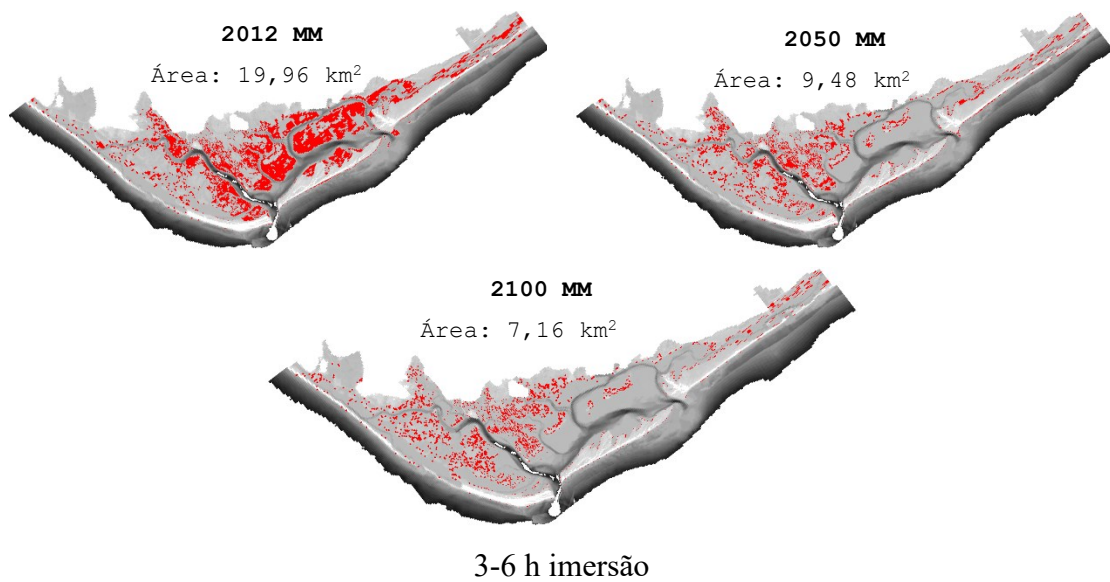


Figura 78 - Mapas de distribuição das áreas de inundação com 3 a 6 horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Morta.

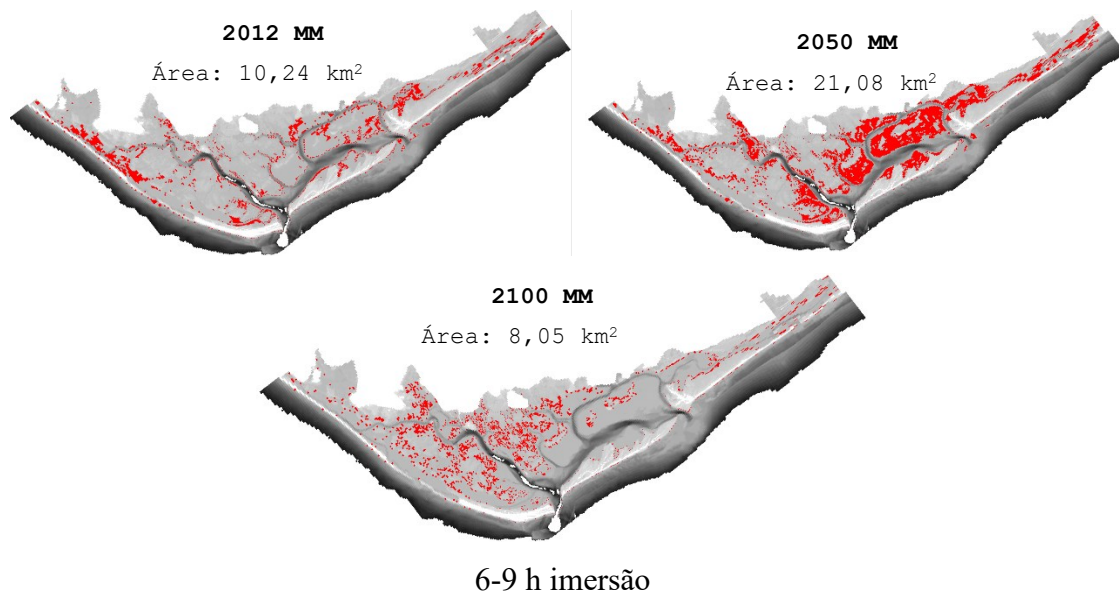


Figura 79 - Mapas de distribuição das áreas de inundação com 6 a 9 horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Morta

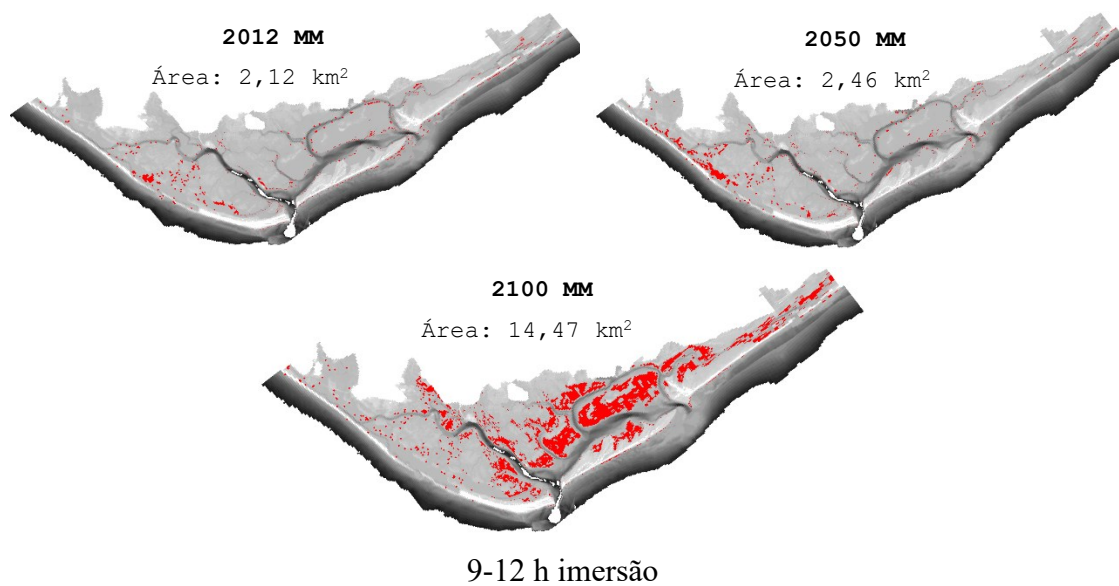


Figura 80 - Mapas de distribuição das áreas de inundação com 9 a 12 horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Morta.

