



UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Faculdade de Ciências e Tecnologia

***Modelação do Balanço Hídrico do Sistema
Aquífero da Campina de Faro***

Em Diferentes Cenários Climáticos e de Exploração de Recursos

João Miguel Sousa Viegas

Dissertação em Engenharia do Ambiente

Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Prof. Doutor José Paulo Monteiro

Eng.º Rui Hugman

2015

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Faculdade de Ciências e Tecnologia

***Modelação do Balanço Hídrico do Sistema
Aquífero da Campina de Faro***

Em Diferentes Cenários Climáticos e de Exploração de Recursos

João Miguel Sousa Viegas

Dissertação em Engenharia do Ambiente

Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Prof. Doutor José Paulo Monteiro

Eng.º Rui Hugman

2015

Modelação do Balanço Hídrico do Sistema Aquífero da Campina de Faro

Em Diferentes Cenários Climáticos e de Exploração de Recursos

Declaração de autoria do trabalho

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

João Miguel Sousa Viegas

Copyright João Miguel Sousa Viegas

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.

Agradecimentos

Neste espaço quero manifestar o meu sincero agradecimento a todos os que me apoiaram ao longo deste trabalho.

Aos meus pais, tios, primos e avós pela forma como me inculcaram a alegria de viver, motivação e confiança necessária para realizar os meus sonhos. Agradeço particularmente aos meus pais, todo o esforço emocional e financeiro por eles realizado em toda a minha formação académica. A eles dedico todo o trabalho.

À Aleksandra, um profundo agradecimento pelo apoio ao longo desta etapa, bem como todos os seus conselhos, críticas e sobretudo a sua compreensão.

Aos meus orientadores, Professor Doutor José Paulo Monteiro e Engenheiro Rui Hugman pelo apoio e orientação disponibilizados na realização deste trabalho. Agradeço também ao Engenheiro Luís Costa por todos os conselhos e sugestões.

Expresso também a minha gratidão à DHI-WASY GmbH, por ter disponibilizado uma licença provisória do programa informático FEFLOW, sem o qual seria impossível realizar este trabalho.

À Agência Portuguesa do Ambiente (APA IP-ARH Algarve), nomeadamente à Engenheira Edite Reis por toda a informação disponibilizada.

Por fim uma grande palavra de apreço aos meus colegas e amigos Diego Luz, Armando Dourado, Mónica Ferreira, Márcio Martins, Alexandra Silva, António Góis, Cláudia Corniciuc, Rúben Simão, Tomás de Carvalho, Adriana Pires, Verónica Gonçalves, Herman Dumby, João Rodrigo e Rodolfo Henriques por toda a força e motivação transmitida ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Muito Obrigado!

Resumo

A água subterrânea sempre desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento da região algarvia. Na década de 90, face à ocorrência do declínio dos níveis piezométricos e casos pontuais de intrusão salina resultantes da sobre-exploração de aquíferos costeiros, a entidade competente delimitou uma área na qual interditou o aumento da extração (Área Crítica). Posteriormente, com a instalação do sistema de abastecimento regional baseado em águas superficiais, verificou-se uma estabilização geral dos níveis piezométricos e melhoria na qualidade da água subterrânea. Recentemente, tem-se verificado um crescimento de solicitações para novos licenciamentos de captações subterrâneas, nomeadamente em locais suscetíveis de ocorrência de intrusão salina. Deste modo, a Agência Portuguesa do Ambiente enquanto entidade gestora dos recursos hídricos, propôs-se desenvolver um Plano Específico de Gestão da Água, visando proceder à reconsideração dos atuais limites da Área Crítica e das condições de exploração da mesma. Neste sentido, o objeto de estudo desta dissertação focou-se na elaboração de um modelo numérico de escoamento do sistema aquífero da Campina de Faro, no qual foram testados modelos conceptuais. Posteriormente simularam-se em regime permanente diferentes cenários de exploração agrícola (propostos pela entidade gestora) e de alterações climáticas. Pretendeu-se por esta via analisar a potencial extensão da intrusão salina.

Os resultados obtidos indicaram que atualmente o sistema da Campina de Faro já se encontra num estado de sobre-exploração, tendo sido determinadas condições favoráveis à ocorrência de intrusão salina nas zonas de Vale do Lobo e Quinta do Lago. Em casos hipotéticos de acréscimo da atividade agrícola, foram estimados aumentos consideráveis da extensão da cunha salina. No entanto, mesmo que se mantenham as restrições atuais, serão igualmente esperados aumentos significativos de intrusão em virtude das alterações climáticas previstas. Constatou-se necessária a implementação de medidas de adaptação para a garantir a sustentabilidade deste sistema como fonte de abastecimento de água.

Palavras Chave: sistema aquífero da Campina de Faro; intrusão Salina; Área Crítica; modelo numérico de escoamento; cenários; alterações climáticas.

Abstract

Groundwater has always played a key role in the development of the Algarve. In the 90s, due to the decrease of water levels and occurrence of individual cases of seawater intrusion resulting from overexploitation of coastal aquifers, the water local authority delimited an area in which the increase of water extractions have been restricted (Critical Area). Later, with the change to a surface water based public supply system in the region, groundwater levels have stabilized and water quality has since then improved. Recently, the number of requests to emit groundwater use permits has increased, particularly in locations susceptible to occurrence of seawater intrusion. Thus, the Portuguese Environment Agency, as the current regulatory agency, proposed to develop a Specific Water Management Plan, aiming to make the reconsideration of the current limits of the Critical Area and exploration conditions. Therefore, a three-dimensional numerical groundwater flow model of the Campina de Faro aquifer was developed to both test several conceptual models and assess the potential extent of seawater intrusion for a range of groundwater use (proposed by the regulatory agency) and climate change scenarios.

Results indicate the system is already overexploited. All scenarios of increased agricultural activity showed considerable extension of seawater intrusion in particular in areas like Vale do Lobo and Quinta do Lago. However, even if current water use restrictions will be kept, it's expected increased phenomena of intrusion due to climate changes effects. Adaptation measures are necessary to guarantee sustainability of the system and its contribution as a source of water supply.

Keywords: aquifer system of Campina de Faro; saline intrusion; Critical Area; numerical groundwater flow model; scenarios; climate change.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento Jurídico	3
1.2 Enquadramento do Problema	4
1.3 Objetivos	5
2 Revisão Bibliográfica	6
2.1 Massas de Água Subterrânea	6
2.2 Intrusão Salina	6
2.3 Modelação Numérica de Aquíferos	8
2.3.1 <i>Princípios Físicos do Processo de Modelação</i>	8
2.3.2 <i>Condições de Fronteira</i>	9
2.3.3 <i>Calibração Inversa de Modelos Numéricos</i>	10
3 Caso de Estudo	13
3.1 Enquadramento Geográfico	13
3.2 Caracterização Climatológica	14
3.3 Enquadramento Geológico	15
3.3.1 <i>Hidrogeologia</i>	16
3.4 Balanço Hídrico	18
3.5 Uso do Solo	19
3.6 Caracterização Piezométrica e Qualitativa	19
3.6.1 <i>Análise Piezométrica dos aquíferos freático e semi-confinado</i>	22
3.6.2 <i>Séries Piezométricas dos aquíferos freático e semi-confinado</i>	24
3.6.3 <i>Qualidade da Água - Concentração de Cloretos</i>	26
4 Metodologia	30
4.1 Modelo Conceptual do Sistema Aquífero da Campina de Faro	30

4.2	Modelo Numérico de Escoamento do Sistema Aquífero da Campina de Faro.....	32
4.2.1	<i>Recarga Direta</i>	34
4.2.2	<i>Condições de Fronteira</i>	35
4.3	Calibração Inversa do Modelo Numérico de Escoamento do Sistema Aquífero da Campina de Faro.....	40
4.3.1	<i>Zonas de Condutividade Hidráulica</i>	40
4.4	Cenários de Exploração e de Alterações Climáticas.....	42
4.5	Determinação da Intrusão Salina.....	44
5	Resultados	46
5.1	Calibração Inversa - Testes das Variantes do Modelo Numérico.....	46
5.2	Cenários de Exploração de Recursos e de Alterações Climáticas.....	53
5.2.1	<i>Cenário 1 - Área Regada Atual</i>	53
5.2.2	<i>Cenário 2 - Área Regada Atual + Área de Cultivo Abandonada</i>	58
5.2.3	<i>Cenário 3 - Área Regada Atual + Área de Cultivo Abandonada abrangida pela RAN</i>	62
5.2.4	<i>Cenário 4 - Área Regada Atual + Área de Cultivo Abandonada fora da Área Crítica</i>	66
5.2.5	<i>Cenário 5 - Área Regada Atual + Área de Cultivo Abandonada abrangida pela RAN fora da Área Crítica</i>	70
5.2.6	<i>Alterações Climáticas - Efeitos previstos entre 2020 e 2050</i>	74
5.2.7	<i>Alterações Climáticas - Efeitos previstos entre 2069 a 2099</i>	78
6	Discussão dos Resultados	82
7	Conclusão	83
8	Referências Bibliográficas	85
	Anexo II	93
	Anexo III	94
	Anexo IV	98

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Extensão da Área Crítica na região do Algarve	2
Figura 3.1 - Localização da Unidade de Gestão do sistema aquífero da Campina de Faro	13
Figura 3.2 - Localização das estações climatológicas e udométricas.....	14
Figura 3.3 - Enquadramento litoestratigráfico do sistema aquífero da Campina de Faro (Adaptado de Almeida et al. 2000)	15
Figura 3.4 - Perfil geológico do sistema aquífero da Campina de Faro proposto por (Silva et al. 1986) . Legenda: (1) Aluvião; (2) Quaternário Arenoso; (3) Miocénico arenoso fino; (4) Miocénico argilo-silto-arenoso; (5) Miocénico calcário e calco-arenoso; (6) Cretácico; (7) Rochas evaporíticas; (A, B, C, D, F, G, I, J, L, N, O) sondagens de captação, ↓↑ falha geológica (Adaptado de Diamantino 2009).....	17
Figura 3.5 - Localização dos piezómetros no aquífero freático	20
Figura 3.6 - Localização dos piezómetros no aquífero semi-confinado	21
Figura 3.7 - Localização dos piezómetros da rede de qualidade no aquífero semi-confinado.....	21
Figura 3.8 - Níveis piezométricos do aquífero freático entre os anos hidrológicos de 1997/1998 e 1998/1999.....	22
Figura 3.9 - Níveis piezométricos do aquífero semi-confinado entre os anos hidrológicos de 1997/1998 e 1998/1999	23
Figura 3.10 - Séries piezométricas do aquífero freático entre os anos hidrológicos de 1995/1996 e 2007/2008.....	24
Figura 3.11 - Precipitação anual registada na estação de Estoi (31J/04UG) entre os anos hidrológicos de 1995/1996 e 2007/2008	25
Figura 3.12 - Séries piezométricas do aquífero semi-confinado entre os anos hidrológicos de 1995/1996 e 2007/2008.....	25
Figura 3.13 - Mapa da concentração de cloretos do aquífero semi-confinado entre os anos hidrológicos de 1995/1996 e 2007/2008.....	26
Figura 3.14 - Séries das concentrações de cloretos no aquífero semi-confinado entre os anos hidrológicos de 1995/1996 e 2007/2008.....	27
Figura 3.15 - Séries das concentrações de cloretos nos piezómetros 610/168 e 606/1019 entre os anos hidrológicos de 1995/1996 e 2012/2013.....	28
Figura 3.16 - Séries piezométricas nos piezómetros 606/1026 e 606/647 entre os anos hidrológicos de 1995/1996 e 2012/2013	29
Figura 4.1 - Modelo conceptual do sistema aquífero da Campina de Faro.....	31
Figura 4.2 - Estrutura do modelo numérico de escoamento do sistema aquífero da Campina de Faro.....	34
Figura 4.3 - Recarga direta no modelo numérico de escoamento do sistema aquífero da Campina de Faro.....	35
Figura 4.4 - Condições de fronteira de <i>Dirichlet</i> impostas no modelo numérico	36

Figura 4.5 - Condições de fronteira de <i>Neumann</i> impostas no modelo numérico	36
Figura 4.6 - Condição de fronteira de <i>Cauchy</i> imposta na primeira variante do modelo numérico	38
Figura 4.7 - Condição de fronteira de <i>Cauchy</i> imposta na segunda variante do modelo numérico	38
Figura 4.8 - Condição de fronteira de <i>Cauchy</i> imposta na terceira variante do modelo numérico	39
Figura 4.9 - Subdivisão das zonas de condutividade hidráulica no modelo numérico de escoamento do sistema da Campina de Faro.....	41
Figura 4.10 - Relação entre o nível freático e a cota da interface entre a água subterrânea e salgada.....	45
Figura 5.1 - Correlação entre a piezometria simulada e observada antes da calibração inversa da primeira variante do modelo numérico	46
Figura 5.2 - Correlação entre a piezometria simulada e observada após a calibração inversa da primeira variante do modelo numérico	47
Figura 5.3 - Correlação entre a piezometria simulada e observada antes da calibração inversa da segunda variante do modelo numérico.....	48
Figura 5.4 - Correlação entre a piezometria simulada e observada após a calibração inversa da segunda variante do modelo numérico.....	49
Figura 5.5 - Correlação entre a piezometria simulada e observada antes da calibração inversa da terceira variante do modelo numérico	50
Figura 5.6 - Correlação entre a piezometria simulada e observada após a calibração inversa da terceira variante do modelo numérico	51
Figura 5.7 - Cenário 1	53
Figura 5.8 - Direção do escoamento no modelo numérico de escoamento no cenário 1	54
Figura 5.9 - Níveis piezométricos do aquífero freático no cenário 1	55
Figura 5.10 - Localização da interface no aquífero freático no cenário 1	56
Figura 5.11 - Níveis piezométricos do aquífero semi-confinado no cenário 1	56
Figura 5.12 - Localização da interface no aquífero semi-confinado no cenário 1	57
Figura 5.13 - Cenário 2	58
Figura 5.14 - Níveis piezométricos do aquífero freático no cenário 2.....	59
Figura 5.15 - Localização da interface no aquífero freático no cenário 2.....	60
Figura 5.16 - Níveis piezométricos do aquífero semi-confinado no cenário 2	60
Figura 5.17 - Localização da interface no aquífero semi-confinado no cenário 2	61
Figura 5.18 - Área de cultivo abandonada abrangida pela RAN	62
Figura 5.19 - Cenário 3	62
Figura 5.20 - Níveis piezométricos do aquífero freático no cenário 3.....	63
Figura 5.21 - Localização da interface no aquífero freático no cenário 3.....	64
Figura 5.22 - Níveis piezométricos do aquífero semi-confinado no cenário 3	64
Figura 5.23 - Localização da interface no aquífero semi-confinado no cenário 3	65
Figura 5.24 - Área de cultivo abandonada fora da Área Crítica	66
Figura 5.25 - Cenário 4	66

Figura 5.26 - Níveis piezométricos do aquífero freático no cenário 4.....	67
Figura 5.27 - Localização da interface no aquífero freático no cenário 4.....	68
Figura 5.28 - Níveis piezométricos do aquífero semi-confinado no cenário 4.....	68
Figura 5.29 - Localização da interface no aquífero semi-confinado no cenário 4.....	69
Figura 5.30 - Área de cultivo abandonada abrangida pela RAN fora da Área Crítica.....	70
Figura 5.31 - Cenário 5.....	70
Figura 5.32 - Níveis piezométricos do aquífero freático no cenário 5.....	71
Figura 5.33 - Localização da interface no aquífero freático no cenário 5.....	72
Figura 5.34 - Níveis piezométricos do aquífero semi-confinado no cenário 5.....	72
Figura 5.35 - Localização da interface no aquífero semi-confinado no cenário 5.....	73
Figura 5.36 - Níveis piezométricos do aquífero freático entre 2020 e 2050.....	75
Figura 5.37 - Localização da interface no aquífero freático entre 2020 e 2050.....	75
Figura 5.38 - Níveis piezométricos do aquífero semi-confinado entre 2020 e 2050.....	76
Figura 5.39 - Localização da interface no aquífero semi-confinado entre 2020 e 2050.....	76
Figura 5.40 - Níveis piezométricos do aquífero freático entre 2069 e 2099.....	79
Figura 5.41 - Localização da interface no aquífero freático entre 2069 e 2099.....	80
Figura 5.42 - Níveis piezométricos do aquífero semi-confinado entre 2069 e 2099.....	80
Figura 5.43 - Localização da interface no aquífero semi-confinado entre 2069 e 2099.....	81

Índice de Quadros

Quadro 3.1 - Informação geral sobre as estações climatológicas e udométricas	14
Quadro 4.1 - Caudais das principais ribeiras que cruzam o sistema aquífero da Campina de Faro	37
Quadro 4.2 - Dotações de rega para cada tipo de cultura no ano de 2009	43
Quadro 4.3 - Extração de água pelos campos de golfe localizados no sistema aquífero da Campina de Faro no ano de 2010.....	43
Quadro 5.1 - Distribuição da condutividade hidráulica e o coeficiente de transferência após a calibração inversa da primeira variante do modelo numérico.....	47
Quadro 5.2 - Distribuição da condutividade hidráulica e o coeficiente de transferência após a calibração inversa da segunda variante do modelo numérico	49
Quadro 5.3 - Distribuição da condutividade hidráulica e o coeficiente de transferência após a calibração inversa da terceira variante do modelo numérico	51
Quadro 5.4 - Balanço do cenário 1.....	53
Quadro 5.5 - Balanço do cenário 2.....	58
Quadro 5.6 - Balanço do cenário 3.....	63
Quadro 5.7 - Balanço do cenário 4.....	67
Quadro 5.8 - Balanço do cenário 5.....	71
Quadro 5.9 - Balanço do cenário climático previsto entre 2020 e 2050	74
Quadro 5.10 - Balanço da primeira simulação do cenário climático previsto entre 2069 e 2099..	78
Quadro 5.11 - Balanço da segunda simulação do cenário climático previsto entre 2069 e 2099 ..	79

1 Introdução

Os recursos hídricos subterrâneos sempre foram uma importante fonte de obtenção de água potável para o abastecimento urbano, agrícola e industrial. No Algarve existem 17 sistemas aquíferos, os quais correspondem ao maior reservatório de água doce de toda a região (Almeida et al. 2000). Estes têm vindo a desempenhar um papel fundamental na subsistência da população algarvia ao longo de décadas, dada a sua elevada resiliência e grande capacidade de armazenamento num território particularmente caracterizado por ter um clima mediterrânico semi-árido, com grandes variações sazonais (inter e intra-anuais) relativamente à precipitação (Stigter et al. 2009).

Nos últimos anos uma grande parte dos sistemas aquíferos, uns mais do que outros, tem sido condicionada pela intensa pressão antropogénica. A conjugação de fatores, tais como a extração excessiva, a poluição proveniente de efluentes agrícolas e domésticos e o aumento da impermeabilização dos solos face ao urbanismo desmesurado, contribuíram para a redução dos níveis piezométricos e deterioração da qualidade da água subterrânea (Monteiro et al. 2002; Stigter 2005). De acordo com Reis & Gago (2013), um dos principais problemas resultantes da sobre-exploração de sistemas aquíferos costeiros no Algarve é a intrusão salina, visto que foram detetados casos pontuais deste fenómeno no passado.

Com o propósito de garantir a boa qualidade da água e reduzir a probabilidade de ocorrência de casos de intrusão salina, a entidade responsável na altura pela gestão dos recursos hídricos delineou no início dos anos 90 uma extensa faixa com cerca de 342 km² junto ao litoral, nomeando-a de Área Crítica (Figura 1.1). A sua delimitação ficou a dever-se a estudos e análises realizadas *in loco* que muito contribuíram para o conhecimento dos aspetos hidrogeológicos e geológicos, bem como das concentrações de cloretos existentes nos sistemas aquíferos costeiros. A partir de então ficou estabelecida a interdição de aumentos de extração, através do não licenciamento de novas captações de água subterrânea em toda a extensão da Área Crítica (Reis & Gago 2013).

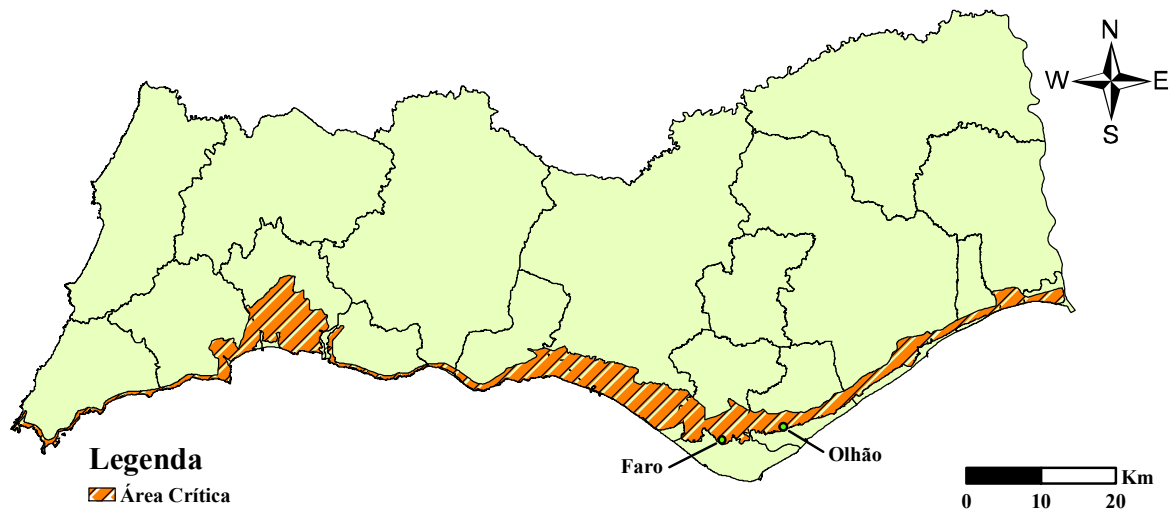


Figura 1.1 - Extensão da Área Crítica na região do Algarve

Com o início do novo milénio, concretizada a realização de vários investimentos com o objetivo de substituir o obsoleto sistema de abastecimento urbano totalmente dependente dos recursos hídricos subterrâneos, foi instalado de forma gradual em todos os concelhos do Algarve o novo sistema de abastecimento regional baseado exclusivamente em água superficial (barragens). Assim surgiu o Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Águas do Algarve (SMAAA). Porém, apesar de se ter verificado uma diminuição da dependência em relação à água subterrânea, esta continuou a ter um papel importantíssimo, suportando cerca de 62% de toda a água consumida (Monteiro et al. 2006).

Em conformidade com Monteiro et al. (2002), podem identificar-se nesta região três períodos distintos no que diz respeito à obtenção de água subterrânea: 1) o período *passado* correspondente às décadas de exploração exclusiva das massas de água subterrâneas como fonte de água potável; 2) o período *atual* no qual se verificou uma diminuição do volume de água subterrânea extraída após a implementação do SMAAA; 3) o período *futuro* no qual se pretende implementar uma estratégia de uso integrado dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais.

O terceiro período será fundamental porque segundo a investigação mais recente, autores como Santos & Miranda (2006) preveem um aumento da frequência e da intensidade da variação sazonal da precipitação no sul de Portugal, sendo expectável a presença de períodos secos extremos mais prolongados. Estas alterações climáticas poderão ter um papel determinante na degradação da qualidade dos recursos subterrâneos, devido a fatores como: 1) a diminuição da recarga dos aquíferos por causa do decréscimo da precipitação; 2) incitação de uma maior

procura de água subterrânea, motivada pela diminuição da precipitação e pelo aumento da necessidade hídrica das plantas face ao acréscimo da evapotranspiração; 3) decréscimo do volume de água armazenado nos aquíferos e possível limitação das suas resiliências em períodos de seca prolongados (Hugman et al. 2013; Lobo Ferreira et al. 2013).

1.1 Enquadramento Jurídico

De forma a estabelecer um quadro de ação comunitária para a proteção das águas superficiais e subterrâneas, no dia 23 de Outubro de 2000 foi publicada pelo Parlamento Europeu a Diretiva n.º 2000/60/CE, também designada por Diretiva Quadro da Água (DQA). Esta diretiva passou a ser o principal instrumento da política da União Europeia (EU) relativamente aos recursos hídricos.

Para dar resposta a algumas das exigências impostas pela DQA, nomeadamente em relação à proteção das águas subterrâneas contra a poluição e degradação, foi aprovada no ano de 2006 a Diretiva Europeia n.º 2006/118/CE. Esta refere que as águas subterrâneas “são um valioso recurso que deverá ser protegido da deterioração em virtude da sua elevada sensibilidade e importância”. A mesma menciona que os aquíferos são as fontes de água potável mais sensíveis e importantes em toda a União Europeia, por isso previu que todos os estados membros, de um modo geral, impusessem normas de qualidade, novas metodologias e medidas de prevenção/identificação de tendências significativas nefastas nas suas massas de água subterrâneas.

Em Portugal a DQA foi transposta para o direito português através da publicação da Lei n.º 58/2005, em 29 de Dezembro de 2005, usualmente denominada “Lei da Água”. Esta compreende todos os recursos hídricos, tais como as águas superficiais (interiores, de transição e costeiras) e águas subterrâneas. Com a sua publicação pretenderam estabelecer-se bases para uma gestão mais sustentável destes recursos em todo o país, tendo sido aplicados quadros institucionais para cada sector com um princípio assente de que determinada administração de uma região hidrográfica (ARH) teria como responsabilidade principal o planeamento e gestão das suas águas superficiais e subterrâneas.

1.2 Enquadramento do Problema

Como já foi referido anteriormente, a intrusão salina é um dos principais problemas resultantes da constante extração de água subterrânea no litoral algarvio. Nesta região existem oito sistemas aquíferos costeiros: Mexilhoeira Grande-Portimão, Ferragudo-Albufeira, Albufeira-Ribeira de Quarteira, Quarteira, Campina de Faro, São João da Venda-Quelfes, Luz-Tavira e Monte Gordo. Devido à possível existência de conexões hidráulicas com o Oceano Atlântico e a Ria Formosa, subsiste sempre uma grande probabilidade de ocorrência de avanços da água salgada no interior destes sistemas (Reis & Gago 2013).

Nos últimos anos tem-se verificado um aumento significativo da procura de novas áreas agrícolas em zonas susceptíveis de ocorrência de intrusão salina, facto este corroborado pela intensificação do número de solicitações à Agência Portuguesa do Ambiente (APA IP-ARH Algarve) para novos licenciamentos de captações de água subterrânea em locais abrangidos pela Área Crítica ou localizados nas suas imediações. Face a esta problemática e ao dever de cumprir as normas europeias e portuguesas, esta entidade propôs a implementação de um Plano Específico de Gestão da Água (PEGA), de modo a serem acauteladas futuramente, algumas medidas de prevenção, tais como as referidas por Reis & Gago (2013):

- Definir as condições específicas da execução e exploração das captações de água;
- Controlar a extração de água através da instalação de aparelhos medidores de caudal nas captações;
- Diminuir os volumes de água extraídos atualmente autorizados, dando apenas prioridade a situações de seca;
- Propor novos limites da Área Crítica à exploração de águas subterrâneas.

Dado que o sistema aquífero da Campina de Faro é um dos sistemas abrangidos pela Área Crítica, é essencial prever o seu comportamento em situações de aumentos de extração de água e/ou alterações climáticas. Daqui decorre a necessidade de abordar este problema de forma rigorosa, visto que os recursos hídricos subterrâneos terão de ser objeto de uma gestão otimizada, pois só desta forma poderão ser equacionadas medidas de adaptação ou encontradas soluções mais sustentáveis. A problemática anteriormente descrita justifica a pertinência de realização de

trabalhos de investigação, contribuindo-se por esta via para um maior conhecimento das zonas em perigo.

1.3 Objetivos

De forma a tentar contribuir para a resolução dos problemas anteriormente referidos, este trabalho tem como objetivo principal a simulação, em regime permanente, do sistema aquífero da Campina de Faro em cinco cenários de exploração. Para além destes, apresenta-se igualmente a análise de dois cenários relacionados com os efeitos das alterações climáticas previstos para o Algarve nos próximos 85 anos, segundo Stigter et al. (2014). Desde modo, pretende-se contribuir para a análise do hipotético avanço da intrusão salina.

A simulação das respetivas situações terá por base a implementação de um modelo numérico de escoamento tridimensional, que será objeto de calibração inversa por forma a estimar a distribuição espacial dos parâmetros hidráulicos responsáveis pela caracterização do sistema, nomeadamente a condutividade hidráulica.