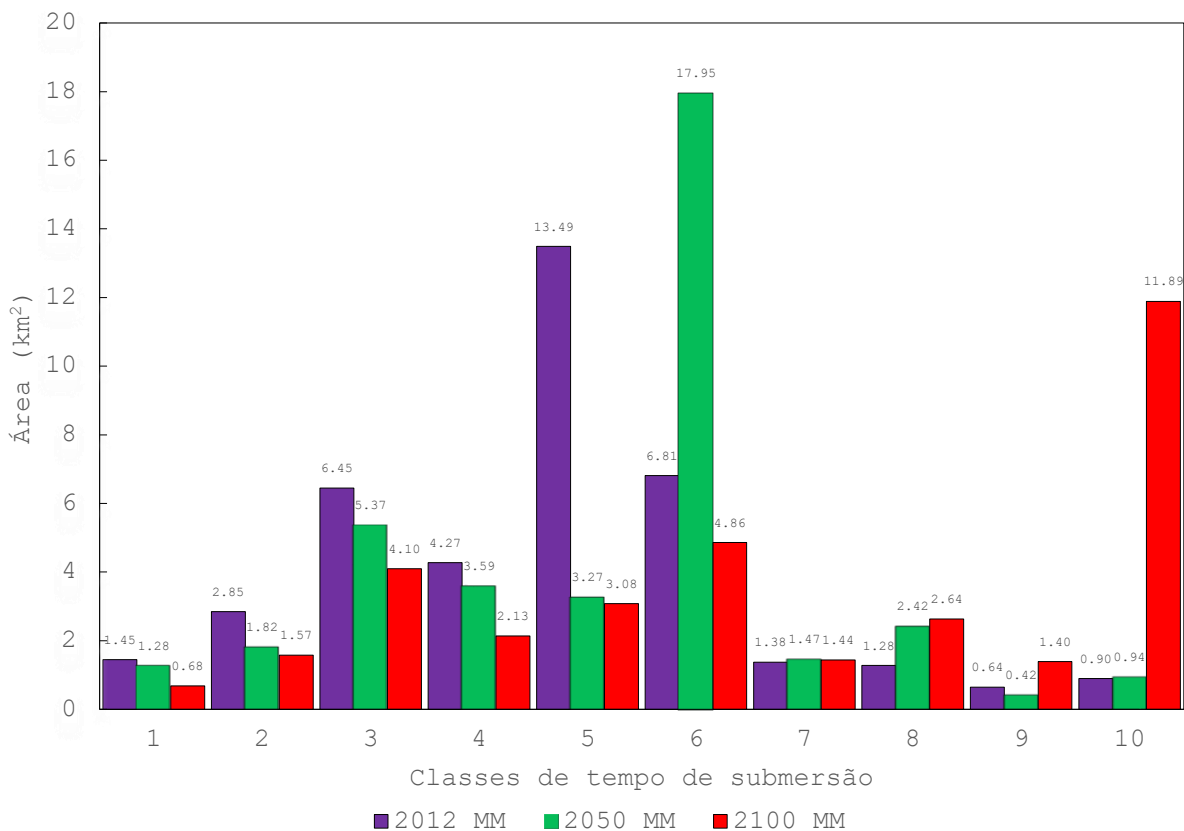


Figura 81 - Histogramas de distribuição das áreas de inundação em função número de horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Morta.

A Tabela 19, na situação de Maré Morta, indica que há uma diminuição das áreas submersas com o passar dos anos em decorrência do aumento do nível do mar. Com relação à 2012, em 2100 ocorre uma diminuição de 5,73 metros quadrados no total de área submersa. Como esperado, o ARNM causa impactos diretos nas áreas inundadas, nomeadamente em relação às horas de imersão que aumentam consoante o ano. Ocorre também um aumento progressivo nas horas de inundações, que se traduz na mudança da classe de inundação para cada ano. Em 2012, as horas de inundação traduziam-se na Classe 5, já, em 2050, a classe proeminente passa a ser a Classe 6 e, por fim, para o ano de 2100, a classe predominante é a Classe 10, indicando que 11,89 m² da área total da Ria Formosa estará submersa durante um período de 11 a 12,2 horas. Isso traduz-se num aumento de 5 horas de imersão para o Cenário 2100 em relação ao Cenário de 2012 em Maré Morta.

4.5.2 Maré Viva

A seguir, nas Figuras 82 e 83, é apresentada a evolução das séries temporais da elevação do nível do mar na estação Cais Comercial e Ilha Deserta, respectivamente, comparando os três anos, considerando um ciclo de maré (13 horas). Em seguida, é apresentado a Tabela 20 que registra a elevação mínima e máxima em ambas as estações para todos os anos na situação de Maré Viva.

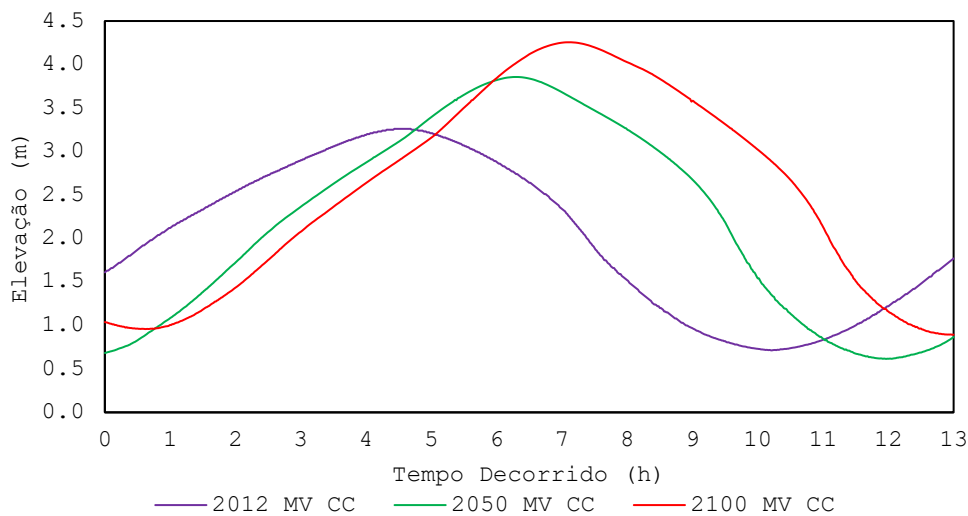


Figura 82 - Série temporal da elevação na estação Cais Comercial para o Cenário 2012 (roxo), Cenário 2050 (verde) e Cenário 2100 (vermelho) na situação de Maré Viva.

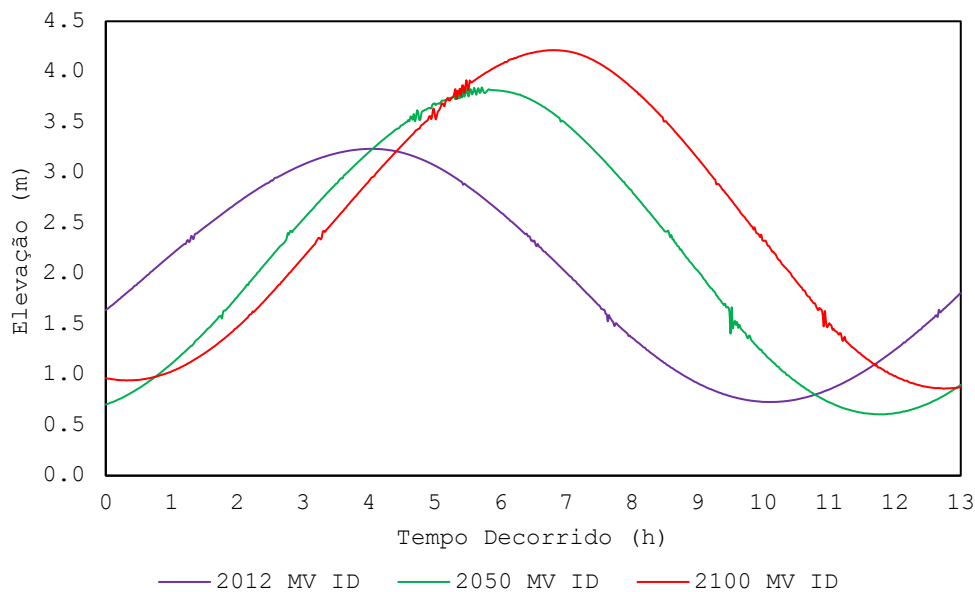


Figura 83 - Série temporal da elevação na estação Ilha Deserta para o Cenário 2012 (roxo), Cenário 2050 (verde) e Cenário 2100 (vermelho) na situação de Maré Viva.

Tabela 20 Elevações e mínimas para as estações consideradas na situação de Maré Viva.

Cenário	Cais Comercial		Ilha Deserta	
	Mínimo (m)	Máximo (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)
2012 MV	0,71	3,26	0,73	3,24
2050 MV	0,62	3,86	0,61	3,85
2100 MV	0,89	4,26	0,86	4,21

Através da análise dos resultados obtidos, percebe-se que, para a situação de Maré Viva, a elevação do nível médio do mar sofre um aumento considerável com o passar dos anos. Entre 2012 e 2100, na estação Cais Comercial, a elevação mínima aumenta 0,18 metros, enquanto que, para a estação Ilha Deserta, o aumento é de 0,13 metros. Os resultados mais expressivos se encontram nas elevações máximas, onde, na estação Cais Comercial, o aumento é de 1 metro entre 2012 e 2100. Na estação Ilha Deserta, o aumento é de 0,97 metros. Na situação de Maré Viva, é possível evidenciar as consequências mais expressivas para o ARNM, indicando que os resultados do *downscaling* climático indicam um aumento do nível médio do mar de aproximadamente 1 metro para o ano de 2100 na situação onde ocorre o fenômeno de Maré Viva.

A seguir, nas Figuras 84 e 85 e na Tabela 21, é apresentada a comparação da evolução do módulo da velocidade para os anos de 2012, 2050 e 2100 para a estação Cais Comercial e Ilha Deserta, respetivamente, na situação de Maré Viva,

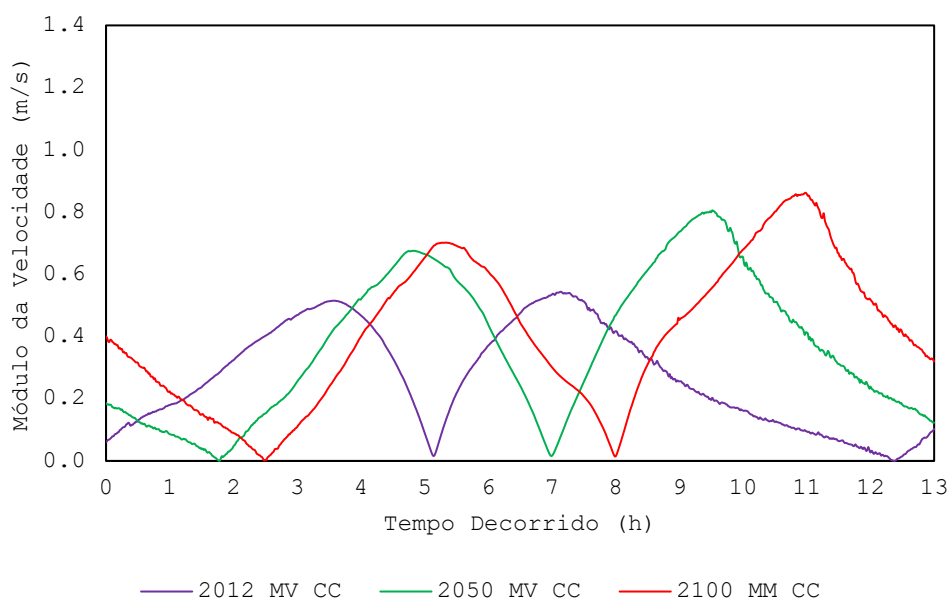


Figura 84 - Evolução do módulo da velocidade na estação Cais Comercial para o Cenário 2012 (roxo), Cenário 2050 (verde) e Cenário 2100 (vermelho) na situação de Maré Viva.

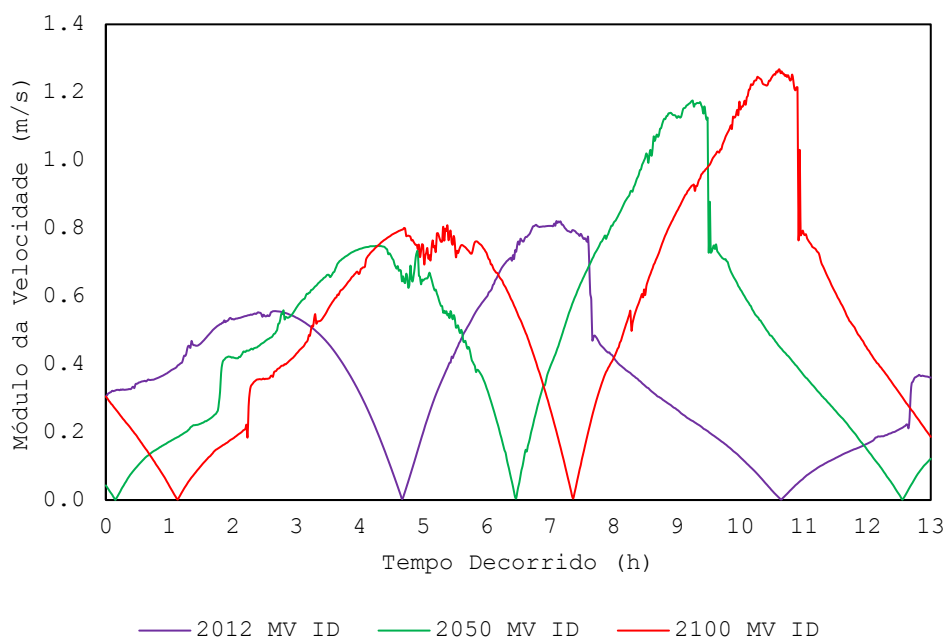


Figura 85 - Evolução do módulo da velocidade na estação Ilha Deserta para o Cenário 2012 (roxo), Cenário 2050 (verde) e Cenário 2100 (vermelho) na situação de Maré Viva.

Tabela 21 - Velocidades máximas registradas nas estações para os três anos simulados.

Cenário	Cais Comercial	Ilha Deserta
	Vel. Máxima (m/s)	Vel. Máxima (m/s)
2012 MV	0,54	0,82
2050 MV	0,81	1,18
2100 MV	0,86	1,27

Conforme as Figuras 84 e 85 e a Tabela 21, nota-se um aumento da velocidade conforme o ARNM. Ao contrário do que foi obtido durante a Maré Morta, no fenômeno de Maré Viva, as velocidades aumentam com o decorrer dos anos, possivelmente devido ao maior volume de água que entra nos canais da Ria Formosa conforme o aumento do nível médio do mar. Entre 2012 e 2100, ocorre um aumento de 0,32 metros por segundo na velocidade do escoamento na estação Cais Comercial e 0,45 metros por segundo na estação Ilha Deserta. Sabe-se que o aumento da velocidade nos canais faz com que hajam mudanças morfológicas no fundo, e também nas barras. Apesar de haver um modelo morfodinâmico capaz de prever os resultados com realismo e precisão, é seguro afirmar que esse aumento na velocidade indica que a Ria Formosa sofrerá mudanças, no decorrer dos anos, conforme o ARNM.

A seguir é apresentada, na Tabela 22, a distribuição das áreas de inundação em função do número de horas de imersão para um ciclo de maré para os três anos simulados,

na situação de Maré Viva, bem como as Figuras 86, 87, 88 e 89, que relacionam graficamente as áreas submersas. Por fim, é apresentada a Figura 90 com o histograma da comparação das classes de inundação para os três anos simulados.

Tabela 22 - Áreas de inundação dos três cenários simulados em função das horas de imersão.

Classe	tempo de imersão (h)	Área (km ²)		
		2012 MV	2050 MV	2100 MV
1	0,0 – 1,2	1.63	0.80	1.51
2	1,2 – 2,4	3.96	1.81	1.79
3	2,4 – 3,7	8.48	8.15	4.63
4	3,7 – 4,9	4.12	4.87	4.84
5	4,9 – 6,1	8.33	7.83	6.69
6	6,1 – 7,3	18.01	20.18	16.20
7	7,3 – 8,6	4.20	6.04	8.28
8	8,6 – 9,8	5.48	5.68	8.84
9	9,8 - 11	2.38	2.03	3.70
10	11 – 12,2	1.10	1.40	2.96
Total		57.70	58.78	59.44

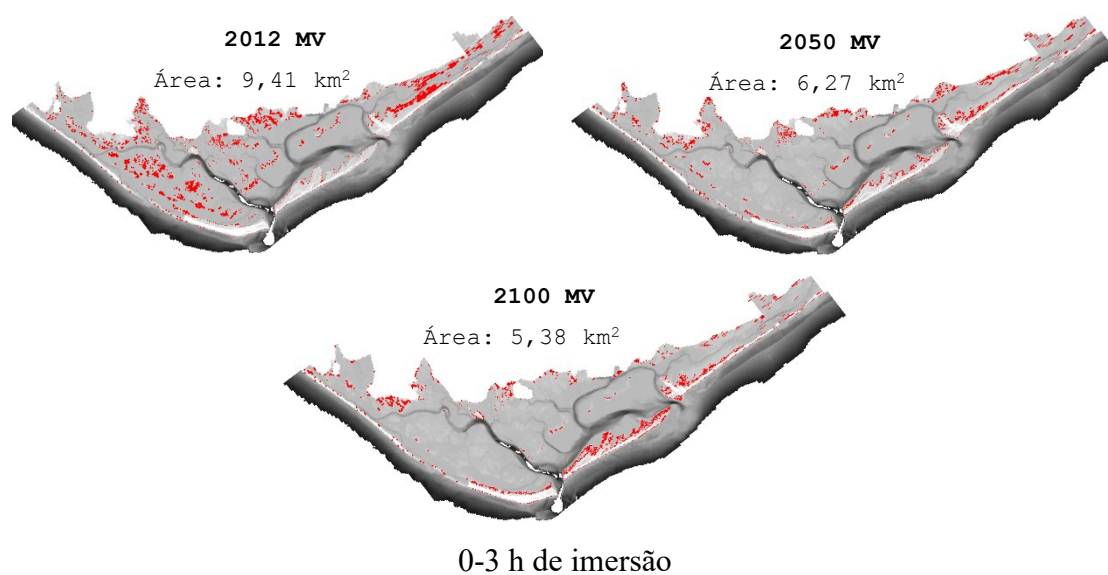


Figura 86 - Mapas de distribuição das áreas de inundação com 0 a 3 horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Viva.