Sob o ponto de vista prático, o trabalho foi desenvolvido com o intuito de poder contribuir para as decisões necessárias à melhoria da gestão dos recursos hídricos subterrâneos na região do Algarve. Logo, espera-se que a APA IP-ARH Algarve, enquanto entidade decisora neste contexto, disponha de mais um instrumento que possa auxiliar à tomada de decisão, a respeito da gestão dos presentes e futuros regimes de exploração e definição dos limites que devem ser incluídos na “Área Crítica” de extração de água subterrânea no sistema aquífero da Campina de Faro.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Massas de Água Subterrânea

Em conformidade com Fetter (2001), as massas de água subterrâneas ou aquíferos são unidades geológicas com capacidade para conduzir e armazenar quantidades de água suficientes para a sua exploração. Estes podem ser categorizados como freáticos/livres, confinados e semi-confinados. Os freáticos encontram-se frequentemente localizados junto da superfície terrestre tendo a mesma pressão atmosférica que esta. Os seus níveis de armazenamento variam diretamente com os fatores climáticos, tais como, a temperatura, a precipitação, a evapotranspiração, etc. Em relação aos confinados, estes estão contidos em camadas impermeáveis, sendo recarregados de forma indireta, em grande parte lateralmente às camadas impermeabilizantes. A pressão exercida pela água na superfície do aquífero pode ser muito superior à pressão atmosférica. E por fim, os aquíferos semi-confinados, têm os seus topos ou bases constituídos por materiais que não são totalmente impermeáveis, permitindo uma recarga vertical muito lenta.

2.2 Intrusão Salina

A intrusão salina é um problema global que tem vindo a ser potenciado pela crescente procura de água subterrânea em zonas costeiras. A elevada densidade populacional aí residente (cerca de 80% da população mundial) constitui o fundamento principal deste fenómeno. Este também poderá ser intensificado futuramente, devido aos efeitos associados às alterações climáticas previstas (Werner et al. 2013).

A intrusão salina ou incursão terrestre da água do mar, consiste essencialmente no deslocamento da água salgada para o interior de um aquífero, tendo como principal consequência a degradação da qualidade da água, afetando tudo o que dela depende (Austin et al. 2013). De acordo com Werner et al. (2013), basta apenas a presença de menos de 1% de água salgada numa determinada área de um aquífero, o equivalente a 250 mg/l de cloretos para inutilizar uma captação de água subterrânea destinada ao abastecimento urbano. O mesmo autor refere que a origem deste fenómeno pode dever-se a causas naturais (menores índices de precipitação, maior evapotranspiração, erosão da linha de costa, marés, etc.) ou a causas antropogénicas (sobre-

exploração, impermeabilização dos solos, efeitos associados às alterações climáticas provocados pela libertação sucessiva de gases com efeito de estufa, etc.).

A intrusão ocorre quando o equilíbrio entre a água subterrânea e salgada é afetado por alterações nos regimes de escoamento de um determinado aquífero costeiro. O deslocamento da água salgada pode ocorrer de forma horizontal, quando a pressão exercida por esta é superior à da água subterrânea, impulsionando a sua entrada em direção ao interior do aquífero. Esta ocorre normalmente na presença de piezometria muito baixa. Outro modo de ocorrência denomina-se por *upconing* ou ascensão vertical. Este tipo de intrusão acontece frequentemente em cones de depressão provocados pela extração sucessiva de água subterrânea em locais onde existem estratificações bem delineadas de água doce e salgada. A bombagem provoca a circulação e movimentação da água salgada mais densa localizada abaixo da água doce, fazendo com que esta se desloque e ascenda verticalmente (Cheng & Ouazar 2003; Werner et al. 2013).

Em caso de remediação de aquíferos afetados pela intrusão salina, são usados processos como por exemplo: extração de água salgada do interior dos aquíferos, aplicação de recarga artificial através da injeção de água superficial, colocação de barreiras físicas que impeçam a conectividade hidráulica entre os aquíferos e massas de água salgada e por fim a recolocação de pontos de extração. Porém, todos estes processos têm custos monetários associados muito elevados e não garantem uma eficácia desejável (Cheng & Ouazar 2003; Liu 2006). Assim sendo, é importante evitar que situações de imprudência causadas pela atividade humana possam originar a ocorrência deste tipo de fenómeno.

Como forma de gestão de sistemas aquíferos costeiros alvos de fortes pressões naturais ou antropogénicas, uma das ferramentas mais utilizadas atualmente é a modelação numérica. Com a sua aplicação, a análise da intrusão salina pode ser abordada essencialmente de três formas: 1) aplicação exclusiva da piezometria simulada pelos modelos numéricos de escoamento, ignorando-se a existência de uma interface plana entre as águas subterrânea e salgada; 2) determinação da localização da interface plana ou *Sharp Interface* através da aplicação conjunta de métodos analíticos e modelos numéricos de escoamento, aquando da realização de investigações à escala regional ou local; 3) utilização de modelos de transporte de massa (*Dispersed Interface Approach*), quando se considera a presença de uma zona de transição criada pela miscibilidade de dois fluidos com diferentes densidades (água subterrânea e água salgada).

2.3 Modelação Numérica de Aquíferos

Atualmente os modelos numéricos de escoamento são uma das ferramentas mais empregues na gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Este tipo de modelos podem ser usados para testar modelos conceptuais, estimar parâmetros hidráulicos e prever funcionamentos hidráulicos. A sua utilidade coloca-se em condições naturais, em diferentes contextos de intervenção antrópica e aquando da resposta de aquíferos em determinadas alterações, quer nos seus regimes de exploração quer nas possíveis interferências provocadas por alterações climáticas (Scanlon et al. 2003).

2.3.1 Princípios Físicos do Processo de Modelação

Os autores como Huyakorn & Pinder (1983) descreveram os princípios físicos que suportam a simulação do comportamento hidráulico de um aquífero. De acordo com Monteiro (2001), a forma mais explícita para a representação da equação diferencial que descreve o escoamento de água subterrânea num meio poroso saturado em derivadas parciais, tem por base a aplicação conjunta da Lei de Darcy e do princípio da conservação de massa, sendo expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [2.1]$$

em que K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} representam os valores da condutividade hidráulica [LT^{-1}] ao longo dos eixos cartesianos (x,y,z), assumindo-se que são paralelos às direções de maior condutividade hidráulica, h é o potencial hidráulico [L], Q o fluxo volumétrico por unidade de volume [$L^3T^{-1}L^{-3}$] e o S_s o armazenamento específico, sendo este necessário para a simulação das variações transitórias do volume armazenado de água [L^{-1}].

A condutividade hidráulica é expressa pela seguinte equação:

$$K = \frac{\rho g k}{\mu} \quad [2.2]$$

em que ρ representa a densidade da água [ML^{-3}], g a aceleração da gravidade [LT^{-2}], k a permeabilidade intrínseca [L^2] e o μ a viscosidade dinâmica [$ML^{-1}T^{-1}$].

O potencial hidráulico h [L] equivale à energia por unidade de massa do fluido. Caso a energia cinética seja ignorada, a equação do potencial hidráulico é representada do seguinte modo:

$$h = \left(\frac{p}{\rho g} \right) + z \quad [2.3]$$

onde p é o potencial de pressão num determinado ponto [ML^{-1}T^2], ρ a densidade da água [ML^{-3}], g a aceleração da gravidade [LT^{-2}] e o z a soma do potencial de elevação do fluido [L].

O armazenamento específico S_s [L^{-1}] define-se por:

$$S_s = \rho g(\alpha + n\beta) \quad [2.4]$$

em que o ρ representa a densidade da água [ML^{-3}], g a aceleração da gravidade [LT^{-2}], α a compressibilidade do meio poroso [LT^2M^{-1}], n a porosidade efetiva [-] e β a compressibilidade da água [LT^2M^{-1}].

A equação [2.1] é frequentemente expressa de forma simplificada, como se pode notar na seguinte equação (Kinzelbach 1986):

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \text{div}(-[K]^{\rightarrow} \text{grad } h) = Q \quad [2.5]$$

Em modelos numéricos de escoamento cuja simulação seja realizada em regime permanente (*Steady State*), as variáveis são independentes do tempo, logo a equação [2.5] apresenta-se da seguinte forma:

$$\text{div}(-[K]^{\rightarrow} \text{grad } h) = Q \quad [2.6]$$

A equação que descreve o escoamento de água subterrânea pode ser solucionada através da aplicação de métodos numéricos de diferenças finitas ou de elementos finitos. No passado, autores como Kinzelbach (1986), Bear & Verruijt (1987) e Wang & Anderson (1982) aplicaram o método numérico de elementos finitos na realização das suas investigações.

2.3.2 Condições de Fronteira

As condições de fronteira correspondem a restrições impostas na rede do modelo numérico com o objetivo de representarem a interface existente entre o domínio da área modelada e o ambiente envolvente. Estas condições são formulações matemáticas que especificam variáveis dependentes (níveis piezométricos) ou derivadas das variáveis dependentes (fluxos) nas fronteiras do modelo.

A sua imposição pode tirar vantagem da existência de fronteiras físicas ou hidráulicas na área a ser modelada, particularmente aquando da presença de corpos de água superficial (ribeiras, rios, lagos) ou de formações/perturbações geológicas (falhas).

Segundo Anderson & Woessner (1992), no momento da sua aplicação deve-se ter em consideração as seguintes noções: 1) localização e orientação de acordo com as características físicas que se pretende representar; 2) imposição o mais afastado possível de zonas de interesse relevante, a fim de se evitar perturbações em casos de alterações no interior do domínio da área modelada; 3) atribuição o mais representativa (realista) possível.

Os diferentes tipos de condição de fronteira que podem ser aplicados são (Diersch 2014):

- *Dirichlet* ou 1º Tipo;
- *Neumann* ou 2º Tipo;
- *Cauchy* ou 3º Tipo;
- 4º Tipo (entrada e saída de um caudal do domínio do modelo através de uma fonte pontual).

As condições de fronteira de *Dirichlet* são usadas quando a variável de estado (potencial hidráulico) permanece constante ao longo do tempo, enquanto as de *Neumann* são empregues em situações de fluxo constante. As condições de fronteira de *Cauchy* são usadas quando existem trocas de fluidos entre aquíferos e outros meios (aquíferos, ribeiras, etc.), em função da diferença de potencial hidráulico existente entre eles e do coeficiente de transferência (parâmetro hidráulico que regula a entrada ou saída de água através de uma fronteira semi-permeável).

As condições de fronteira podem ser limitadas através da imposição de restrições, nas quais são aplicadas limites máximos e mínimos.

2.3.3 Calibração Inversa de Modelos Numéricos

Neste trabalho apenas será abordado o método indireto e automático da calibração inversa de modelos numéricos de escoamento. De acordo com Carrera et al. (2005), este processo é aplicado fundamentalmente quando se pretende determinar a distribuição espacial dos parâmetros hidráulicos (condutividade hidráulica, transmissividade, coeficiente de armazenamento específico, etc.), a partir de potenciais hidráulicos de referência (valores piezométricos observados). Ou seja, o método tenta resolver o problema de forma inversa ajustando

automaticamente os valores das zonas (classes) dos parâmetros que são inconclusivos ou inexistentes, através da sucessiva repetição de simulações ao modelo, a fim de se obter o melhor ajuste possível entre a piezometria simulada e observada.

A abordagem automática surgiu de forma a evitar-se o moroso processo de calibração manual de tentativa e erro.

A sua aplicação tem as seguintes vantagens (Poeter & Hill 1997):

- 1) Determinação mais rápida dos parâmetros;
- 2) Quantificação:
 - a. Da qualidade da calibração;
 - b. Da limitação da informação e das necessidades;
 - c. Dos limites de confiança dos parâmetros estimados e previstos;
- 3) Identificação dos problemas que são facilmente ignorados durante a calibração não automatizada.

É sabido que a utilização de modelos inversamente calibrados permitem avaliar com maior facilidade a fiabilidade dos resultados obtidos, uma vez que estes não se cingem apenas aos parâmetros, potenciais e escoamentos estimados, apresentando também os seus intervalos de confiança. Logo, é possível estimar os valores dos parâmetros com maior precisão e rapidez comparativamente ao processo clássico de calibração manual de tentativa e erro.

O processo está assente nas seguintes etapas: 1) determinação dos resíduos (diferenças) entre os valores observados e simulados do potencial hidráulico, dos parâmetros e do escoamento em todos os nós e períodos do modelo; 2) eliminação dos resíduos negativos e destaque dos positivos através da elevação destes ao quadrado; 3) medição da importância dos resíduos ao quadrado através do nível de incerteza especificado pelo modelador para cada observação, expresso como o inverso da variância do erro das observações; 4) somatório dos resíduos ao quadrado de modo a obter uma medida total da aproximação dos valores simulados às observações de campo, também denominada por função objetiva (*objective function*); 5) determinação da sensibilidade aquando da alteração dos potenciais hidráulicos e fluxos calculados, sempre que os valores dos parâmetros a serem estimados são modificados; 6) utilização da sensibilidade e dos resíduos para proceder ao ajuste dos valores dos parâmetros, de forma a minimizar a medida total da função objetiva; 7) repetição das etapas 4, 5 e 6 com o propósito de melhorar o modelo numérico.

Em conformidade com Cooley & Naff (1990), o coeficiente de correlação (R) fornece uma medida de suporte à validação da calibração, facultando ao modelador o valor do ajuste existente entre a piezometria simulada e observada. Ao contrário da função objetiva, o coeficiente de correlação é independente do número de observações envolvidas no processo de estimação dos parâmetros e dos níveis de incerteza associados. Logo, através da sua utilização é possível comparar resultados de modelos numéricos que contenham diferentes variantes.

O coeficiente de correlação é calculado da seguinte forma (Doherty 2002):

$$R = \frac{(W_i - m)(W_i C_{oi} - m_o)}{\sqrt{[(W_i C_i - m)^2 (W_i C_{oi} - m_o)^2]}} \quad [2.7]$$

em que C_i é o valor da i -ésima observação, C_{oi} é o valor gerado pelo modelo para o i -ésimo valor observado, m é a média do peso de todas as observações e o m_o é a média do peso de todos os valores gerados pelo modelo para as respetivas observações. O coeficiente por norma deverá ser superior a 0,9.

A análise efetuada aos resultados obtidos nos coeficientes de correlação e funções objetivas pode ser usada de forma a apoiar a tomada de decisão em relação à validação das calibrações de modelos numéricos. Deste modo, é possível verificar se a quantidade de dados fornecidos é suficiente ou se é necessário aplicar informação adicional com o intuito de se obter uma estimação dos parâmetros mais satisfatória e representativa.

3 Caso de Estudo

No terceiro capítulo deste trabalho proceder-se-á à revisão do conhecimento atual acerca do sistema aquífero da Campina de Faro. Serão abordados temas, tais como: a localização geográfica, clima, geologia, hidrogeologia, balanço hídrico, uso do solo, caracterização quantitativa e qualitativa.

3.1 Enquadramento Geográfico

O sistema aquífero da Campina de Faro (M12) situa-se no sul de Portugal Continental, na região do Algarve. A Unidade de Gestão deste sistema abrange os concelhos de Faro, Loulé e Olhão, compreendendo uma área total de 86,4 km² (Figura 3.1). No enquadramento cartográfico cobre as folhas 606, 607, 610 e 611 da Carta Topográfica à escala 1:25000 do iGeoE e as folhas 53-A do Mapa Corográfico e da Carta Geológica de Portugal às escalas de 1:50000 do IPCC e do IGM respetivamente (Almeida et al. 2000).

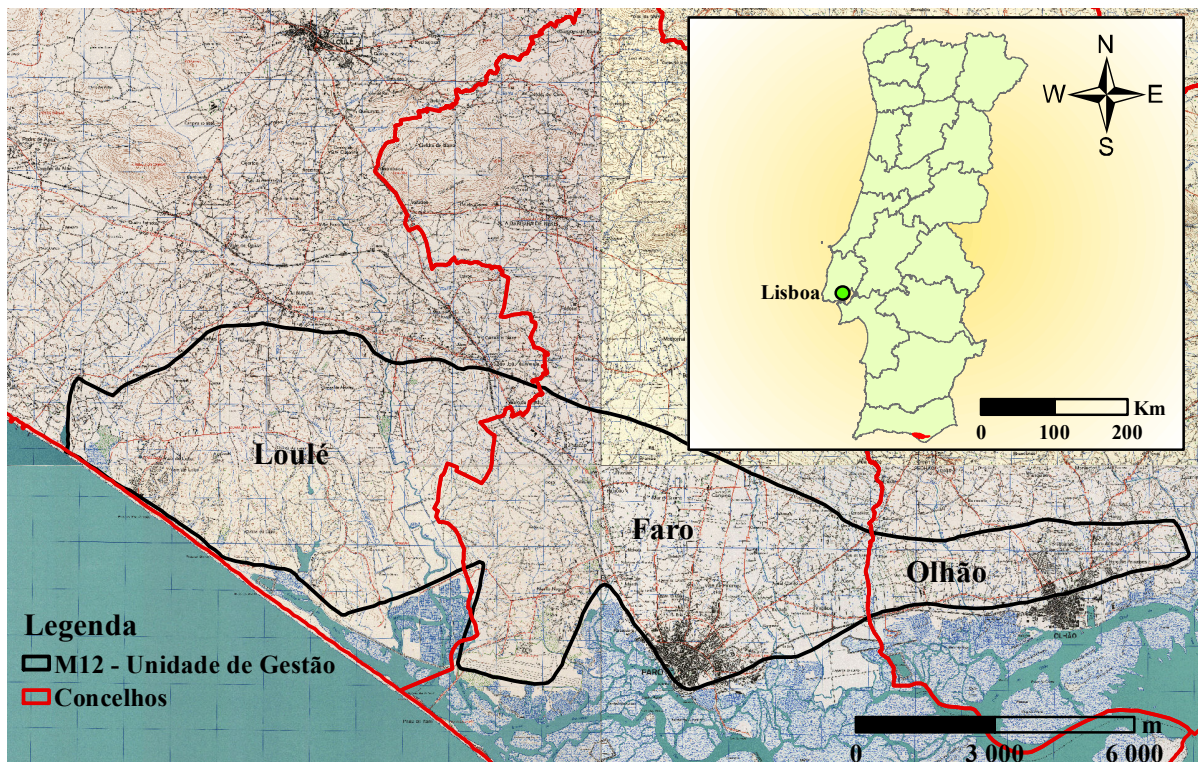


Figura 3.1 - Localização da Unidade de Gestão do sistema aquífero da Campina de Faro

3.2 Caracterização Climatológica

O clima da área circundante ao sistema da Campina de Faro é classificado de mediterrânico semiárido com temperaturas médias anuais de 16,3°C. As temperaturas mínimas são registadas frequentemente em janeiro com valores regulares de 9,9°C e as máximas em agosto com valores médios de 23,3°C. A precipitação média anual registada no Aeroporto Internacional de Faro é de 531 mm, porém a evapotranspiração potencial da área de estudo é consideravelmente superior (1700 mm). A sazonalidade da precipitação está bem vincada nesta região, dado que os períodos secos ocorrem habitualmente entre maio e setembro e os húmidos entre outubro e abril (Stigter et al. 1998; Stigter 2005).

As estações climatológicas e udométricas localizadas nas proximidades do sistema da Campina de Faro são: Arábia, Estoi, Fuseta, Loulé, Olhão, Quelfes e São Brás de Alportel (Figura 3.2).

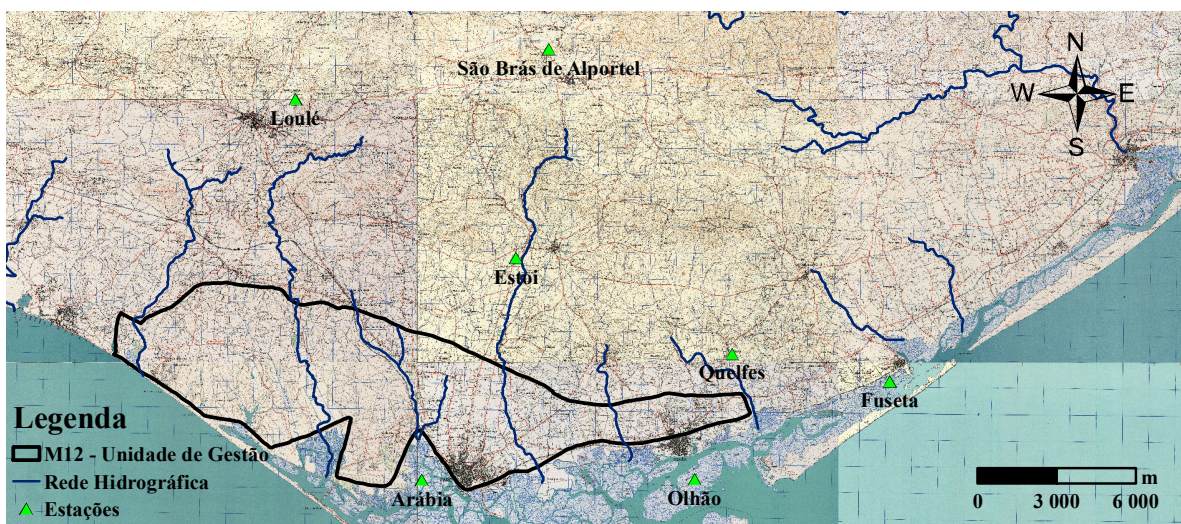


Figura 3.2 - Localização das estações climatológicas e udométricas

No Quadro 3.1 está representada a informação geral das referidas estações (SNIRH 2015).

Quadro 3.1 - Informação geral sobre as estações climatológicas e udométricas

Código	Nome	Altitude (m)	Início	Fim	Estado	Precipitação Média Anual (mm)
31J/03U	Arábia	1	01/10/79	30/09/85	Extinta	365,18
31J/04UG	Estoi	63	01/08/80	-	Ativa	616,98
31K/03U	Fuseta	2	01/10/79	30/09/85	Extinta	360,96
31I/01UG	Loulé	212	13/09/31	-	Ativa	673,64
31J/05U	Olhão	3	01/10/79	30/09/85	Extinta	498,32
31K/02UG	Quelfes	24	01/08/80	-	Ativa	606,66
31J/01C	S. B. Alportel	334	01/10/00	-	Ativa	827,27

Segundo a informação disponibilizada anteriormente, constata-se que a precipitação tende a ser superior a norte comparativamente aos valores registados no litoral. Isto é, a estação localizada mais a norte (São Brás de Alportel) foi a que registou a precipitação média anual mais elevada com cerca de 827,27 mm, enquanto a estação ativa situada mais a sul (Quelfes) apenas registou um valor a rondar os 606,66 mm. Deduz-se que exista uma tendência de diminuição da precipitação de norte para sul, em conformidade com o decréscimo da orografia (elevação do terreno).

3.3 Enquadramento Geológico

O sistema da Campina de Faro encontra-se localizado na Orla Meridional de Portugal. Os limites da sua Unidade de Gestão são: a norte as formações do Jurássico e do Cretácico, a sul a Ria Formosa e o Oceano Atlântico, a este o aldeamento de Marim e a oeste o sistema aquífero de Quarteira (Figura 3.3). Autores como Almeida et al. (2000), presumem que possivelmente existam conexões hidráulicas com o sistema de Quarteira.

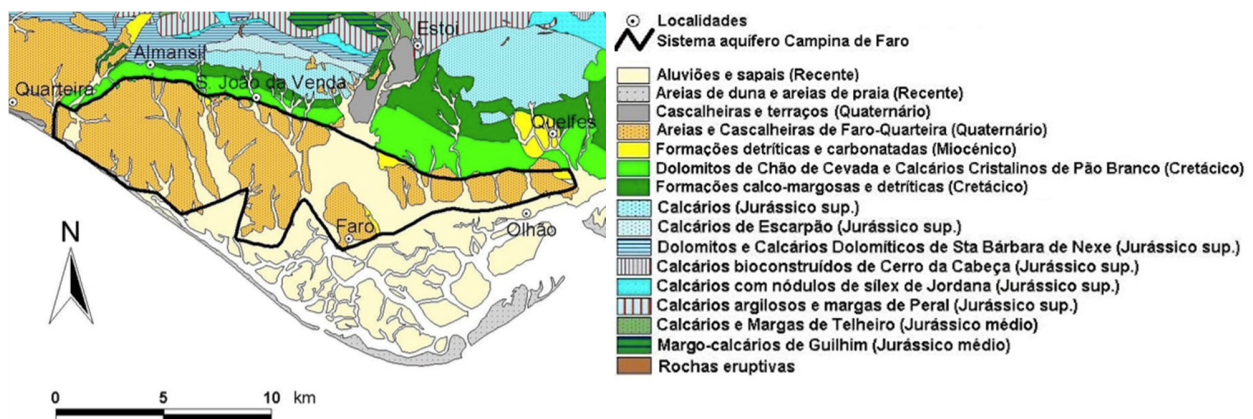


Figura 3.3 - Enquadramento litoestratigráfico do sistema aquífero da Campina de Faro
(Adaptado de Almeida et al. 2000)

A área envolvente é caracterizada por ser monoclinal de direção norte-sul, com uma sequência estratificada de formações sedimentares compreendidas entre os períodos do Jurássico e do Quaternário.

As formações do Cretácico são constituídas basicamente por calcários arenosos e margosos, dolomites, dolomitos, margas, conglomerados e arenitos finos e grosseiros (Manuppella et al. 1987; Diamantino 2009). Em relação às formações do Miocénico, existem três grandes afloramentos em toda a extensão da área de estudo, correspondentes aos Siltes Glauconíticos da Campina de Faro, aos Calcários das Galvanas e aos Conglomerados das Galvanas. Os Calcários

das Galvanas são compostos essencialmente por camadas de biocalcarenitos, fósseis e seixos de quartzo, enquanto os Siltes Glauconíticos são compostos por siltes ricos em glauconite.

As formações de cobertura do Miocénico pertencentes ao período do Quaternário (Plistocénico e Holocénico), designadas por Areias e Cascalheiras de Faro-Quarteira, acomodam na sua grande maioria depósitos de areia, arenitos argilosos, cascalheiras e conglomerados do Plio-Quaternário (Almeida et al. 2000; Diamantino 2009).

3.3.1 Hidrogeologia

De acordo com Stigter (2005), do ponto de vista hidrogeológico o sistema aquífero da Campina de Faro é composto por um conjunto de três aquíferos distintos (Figura 3.4). O aquífero mais antigo e profundo, também definido por aquífero cretácico ou primeiro aquífero é formado essencialmente por calcários, margas e dolomites do Cretácico sobrejacentes às formações sedimentares do Jurássico. Estas formações afloram a norte deste sistema, tendo uma inclinação preferencial entre 20 a 30 graus para sul, encontrando-se o seu topo a uma profundidade de 200 metros nas proximidades da cidade de Faro. Estima-se que a sua espessura máxima possa chegar a 1000 metros, nomeadamente na zona este da área de estudo (Manuppella 1992). O aquífero miocénico (segundo aquífero), semi-confinado/confinado¹ é formado por calcarenitos ricos em fósseis do Miocénico. Estes encontram-se integrados numa estrutura do tipo *graben* (depressão de origem tectónica) em forma de degraus com várias falhas de alinhamento com direção norte-sul originada pela deposição de calcários, areias finas e margas depois do fim do período do Cretácico. A sua espessura aumenta de norte para sul, excedendo os 200 metros perto do litoral (Silva 1988; Stigter 2005).

Em relação ao terceiro aquífero, frequentemente chamado de freático ou livre, é constituído por sedimentos detríticos (areias finas) do Miocénico e pelas areias e cascalheiras do Plio-Quaternário, que se depositaram ao longo da estrutura irregular anteriormente referida. Estima-se que contenha uma espessura máxima de 50 metros na zona central do sistema. As sucessivas erosões marítimas e fluviais ocorridas durante o Holocénico, foram regularmente acompanhadas pela deposição de uma fina camada de argila ao longo de toda a área. Devido ao facto da camada de argila depositada possuir uma espessura muito reduzida, acabou por não alterar as

¹ Não existe uniformidade em relação à classificação do segundo aquífero.

propriedades freáticas do aquífero, permitindo que este fosse recarregado de forma direta (Stigter 2005).

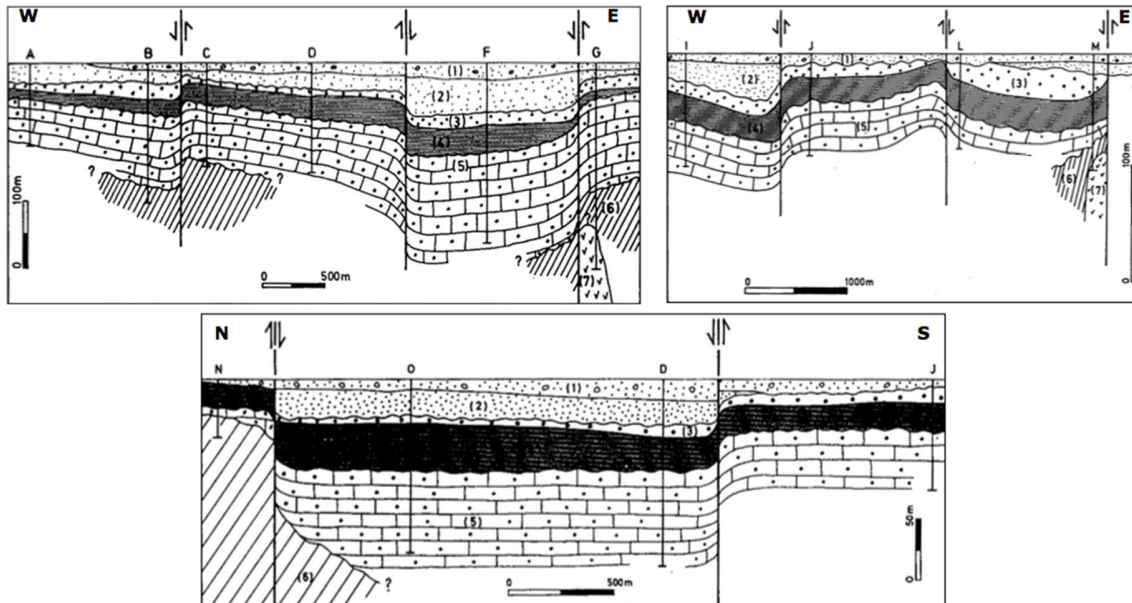


Figura 3.4 - Perfil geológico do sistema aquífero da Campina de Faro proposto por (Silva et al. 1986) . Legenda: (1) Aluvião; (2) Quaternário Arenoso; (3) Miocénico arenoso fino; (4) Miocénico argilo-silto-arenoso; (5) Miocénico calcário e calco-arenoso; (6) Cretácico; (7) Rochas evaporíticas; (A, B, C, D, F, G, I, J, L, N, O) sondagens de captação, ↓↑ falha geológica (Adaptado de Diamantino 2009)

Em conformidade com Silva et al. (1986) e Almeida et al. (2000), os aquíferos semi-confinado e freático, estão separados entre si por uma camada confinante ou aquitardo. Esta teoria é corroborada pela realização de trabalhos de campo e por sondagens geológicas (*logs*) onde se observaram caudais independentes entre eles. A separação deve-se à presença de vários níveis siltosos, arenosos e argilosos com espessuras variáveis entre os dois aquíferos. No entanto, presume-se que possam existir conexões hidráulicas entre eles, dada a inexistência da camada confinante em alguns setores do sistema. Estas conexões podem também ter sido provocadas de forma artificial aquando da construção de furos de captação de maiores profundidades.

O aquífero freático tem como principal fonte de recarga a precipitação direta. Esta ocorre através da infiltração ao longo das camadas detriticas de cobertura bem como dos leitos de diversos cursos de água superficial que atravessam a área de estudo. A ribeira do Rio Seco é o principal curso de água superficial de todo o sistema. De acordo com Almeida et al. (2000), a infiltração proveniente do leito desta ribeira ocorre essencialmente na área a jusante da localidade de Estoi, com perdas de caudal a rondar os 100%. Os valores da recarga anual são normalmente proporcionais aos excedentes hídricos, decrescendo de norte para sul, fruto da diminuição da

precipitação e do aumento da evapotranspiração (Diamantino 2009). O escoamento preferencial da água subterrânea neste aquífero ocorre de norte para sul.

Em relação ao aquífero semi-confinado presume-se que a recarga seja efetuada de maneira diferente, ou seja, de forma indireta. Supõe-se que esta tenha origem nas infiltrações ocorridas nas camadas calcárias das formações do Cretácico e do Jurássico localizadas a norte, processo facilitado pela presença de falhas geológicas que promovem o escoamento da água para sul. Estas falhas situam-se possivelmente entre as Navalhas e Gambelas a oeste de Faro, bem como no corredor que acompanha o curso superior da ribeira do Rio Seco a norte desta cidade (Almeida et al. 2000; Stigter 2005).

3.4 Balanço Hídrico

O balanço hídrico (entradas e saídas) do sistema da Campina de Faro ainda é alvo de grande incerteza nos dias de hoje. Esta incógnita deve-se sobretudo ao facto de subsistirem dúvidas em relação à recarga média anual, fruto do desconhecimento da distribuição e do volume de água que entra neste sistema através de transferências originárias de aquíferos localizados a norte.

Na quantificação da recarga direta (precipitação) deste sistema existe igualmente alguma incerteza, dado que autores como Lobo Ferreira (1981), Almeida et al. (2000), Lobo Ferreira et al. (2006) e por fim o Ministério da Agricultura do Mar do Ambiente e do Ordenamento do Território (2012a), estimaram diferentes valores. Lobo Ferreira (1981) refere que a recarga é de 13,87 hm³/ano, enquanto Almeida et al. (2000) estima um valor a rondar os 10 hm³/ano para a totalidade da Unidade de Gestão (86,4 km²), com uma precipitação média anual de 550 mm e uma taxa de infiltração no aquífero freático entre 15 a 20%. Lobo Ferreira et al. (2006) através do uso de um modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário, estimou que a recarga é de 11,98 hm³/ano. O Ministério da Agricultura do Mar do Ambiente e do Ordenamento do Território (2012a) calculou um valor médio anual de 9,95 hm³/ano.

Este desconhecimento e falta de consenso contribui igualmente para a subavaliação e indeterminação do valor exato da recarga total e consequentemente do balanço hídrico (Alcobia et al. 2013).

Em relação à extração para abastecimento urbano, o volume máximo extraído ocorreu no ano de 1994 (2,3 hm³/ano) (Almeida et al. 2000). Atualmente, estima-se que o volume extraído seja

significativamente inferior, devido à implementação do abastecimento urbano com recurso à água superficial. No que concerne à extração de água subterrânea para fins agrícolas, a bibliografia existente e a informação disponibilizada pela APA IP-ARH Algarve estimam que ronde os 12 hm³/ano.

3.5 Uso do Solo

Ao longo de séculos, na Campina de Faro o solo sempre foi particularmente utilizado para fins agrícolas. Numa época anterior à exploração de água proveniente de noras, a atividade agrícola era essencialmente baseada em culturas de poucas necessidades hídricas, tais como o cultivo de alfarrobas, figueiras e oliveiras. Contudo, no fim do século XIX, com a construção das tradicionais noras com captação de água do aquífero freático, verificou-se um desenvolvimento das técnicas de irrigação, resultando na substituição das culturas referidas. Estas foram trocadas pelas de regadio, como por exemplo os citrinos e as horticulturas. Com a forte expansão agrícola observada nas últimas décadas e conseqüente aumento das necessidades hídricas associadas, verificou-se um abandono progressivo das noras em favor da construção de furos de maior rentabilidade, com captações situadas a grandes profundidades, que vieram intensificar a exploração do aquífero semi-confinado comparativamente ao freático. Nos dias de hoje, as culturas de citrinos correspondem a cerca de 54% da área cultivada total, enquanto as horticulturas equivalem a 37,3% (Stigter 2005).

3.6 Caracterização Piezométrica e Qualitativa

A monitorização quantitativa e qualitativa tem um papel preponderante em sistemas aquíferos propensos a fortes pressões externas naturais ou antropogénicas, como é o caso do sistema da Campina de Faro. Através da realização desta caracterização pretendeu-se obter informação acerca do comportamento deste sistema, visto que foram analisados mapas e séries piezométricas dos aquíferos freático e semi-confinado, assim como das concentrações de cloretos neste último.

Para a elaboração dos mapas piezométricos recorreu-se à informação obtida pela rede de monitorização pública da APA IP-ARH Algarve, denominada por SNIRH (2015) e do trabalho realizado por Stigter & Dill (2001) para a Universidade do Algarve. A necessidade da inclusão deste estudo deveu-se à incompleta informação disponibilizada pelo SNIRH relativamente ao aquífero freático. Devido ao facto dos resultados obtidos por Stigter & Dill (2001) abrangeram

somente os anos hidrológicos entre 1997/1998 a 1998/1999, os mapas piezométricos dos aquíferos freático e semi-confinado apenas foram caracterizados neste curto espaço de tempo.

De modo a transmitir um conhecimento mais detalhado do sistema, coincidindo com a precipitação anual registada pelo SNIRH na estação de Estoi (registo realizado unicamente entre os anos de 1995/1996 a 2007/2008), usou-se exclusivamente a informação recolhida por esta entidade nos anos anteriormente referidos, aquando da elaboração das séries piezométricas dos aquíferos freático e semi-confinado. Estes dados foram igualmente utilizados na construção do mapa e das séries relativas às concentrações de cloretos no aquífero semi-confinado, visto não existir informação disponível sobre os cloretos existentes no freático.

Para a elaboração do mapa e das séries piezométricas do aquífero freático foram considerados os seguintes piezómetros (Figura 3.5):

- SNIRH – 610/167, 610/6, 611/217, 611/91;
- UAlg– 12, 18, 16, 17, 30, 33, 44, 5, 55, 56, 59, 60, 74, 75, 79, 82, 84, s16, s4, L1, L2, L3, L4, L5, L6, L9.

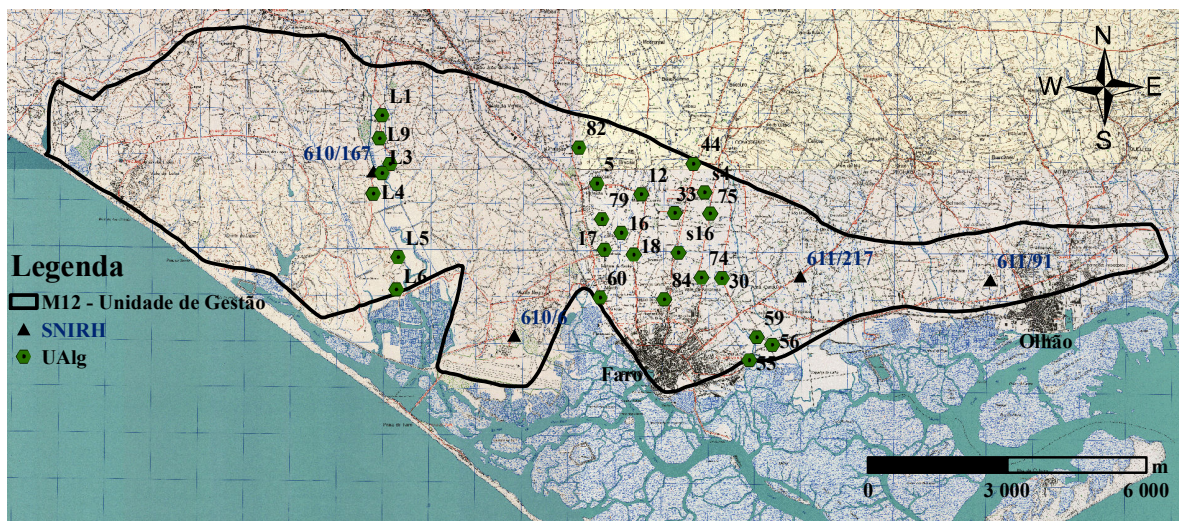


Figura 3.5 - Localização dos piezómetros no aquífero freático

Foram considerados os seguintes piezómetros na realização dos mapas e das séries piezométricas do aquífero semi-confinado (Figura 3.6):

- SNIRH – 606/1026, 606/1033, 606/1057, 606/647, 610/183, 611/115, 611/200, 611/209, 611/230, 611/233, 611/234, 611/236, 611/237.

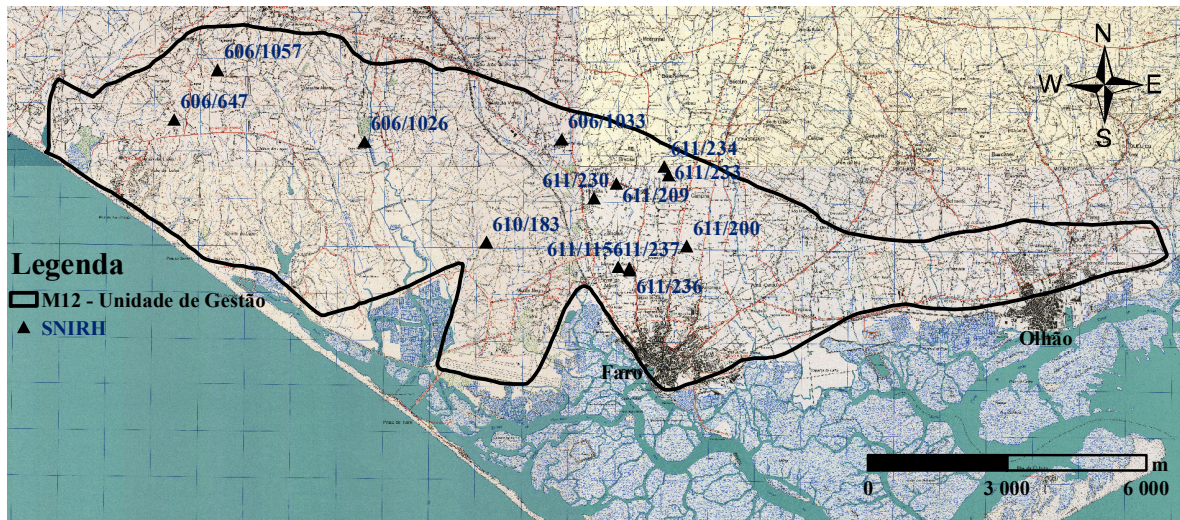


Figura 3.6 - Localização dos piezómetros no aquífero semi-confinado

Relativamente à rede de monitorização da qualidade (cloretos) do SNIRH, consideram-se apenas os seguintes piezómetros (Figura 3.7):

- SNIRH – 606/1019, 606/434, 610/168, 610/186, 610/187, 610/20, 611/201, 611/225, 611/229, 611/242, 611/246 e 611/92.

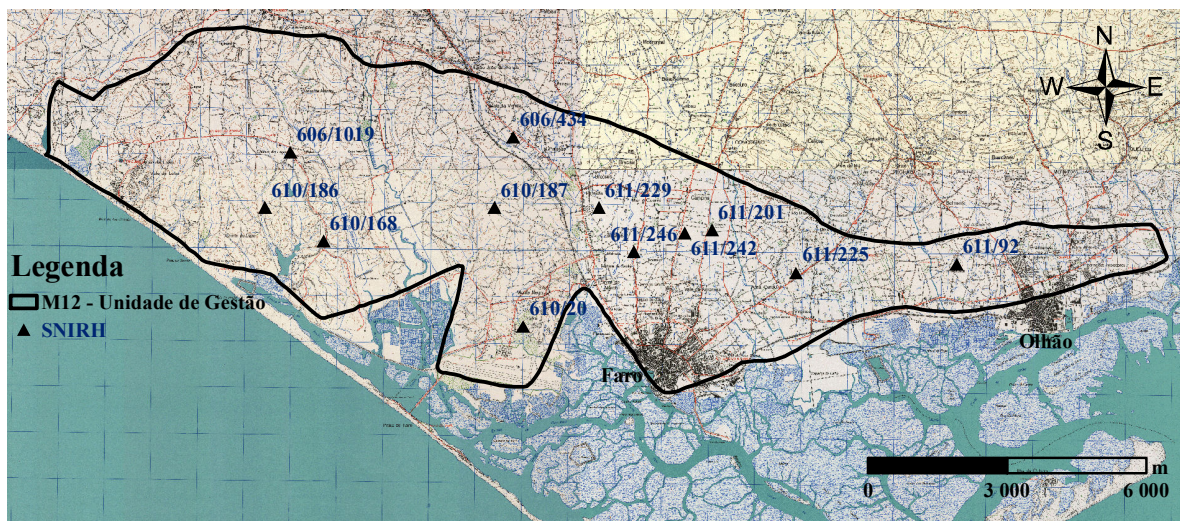


Figura 3.7 - Localização dos piezómetros da rede de qualidade no aquífero semi-confinado

3.6.1 Análise Piezométrica dos aquíferos freático e semi-confinado

Na Figura 3.8 está representado o mapa piezométrico do aquífero freático em relação ao nível médio do mar, de acordo com os valores medianos obtidos pela rede de monitorização do SNIRH e da Universidade do Algarve entre os anos hidrológicos de 1997/1998 a 1998/1999. As isolinhas representam as cotas dos níveis piezométricos (metros) em relação ao nível médio do mar.

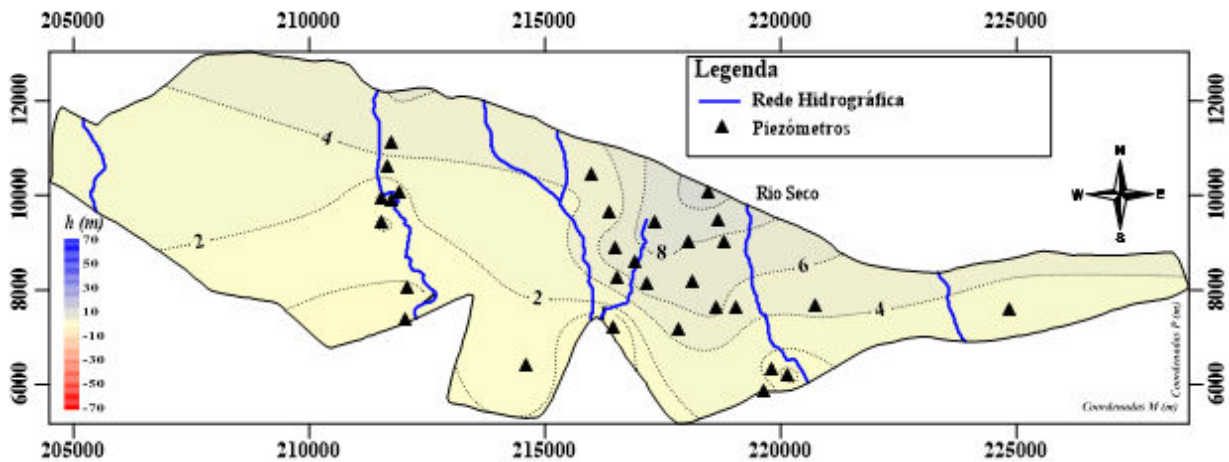


Figura 3.8 - Níveis piezométricos do aquífero freático entre os anos hidrológicos de 1997/1998 e 1998/1999

Neste aquífero verificou-se a existência de níveis piezométricos superiores a norte e níveis mais baixos a sul, sugerindo a existência de descarga na Ria Formosa e no Oceano Atlântico. Subentende-se que a presença de maiores cargas hidráulicas a norte possam ser potenciadas pela maior infiltração ocorrida nas camadas detriticas, face aos maiores índices de precipitação e menor evapotranspiração registada nesta zona.

O mapa apresenta igualmente uma maior piezometria nas imediações do Rio Seco, corroborando Almeida et al. (2000), já que estes autores afirmam que a referida ribeira é o principal curso de água superficial que contribui com recarga ao aquífero freático.

Na Figura 3.9 está representado o mapa piezométrico do aquífero semi-confinado em relação ao nível médio do mar, tendo em consideração os valores medianos obtidos pela rede de monitorização do SNIRH e da Universidade do Algarve entre os anos hidrológicos de 1997/1998 a 1998/1999.

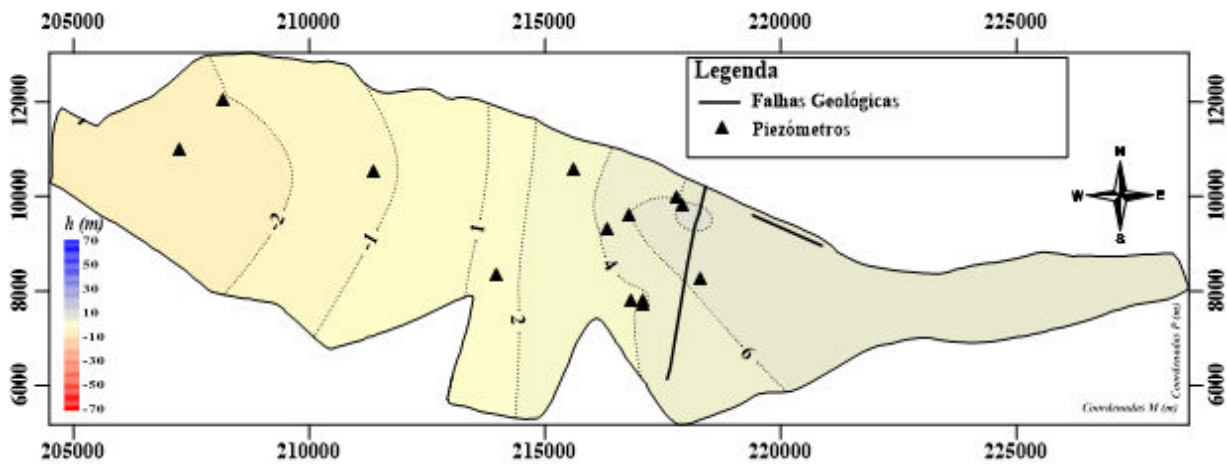


Figura 3.9 - Níveis piezométricos do aquífero semi-confinado entre os anos hidrológicos de 1997/1998 e 1998/1999

À semelhança do que é verificado no aquífero freático, também no semi-confinado foram visíveis maiores níveis piezométricos a norte. Presume-se que o facto das cargas hidráulicas serem mais elevadas nesta zona se devam à possível recarga indireta deste aquífero, isto é, à entrada de água proveniente das formações do Cretácico e do Jurássico localizadas a norte deste sistema. O escoamento é possivelmente facilitado pela presença de falhas geológicas.

Este aquífero apresentou uma piezometria negativa na parte oeste da Unidade de Gestão, consequência da forte extração de água subterrânea existente nas urbanizações de Vale do Lobo e Quinta do Lago. A presença de áreas agrícolas e de campos de golfe neste local, aliados ao facto do semi-confinado ser mais explorado do que o freático, tem como efeito a redução significativa dos níveis piezométricos.

Os aquíferos semi-confinado e freático apresentam um escoamento preferencial idêntico, com as maiores cargas hidráulicas localizadas a norte a convergirem para sul.

3.6.2 Séries Piezométricas dos aquíferos freático e semi-confinado

Na Figura 3.10 estão representadas as séries piezométricas medianas obtidas no aquífero freático pela rede de monitorização do SNIRH, entre os anos hidrológicos de 1995/1996 e 2007/2008.

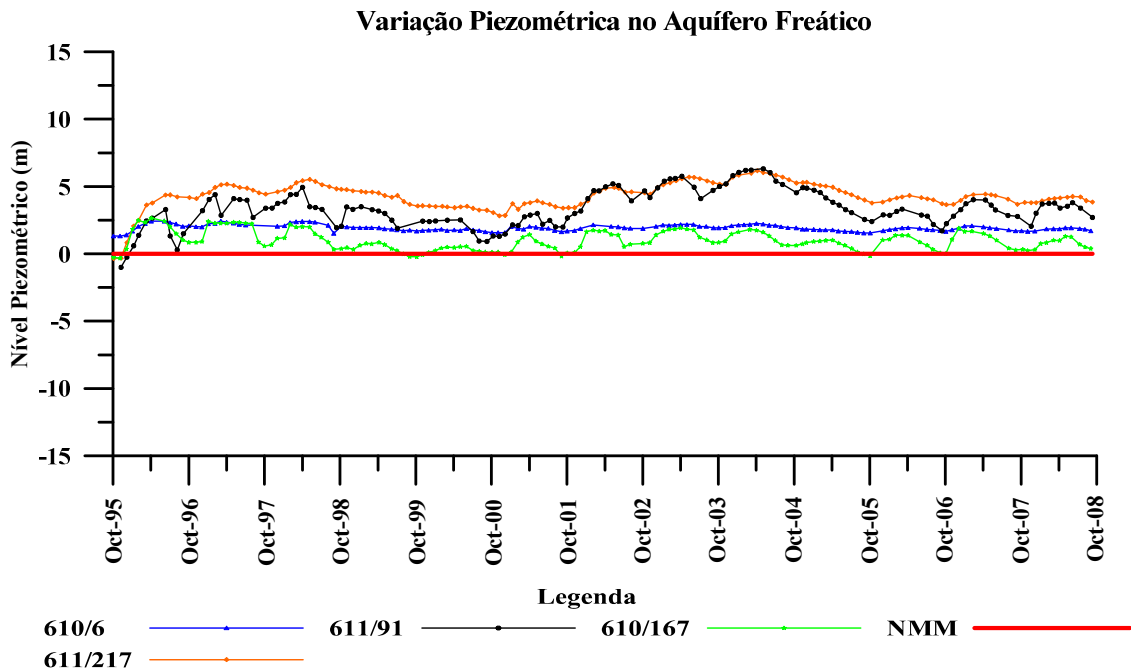


Figura 3.10 - Séries piezométricas do aquífero freático entre os anos hidrológicos de 1995/1996 e 2007/2008

Através da leitura das séries piezométricas do aquífero freático foi possível constatar que os quatro piezómetros apresentaram comportamentos diferenciados entre si. No entanto, verificaram-se pequenas oscilações da piezometria ao longo dos anos, devido à sazonalidade da precipitação e ao facto deste aquífero ser pouco explorado. Os níveis tenderam a apresentar valores máximos nos meses húmidos e mínimos nos meses mais secos. Ou seja, conclui-se que o comportamento deste aquífero é influenciado fundamentalmente por fatores naturais externos, especificamente os índices de precipitação e de evapotranspiração.

Comparando a presente série piezométrica com os valores de precipitação anuais obtidos na estação de Estoi (31J/04UG) (Figura 3.11), foi possível observar-se uma correspondência entre os aumentos dos níveis piezométricos e os anos com maiores precipitações, bem como o inverso. O aumento da piezometria ocorrido entre 2000/2001 e 2002/2003 quando foram registados bons índices de precipitação e a diminuição considerável dos níveis aquando da grave seca sentida entre 2003 a 2005, constituem um bom exemplo da situação anteriormente descrita.

Na Figura 3.11 estão representadas as precipitações anuais registadas na estação de Estoi (31J/04UG) entre os anos hidrológicos de 1995/1996 e 2007/2008 (SNIRH 2015).

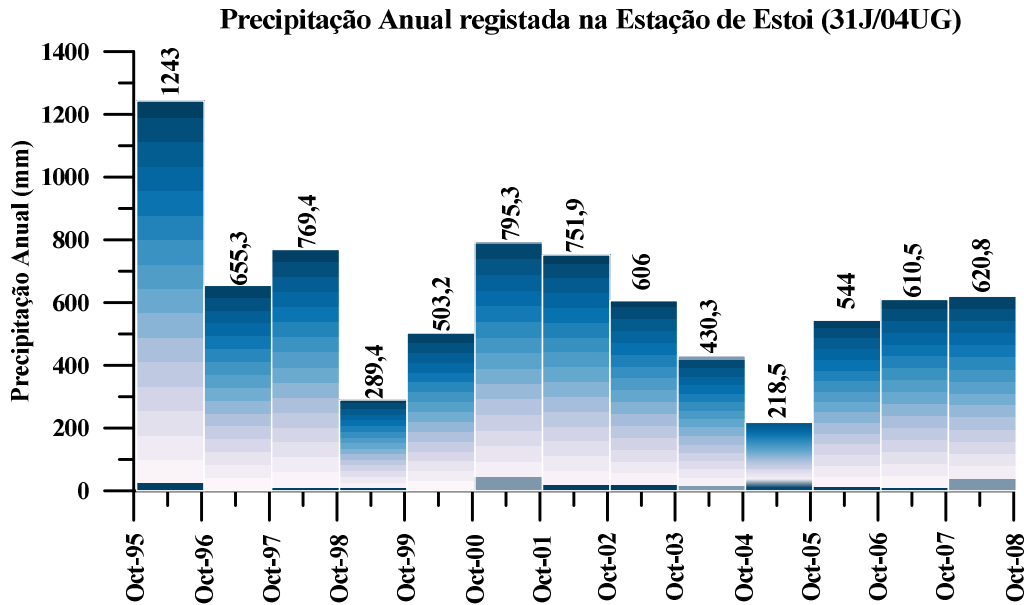


Figura 3.11 - Precipitação anual registada na estação de Estoi (31J/04UG) entre os anos hidrológicos de 1995/1996 e 2007/2008

Na Figura 3.12 é possível analisar as séries piezométricas medianas do aquífero semi-confinado, obtidas pela rede de monitorização do SNIRH entre os anos hidrológicos de 1995/1996 a 2007/2008.