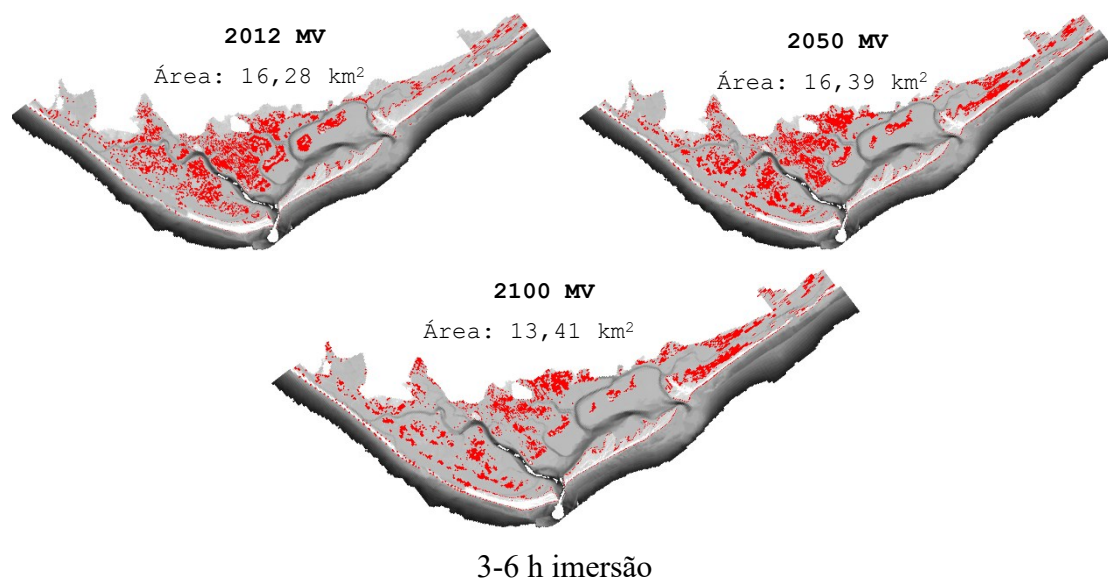


Figura 87 - Mapas de distribuição das áreas de inundação com 3 a 6 horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Viva.

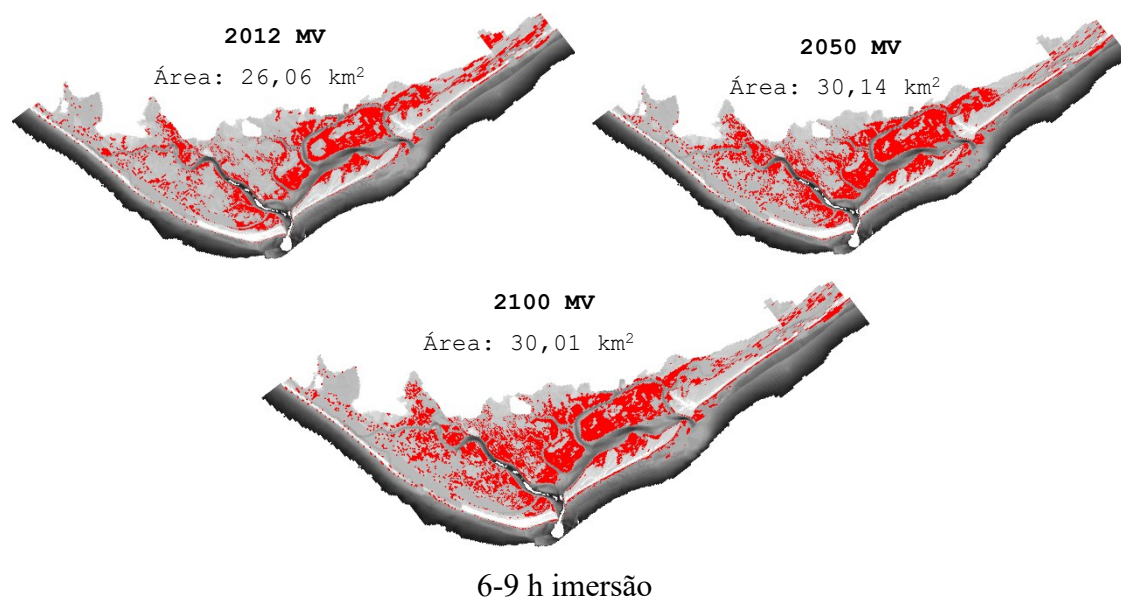
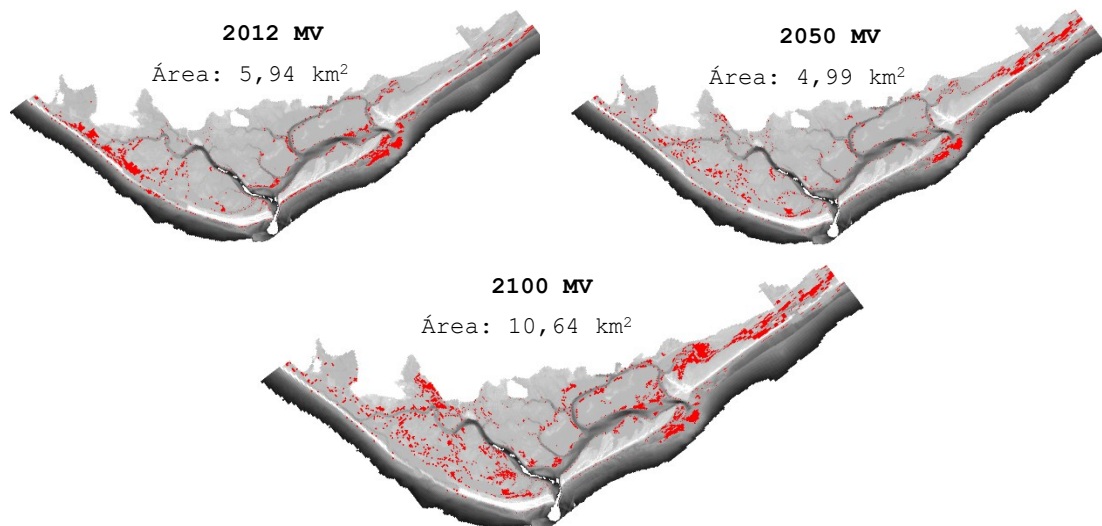


Figura 88 - Mapas de distribuição das áreas de inundação com 6 a 9 horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Viva.



9-12 h imersão

Figura 89 - Mapas de distribuição das áreas de inundação com 9 a 12 horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Viva.