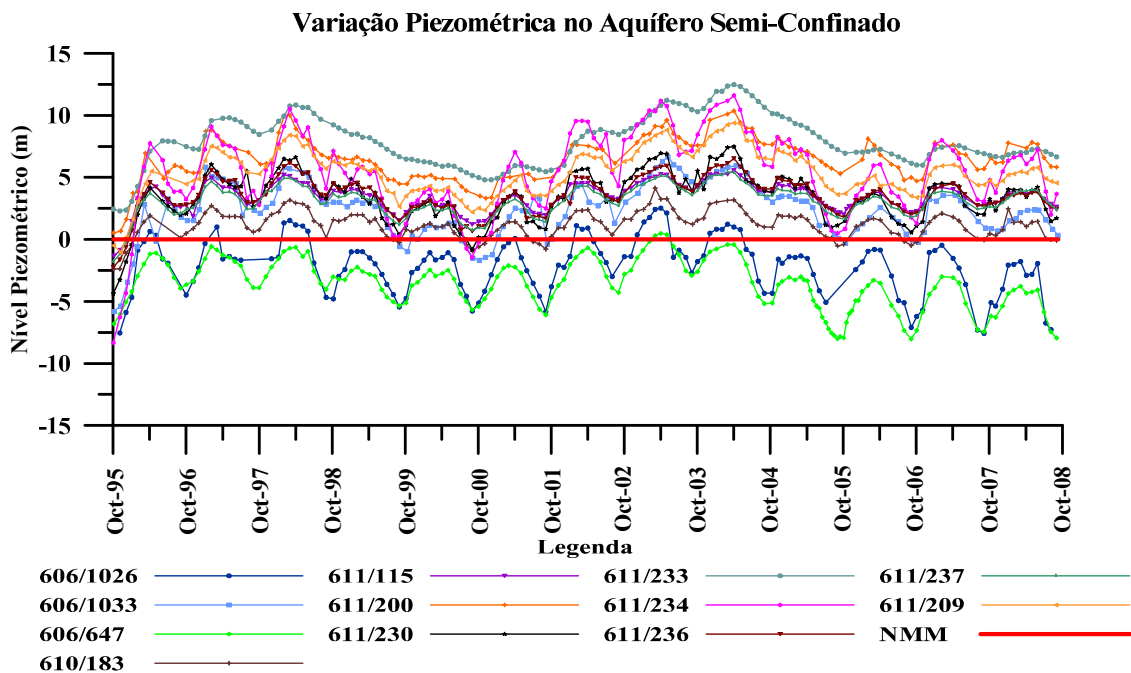


Figura 3.12 - Séries piezométricas do aquífero semi-confinado entre os anos hidrológicos de 1995/1996 e 2007/2008

No aquífero semi-confinado foi igualmente possível observar a presença de variações sazonais dos níveis piezométricos. No entanto, estas foram mais evidentes do que as registadas no freático. Esta forte amplitude dos níveis piezométricos deve-se ao facto do semi-confinado ser mais explorado do que o freático. Os níveis tendem normalmente a aumentar aquando da diminuição da extração de água nos meses húmidos e a decrescer nos meses secos, face ao aumento das extrações. Nas séries piezométricas deste aquífero constatou-se a existência de aumentos dos níveis piezométricos em três momentos distintos, sendo estes coincidentes com a elevada precipitação registada nos anos de 1995/1996, 1997/1998 e 2000/2001. A diminuição da piezometria ocorreu nos anos de 1998/1999 e 2004/2005 face aos baixos índices de precipitação registados (Figura 3.11).

Os piezómetros localizados nas imediações de Vale do Lobo e Quinta do Lago (606/647 e 606/1026) apresentaram frequentemente níveis piezométricos negativos durante o espaço de tempo analisado. A presença de piezometria negativa neste local dever-se-á às elevadas extrações de água provocadas pela exploração de campos de golfe e agrícolas nas proximidades. Em relação aos piezómetros 611/233 e 611/234, a contínua piezometria elevada sugere que estes estejam localizados onde se supõe que haja recarga de água proveniente de sistemas aquíferos situados a norte da área de estudo.

3.6.3 *Qualidade da Água - Concentração de Cloretos*

Na Figura 3.13 está representado o mapa das concentrações medianas de cloretos no aquífero semi-confinado, de acordo com os dados obtidos pela rede de monitorização de qualidade do SNIRH, entre os anos hidrológicos de 1995/1996 a 2007/2008.

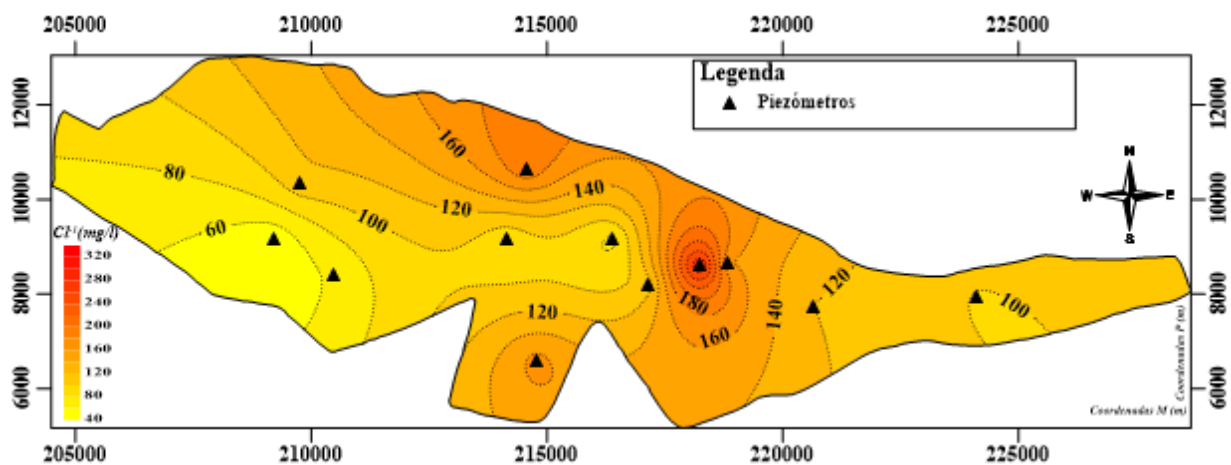


Figura 3.13 - Mapa da concentração de cloretos do aquífero semi-confinado entre os anos hidrológicos de 1995/1996 e 2007/2008

De acordo com o mapa, foi possível observar que as concentrações de cloretos foram superiores na zona central da Unidade de Gestão. Em conformidade com o Ministério da Agricultura do Mar do Ambiente e do Ordenamento do Território (2012a), a presença de maiores concentrações de cloretos neste local poderá dever-se à existência de estruturas diapíricas aflorantes. Para além destas estruturas, o aumento do teor de cloretos pode ter sido influenciado pelas elevadas extrações de água subterrânea associadas a fenómenos cíclicos resultantes da rega agrícola, assim como da ocorrência pontual de casos de intrusão salina.

Na Figura 3.14 estão representadas as séries das concentrações de cloretos medianas obtidas pela rede de monitorização do SNIRH no aquífero semi-confinado, entre os anos hidrológicos de 1995/1996 a 2007/2008.

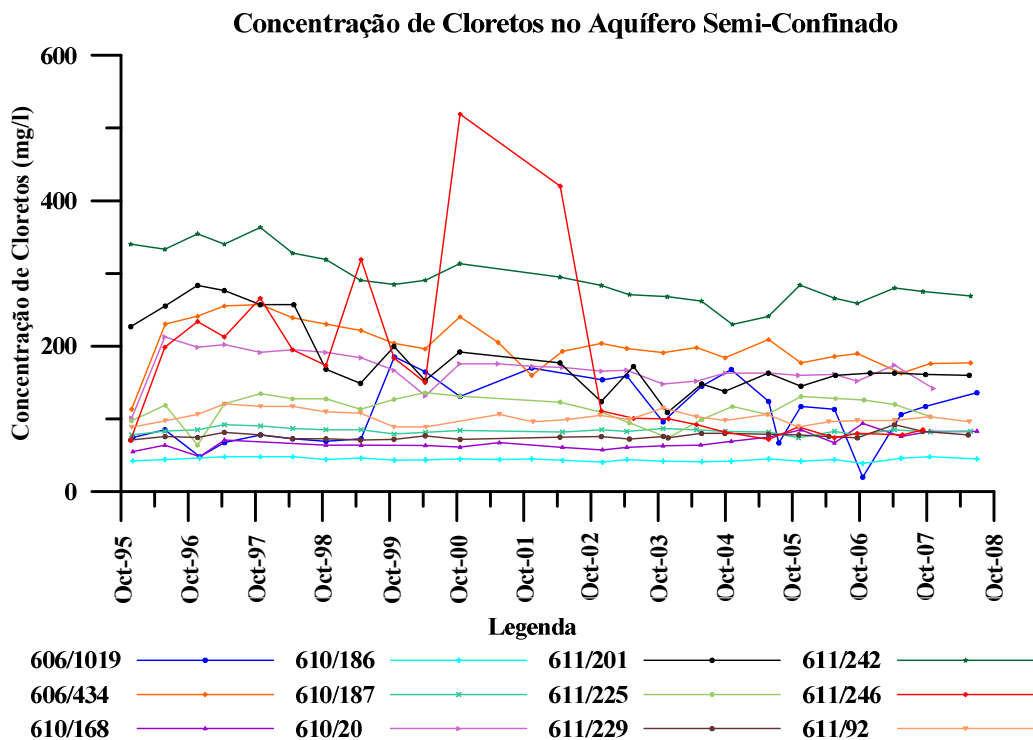


Figura 3.14 - Séries das concentrações de cloretos no aquífero semi-confinado entre os anos hidrológicos de 1995/1996 e 2007/2008

No aquífero semi-confinado foi possível observar que as concentrações de cloretos variaram pouco durante o período de tempo analisado. Em relação ao piezómetro 611/246, constatou-se a existência de um aumento brusco da concentração entre 1999/2000 a 2001/2002, podendo este estar associado à diminuição da piezometria registada nas suas proximidades (611/236, 611/237 e 611/115). De acordo com esta informação, considera-se que provavelmente tenha ocorrido neste local um caso pontual de intrusão salina durante os anos referidos.

Relativamente à área circundante a Vale do Lobo e Quinta do Lago onde foram registados baixos níveis piezométricos, seria de esperar a presença de concentrações de cloretos mais elevadas. No entanto, a informação registada nos piezómetros mais próximos (606/1019 e 606/168) foi inconclusiva, assinalando apenas uma ligeira subida das concentrações a partir do ano de 2006/2007. Com o intuito de se obter um conhecimento mais conciso dos últimos anos, optou-se por alongar a análise dos piezómetros referidos até ao final do ano de 2012/2013 (Figura 3.15).

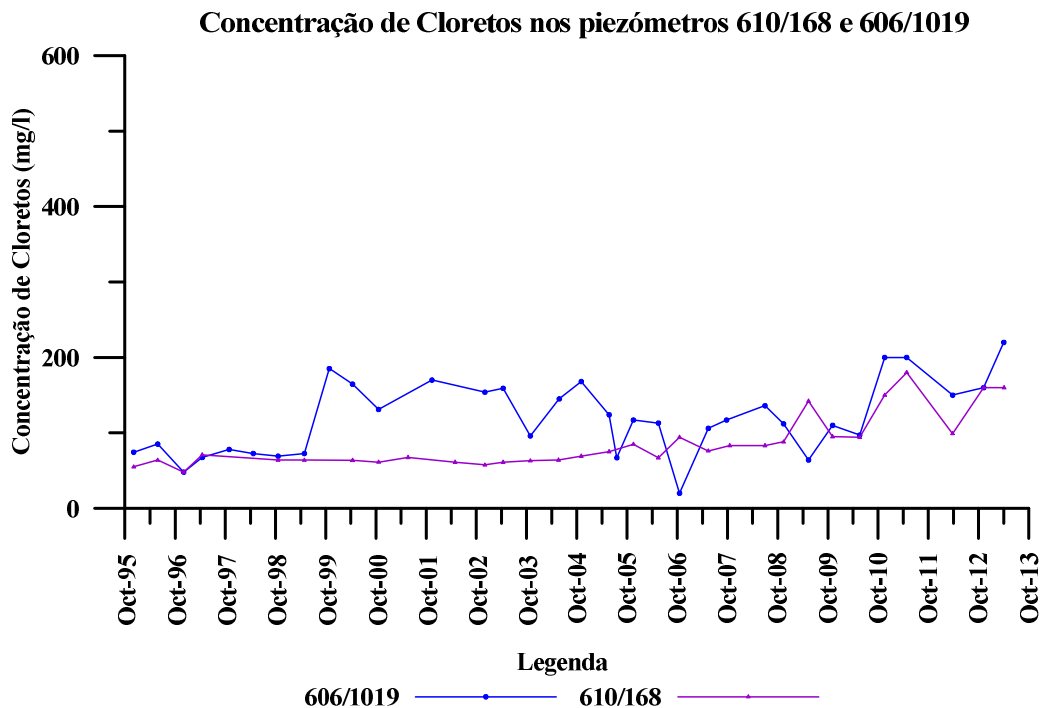


Figura 3.15 - Séries das concentrações de cloretos nos piezómetros 610/168 e 606/1019 entre os anos hidrológicos de 1995/1996 e 2012/2013. Como se pode constatar, as concentrações de cloretos registadas no aquífero semi-confinado nas zonas envolventes a Vale do Lobo e Quinta do Lago apresentaram um aumento constante ao longo dos últimos anos, indiciando provavelmente a ocorrência de um fenómeno gradual de intrusão salina. A explicação para a subida dos teores de cloretos poderá dever-se ao decréscimo contínuo da piezometria registada nesta zona desde 2004/2005 (Figura 3.16).

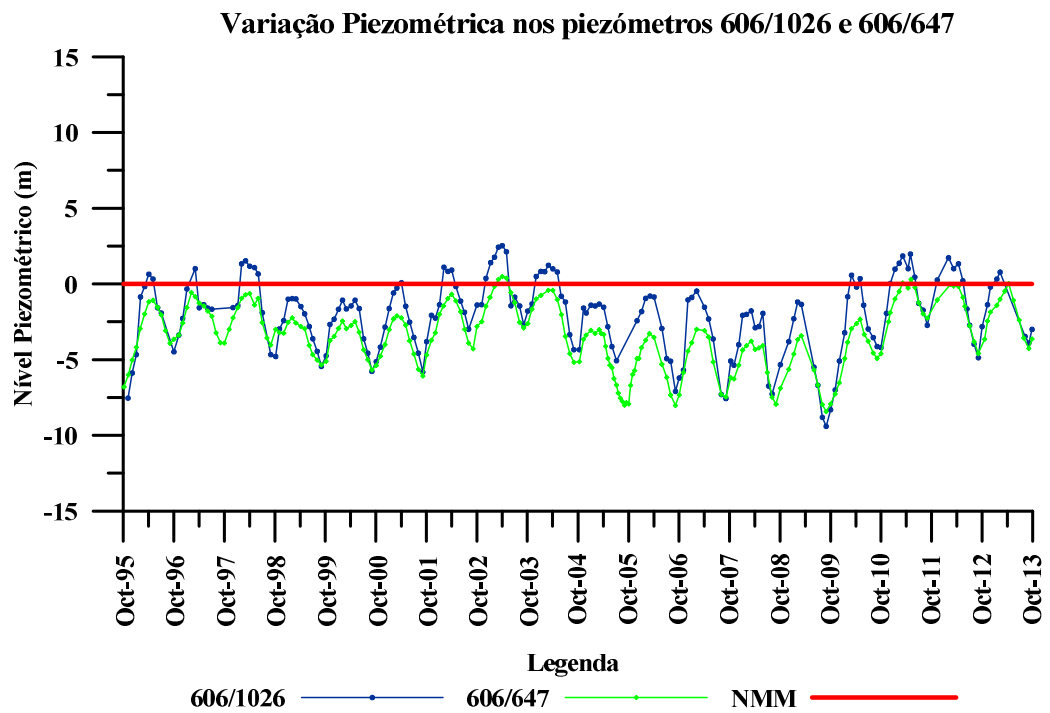


Figura 3.16 - Séries piezométricas nos piezômetros 606/1026 e 606/647 entre os anos hidrológicos de 1995/1996 e 2012/2013

4 Metodologia

A metodologia de suporte ao desenvolvimento deste trabalho seguiu as seguintes etapas: 1) conceção do modelo conceptual do sistema aquífero da Campina de Faro através do tratamento de dados de informação bibliográfica, geográfica e piezométrica de todo o sistema; 2) tradução do modelo conceptual num modelo numérico de escoamento de elementos finitos; 3) aplicação do método de calibração inversa de modo a otimizar o modelo numérico de escoamento; 4) realização das simulações em regime permanente dos diferentes cenários de exploração e de alterações climáticas; 5) aplicação do método analítico de *Ghyben-Herzberg* para a determinação da extensão da intrusão salina associada a cada um dos cenários simulados.

4.1 Modelo Conceptual do Sistema Aquífero da Campina de Faro

Através da análise de trabalhos realizados previamente, tais como Almeida et al. (2000), Lobo Ferreira et al. (2006), Stigter (2005), Diamantino (2009) Silva et al. (1986) e Stigter et al. (1998), bem como da informação disponibilizada pela APA IP-ARH Algarve (SNIRH) e Universidade do Algarve (balanços, piezometria, hidrogeologia, caudais de base e extrações), foi possível idealizar o modelo conceptual do funcionamento deste sistema.

Neste modelo foram consideradas as seguintes camadas constituintes do sistema aquífero da Campina de Faro:

- Aquífero freático, constituído pelas areias finas do Miocénico e cascalheiras do Plio-Quaternário;
- Camada confinante ou aquitardo, composta pelos níveis silteosos, arenosos e argilosos do Miocénico;
- Aquífero semi-confinado, constituído pelos calcareníticos do Miocénico.

Definiu-se que o aquífero freático seja recarregado em toda a sua extensão de forma direta pela precipitação, para além da existência de entradas de água procedentes das ribeiras do Carcavai, São Lourenço, Biogal, Rio Seco e Bela Mandil, nos locais onde estas apresentam comportamentos influentes. Em relação ao aquífero semi-confinado não existe informação consolidada quanto à sua forma de recarga. Dado presumir-se que esta tenha origem nas formações do Jurássico e do Cretácico, considerou-se que o sistema da Campina de Faro

receberia água dos sistemas aquíferos de Almancil-Medronhal (M9) e São João da Venda-Quelfes (M10). A escolha destes sistemas deveu-se essencialmente ao facto da investigação realizada por Almeida et al. (2000), sugerir que estes são constituídos essencialmente pelas formações referidas anteriormente e por estarem localizados nas imediações.

No presente modelo conceptual definiu-se também a existência de possíveis conexões hidráulicas entre os aquíferos freático e semi-confinado, através da camada confinante. Estas dependem fundamentalmente, do potencial hidráulico existente nos respetivos aquíferos, ocorrendo normalmente no sentido descendente.

Foi igualmente tido em consideração que possivelmente a área total do sistema aquífero da Campina de Faro não se cinja apenas aos atuais limites da Unidade de Gestão. Deste modo, definiu-se que o sistema se estenderia em cerca de 2 km para sul, abrangendo também as zonas subsequentes às da Ria Formosa e do Oceano Atlântico.

Na Figura 4.1 encontra-se representado o esquema da estrutura do modelo conceptual idealizado para o sistema aquífero da Campina de Faro.

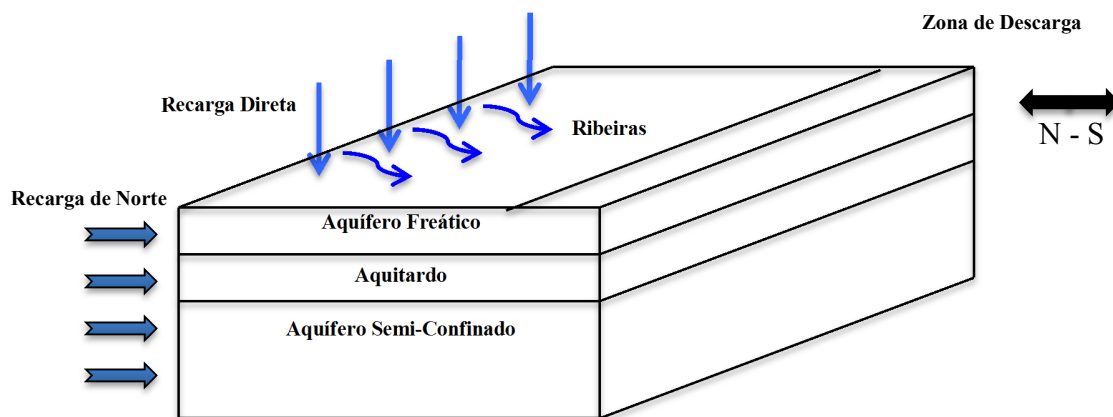


Figura 4.1 - Modelo conceptual do sistema aquífero da Campina de Faro

4.2 Modelo Numérico de Escoamento do Sistema Aquífero da Campina de Faro

Como forma de resolução de todas as questões relacionadas com o modelo conceptual do sistema aquífero da Campina de Faro referido anteriormente, foi construído um modelo numérico de escoamento de elementos finitos para este sistema. Para tal, foi utilizado o programa informático FEFLOW (*Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System*) desenvolvido pela WASY (*Institute for Water Resources Planning and Systems Research*). Este *software* utiliza o método numérico de elementos finitos para resolver a equação que descreve o escoamento subterrâneo. Torna-o mais realista na caracterização de aquíferos, permitindo uma tradução mais precisa da geometria/limites, bem como do regime de escoamento através da anisotropia e heterogeneidade do meio (Diersch 2014; Diamantino 2009).

O modelo conceptual concebido para o sistema da Campina de Faro foi então traduzido numa rede tridimensional de 80004 elementos triangulares e 54484 nós em todo o seu domínio, tendo em conta a sua estrutura base, a localização dos principais componentes do sistema e as condições de fronteira. Os valores e a distribuição espacial da recarga foram impostos no modelo e as estimativas de extração para o uso agrícola, distribuídas de acordo com as captações de água conhecidas, sendo estas atribuídas aos respetivos nós.

Estabeleceu-se um modelo tridimensional (3D) de zona saturada, constituído por três camadas (*layers*) e quatro planos (*slices*). A primeira camada correspondeu ao aquífero freático, a segunda à camada confinante ou aquífero aqüardo e a terceira ao aquífero semi-confinado.

No interior dos limites da Unidade de Gestão, o primeiro plano correspondeu à elevação máxima da piezometria alcançada pelo aquífero freático. Fora destes, nas zonas correspondentes à Ria Formosa e ao Oceano Atlântico, a elevação correspondeu à batimetria obtida pelo projeto LiDAR, que fora atualizada pelo Centro de Investigação Marinha e Ambiental da Universidade do Algarve (CIMA). Para se delimitar os diversos canais de navegação, sapais, ilhas barreira e sistemas dunares existentes nesta zona, foi utilizada a informação geológica das litologias superficiais obtidas por Manuppella et al. (1987).

Em relação aos planos 2, 3 e 4 as suas elevações advêm da compilação da informação realizada por Diamantino (2009), acerca da estrutura geológica do sistema aquífero da Campina de Faro.

Esta informação resultou de estudos realizados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Silva et al. (1986), Silva (1988), Van Ooijen et al. (1996) e Geinaert et al. (1982) com base na utilização de *logs* de furos e de piezómetros e na interpretação de SEVs (sondagens elétricas verticais). Esta coletânea de dados encontra-se disponível no Anexo I.

Para o segundo plano (fundo do aquífero freático/topo da camada confinante), definiu-se a elevação estimada referente à base da formação do Miocénico detrítico, tendo sido fixado uma espessura mínima de 5 metros para o aquífero freático. No terceiro plano (fundo da camada confinante/topo do aquífero semi-confinado) definiu-se a elevação respeitante à base das formações argilo-silto-arenosas do Miocénico. Em virtude da falta de dados na zona este da área de estudo, relativamente à elevação das formações anteriormente referidas, foi necessário impor-se um conjunto de valores tendo em conta a informação obtida por Stigter (2005) e Silva (1988). A espessura mínima considerada para a camada confinante foi de 2,5 metros. Para o quarto e último plano (fundo do aquífero semi-confinado), definiu-se a elevação da base correspondente à formação calcária e calco-arenosa do Miocénico. Para o aquífero semi-confinado fixou-se uma espessura mínima de 10 metros.

Toda a informação utilizada para a construção dos planos do modelo numérico foi previamente trabalhada no *software* Surfer 11, no qual foram feitas interpolações de *Kriging*, que posteriormente foram adicionadas ao FEFLOW.

Na Figura 4.2 está representada a estrutura do modelo numérico de escoamento do sistema aquífero da Campina de Faro.

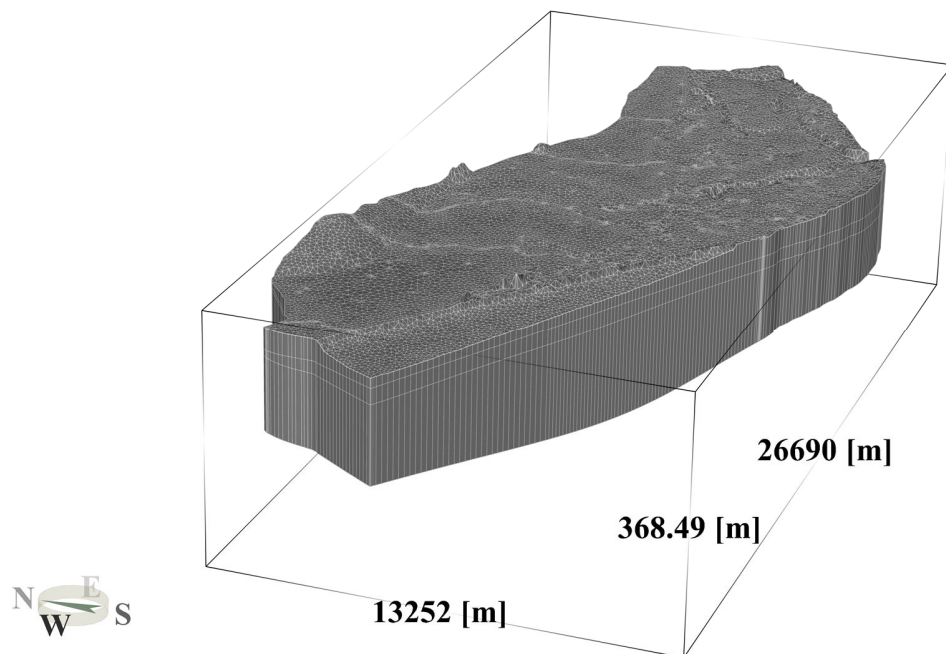


Figura 4.2 - Estrutura do modelo numérico de escoamento do sistema aquífero da Campina de Faro

4.2.1 Recarga Direta

Finalizada a construção da estrutura do modelo numérico, adicionou-se a recarga direta ou precipitação. Para tal, foram utilizados em toda a extensão do aquífero freático os valores da precipitação determinados por Nicolau (2002). O autor através da utilização de algoritmos preparados com a aplicação conjunta de técnicas de geoestatística e de variáveis auxiliares determinantes (por exemplo a altimetria), conseguiu realizar uma análise espacial da precipitação. Desta forma, com uma resolução espacial de 1 km^2 , o autor concebeu mapas de precipitação que cobrem totalmente a área de Portugal Continental.

Para a recarga direta do modelo numérico foi definida uma taxa de infiltração de 17,5% no aquífero freático. Esta opção é justificada pelo facto de Almeida et al. (2000) estimarem uma variação da taxa para o aquífero em análise situada entre os 15 e os 20%. Apesar dos mapas de precipitação realizados por Nicolau (2002) cobrirem igualmente as zonas envolventes da Ria Formosa e do Oceano Atlântico, considerou-se a existência de recarga exclusivamente nos locais com elevações superiores às do nível médio do mar (0 metros) (Figura 4.3).

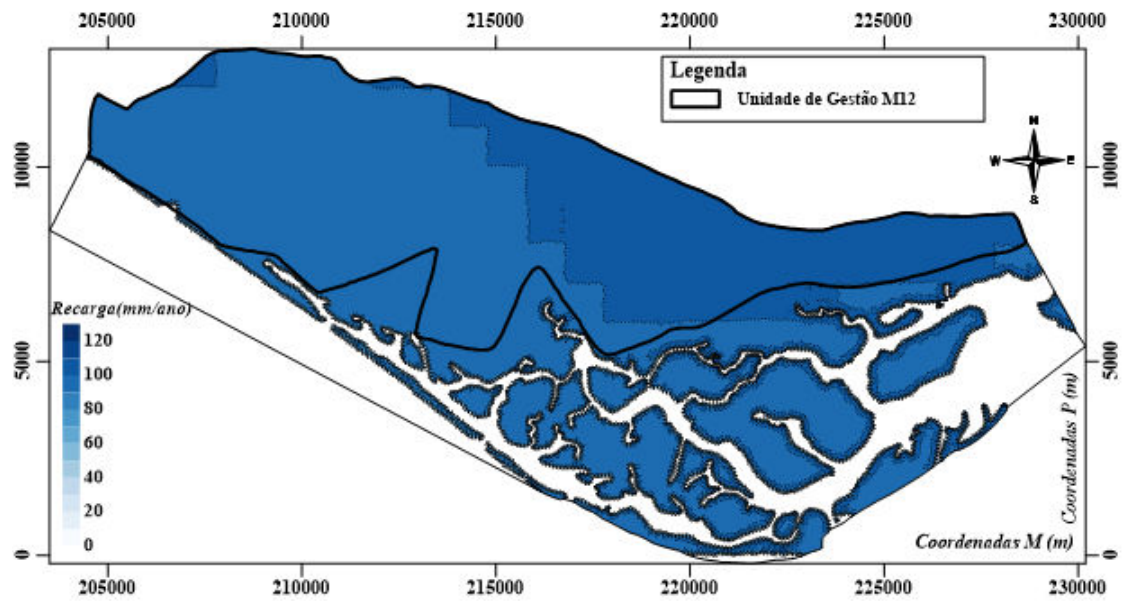


Figura 4.3 - Recarga direta no modelo numérico de escoamento do sistema aquífero da Campina de Faro

4.2.2 Condições de Fronteira

A imposição das condições de fronteira no modelo numérico teve em consideração o comportamento hidráulico do sistema aquífero da Campina de Faro, através da análise piezométrica e do conhecimento hidrogeológico descrito pela bibliografia existente.

Na primeira camada correspondente ao aquífero freático, definiu-se como zona de descarga do escoamento subterrâneo os canais de navegação na Ria Formosa e as áreas abrangidas pelo Oceano Atlântico. De modo a representar a descarga subterrânea foram impostas condições de fronteira do tipo *Dirichlet*, com um potencial hidráulico constante de $h=0$ metros (Figura 4.4).

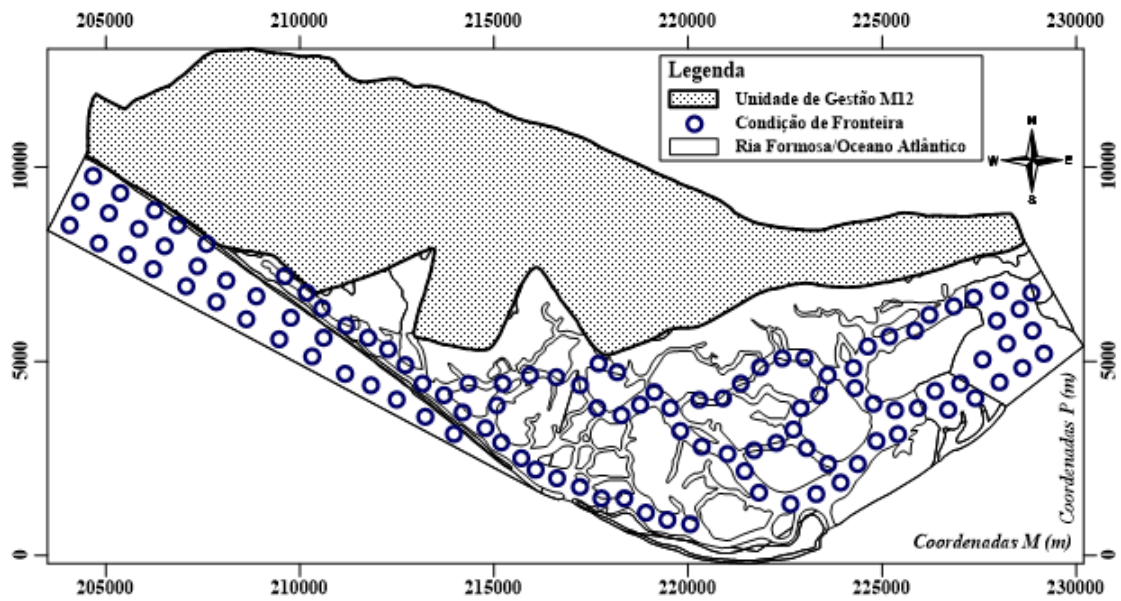


Figura 4.4 - Condições de fronteira de *Dirichlet* impostas no modelo numérico

No aquífero freático foram igualmente impostas condições de fronteira de fluxo constante (*Neumann*), com o objetivo de representarem a entrada de água proveniente das principais ribeiras que cruzam o sistema da Campina de Faro. Foi apenas considerada a existência de recarga nos locais onde estas provavelmente tenham um comportamento influente (Figura 4.5).

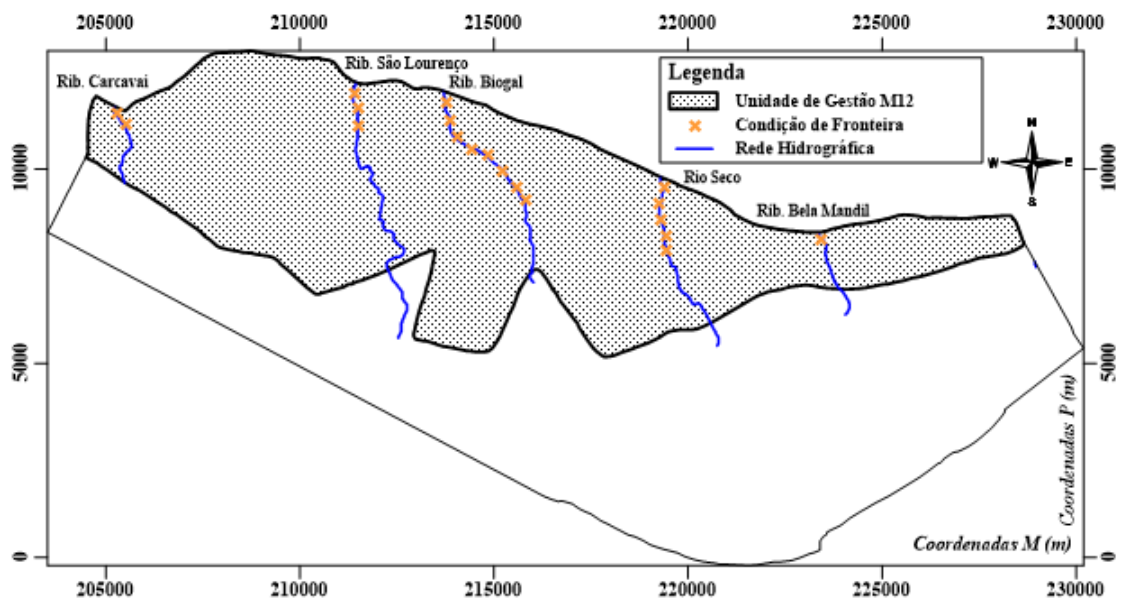


Figura 4.5 - Condições de fronteira de *Neumann* impostas no modelo numérico

Para a sua imposição foram utilizados os valores médios anuais dos caudais registados pelo Ministério da Agricultura do Mar do Ambiente e do Ordenamento do Território (2012a). De acordo com este organismo, a recarga de água total, que entra no sistema com origem nos principais cursos de água superficiais equivale a 1,66 hm³/ano. O Rio Seco contribui com um

volume correspondente a 23% do total e as ribeiras do Carcavai e São Lourenço de 22% e 15% respetivamente. Face à inexistência de valores respeitantes aos caudais das ribeiras de Bela Mandil e Biogal, considerou-se que estas equivaleriam ao restante, todavia esta suposição poderá estar incorreta.

No Quadro 4.1 estão representados os caudais das principais ribeiras que cruzam o sistema aquífero da Campina de Faro.

Quadro 4.1 - Caudais das principais ribeiras que cruzam o sistema aquífero da Campina de Faro

Ribeiras	Caudal hm^3/ano	Caudal Específico (m/d)
Rio Seco	0,38	0,0089
Carcavai	0,36	0,0208
São Lourenço	0,25	0,0531
Biogal	0,34	0,0059
Bela Mandil	0,34	0,0874

Considerando o facto da bibliografia existente indicar que o sistema da Campina de Faro, nomeadamente o aquífero semi-confinado seja recarregado de forma indireta através de transferências oriundas de norte, indefinidas relativamente ao formato de entrada e à quantidade de água associada, foi necessário aplicar-se três variantes distintas no que respeita à forma de entrada da água. Impôs-se ao modelo numérico diferentes condições de fronteira do tipo *Cauchy* nas variantes consideradas, partindo-se do pressuposto que a origem da recarga seja proveniente dos sistemas aquíferos de Almancil-Medronhal (M9) e São João da Venda-Quelfes (M10). Assim sendo, conjecturou-se a existência de trocas de água entre estes sistemas e o da Campina de Faro, em função das diferenças de potencial hidráulico e do coeficiente de transferência.

Na primeira variante do modelo numérico, considerou-se que o sistema aquífero da Campina de Faro seria recarregado ao longo dos limites norte da Unidade de Gestão numa extensão compreendida entre as ribeiras do Biogal e do Rio Seco. Foi imposta uma condição de fronteira de *Cauchy* na extensão considerada com um potencial hidráulico de referência de $h=22$ metros em todas as camadas do modelo numérico. Este valor resultou da análise piezométrica mediana obtida entre os anos hidrológicos de 1989/1990 e 2013/2014 pela rede de monitorização do SNIRH nos sistemas aquíferos M9 e M10 (Figura 4.6).

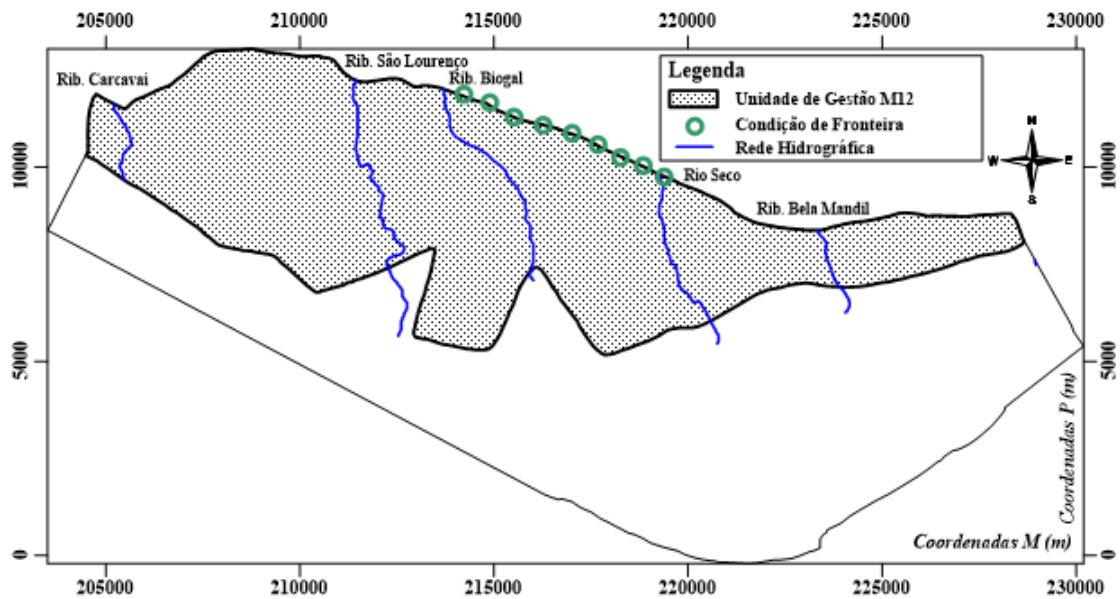


Figura 4.6 - Condição de fronteira de *Cauchy* imposta na primeira variante do modelo numérico

Na segunda variante, considerou-se que o sistema aquífero da Campina de Faro seria recarregado através de uma falha geológica existente no aquífero semi-confinado a nordeste da cidade de Faro. Foi imposta uma condição de fronteira de *Cauchy* na camada correspondente ao aquífero semi-confinado ao longo da falha referida, tendo sido considerado um potencial hidráulico de referência de $h=22$ metros, valor resultante da piezometria mediana obtida nos sistemas M9 e M10 pela rede de monitorização do SNIRH, entre 1989/1990 e 2013/2014 (Figura 4.7).

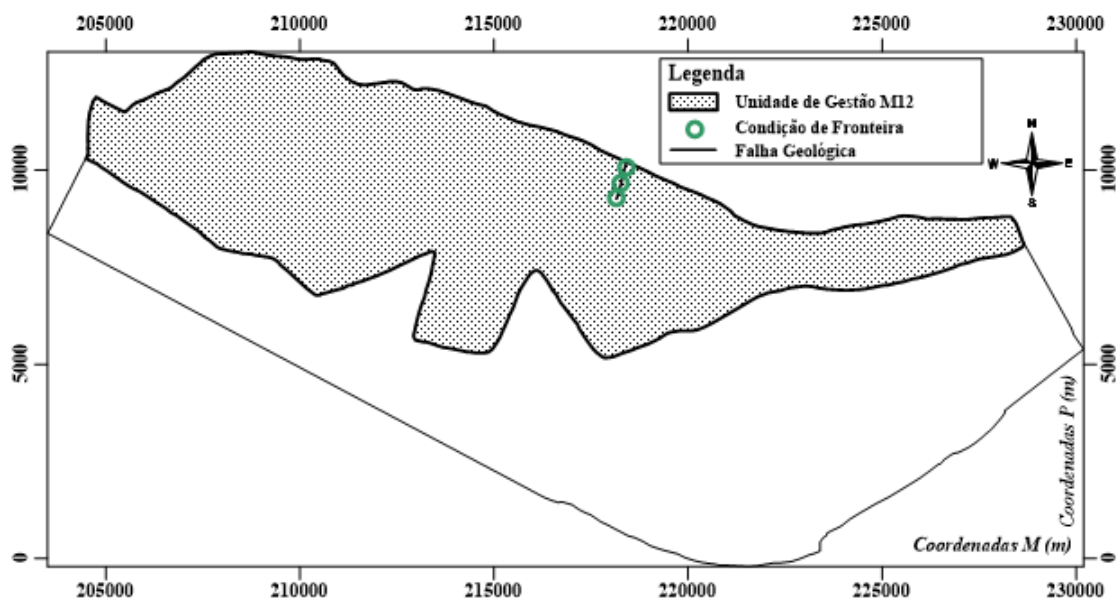


Figura 4.7 - Condição de fronteira de *Cauchy* imposta na segunda variante do modelo numérico

Em relação à terceira variante do modelo numérico, definiu-se que o sistema da Campina de Faro seria recarregado ao longo de uma extensa área a norte. Para tal, foi imposta uma condição de fronteira de *Cauchy* em todas as camadas do modelo numérico, entre o limite oeste do sistema e a ribeira do Rio Seco. Nesta condição foram definidos três potenciais hidráulicos de referência em três zonas distintas. Entre o limite oeste do sistema e a ribeira de São Lourenço um $h=14$ metros, entre as ribeiras de São Lourenço e Biogal um $h=16$ metros e entre as ribeiras do Biogal e do Rio Seco um $h=22$ metros. A imposição destes valores deveu-se à piezometria mediana obtida entre os anos hidrológicos de 1989/1990 e 2013/2014 pela rede de monitorização do SNIRH nos sistemas aquíferos M9 e M10 (Figura 4.8).

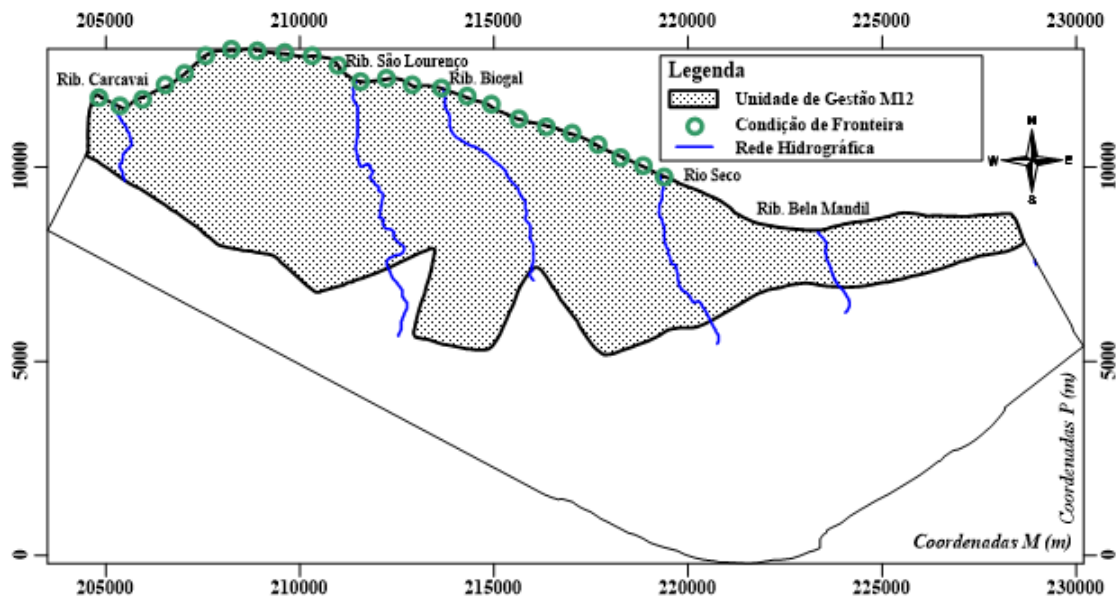


Figura 4.8 - Condição de fronteira de *Cauchy* imposta na terceira variante do modelo numérico

4.3 Calibração Inversa do Modelo Numérico de Escoamento do Sistema Aquífero da Campina de Faro

Finalizada a construção do modelo numérico de escoamento procedeu-se à sua otimização. Para tal, foi aplicado o método de calibração inversa presente no *software* PEST (*Parameter Estimation*) (Doherty 2002). Com a aplicação deste método, consegue estimar-se de forma automática a distribuição espacial dos parâmetros hidráulicos (condutividade hidráulica neste caso), de modo a obter-se o melhor ajuste possível entre os níveis piezométricos simulados no modelo e os observados no campo.

Em conformidade com os autores Sophocleous (2002), Ackerman et al. (2010) e Reilly (2001), uma boa representação e quantificação dos volumes de água que atravessam as condições de fronteira impostas num determinado modelo numérico são essenciais para a realização de uma boa análise. Face à elevada incerteza envolta às transferências de água com origem a norte, aquando da calibração inversa foi necessário testar-se as três variantes consideradas no modelo numérico, atendendo ao estado atual do sistema da Campina de Faro.

4.3.1 Zonas de Condutividade Hidráulica

De forma a calibrar-se o modelo numérico de escoamento através da piezometria de referência observada *in loco* e em virtude deste modelo ser tridimensional, foi necessário definir-se diferentes zonas (classes) de condutividade hidráulica na área modelada. Devido à pouca variação geológica presente nas diferentes camadas do sistema, a subdivisão das zonas foi realizada em função dos principais cursos de água superficiais existentes na área em estudo. Para tal, delimitou-se um zoneamento simples de três zonas iguais em cada camada, perfazendo um total de nove.

A zona 1 ficou confinada entre os limites oeste do sistema e a ribeira de São Lourenço, a zona 2 ficou limitada pelas ribeiras de São Lourenço e do Biogal, e por fim a zona 3 pela ribeira do Biogal e pelo limite este do sistema (Figura 4.9).

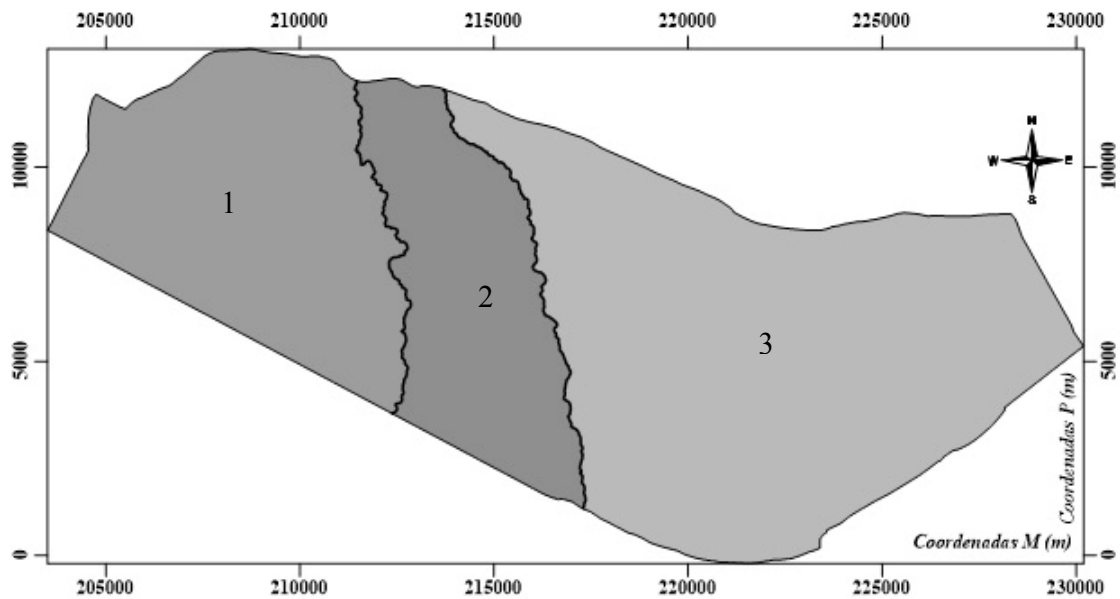


Figura 4.9 - Subdivisão das zonas de condutividade hidráulica no modelo numérico de escoamento do sistema da Campina de Faro

Na fase seguinte à da subdivisão das zonas de condutividade, foram adicionados ao PEST, 16 pontos de observação, facultando a este a informação necessária para se proceder à calibração inversa do modelo numérico de elementos finitos. Os pontos de observação escolhidos corresponderam aos piezómetros da rede de monitorização do SNIRH, tendo sido utilizado como valor “observado” de referência, os níveis piezométricos medianos obtidos entre os anos hidrológicos de 1989/1990 a 2013/2014. Optou-se por este espaço de tempo, porque pretendeu-se que o processo de calibração incidisse em dois períodos da história recente da gestão dos recursos hídricos subterrâneos no Algarve, o antes e o depois da implementação do SMAAA.

Para o aquífero freático consideraram-se os piezómetros:

- 606/1118, 610/167, 610/6, 611/217, 611/91.

E no aquífero semi-confinado foram considerados os piezómetros:

- 606/1026, 606/1033, 606/1461, 606/647, 610/183, 611/115, 611/200, 611/209, 611/230, 611/233 e 611/236.

4.4 Cenários de Exploração e de Alterações Climáticas

Concluído o processo de construção e otimização do modelo numérico de escoamento do sistema aquífero da Campina de Faro, realizou-se a simulação em regime permanente (*Steady State*) dos diferentes cenários.

Em relação aos cenários de exploração propostos pela APA IP-ARH Algarve, foram simulados os seguintes casos:

- Cenário 1 - Área Regada Atual;
- Cenário 2 - Área Regada Atual + Área de Cultivo Abandonada;
- Cenário 3 - Área Regada Atual + Área de Cultivo Abandonada abrangida pela Reserva Agrícola Nacional (RAN);
- Cenário 4 - Área Regada Atual + Área de Cultivo Abandonada fora da Área Crítica;
- Cenário 5 - Área Regada Atual + Área de Cultivo Abandonada abrangida pela RAN fora da Área Crítica.

A *área regada atual*, tal como o nome indica equivale à zona agrícola explorada nos dias de hoje. Esta compreende diferentes tipos de cultura, tais como: citrinos, estufas, golfe, hortícolas, pomares e vinhas. Em relação à *área de cultivo abandonada*, esta corresponde a antigas zonas usadas para fins agrícolas que atualmente estão abandonadas ou em desuso, como por exemplo: pomares de sequeiro, pomares de sequeiro abandonados, citrinos e estufas abandonados, áreas de inculto, mato e pinhal. Nos diferentes cenários hipotéticos de aumento da atividade agrícola, considerou-se que estas seriam novamente reaproveitadas como áreas de cultivo de citrinos com uma dotação estipulada de 6000 m³/ha.ano. Este valor foi calculado a partir da média das extrações de água para este tipo de cultura no ano de 2009 no Sotavento Algarvio (Ministério da Agricultura do Mar do Ambiente e do Ordenamento do Território 2012b).

Para a *área regada atual*, as dotações de rega (m³/ha.ano) dos diferentes tipos de cultura no ano de 2009, segundo o Ministério da Agricultura do Mar do Ambiente e do Ordenamento do Território (2012b) estão presentes no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Dotações de rega para cada tipo de cultura no ano de 2009

Uso do Solo	Dotação (m ³ /ha.ano)
Citrinos	6000
Estufas	13000
Hortícolas	4750
Pomares	4000
Vinha	600

Face ao número insuficiente de dados relativos à extração de água pelos campos de golfe localizados no sistema da Campina de Faro, optou-se pela utilização da informação coletada pela APA IP-ARH Algarve no ano de 2010, junto das entidades responsáveis pela exploração dos ditos campos (Quadro 4.3).

Quadro 4.3 - Extração de água pelos campos de golfe localizados no sistema aquífero da Campina de Faro no ano de 2010

Entidade	Extração (m ³ /ano)
São Lourenço	38180
Laranjal	514870
Quinta do Lago	704788
Pinheiros Altos	670746
Vale do Lobo	500000 (aproximado)
Total	+2428584

Na escolha dos pontos de extração para cada cenário, considerou-se todos aqueles que estavam localizados a uma distância igual ou inferior a 100 metros das áreas regadas e das áreas de cultivo abandonadas. Neste trabalho apenas foram considerados os pontos de extração correspondentes a furos de grandes profundidades, cuja captação se encontra no aquífero semi-confinado. Esta situação advém do abandono das captações de água no aquífero freático, nos moldes mais tradicionais (noras e poços) que se tem vindo a assistir nas últimas décadas.

Em relação aos caudais de extração dos furos, estes resultaram da divisão da extração total de um determinado tipo de cultura pela quantidade existente de furos associados.

Para além da simulação dos cenários de exploração, foram também simulados dois cenários relacionados com os efeitos das alterações climáticas esperados no Algarve entre 2020 e 2050 e entre 2069 e 2099, de acordo como os resultados obtidos por Stigter et al. (2014).

4.5 Determinação da Intrusão Salina

Com o propósito de se realizar uma análise à escala local referente à extensão da intrusão salina no sistema da Campina de Faro, após a simulação dos diferentes cenários foi aplicado aos resultados obtidos, o método analítico de *Ghyben-Herzberg*. A aplicação deste método permite estimar a localização da interface entre a água doce e salgada num determinado aquífero costeiro freático e homogéneo. Este admite que o escoamento da água subterrânea ocorra de forma horizontal e que, conseqüentemente o potencial hidráulico se mantenha constante ao longo de qualquer vertical. Além disso considera igualmente a não existência de escoamento por parte da água salgada.

O método de *Ghyben-Herzberg* carece de algumas limitações, tais como (Monaco & Prouzet 2014): 1) condições hidroestáticas; 2) a interface entre a água doce e salgada é rígida, devido à imiscibilidade dos líquidos; 3) a interface apenas intersecta o nível freático na linha de costa; 4) a descarga da água subterrânea ocorre apenas num único ponto (linha de costa).

Deste modo, a interface considerada é representada por uma superfície plana ou *Sharp Interface*, dado que não se pressupõe a existência de uma zona de transição.

A equação deste método apresenta-se da seguinte forma (Fetter 2001):

$$z = \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} h \quad [4.1]$$

onde z representa a profundidade a que a água salgada se encontra abaixo do nível do mar [L], h a elevação do nível freático acima do nível do mar (potencial hidráulico) [L], ρ_w a densidade da água doce [M/L³] e por fim ρ_s a densidade da água salgada [M/L³]. Visto que na maioria dos casos o ρ_s corresponde 1025 kg/m³ e o ρ_w 1000 kg/m³, chegou-se à conclusão que a cota a que se situa a coluna de água doce abaixo do nível médio do mar é cerca de 40 vezes superior à altura do nível freático acima do nível do mar (Figura 4.10).

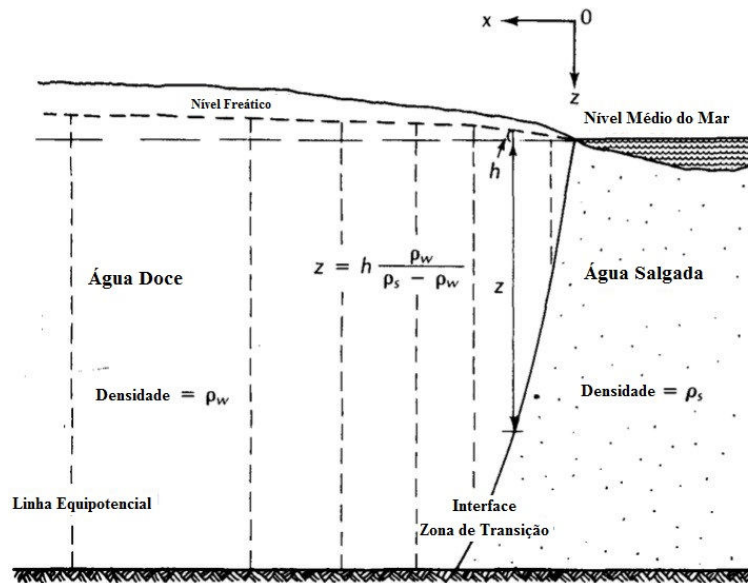


Figura 4.10 - Relação entre o nível freático e a cota da interface entre a água subterrânea e salgada
Adaptado de (Fetter 2001)

Logo, a equação [4.1] é frequentemente expressa de forma simplificada da seguinte forma:

$$z = 40h \quad [4.2]$$

Apesar do método ser fundamentalmente aplicado em aquíferos freáticos, foi também utilizado nos resultados respeitantes ao aquífero semi-confinado. A sua aplicação deveu-se ao facto de Bowen (1986) e Karanth (1987) sugerirem que o método de *Ghyben-Herzberg* também possa ser empregue em aquíferos confinados e semi-confinados.