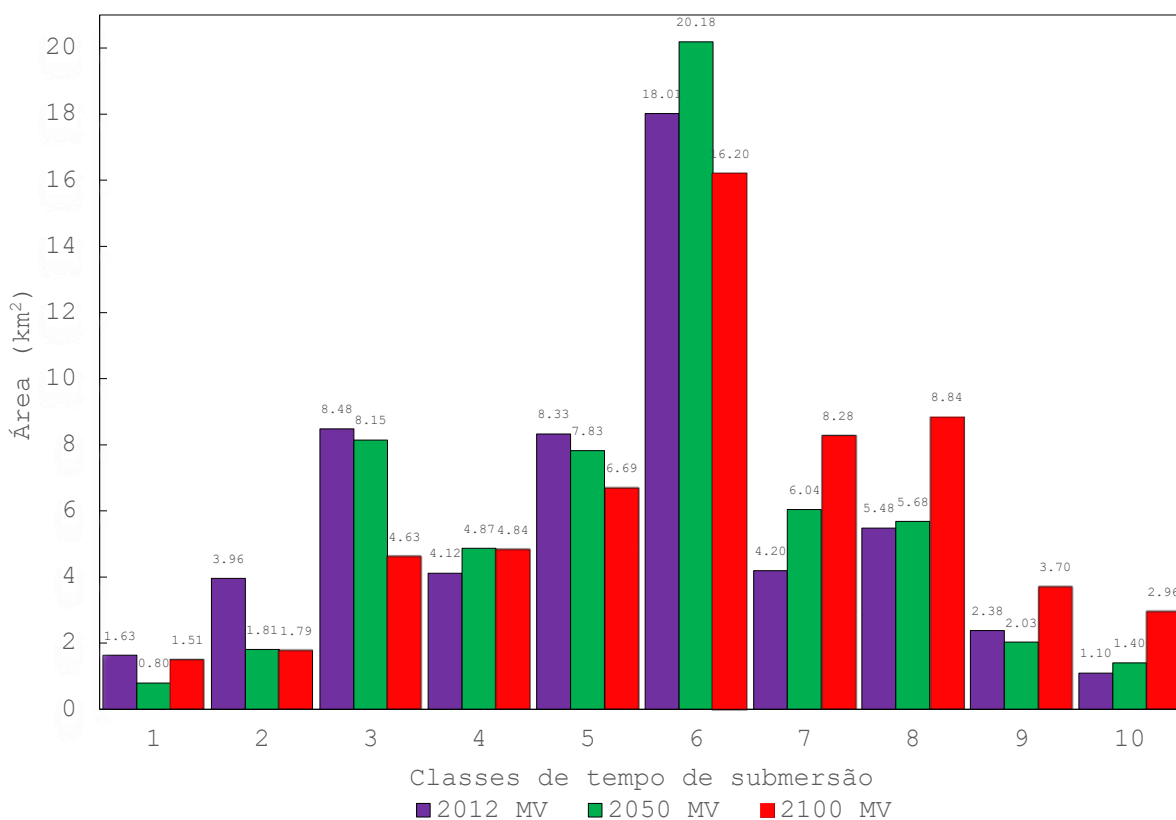


Figura 90 - Histogramas de distribuição das áreas de inundação em função número de horas de imersão ao longo de um ciclo de maré para o ano de 2012, 2050 e 2100 em Maré Viva.

Os resultados para as áreas de inundação indicam um aumento gradual das áreas imersas ao longo dos anos, em decorrência do aumento do nível médio do mar. Na situação de Maré Viva, ocorre um aumento de 1,74 metros quadrados de área imersa entre

2012 e 2100. Esse aumento progressivo das horas de inundação se traduz na mudança de classes de inundação para cada ano. Conforme a Figura 90, em 2012 e 2050, as áreas com maiores horas de imersão são expressas na Classe 6. Em 2100, a classe predominante também permanece sendo a Classe 6, porém ocorre uma grande expressão das Classes 7 e 8 em conjunto. Nas áreas correspondentes às Classes 7, 8, 9 e 10 ocorre um aumento das áreas imersas no decorrer dos anos, indicando que, mesmo que a maiores áreas sejam expressas na Classe 6, entre 2012 e 2100 haverá um aumento de 1,86 quilômetros quadrados de área imersa por um período de 11 a 12,2 horas durante o ciclo de maré.

Ao contrário dos resultados encontrados na Maré Morta, a Classe 10 não é predominante neste cenário. Tal resultado é devido ao fenômeno da Maré Viva, onde se observa que, por mais que um volume maior de água entre no sistema durante a preia-mar, esse mesmo volume é retirado durante a baixa-mar.

Os resultados evidenciam que o ARNM causará impactos significativos na Ria Formosa nos próximos 79 anos. Com relação à velocidade, apesar de a simulação não considerar as mudanças morfológicas da Ria Formosa, é correto afirmar que a diminuição da velocidade nos cenários de Maré Morta e o aumento nos cenários de Maré Viva afetam diretamente a erosão e a maneira como o fundo é moldado. Entretanto, com o modelo atual, não é possível determinar de maneira precisa a ocorrência de tais fenômenos.

O aumento das horas de imersão tem impacto direto na ecologia marinha. Apenas com as áreas de imersão não é possível medir diretamente os impactos que o aumento das horas de inundação causará na ecologia, porém, é possível deduzir que o aumento do nível do mar causará danos à produção de bivalves e mariscos. Sugere-se a realização de estudos aprofundados em nível biológico e ecológico das áreas afetadas para que possam ser apresentados dados concretos com relação à diminuição da produção de bivalves nos viveiros, seja pelas alterações da velocidade, que afetará os nutrientes recebidos e o preenchimento sedimentar de várias partes do sistema lagunar, quanto pelos tempos de inundação das áreas, que impactarão nas temperaturas dos viveiros. Por fim, a última componente deste trabalho tem como objetivo comparar o cenário de 2100, considerando o *downscaling* climático de Vousdoukas et al. (2017), com o cenário de 2100 realizado por Martins e Janeiro (2018), considerando os dados globais do IPCC 2014.

4.6 Comparação entre Metodologias para o Cenário de 2100

As metodologias comparadas em questão são a metodologia do presente trabalho (Metodologia *Downscaling*), apresentada no Capítulo 3, e a metodologia de Martins e Janeiro (2018) (Metodologia PIAAC). O descritor em análise foi apenas as áreas de inundação. Foram comparados os resultados para o cenário de 2100, sendo que a condição de forçamento da maré foi de 0,72 metros para o aumento no nível do mar no método PIAAC e 0,53 metros na metodologia *Downscaling*, que utiliza os dados de Vousdoukas et al. (2017). Os dados de Martins e Janeiro (2018) consideram um cenário global para o aumento do nível do mar, enquanto Vousdoukas et al. (2017) realizou o *downscaling* climático e obteve resultados regionais para o aumento do nível do mar na costa de Europa. O período simulado foi das 7 horas do dia 15/03/2100 até às 7 horas do dia 16/03/2100, totalizando 24 horas simuladas.

Os resultados são apresentados sob a forma de classes de imersão, conforme a Tabela 26 e, também, sob a forma de histograma na Figura 91.

Tabela 23 – Comparação entre metodologias da distribuição das áreas em função das classes de horas de imersão.

Classe	tempo de imersão (h)	Área (km ²)	
		PIAAC 2100	<i>Downscaling</i> 2100
1	0,0 – 1,2	0,49	0,96
2	1,2 – 2,4	1,35	0,32
3	2,4 – 3,7	3,44	3,36
4	3,7 – 4,9	3,85	1,34
5	4,9 – 6,1	5,40	3,53
6	6,1 – 7,3	7,72	8,80
7	7,3 – 8,6	3,95	6,63
8	8,6 – 9,8	8,24	18,20
9	9,8 – 11	9,48	4,94
10	11 – 12,2	4,54	2,12
Total		48,48	50,19