No aquífero freático foi tido em conta a elevação do topo da camada confinante e no aquífero semi-confinado a elevação da base calcária e calco-arenosa do Miocénico (fundo do semi-confinado). Os mapas das elevações referidas anteriormente estão presentes no Anexo II.

5 Resultados

Neste capítulo foram retratados os resultados obtidos no pré e pós processo de calibração inversa, referente às três variantes do modelo numérico de escoamento do sistema da Campina de Faro. Foram igualmente analisados neste capítulo os resultados das simulações dos diferentes cenários.

5.1 Calibração Inversa - Testes das Variantes do Modelo Numérico

Na Figura 5.1 está representada a correlação entre os níveis piezométricos simulados e observados antes do processo de calibração inversa respeitante à primeira variante do modelo numérico de escoamento.

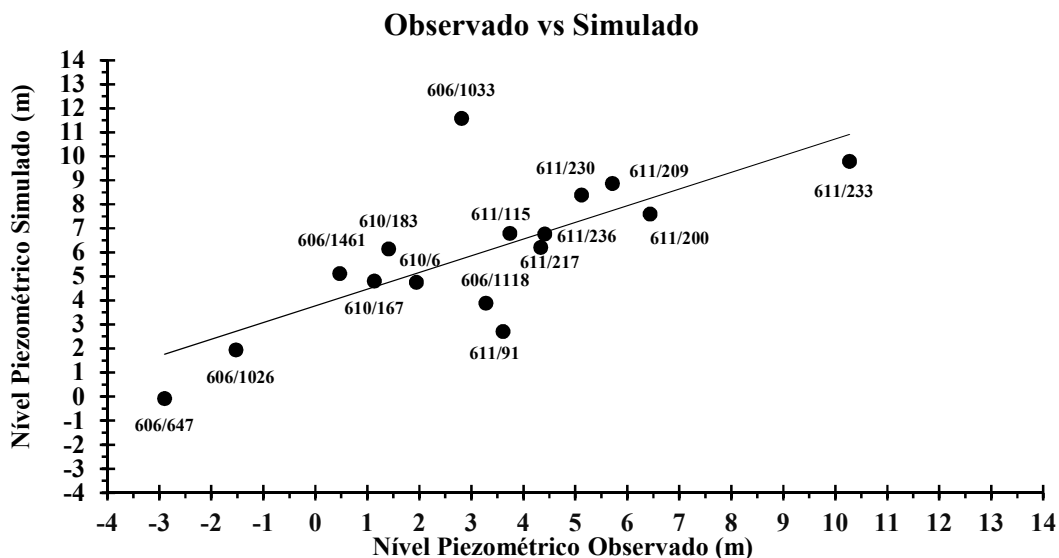


Figura 5.1 - Correlação entre a piezometria simulada e observada antes da calibração inversa da primeira variante do modelo numérico

Globalmente o modelo numérico não calibrado desta variante representou o comportamento do sistema, apresentando cargas hidráulicas superiores nos locais de recarga e cargas inferiores nos locais de descarga. No entanto a sua correlação foi baixa, dado que se obteve um coeficiente de 0,53 e uma soma dos resíduos ao quadrado (medida da função objetiva) de 264,83 metros.

Na Figura 5.2 é possível observar a correlação entre a piezometria simulada e observada após o processo de calibração inversa da primeira variante do modelo numérico.

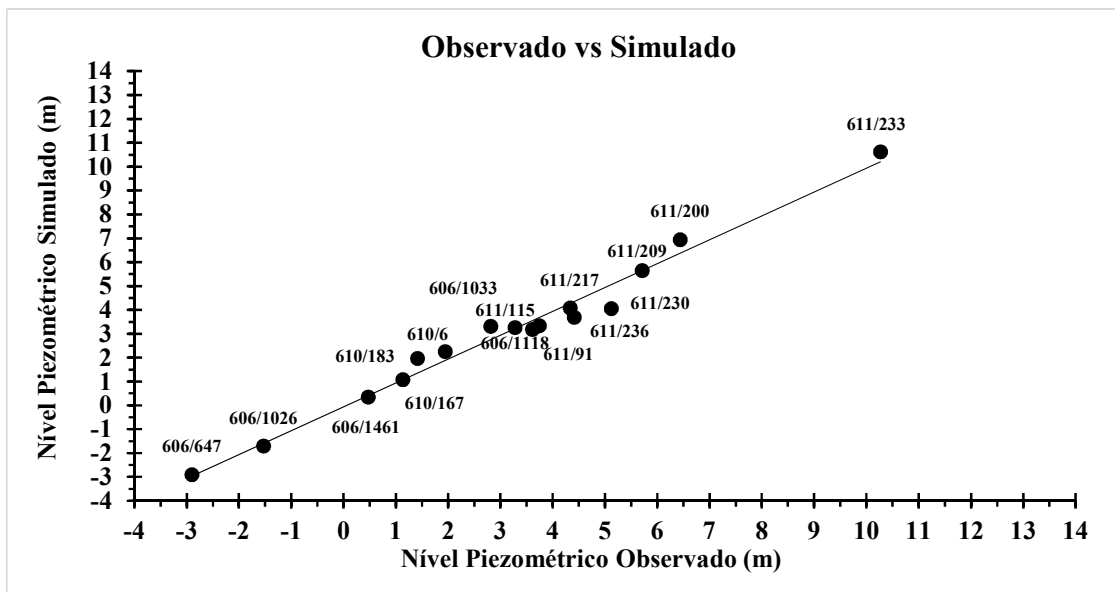


Figura 5.2 - Correlação entre a piezometria simulada e observada após a calibração inversa da primeira variante do modelo numérico

Findada a calibração inversa do modelo, constatou-se que houve uma melhoria significativa da correlação entre a piezometria simulada e observada. Foi obtido um coeficiente de 0,989 e uma soma dos resíduos ao quadrado de apenas 3,11 metros.

Relativamente à distribuição espacial da condutividade hidráulica resultante da calibração inversa, a série de valores variou entre 2,69 e 4,8 m/dia no aquífero freático, 0,0059 e 0,031 m/dia na camada confinante e entre 1,24 e 6,26 m/dia no aquífero semi-confinado. Pode-se considerar a distribuição obtida representativa da realidade, dado que se encontra dentro da combinação de valores estimados pela bibliografia consultada. Em relação ao coeficiente de transferência, essencial à condição de fronteira de *Cauchy* considerada nesta variante do modelo, estimou-se um valor uniforme de 0,0057 1/dia (Quadro 5.1).

Quadro 5.1 - Distribuição da condutividade hidráulica e o coeficiente de transferência após a calibração inversa da primeira variante do modelo numérico

	Condutividade Hidráulica (m/dia)		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Aquífero Freático	2,69	0,44	4,8
Camada Confinante	0,0059	0,049	0,031
Aquífero Semi-Confinado	2,12	6,26	1,24
Coeficiente de Transferência (1/dia)			
Modelo Numérico	0,0057		

A simulação da primeira variante do modelo numérico de escoamento após a sua calibração, estimou uma recarga proveniente dos sistemas aquíferos M9 e M10 de cerca de 5,13 hm³/ano. O

valor obtido foi inferior à soma das recargas máximas dos sistemas referidos (+12 hm³/ano), consideradas por Almeida et al. (2000).

A correlação entre os níveis piezométricos simulados e observados antes do processo de calibração inversa da segunda variante do modelo numérico de escoamento, está representada na Figura 5.3.

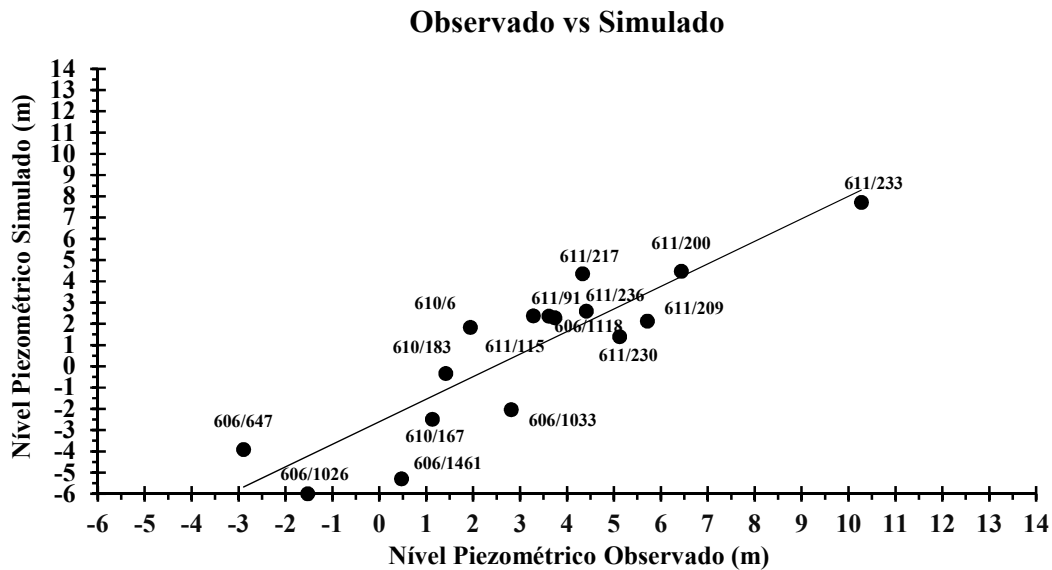


Figura 5.3 - Correlação entre a piezometria simulada e observada antes da calibração inversa da segunda variante do modelo numérico. O modelo numérico da presente variante representou globalmente o comportamento do sistema, com cargas hidráulicas menores nas zonas de descarga e cargas maiores nas zonas de recarga. Porém, o coeficiente de correlação obtido foi baixo, com um valor de 0,793 e uma soma dos resíduos ao quadrado de 120,25 metros.

Após a calibração inversa da segunda variante do modelo numérico obteve-se a seguinte correlação (Figura 5.4).

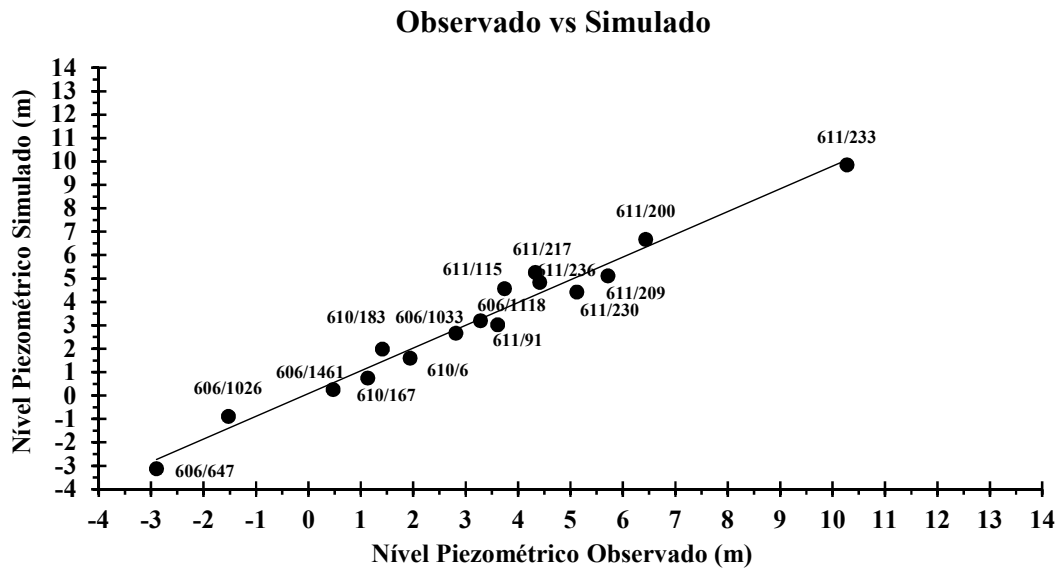


Figura 5.4 - Correlação entre a piezometria simulada e observada após a calibração inversa da segunda variante do modelo numérico. Com a realização da calibração inversa foi possível melhorar a correlação entre a piezometria simulada e observada, tendo sido obtido um coeficiente de 0,986 e um somatório dos resíduos ao quadrado de 4,28 metros.

A distribuição espacial da condutividade hidráulica decorrente da calibração inversa determinou uma série de valores entre 0,32 e 26,44 m/dia no aquífero freático, 0,0054 e 0,32 m/dia na camada confinante e entre 1,89 e 35,3 m/dia no aquífero semi-confinado. Esta distribuição revelou a presença de condutividades ligeiramente elevadas relativamente ao estimado pela bibliografia existente. A calibração definiu igualmente um valor uniforme de 0,036 1/dia para o coeficiente de transferência da condição de fronteira de *Cauchy* considerada nesta variante do modelo numérico (Quadro 5.2).

Quadro 5.2 - Distribuição da condutividade hidráulica e o coeficiente de transferência após a calibração inversa da segunda variante do modelo numérico

	Condutividade Hidráulica (m/dia)		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Aquífero Freático	2,88	26,44	0,32
Camada Confinante	0,0054	0,32	0,046
Aquífero Semi-Confinado	1,89	13,94	35,3
Coeficiente de Transferência (1/dia)			
Modelo Numérico	0,036		

Considerado o facto da calibração inversa da segunda variante do modelo numérico de escoamento ter estimado uma distribuição da condutividade hidráulica ligeiramente elevada, a

simulação deste modelo determinou uma recarga oriunda dos sistemas aquíferos M9 e M10 de 14,94 hm³/ano. Logo, concluiu-se que este sobrestimou o valor da soma das recargas máximas estimadas por Almeida et al. (2000) para os sistemas M9 e M10 (+12 hm³/ano).

Na Figura 5.5 está representada a correlação entre os níveis piezométricos simulados e observados antes do processo de calibração inversa da terceira variante do modelo numérico de escoamento.

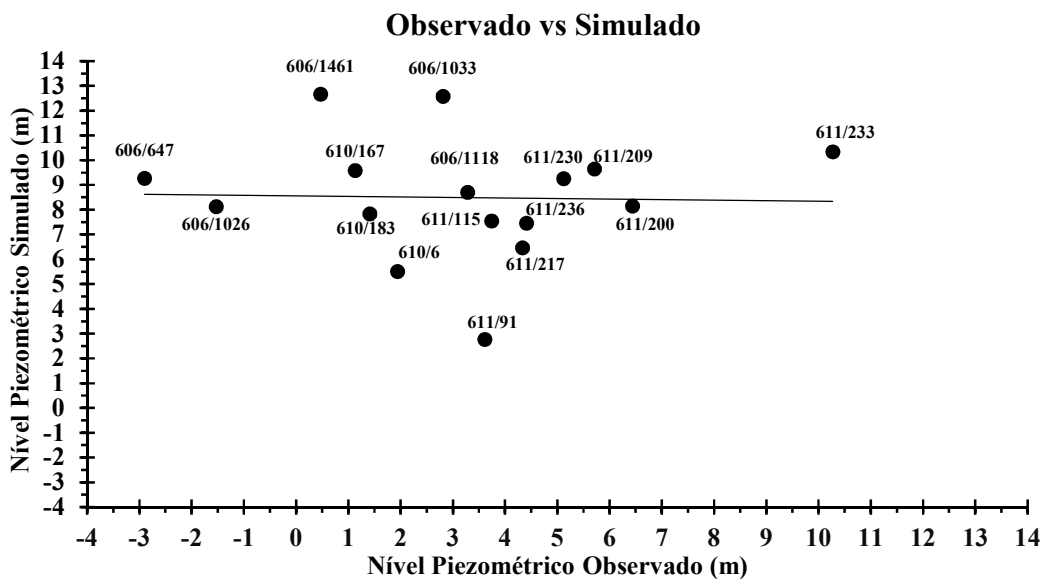


Figura 5.5 - Correlação entre a piezometria simulada e observada antes da calibração inversa da terceira variante do modelo numérico. Neste caso, o modelo numérico não representou o comportamento do sistema, sobrestimando a piezometria na maioria dos pontos de observação. A dispersão dos níveis piezométricos deveu-se à grande extensão considerada como zona de recarga nesta variante do modelo numérico. O coeficiente de correlação obtido foi de 0,0008 e a soma dos resíduos ao quadrado de 823,7 metros.

Na Figura 5.6 é possível observar a correlação entre a piezometria simulada e observada após a calibração inversa referente à terceira variante do modelo numérico de escoamento.

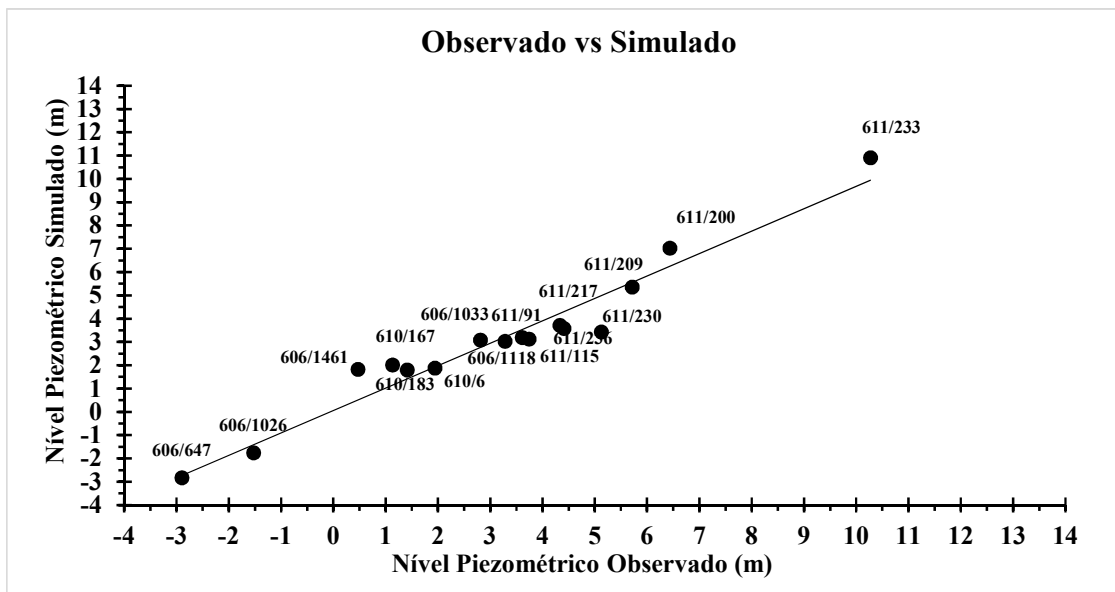


Figura 5.6 - Correlação entre a piezometria simulada e observada após a calibração inversa da terceira variante do modelo numérico

Como se pode observar, a correlação melhorou significativamente após a calibração. Foi obtido um coeficiente de 0,972 e uma soma dos resíduos ao quadrado de 8,31 metros.

Todavia, independentemente da obtenção de um bom ajuste na piezometria, a calibração calculou uma distribuição espacial desequilibrada da condutividade hidráulica. A série de condutividades estimadas variou entre 1,77 e 18,18 m/dia no aquífero freático, 0,0019 e 0,44 m/dia na camada confinante e entre 0,32 e 10000 m/dia (valor totalmente desajustado) no aquífero semi-confinado. No que se refere ao coeficiente de transferência associado à condição de fronteira de *Cauchy* considerada nesta variante do modelo, a calibração determinou um valor uniforme de 0,0060 1/dia (Quadro 5.3).

Quadro 5.3 - Distribuição da condutividade hidráulica e o coeficiente de transferência após a calibração inversa da terceira variante do modelo numérico

	Condutividade Hidráulica (m/dia)		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Aquífero Freático	18,18	1,77	4,40
Camada Confinante	0,0019	0,44	0,10
Aquífero Semi-Confinado	0,32	10000	1,32
Coeficiente de Transferência (1/dia)			
Modelo Numérico	0,0060		

Devido ao facto da calibração inversa referente à terceira variante do modelo numérico de escoamento ter estimado condutividades hidráulicas muito elevadas, a simulação deste modelo sobrestimou a recarga proveniente dos sistemas aquíferos M9 e M10. Registou-se um valor de 19

hm³/ano, quando o limite definido não podia exceder os 12 hm³/ano, segundo Almeida et al. (2000).

Finalizada a calibração inversa das variantes do modelo numérico de escoamento, procedeu-se à seleção daquela que apresentou os melhores resultados. Através da análise dos resultados constatou-se que a calibração inversa da primeira variante do modelo numérico foi a que apresentou o melhor coeficiente de correlação (0,989) e a menor soma dos resíduos ao quadrado ou medida da função objetiva (3,11 metros). Esta variante apresentou igualmente a distribuição espacial da condutividade hidráulica mais representativa.

Assim sendo, optou-se naturalmente pela aplicação da primeira variante do modelo numérico calibrado aquando da simulação dos diferentes cenários.

5.2 Cenários de Exploração de Recursos e de Alterações Climáticas

5.2.1 Cenário 1 - Área Regada Atual

O primeiro cenário consistiu na análise ao estado atual do sistema aquífero da Campina de Faro. Atualmente a área regada total corresponde a cerca de 1452 hectares e extração anual de 12,15 hm³/ano (Figura 5.7).

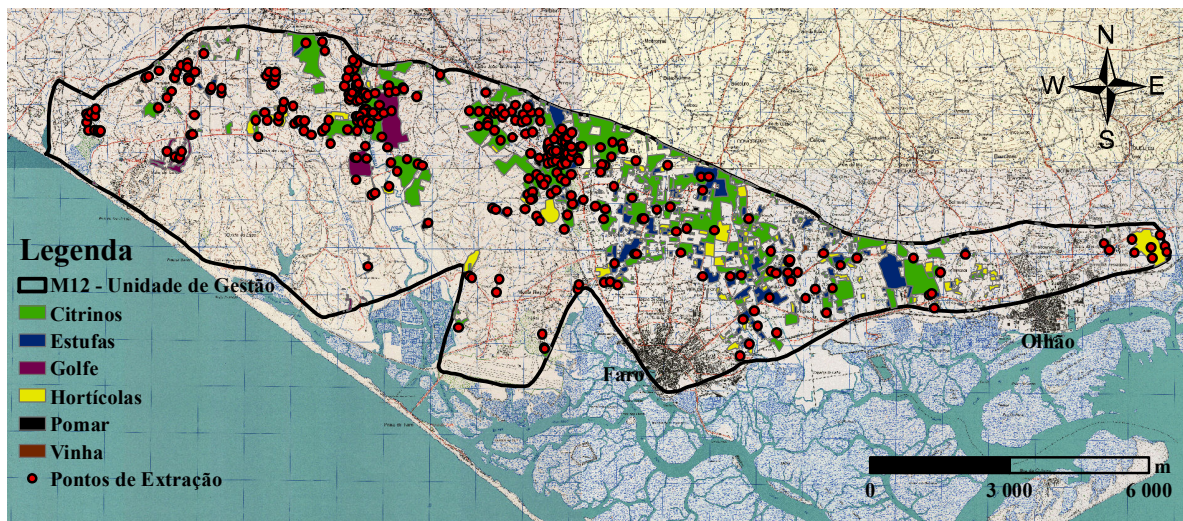


Figura 5.7 - Cenário 1

Os volumes de água extraídos pelos diferentes tipos de cultura e o número de furos existentes neste cenário estão presentes no Anexo III.

No Quadro 5.4 está exposto o balanço da simulação do cenário 1.

Quadro 5.4 - Balanço do cenário 1

	Saída (hm ³ /ano)	Entrada (hm ³ /ano)
Oceano Atlântico/Ria Formosa	9,57	0,78
Ribeiras	-	1,66
Transferências de Norte	-	5,13
Extração	12,15	-
Precipitação	-	14,15

Considerando uma recarga direta proveniente da precipitação de 14,15 hm³/ano, uma entrada de 1,66 hm³/ano com origem nas ribeiras e uma extração contínua de 12,15 hm³/ano, a simulação do cenário atual estimou uma transferência de água oriunda dos sistemas M9 e M10 de 5,13 hm³/ano. A mesma calculou uma descarga subterrânea do aquífero freático para o Oceano Atlântico e Ria Formosa de 9,57 hm³/ano e uma admissão de água salgada no interior deste de 0,78 hm³/ano. Através desta simulação foi possível constatar que o modelo numérico estimou um

escoamento interno preferencial do aquífero freático para o semi-confinado, comparativamente ao inverso. Ou seja, calculou-se uma contribuição por parte das camadas superiores ao aquífero semi-confinado de $10,88 \text{ hm}^3/\text{ano}$, enquanto no sentido oposto apenas foi estimado um volume de $1,52 \text{ hm}^3/\text{ano}$ (podendo este caudal contribuir para a descarga subterrânea). No aquífero semi-confinado foi igualmente presenciado um fluxo subterrâneo contínuo em direção à zona oeste do modelo (Figura 5.8).

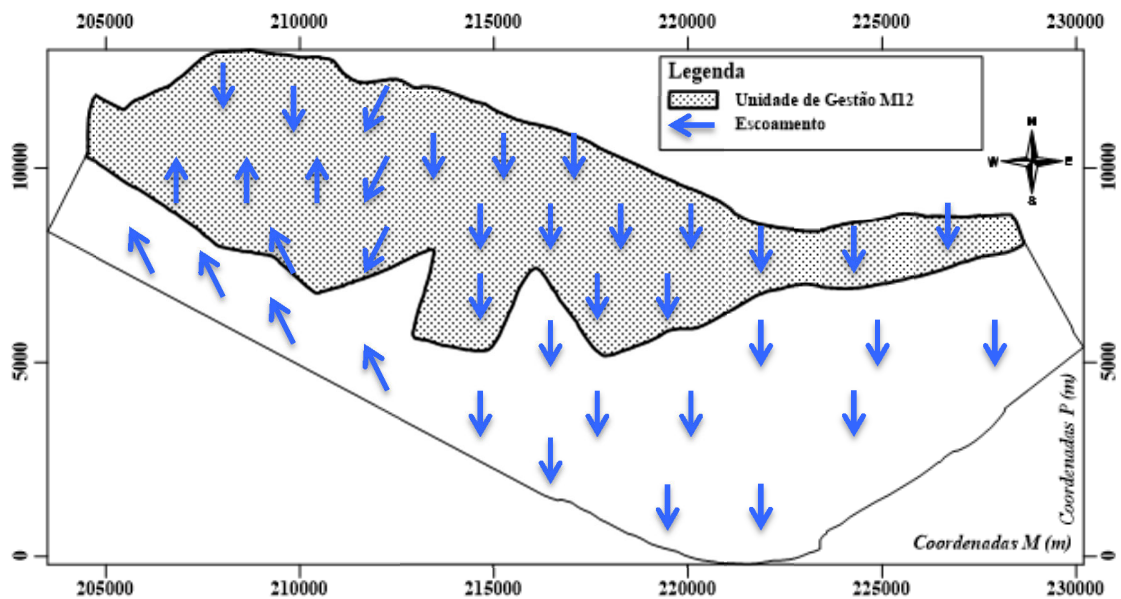


Figura 5.8 - Direção do escoamento no modelo numérico de escoamento no cenário 1

Dado que não foi aplicada nenhuma condição de fronteira na camada referente ao aquífero semi-confinado para representar a descarga subterrânea deste aquífero, na qual se pretendeu realizar uma aproximação à *Sharp Interface* ignorando-se a existência de uma zona de transição com processos associados a diferenças de densidade, poder-se-á ter constituído uma limitação do modelo numérico e da análise subjacente.

Em consequência de se ter estimado uma entrada de água salgada de $0,78 \text{ hm}^3/\text{ano}$, deduz-se que atualmente possam existir condições para a ocorrência de intrusão salina neste sistema.

Na Figura 5.9 está representada a piezometria obtida pela simulação deste cenário no aquífero freático. As isolinhas representam as cotas dos níveis piezométricos (metros) em relação ao nível médio do mar.

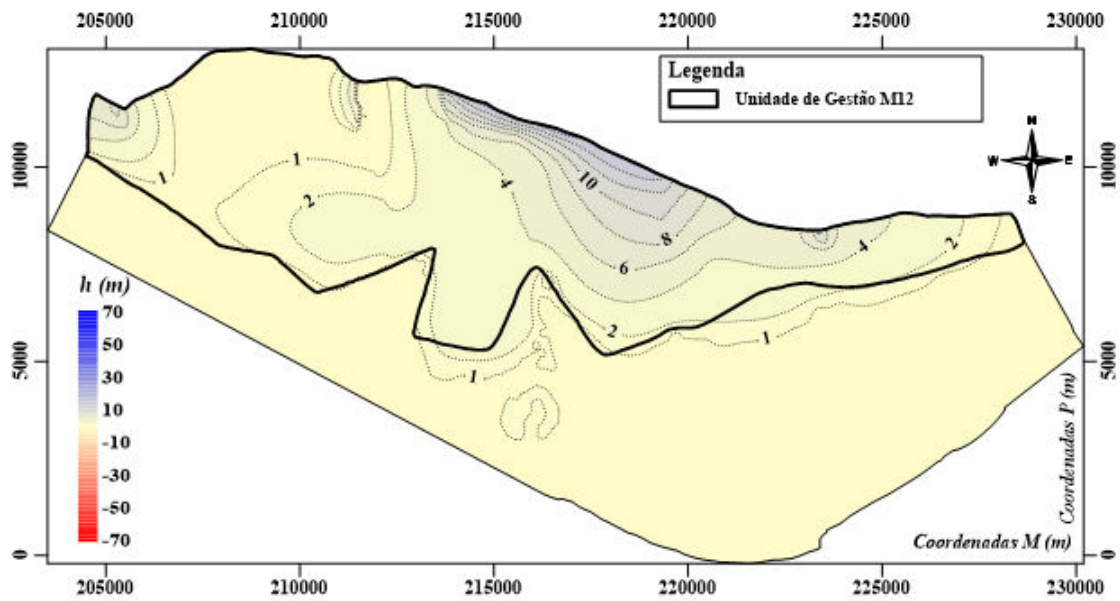


Figura 5.9 - Níveis piezométricos do aquífero freático no cenário 1

No aquífero freático registou-se a presença de maiores cargas hidráulicas nos limites a norte e cargas menores nos limites a sul da Unidade de Gestão, face à existência de recargas e de descargas nos respetivos locais. Na zona oeste do sistema verificou-se a presença de níveis piezométricos mais baixos. Este rebaixamento deveu-se essencialmente à forte extração de água existente nas imediações de Vale do Lobo e da Quinta do Lago, em virtude da exploração agrícola e turística (golfe).

Mediante a baixa piezometria registada na zona oeste, estimou-se a presença de pequenos avanços da cunha salina e condições para a ocorrência de intrusão através de ascensão vertical ou *upconing*. A presença deste tipo de fenómeno é visível devido ao facto da interface intercetar a camada confinante a uma cota de -30 metros junto ao limite sul da Unidade de Gestão, ascendendo novamente à cota 0 metros na região do cone de depressão (Figura 5.10). Supõe-se que exista uma entrada de água salgada no aquífero freático com origem na extensão da cunha salina considerada no aquífero semi-confinado (ver Figura 5.12). É importante salientar que os dados relativos à extensão da intrusão salina demonstram o resultado de um processo gradual e moroso do avanço da água salgada nos aquíferos referidos.

As isolinhas representam a cota da interface (metros) entre a água subterrânea e salgada em relação ao nível médio do mar.

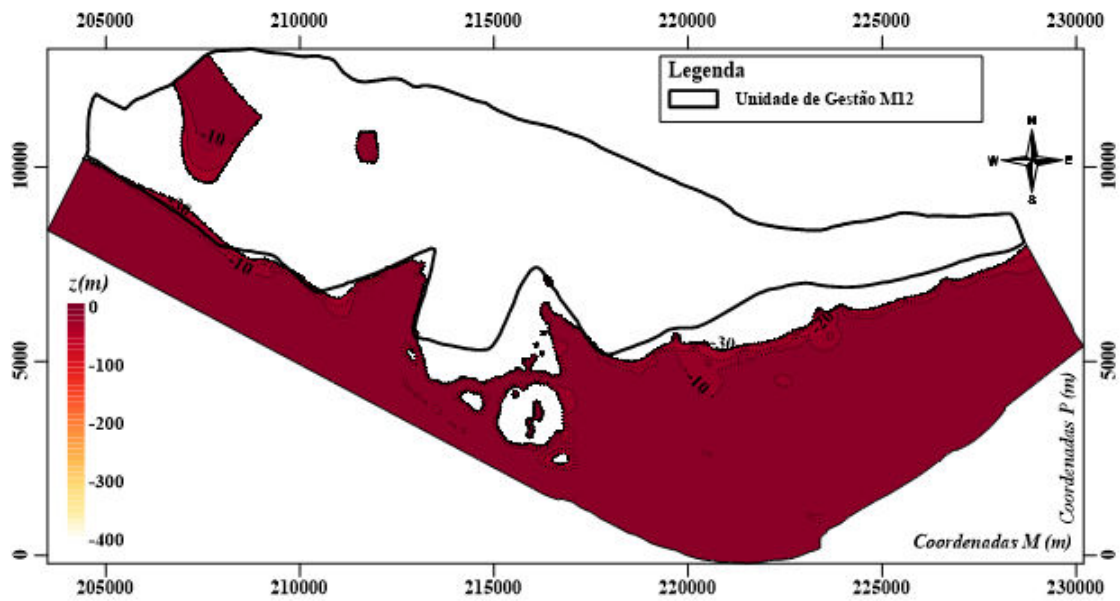


Figura 5.10 - Localização da interface no aquífero freático no cenário 1

Na Figura 5.11 está representada a piezometria obtida no aquífero semi-confinado.

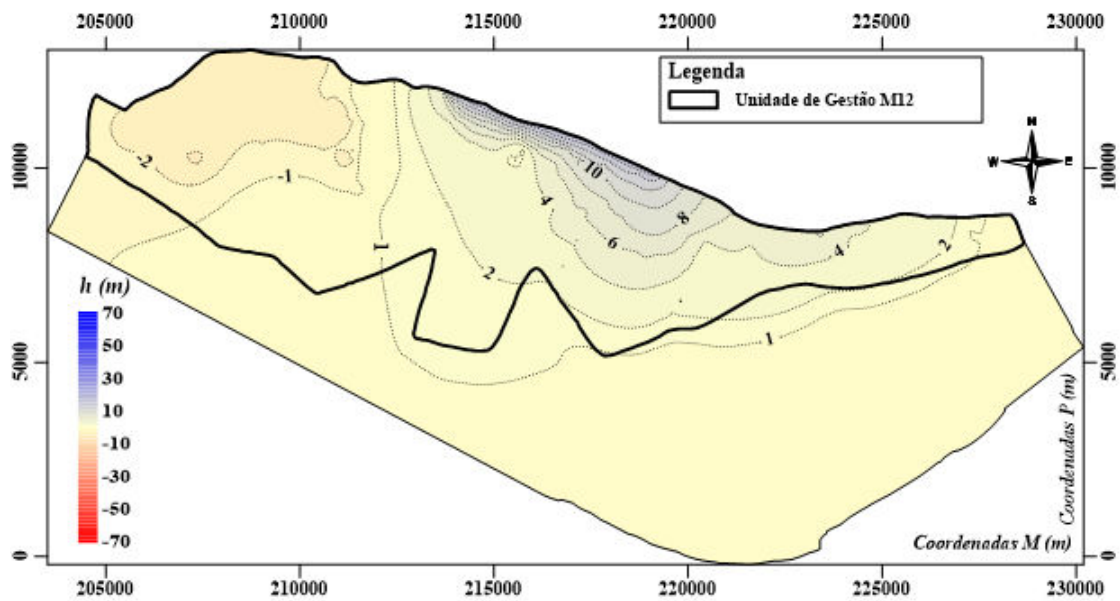


Figura 5.11 - Níveis piezométricos do aquífero semi-confinado no cenário 1

No aquífero semi-confinado, os resultados sugeriram igualmente a presença de níveis piezométricos baixos na zona oeste do sistema, com valores a rondar entre os -2 e -4 metros em relação ao nível médio do mar.

Face à presença de piezometria negativa nesta zona, supõe-se que existam condições para a ocorrência de avanços consideráveis de intrusão salina neste local. Deste modo, estes resultados

corroboram o recente aumento da concentração de cloretos registados nesta área, aquando da caracterização qualitativa do sistema (Figura 5.12).

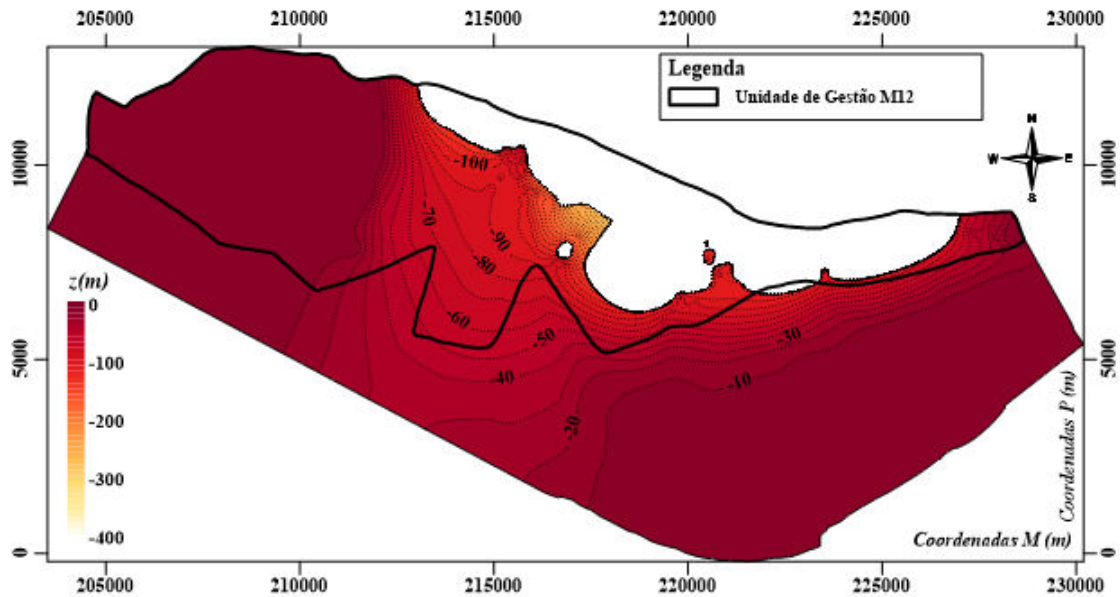


Figura 5.12 - Localização da interface no aquifero semi-confinado no cenário 1

A existência de níveis piezométricos baixos nas áreas envolventes às urbanizações de Vale do Lobo e Quinta do Lago, quer na simulação deste cenário, quer na rede de monitorização do SNIRH, aliado ao facto de se ter estimado uma entrada de água salgada de $0,78 \text{ hm}^3/\text{ano}$, consolida a teoria de que poderá estar em curso um processo gradual de intrusão salina. Constatase que o sistema da Campina de Faro já se encontra num estado de sobre-exploração comprometendo a sua sustentabilidade a longo prazo.

5.2.2 Cenário 2 - Área Regada Atual + Área de Cultivo Abandonada

No cenário 2 foi retratado o caso mais extremo de todos os cenários hipotéticos de aumento da atividade agrícola. Para tal, acrescentou-se à área regada atual toda a área de cultivo abandonada, perfazendo uma extensão total de área regada de 5013 hectares e uma extração de 33,53 hm³/ano (Figura 5.13).

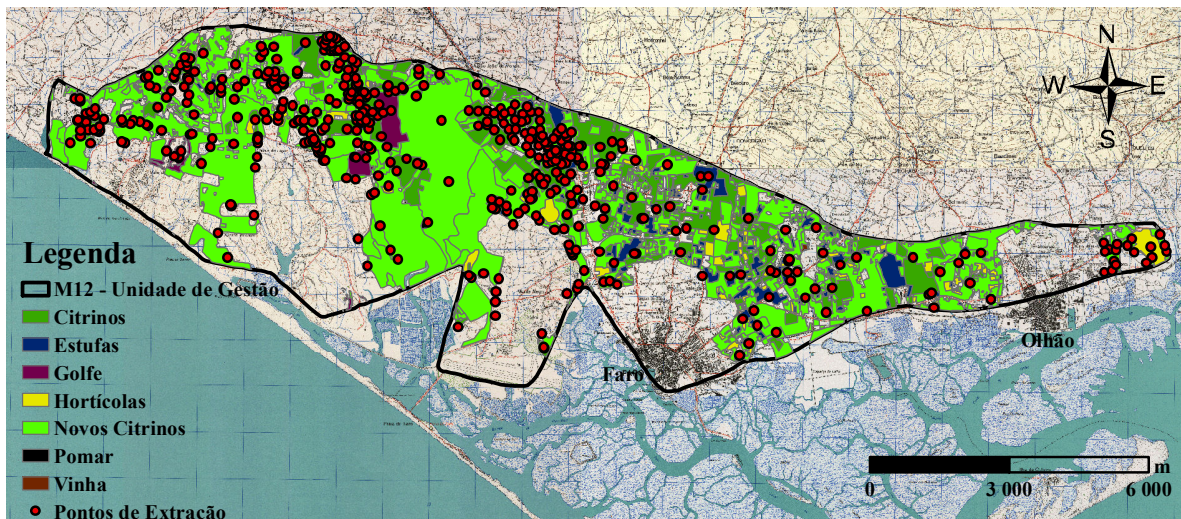


Figura 5.13 - Cenário 2

No Anexo III estão presentes os volumes de água extraídos pelos diferentes tipos de cultura associados a este cenário, bem como a quantidade de furos existentes.

No Quadro 5.5 é possível observar o balanço da simulação do cenário 2.

Quadro 5.5 - Balanço do cenário 2

	Saída (hm³/ano)	Entrada (hm³/ano)
Oceano Atlântico/Ria Formosa	4,29	12,72
Ribeiras	-	1,66
Transferências de Norte	-	9,28
Extração	33,53	-
Precipitação	-	14,15

Face ao aumento de extração de água associada a este cenário, a simulação estimou um acréscimo da recarga proveniente dos sistemas M9 e M10 comparativamente ao registado no cenário atual. O volume estimado para as transferências de água vindas de norte foi de 9,28 hm³/ano, abaixo dos 12 hm³/ano estimados por Almeida et al. (2000), correspondente à soma das recargas máximas dos sistemas referidos anteriormente (valor sobrestimado, visto que não foi tido em consideração um crescimento da atividade agrícola nestes aquíferos). A simulação deste cenário supôs também uma diminuição da descarga subterrânea do aquífero freático para a Ria

Formosa e Oceano Atlântico ($4,29 \text{ hm}^3/\text{ano}$) e um aumento significativo de entrada de água salgada no seu interior ($12,72 \text{ hm}^3/\text{ano}$). Dado que a contribuição de água ocorre maioritariamente do freático para o semi-confinado, prevê-se uma entrada neste último de $28,19 \text{ hm}^3/\text{ano}$ e um escoamento na direção inversa de apenas $0,34 \text{ hm}^3/\text{ano}$.

Em conformidade com o balanço deste cenário, conclui-se evidentemente que o sistema aquífero da Campina de Faro teria grandes possibilidades de ser afetado pela intrusão salina.

Os níveis piezométricos no aquífero freático estão representados na Figura 5.14.

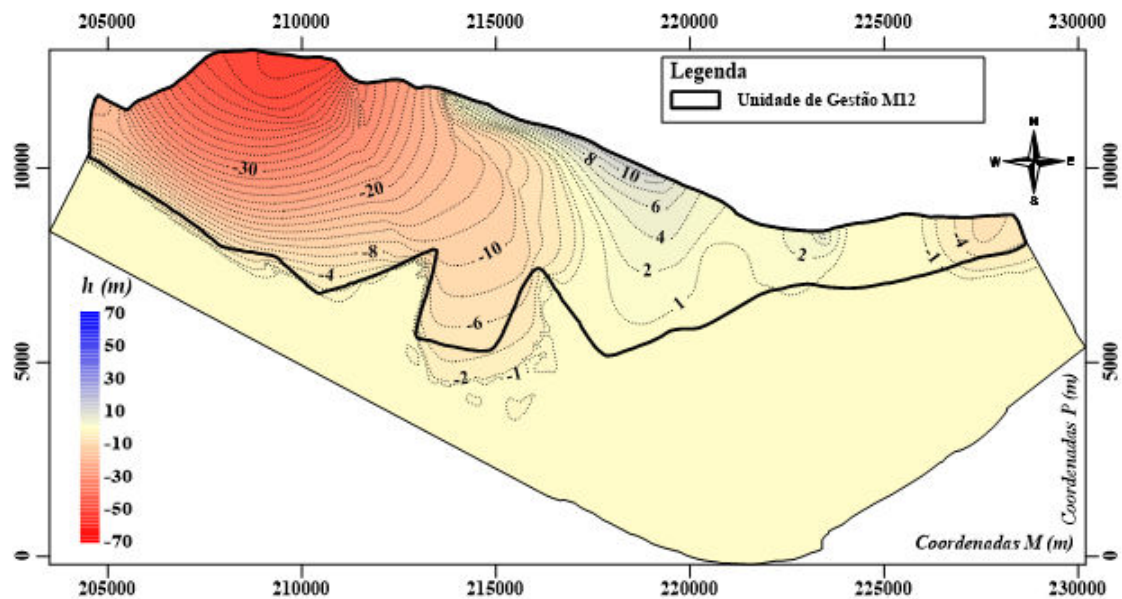


Figura 5.14 - Níveis piezométricos do aquífero freático no cenário 2

O mapa piezométrico do aquífero freático revelou que seriam notórios em toda a sua extensão os efeitos provocados pelo aumento extensivo da exploração agrícola. Ou seja, na generalidade haveria uma redução acentuada dos níveis piezométricos, destacando-se as zonas oeste e este do sistema.

Com a expectável redução considerável dos níveis piezométricos, seriam esperados aumentos expressivos da extensão da intrusão salina. A interface situar-se-ia apenas a cotas mais profundas na zona central, em virtude da piezometria positiva estimada neste local (Figura 5.15).

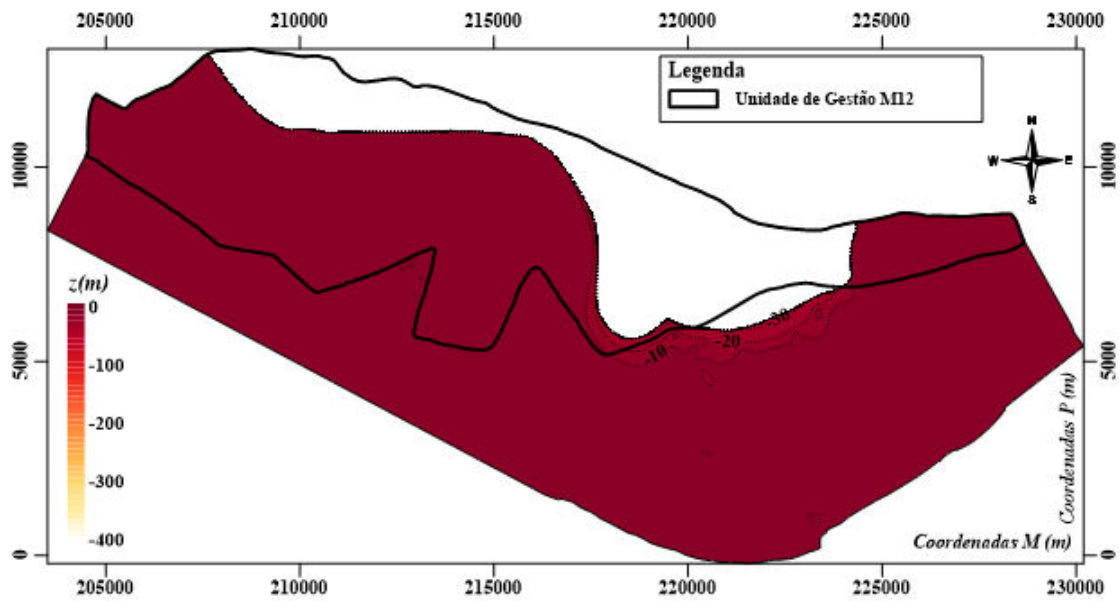


Figura 5.15 - Localização da interface no aquífero freático no cenário 2

Os níveis piezométricos do aquífero semi-confinado estão representados na Figura 5.16.

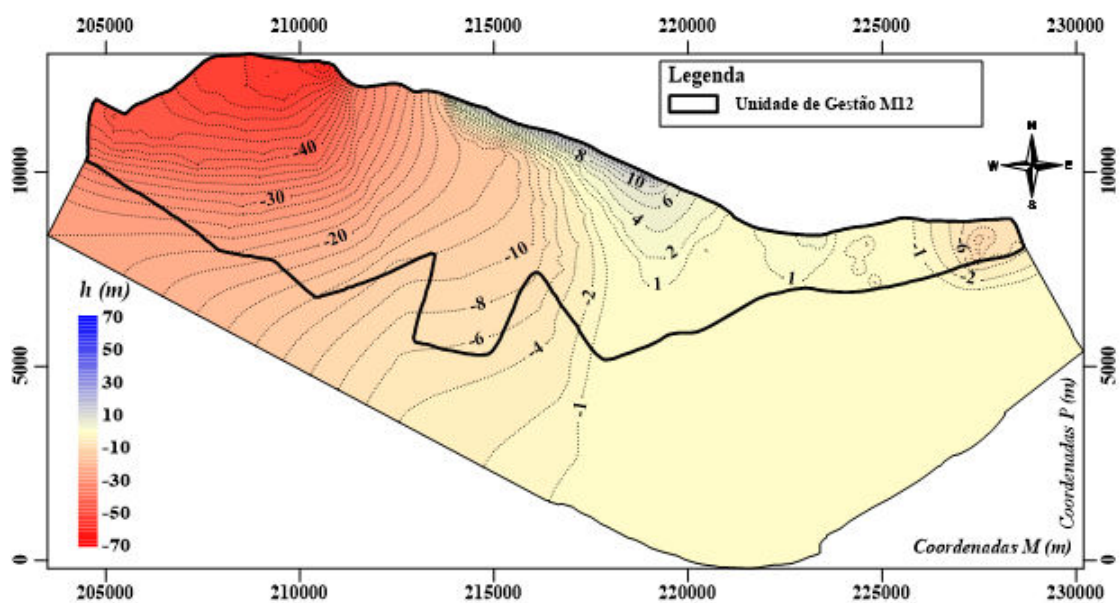


Figura 5.16 - Níveis piezométricos do aquífero semi-confinado no cenário 2

Os resultados obtidos para o aquífero semi-confinado revelaram também uma diminuição da piezometria na globalidade do aquífero, com uma redução substancial nomeadamente nas zonas oeste e este. Tal como se verificou no aquífero freático, a piezometria apenas apresentaria valores positivos nos locais onde se pressupôs a existência de transferências de água oriundas de norte.

Neste aquífero esperar-se-iam aumentos consideráveis da extensão da intrusão salina na área abrangida pela Unidade de Gestão (Figura 5.17).

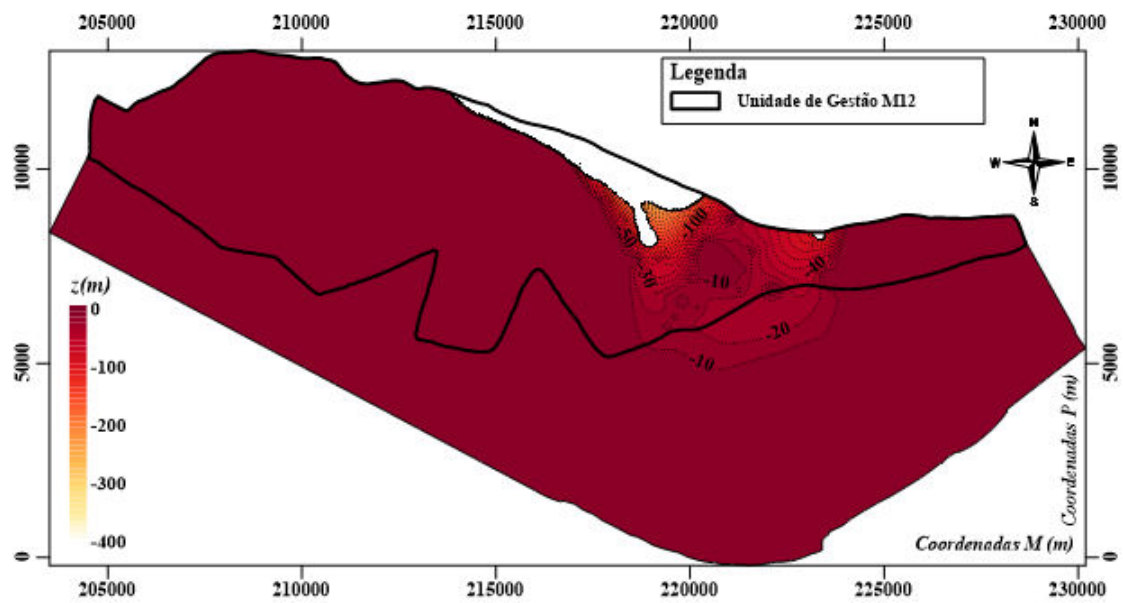


Figura 5.17 - Localização da interface no aquífero semi-confinado no cenário 2

De acordo com os resultados, conclui-se claramente que o sistema da Campina de Faro não teria capacidade para satisfazer as necessidades hídricas associadas a um cenário como este.

5.2.3 Cenário 3 - Área Regada Atual + Área de Cultivo Abandonada abrangida pela RAN

No presente cenário hipotético de aumento da exploração agrícola, adicionou-se à área regada atual a área de cultivo abandonada abrangida pela Reserva Agrícola Nacional (RAN). Na Figura 5.18 é possível visualizar a extensão da área de cultivo abandonada abrangida por esta reserva.

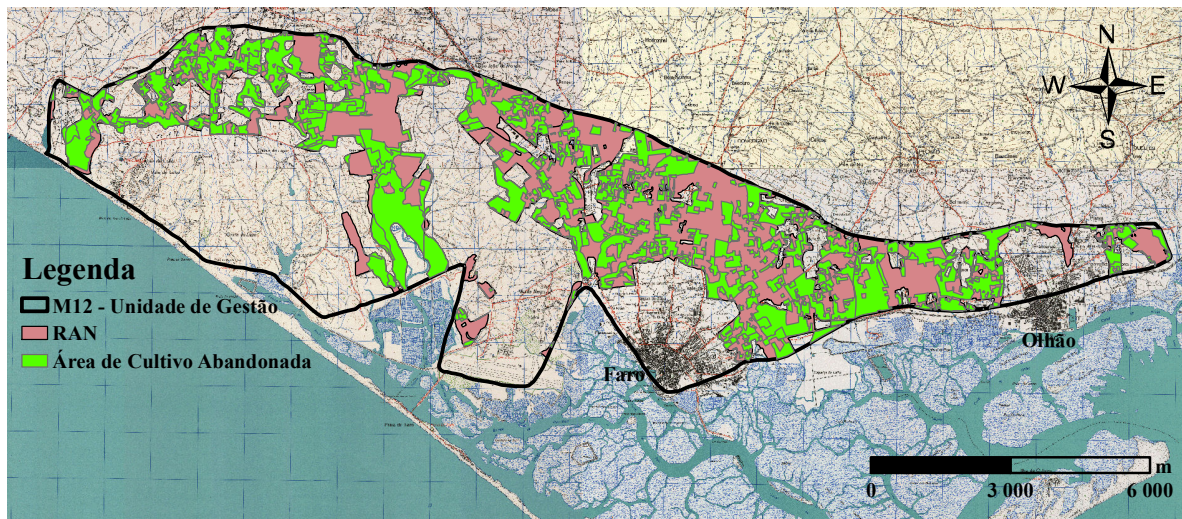


Figura 5.18 - Área de cultivo abandonada abrangida pela RAN

A área de rega total determinada para o terceiro cenário é de 3581 hectares e a extração de água associada de 24,93 hm³/ano (Figura 5.19).

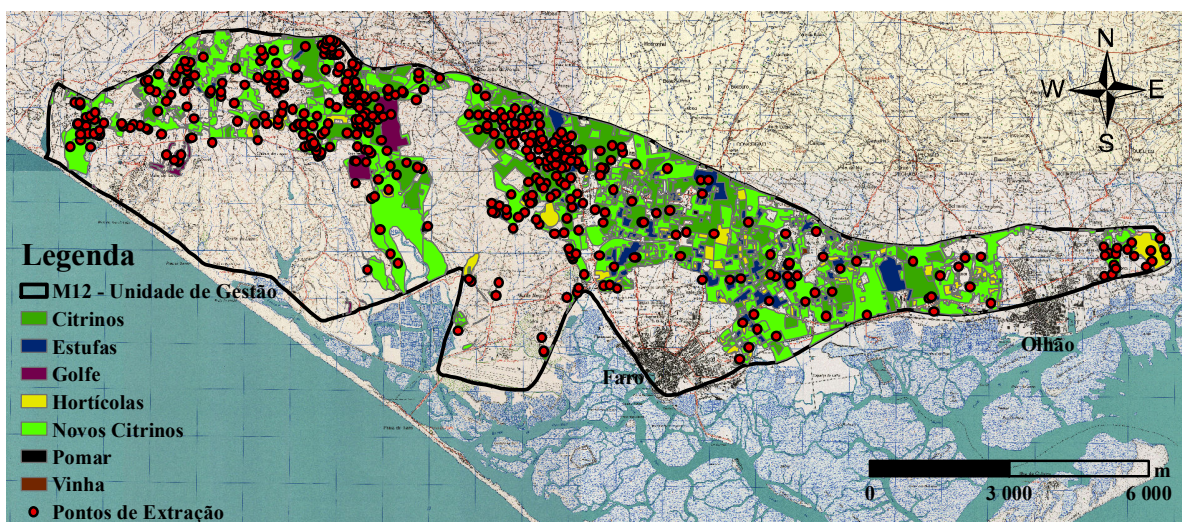


Figura 5.19 - Cenário 3

Os volumes de água extraídos pelos diferentes tipos de cultura, bem como a quantidade de furos existentes neste cenário estão presentes no Anexo III.