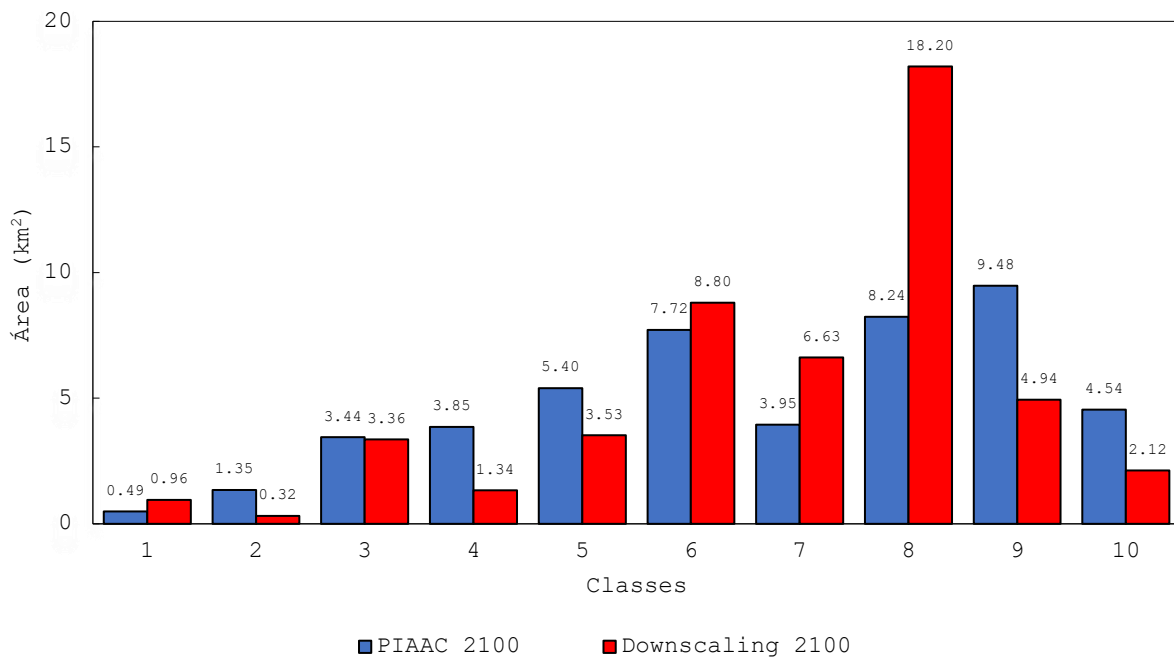


Figura 91 - Histograma comparando a distribuição das áreas submersas por classes.

Os mapas para a distribuição espacial são apresentados nas Figuras 92, 93, 94 e 95 para os intervalos de imersão respectivos.

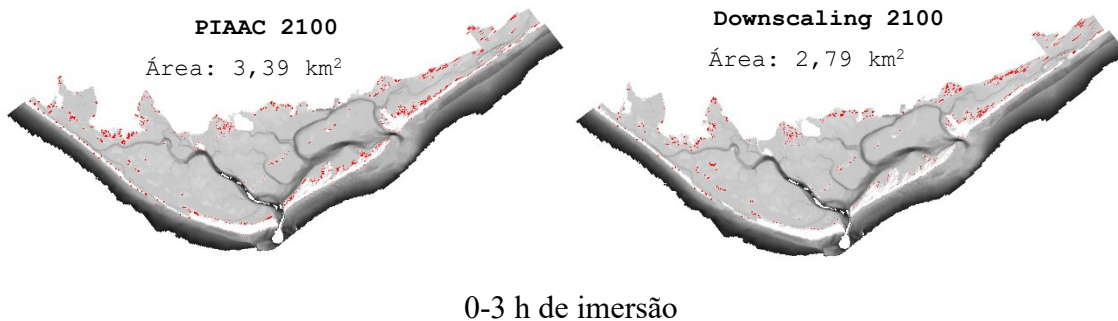
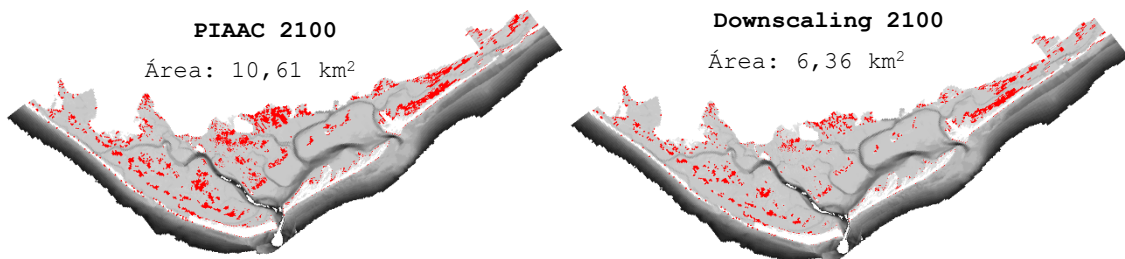
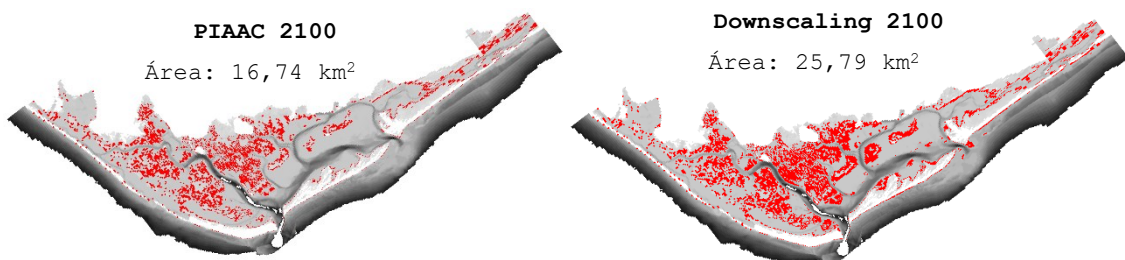


Figura 92 - Comparação dos mapas de distribuição das áreas de inundação para um período de 0 a 3 horas de imersão.



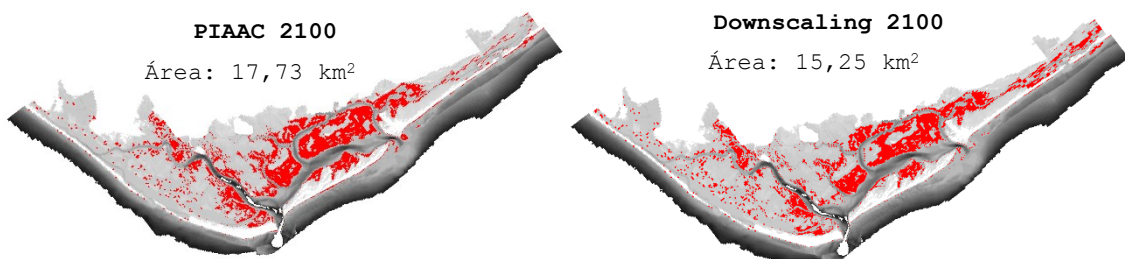
3-6 h de imersão

Figura 93 - Comparação dos mapas de distribuição das áreas de inundação para um período de 3 a 6 horas de imersão.



6-9 h de imersão

Figura 94 - Comparação dos mapas de distribuição das áreas de inundação para um período de 6 a 9 horas de imersão.



9-12 h de imersão

Figura 95 - Comparação dos mapas de distribuição das áreas de inundação para um período de 9 a 12 horas de imersão.

Analisando o gráfico da Figura 91, nota-se que, para a metodologia PIAAC, a classe predominante é a Classe 9, com 9,48 km² de área submersa por um período de 9,8 a 11 horas. Porém a Classe 8 também apresenta certa expressão nos valores, com 8,24 km² de área submersa entre 8,6 a 9,8 horas. Já na metodologia *Downscaling*, a Classe 8 é predominantemente maior do que as demais, sendo que 18,20 km² permanecem submersos por um período de 8,6 a 9,8 horas.

Para o período de 0 a 3 horas, a metodologia PIAAC apresenta uma área submersa 0,6 km² maior do que a metodologia *Downscaling*. De 3 a 6 horas, a área submersa, na metodologia PIAAC, é 4,25 km² maior do que a metodologia *Downscaling*. Já para 6 a 9 horas de imersão, a metodologia *Downscaling* apresenta 9,05 km² de área submersa a mais do que a metodologia PIAAC. Por fim, entre 9 e 12 horas de imersão, a metodologia PIAAC possui 2,48 km² a mais de área submersa. No total de áreas submersas, a metodologia *Downscaling* apresenta 1,71 km² a mais de área do que a metodologia PIAAC. Ao analisar o total de área submersas entre as metodologias, nota-se que não há uma diferença expressiva de valores, porém, a diferença maior se dá nas classes de imersão através das horas. A Metodologia PIAAC apresenta uma distribuição de classes consideravelmente mais homogênea em comparação com a Metodologia *Downscaling*.

Ao comparar as duas metodologias, é possível entender como as harmônicas de maré influenciam o comportamento hidrodinâmico do sistema lagunar Ria Formosa. Em um primeiro momento, pensou-se que, por a metodologia PIAAC usar um forçamento de maré 35% maior do que a metodologia *Downscaling* (0,53 m de ARNM para a Metodologia *Downscaling* e 0,72 m de ARNM para a Metodologia PIAAC), os resultados apresentariam maiores áreas de inundação a favor da metodologia PIAAC. O que se observou foi que a metodologia PIAAC apresenta resultados para a elevação maiores do que a Metodologia *Downscaling*, entretanto tal elevação não reflete em mais áreas inundadas.

Portanto, a comparação entre as metodologias provou que a utilização de dados regionais para o ARNM e a utilização das demais harmônicas de maré produzem resultados que indicam condições mais prejudiciais para a Ria Formosa em comparação com um cenário onde não são considerados tais fatores, mesmo que o cenário sem os fatores tenha um forçamento de maré maior. Os dados regionais obtidos por *downscaling* climáticos e a utilização das demais harmônicas de maré contribuem para um modelo hidrodinâmico mais realista em comparação com um modelo onde se utiliza dados globais.

No próximo capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com relação ao trabalho, aos objetivos e também são apresentadas sugestões de estudos posteriores.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo geral estudar os efeitos da subida do nível do mar na Ria Formosa, considerando os dados em *downscaling* climático para o aumento relativo do nível do mar (ARNM) proposto por Vousdoukas et al. (2017) e tendo como base o trabalho exploratório desenvolvido por Martins e Janeiro (2018).

Os objetivos específicos incluíram a calibração e validação do modelo utilizando a batimetria desenvolvida por Martins e Janeiro (2018); a simulação dos efeitos do ARNM para os cenários estabelecidos; a comparação dos resultados obtidos para os cenários considerando o *downscaling* climático; a estimativa da variação nos tempos de imersão das áreas inte-marés e, por fim; a comparação da metodologia utilizada neste trabalho com a metodologia proposta por Martins e Janeiro (2018).

Com relação ao objetivo geral de estudar os efeitos da subida do nível do mar na Ria Formosa, considerando os dados em *downscaling* climático para o aumento relativo do nível do mar (ARNM) proposto por Vousdoukas et al. (2017) e tendo como base o trabalho exploratório desenvolvido por Martins e Janeiro (2018), o mesmo foi atingido através da utilização do sistema de modelação numérica MOHID considerando sete cenários possíveis.

Com relação ao objetivo específico de calibração e validação do modelo utilizando a batimetria desenvolvida por Martins e Janeiro (2018), o mesmo foi atingido com sucesso. A calibração se deu através de um processo iterativo dos parâmetros de calibração considerados, que foram a rugosidade do fundo e a viscosidade horizontal. A validação do modelo se deu através dos dados reais fornecidos pelo projeto COALA, em que foi realizada uma simulação para a mesma data das medições. O modelo foi capaz de simular as mesmas condições apresentadas em 2012 com um erro de 0,01, classificando o modelo como excelente, segundo o critério de erros RMAE. Sendo assim, considerou-se o modelo validado quantitativamente e qualitativamente.

Com relação aos objetivos específicos de simular os efeitos do ARNM para os cenários estabelecidos e comparar os resultados obtidos entre os diferentes cenários considerados, os resultados mostraram um aumento considerável da elevação mínima no decorrer dos cenários. Para os níveis máximos de elevação, o maior aumento encontra-se entre os anos de 2012 e 2100, considerando os efeitos da Maré Viva, onde o nível médio do mar sofre um aumento de aproximadamente um metro. Foi possível observar um

desfasamento das alturas de maré, obtido ao longo dos cenários simulados, causado pela utilização das harmónicas de maré. Com relação ao módulo da velocidade, ocorre uma variação ao longo dos anos. Nos cenários considerando a Maré Morta, a velocidade diminui com o passar dos anos, enquanto que, na Maré Viva, a velocidade aumenta. Considera-se, portanto, os objetivos atingidos.

O objetivo específico de estimar a variação nos tempos de imersão das áreas intermarés foi realizado para cada cenário, durante um ciclo de maré, através das áreas de inundação em função das horas de imersão sob a forma de classes de inundação, com um intervalo de 1,2 horas. Além disso, os resultados foram exibidos sob a forma de mapas de distribuição das áreas inundadas. Conclui-se que a cada cenário ocorre um aumento das áreas submersas causado pelo ARNM, ocorrendo também um aumento do período em que essa área permanecerá submersa, confirmando o que foi escrito por Martins e Janeiro (2018, p.?) em que “as percentagens de tempo de imersão para cada região sofrerão alterações com o aumento do nível do mar”. Quanto ao nível ecológico, tal aumento acarretará em mudanças nos tempos de exposição dos viveiros de bivalves, entretanto, apenas uma análise das áreas inundadas não é o suficiente para mensurar os impactos causados por esse aumento. Não é possível afirmar quais áreas sofrerão maiores impactos e nem a intensidade dos mesmos, sendo este trabalho uma primeira abordagem na identificação da problemática e chamando a atenção para estudos futuros.

Por fim, com relação ao objetivo específico de comparar a metodologia utilizada nesta dissertação com a metodologia proposta por Martins e Janeiro (2018), foi realizada a comparação das áreas de imersão para 24 horas na mesma data, para ambas metodologias, no ano de 2100. A principal diferença entre as metodologias se dá na escolha dos dados para o forçamento de maré e na utilização das harmónicas de maré. Além disso, a Metodologia PIAAC não considerou as demais harmónicas de maré elencadas na Tabela 6. A Metodologia *Downscaling* apresentou uma maior área total submersa com relação à Metodologia PIAAC. Inicialmente pensou-se que um maior forçamento de maré causaria, consequentemente, maiores áreas de inundação, porém o que se percebeu é que, mesmo o forçamento sendo menor, na Metodologia *Downscaling*, as áreas inundadas são maiores do que na Metodologia PIAAC. O que se conclui é que um maior forçamento ou ARNM não necessariamente resultará em maiores áreas submersas, sendo necessário levar em conta outros fatores, como as harmónicas de maré, para obter resultados condizentes. A comparação entre as metodologias mostrou que a utilização de dados regionais para o

ARNM e a utilização das demais harmônicas de maré produzem resultados que indicam condições mais prejudiciais para a Ria Formosa do que um cenário onde não são considerados tais fatores, mesmo que o cenário sem os fatores tenha um forçamento de maré maior.

Ao final deste trabalho, foi possível obter dados e informações que colaboram na percepção das consequências do aumento do nível do mar, nomeadamente a quantidade de área submersa e os tempos de inundação, em comparação com a situação atual. Uma limitação deste estudo é a não utilização de um modelo morfodinâmico capaz de simular as alterações à nível da forma e do fundo da Ria Formosa. Um estudo considerando um modelo morfodinâmico seria capaz de apresentar uma análise mais completa da hidrodinâmica. Além disso, este estudo não se aprofundou nas consequências ecológicas e biológicas causadas pelo aumento do nível do mar e das áreas submersas. Sugere-se, com base nos resultados deste trabalho, a realização de estudos voltados para esta área de forma a apresentar análises mais completas e precisas quanto aos impactos causados pelas mudanças, nomeadamente às condições dos viveiros de bivalves e os impactos económicos em uma possível diminuição dos produtos deste mercado, causados pelo ARNM e o aumento das áreas inundadas. Por fim, sugere-se também a realização de estudos complementares ao já existentes, que considerem uma batimetria em que seja possível estudar e quantificar os efeitos do ARNM em relação à inundação de zonas habitáveis, a fim de avaliar as consequências que o aumento do nível do mar pode causar sobre a zona urbana do sistema lagunar Ria Formosa.

Portanto, esse estudo serve de alerta e olhar sobre os desafios futuros para a gestão deste complexo sistema lagunar. Os resultados obtidos contribuem, portanto, para ampliar o conhecimento dos efeitos da subida do nível do mar na Ria Formosa

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMAL. (2019). *Plano Intermunicipal de Adaptação às Alterações Climáticas do Algarve*. Obtido de <https://amal.pt/comunicacao/publicacoes/234-plano-intermunicipal-de-adaptacao-as-alteracoes-climaticas-piaac-amal>
- AVISO+. (sem data). Global tide - FES2012. Obtido 29 de Junho de 2021, de <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes/description-fes2012.html>
- Carrasco, A. R., Plomaritis, T., Reyns, J., Ferreira, Ó., & Roelvink, D. (2018). Tide circulation patterns in a coastal lagoon under sea-level rise. *Ocean Dynamics*, 68(9), 1121–1139. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1178-0>
- Ceia, F. R. (2009). Vulnerabilidade das Ilhas-Barreira e Dinâmica da Ria Formosa na Óptica da Gestão. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 9(1), 57–77. <https://doi.org/10.5894/rgci159>
- Chandler, D. L. (2010). Explained: Radiative forcing. Obtido 24 de Julho de 2021, de MIT News Office website: <https://news.mit.edu/2010/explained-radforce-0309>
- Chang, Y. S., Jin, J. Y., Choi, J. Y., Jeong, W. M., Hyun, S. K., Chung, C. S., & Do, J. D. (2020). Three dimensional numerical modeling using a multi-level nesting system for identifying a Water layer suitable for scallop farming in Tongyeong, Korea. *Aquacultural Engineering*, 89(January), 102058. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102058>
- Church, J. A., & White, N. J. (2006). A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, 33(1), 94–97. <https://doi.org/10.1029/2005GL024826>
- DGRM. (2019). *Estatísticas da Pesca 2018*. Obtido de https://ine.pt/ngt_server/attachfileu.jsp?look_parentBoui=376239520&att_display=n&att_download=y
- Dias, J. A., Ferreira, Ó., & Moura, E. D. (2004). O Sistema de Ilhas - Barreira da Ria Formosa. *3º Simpósio Interdisciplinar Sobre Processos Estuarinos, 2004*. Obtido de http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/papers/xOP/04_Humedales.pdf
- Duarte, A. a. L. S., & Vieira, J. M. P. (1997). Caracterização de ambientes estuarinos: mistura em estuários. *Engenharia Civil UM*, Vol. 6, pp. 41–55.
- Ferreira, Ó., Dias, J. A., & Taborda, R. (2008). Implications of Sea-Level Rise for

- Continental Portugal. *Journal of Coastal Research*, 24(2), 317–324.
- Gawande, V. B., Dhoble, A. S., Zodpe, D. B., & Chamoli, S. (2016). A review of CFD methodology used in literature for predicting thermo-hydraulic performance of a roughened solar air heater. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 550–605. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.025>
- Godinho, J. R. P. M. (2011). Variação temporal das principais constituintes harmónicas da maré de Cascais. *Enggeografica.Fc.Ul.Pt*, 78. Obtido de http://enggeografica.fc.ul.pt/ficheiros/teses/tese_joana_godinho.pdf
- González-Gorbeña, E., Pacheco, A., Plomaritis, T. A., Ferreira, Ó., & Sequeira, C. (2018). Estimating the optimum size of a tidal array at a multi-inlet system considering environmental and performance constraints. *Applied Energy*, 232(September), 292–311. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.204>
- Hinkel, J., Nicholls, R. J., Vafeidis, A. T., Tol, R. S. J., & Avagianou, T. (2010). Assessing risk of and adaptation to sea-level rise in the European Union: An application of DIVA. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15(7), 703–719. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9237-y>
- Hsu, M.-H., Kuo, A. Y., Kuo, J.-T., & Liu, W.-C. (1999). Procedure to Calibrate and Verify Numerical Models of Estuarine Hydrodynamics. *Journal of Hydraulic Engineering- ASCE.*, 125(4), 369–375. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125)
- ICNF. (sem data). Geologia, hidrologia e clima do Parque Nacional da Ria Formosa. Obtido de <http://www2.icnf.pt/portal/ap/p-nat/pnrf/geo>
- IPCC. (2014). Fifth Assessment Report. Obtido de <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>
- IPCC. (2019). Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities. IPCC SR Ocean and Cryosphere. *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.- O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.)]. In press.*, 1–169. <https://doi.org/10.1126/science.aam6284>
- Janeiro, J., Fernandes, E., Martins, F., & Fernandes, R. (2008). Wind and freshwater influence over hydrocarbon dispersal on Patos Lagoon, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 56(4), 650–665. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.01.011>

- Kenov, Ascione, I., Garcia, A. C., & Neves, R. (2012). Residence time of water in the Mondego estuary (Portugal). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 106, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.04.008>
- Martinho, V. (2010). *Estudo da Dispersão de Manchas de Óleo na Área de Atuação do Porto do Rio Grande – RS*. 71.
- Martins, F., & Janeiro, J. (2018). *Plano Intermunicipal de Adaptação às Adaptações Climáticas da AMAL*. Faro.
- MohidWiki. *Mohid Water*. Obtido 21 de Junho de 2021, de http://wiki.mohid.com/index.php?title=Mohid_Water
- Mills, L., Janeiro, J., Neves, A. A. S., & Martins, F. (2020). The impact of Sea level rise in the guadiana estuary. *Journal of Computational Science*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2020.101169>
- Neves, R. J. J., & Martins, F. A. (1996). Modelação lagrangeana dos processos de transporte na Ria Formosa. *5ª Conferência Nacional Sobre a Qualidade do Ambiente*.
- Newton, A., & Mudge, S. M. (2003). Temperature and salinity regimes in a shallow, mesotidal lagoon, the Ria Formosa, Portugal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57(1–2), 73–85. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(02\)00332-3](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(02)00332-3)
- NOAA. (2019). What is a storm surge? Obtido de National Ocean Service website: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/stormsurge-stormtide.html>
- Oceanteacher. (sem data). Análise espectral de Marés e suas Aplicações. Obtido 21 de Junho de 2021, de <https://classroom.oceanteacher.org/mod/book/view.php?id=10350>
- Pacheco, A. M. D. (2010). *Hydrodynamic and Sediment Fluxes through the Inlets of the Ria Formosa*. *Hydrodynamic and Sediment Fluxes through the Inlets of the Ria Formosa*.
- Pacheco, A., Vila-Concejo, A., Ferreira, Ó., & Dias, J. A. (2008). Assessment of tidal inlet evolution and stability using sediment budget computations and hydraulic parameter analysis. *Marine Geology*, 247(1–2), 104–127. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.07.003>
- Pérez, J. E. (2020). *Tidal channel hydrodynamics and salt marsh deposition under varying sea-level rise scenarios*.
- Portela, L. (2012). Evolução morfológica recente da zona lagunar da Ria Formosa. *2ªs*

- Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, (1), 291–294.
- Pugh, D., & Woodworth, P. (2014). Tidal analysis and prediction. *Sea-Level Science*, 60–96. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139235778.007>
- Quesada, Calero, M. C., García-Lafuente, J., Garel, E., Delgado Cabello, J., Martins, F., & Moreno-Navas, J. (2019). Effects of tidal and river discharge forcings on tidal propagation along the Guadiana Estuary. *Journal of Sea Research*, 146(January), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2019.01.006>
- Relvas, P. (2018). Processos Dinâmicos que determinam as correntes no oceano. *Gazeta de Física*. Obtido de <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/387/pdf>
- RGCM. (sem data). Coupled Model Intercomparison Project. Obtido de <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/>
- Seiler, L. M. N., Fernandes, E. H. L., & Siegle, E. (2020). Effect of wind and river discharge on water quality indicators of a coastal lagoon. *Regional Studies in Marine Science*, 40, 101513. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101513>
- SETA. (sem data). *Parque Natural da Ria Formosa (PNRF)*. Obtido de http://www.seta.org.pt/artigo2_23.pdf
- Sutherland, J., Walstra, D. J. R., Chesher, T. J., van Rijn, L. C., & Southgate, H. N. (2004). Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth. *Coastal Engineering*, 51(2), 119–142. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2003.12.003>
- Telles, W. R., Neto, J. S., & Rodrigues, P. P. G. W. (2012). *Avaliação do Sistema de Modelagem na delimitação de bacias hidrográficas*. 589–592.
- Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Feyen, L., & Voukouvalas, E. (2017). Earth ' s Future Extreme sea levels on the rise along Europe ' s coasts Earth ' s Future. *Earth ' s Future*, 5(3), 1–20. <https://doi.org/10.1002/ef2.192>
- Zawawi, M. H., Saleha, A., Salwa, A., Hassan, N. H., Zahari, N. M., Ramli, M. Z., & Muda, Z. C. (2018). A review: Fundamentals of computational fluid dynamics (CFD). *AIP Conference Proceedings*, 2030(November). <https://doi.org/10.1063/1.5066893>