O balanço da simulação do cenário 3 está presente no Quadro 5.6.

Quadro 5.6 - Balanço do cenário 3

	Saída (hm ³ /ano)	Entrada (hm ³ /ano)
Oceano Atlântico/Ria Formosa	4,99	6,41
Ribeiras	-	1,66
Transferências de Norte	-	7,70
Extração	24,93	-
Precipitação	-	14,15

A simulação do cenário 3 prevê que o sistema da Campina de Faro receba um volume de água oriunda de norte de 7,69 hm³/ano. Nesta simulação foi também calculada uma descarga de água subterrânea do aquífero freático para o Oceano Atlântico e Ria Formosa de 4,99 hm³/ano e uma entrada de água salgada no seu interior de 6,41 hm³/ano. Para além dos valores referidos anteriormente, estimou-se que o aquífero semi-confinado receba um volume de 20,71 hm³/ano proveniente das camadas superiores e um fluxo no sentido oposto de 0,37 hm³/ano.

De acordo com o balanço obtido, conclui-se que num cenário como este, o sistema aquífero da Campina de Faro teria grandes possibilidades de ser afetado por fenómenos de intrusão salina.

Na Figura 5.20 estão representados os níveis piezométricos no aquífero freático.

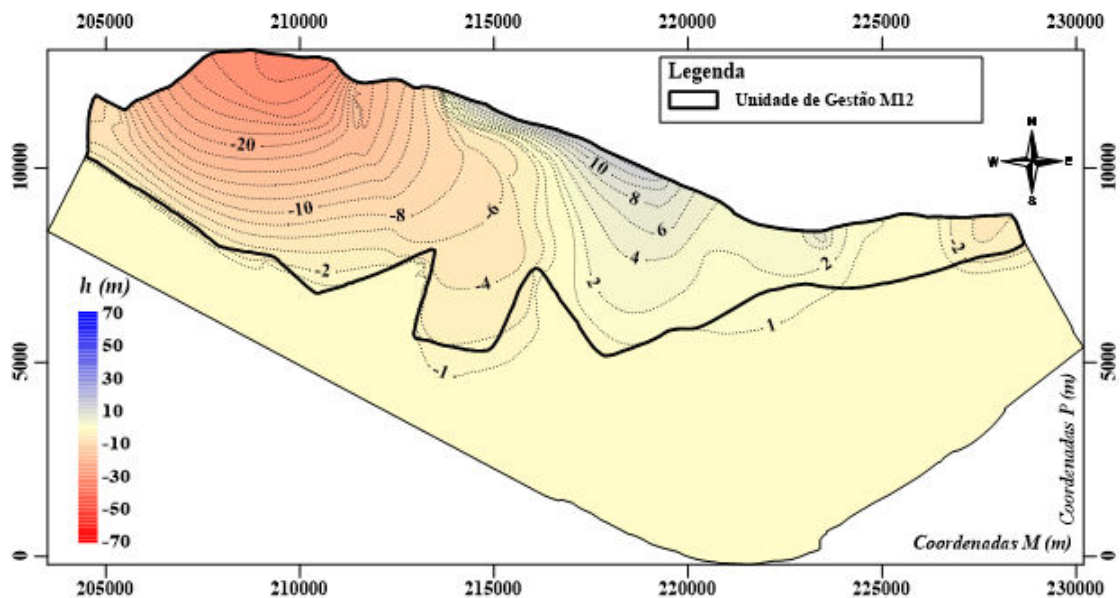


Figura 5.20 - Níveis piezométricos do aquífero freático no cenário 3

A simulação deste cenário sugeriu a existência de uma ligeira melhoria da piezometria no aquífero freático relativamente ao verificado no cenário antecedente. No entanto, ainda seria expectável a presença de níveis piezométricos negativos nas zonas oeste e este do sistema.

Em relação à intrusão salina, estimou-se um ligeiro decréscimo da sua extensão na zona este, comparativamente ao pressuposto no cenário anterior. Para além desta diminuição, também se considerou a existência de alterações nas cotas da interface na parte central, prevendo-se que esta interseste o topo da camada confinante num local mais afastado do limite sul da Unidade de Gestão (Figura 5.21).

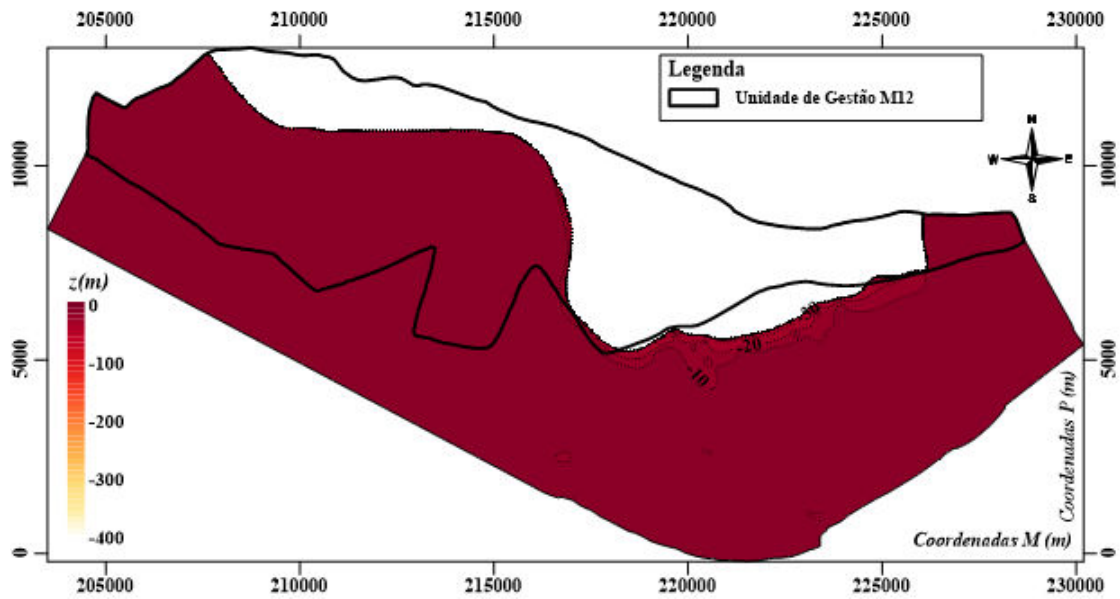


Figura 5.21 - Localização da interface no aquífero freático no cenário 3

Na Figura 5.22 estão representados os níveis piezométricos no aquífero semi-confinado.

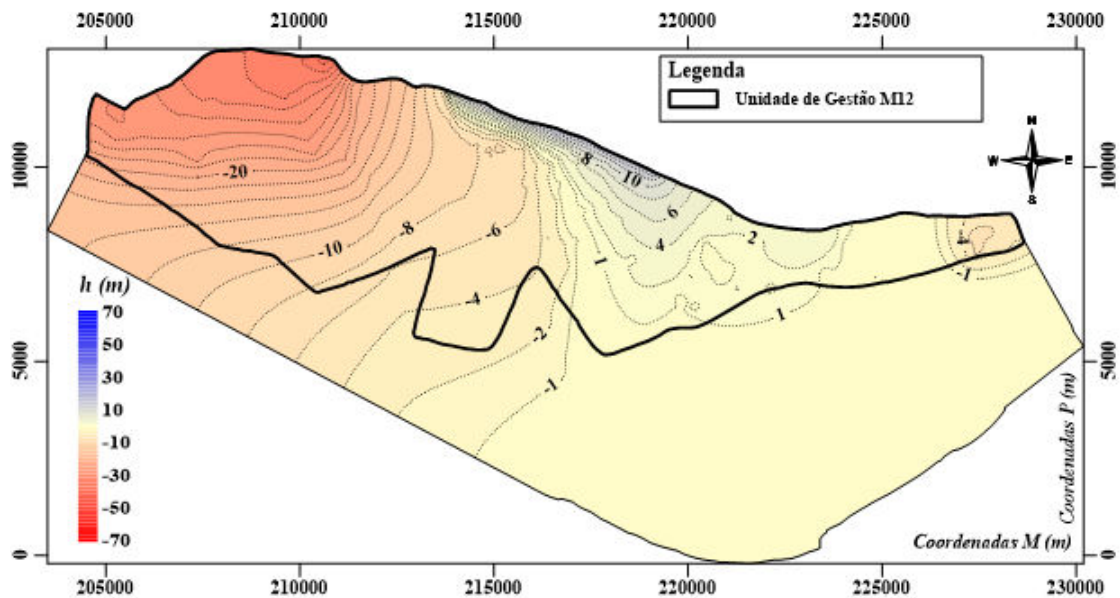


Figura 5.22 - Níveis piezométricos do aquífero semi-confinado no cenário 3

No aquífero semi-confinado são esperadas ligeiras subidas da piezometria, porém, os níveis continuariam a ser muito baixos, nomeadamente nas zonas oeste e este.

Considerando uma continuidade dos níveis piezométricos negativos numa grande extensão do aquífero semi-confinado, supõe-se que a área afetada pela entrada de água salgada continuaria a ser muito extensa. Comparativamente ao cenário anterior, face à menor extração de água subterrânea considerada, também no aquífero semi-confinado esperar-se-iam pequenas alterações nas cotas da interface na zona este (Figura 5.23).

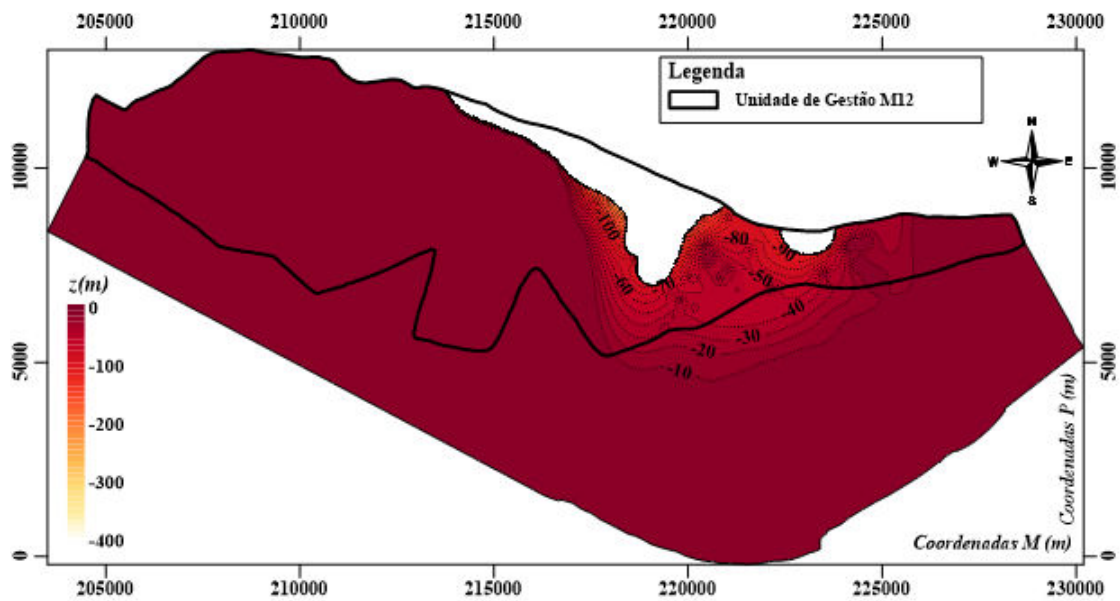


Figura 5.23 - Localização da interface no aquífero semi-confinado no cenário 3

Apesar do cenário 3 apresentar uma área de rega menor e conseqüentemente uma extração inferior relativamente ao considerado no cenário 2, o sistema aquífero da Campina de Faro continuaria a não ter capacidade para satisfazer as necessidades hídricas inerentes a uma situação como esta.

5.2.4 Cenário 4 - Área Regada Atual + Área de Cultivo Abandonada fora da Área Crítica

No quarto cenário de aumento da exploração agrícola, pretendeu-se analisar o comportamento do sistema da Campina de Faro, caso houvesse um reaproveitamento da área de cultivo abandonada, que se encontra fora da zona considerada como Área Crítica (Figura 5.24). Para tal, foi adicionada à área regada atual a área de cultivo abandonada referida.

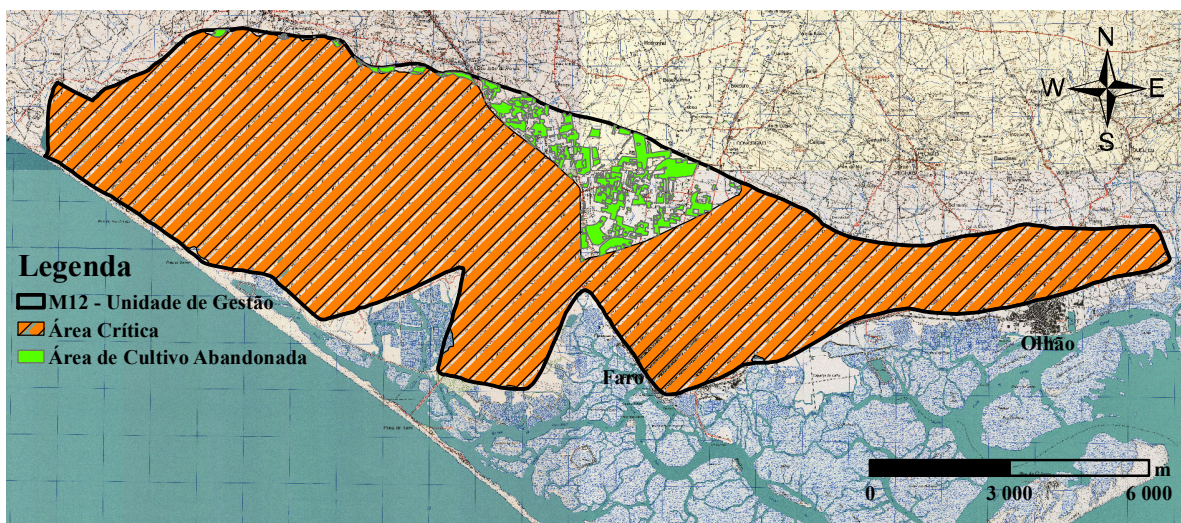


Figura 5.24 - Área de cultivo abandonada fora da Área Crítica

A área de rega total determinada para este cenário é de 1800 hectares e a extração de 14,24 hm³/ano (Figura 5.25).

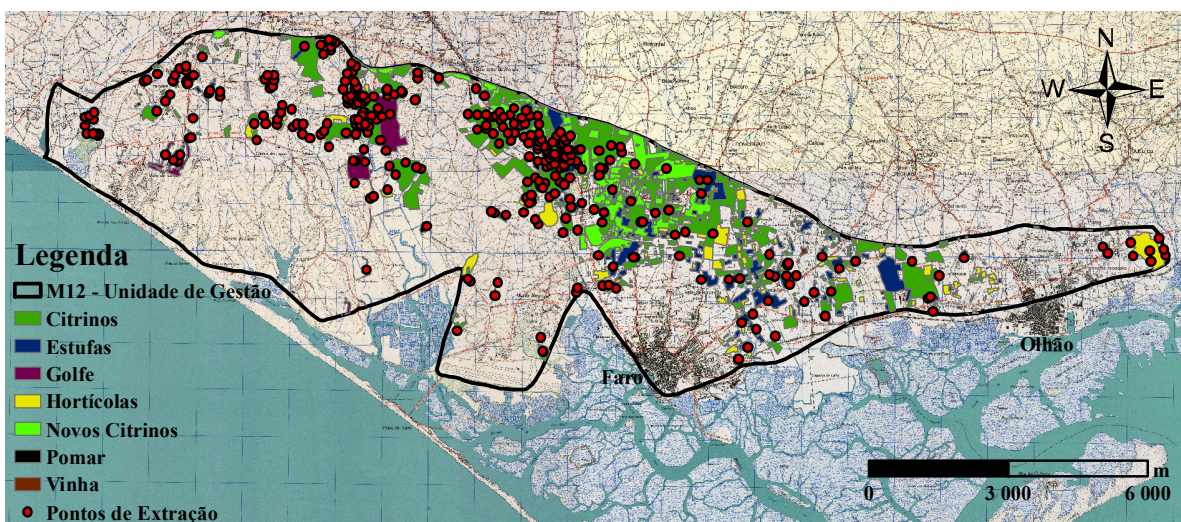


Figura 5.25 - Cenário 4

No Anexo III estão representados os volumes de água extraídos pelos diferentes tipos de cultura e a quantidade de furos existentes associados a este cenário.

No Quadro 5.7 está representado o balanço da simulação do cenário 4.

Quadro 5.7 - Balanço do cenário 4

	Saída (hm ³ /ano)	Entrada (hm ³ /ano)
Oceano Atlântico/Ria Formosa	8,39	0,89
Ribeiras	-	1,66
Transferências de Norte	-	5,92
Extração	14,24	-
Precipitação	-	14,15

A simulação deste cenário estimou uma transferência de água proveniente de norte de 5,92 hm³/ano, uma descarga de água subterrânea do aquífero freático para a Ria Formosa e Oceano Atlântico de 8,39 hm³/ano e uma entrada de água salgada no interior deste de 0,89 hm³/ano. Prevê-se que as camadas superiores contribuam com cerca de 11,93 hm³/ano ao aquífero semi-confinado e que ocorra um escoamento inverso de 0,96 hm³/ano.

Segundo o balanço obtido para este cenário, é provável que sejam observadas condições favoráveis à ocorrência de fenómenos de intrusão salina.

Na Figura 5.26 estão representados os níveis piezométricos no aquífero freático.

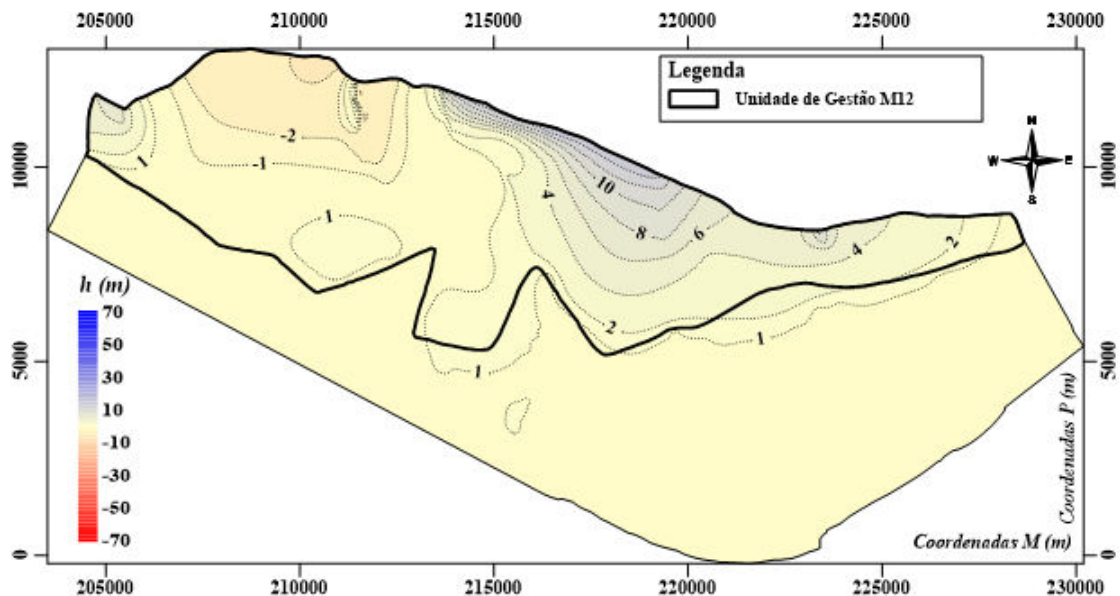


Figura 5.26 - Níveis piezométricos do aquífero freático no cenário 4

Comparando o presente cenário com o estado atual do sistema, considerando um aumento da extração em $2,06 \text{ hm}^3/\text{ano}$, estimou-se uma redução dos níveis piezométricos no aquífero freático, nomeadamente na zona oeste.

Em virtude da diminuição estimada da piezometria na parte oeste do sistema, será expectável verificar-se um aumento da extensão da intrusão salina no referido local (Figura 5.27).

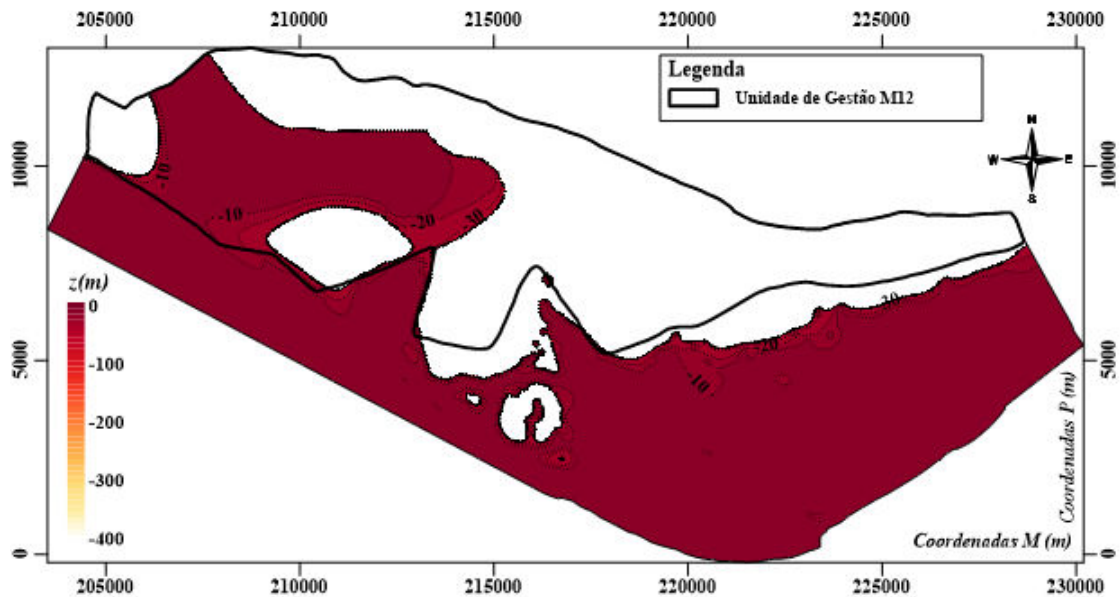


Figura 5.27 - Localização da interface no aquífero freático no cenário 4

Na Figura 5.28 estão representados os níveis piezométricos no aquífero semi-confinado.

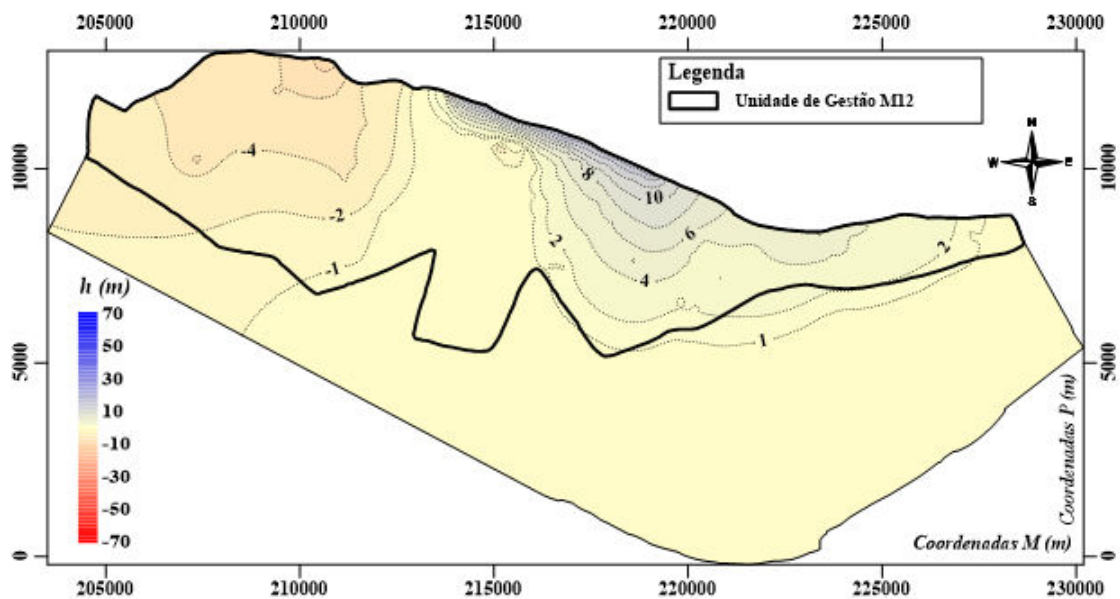


Figura 5.28 - Níveis piezométricos do aquífero semi-confinado no cenário 4

No aquífero semi-confinado seriam igualmente esperados rebaixamentos consideráveis na zona oeste.

Previu-se um aumento da extensão da intrusão salina nas áreas envolventes a Vale do Lobo e Quinta do Lago. Para além do acréscimo da área afetada pela intrusão salina a oeste, os resultados indicaram igualmente um possível avanço da cunha salina na parte este (Figura 5.29).

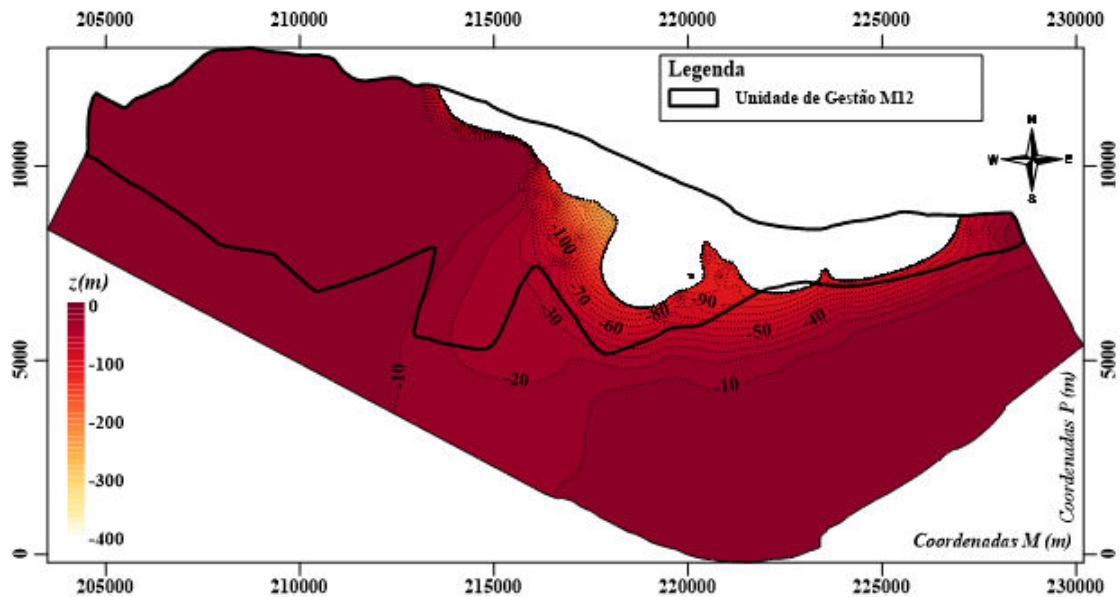


Figura 5.29 - Localização da interface no aquífero semi-confinado no cenário 4

Caso se verifique um aumento da atividade agrícola em locais não abrangidos pela Área Crítica, é lógico que a possibilidade de ocorrência de avanços da cunha salina na zona oeste do sistema venha a aumentar.

5.2.5 Cenário 5 - Área Regada Atual + Área de Cultivo Abandonada abrangida pela RAN fora da Área Crítica

No quinto e último cenário hipotético de aumento da exploração agrícola, pretendeu-se analisar o comportamento do sistema da Campina de Faro, caso houvesse um reaproveitamento da área de cultivo abandonada abrangida pela RAN, que se encontra fora da zona considerada como Área Crítica (Figura 5.30). Acrescentou-se à área regada atual a área de cultivo abandonada referida previamente.

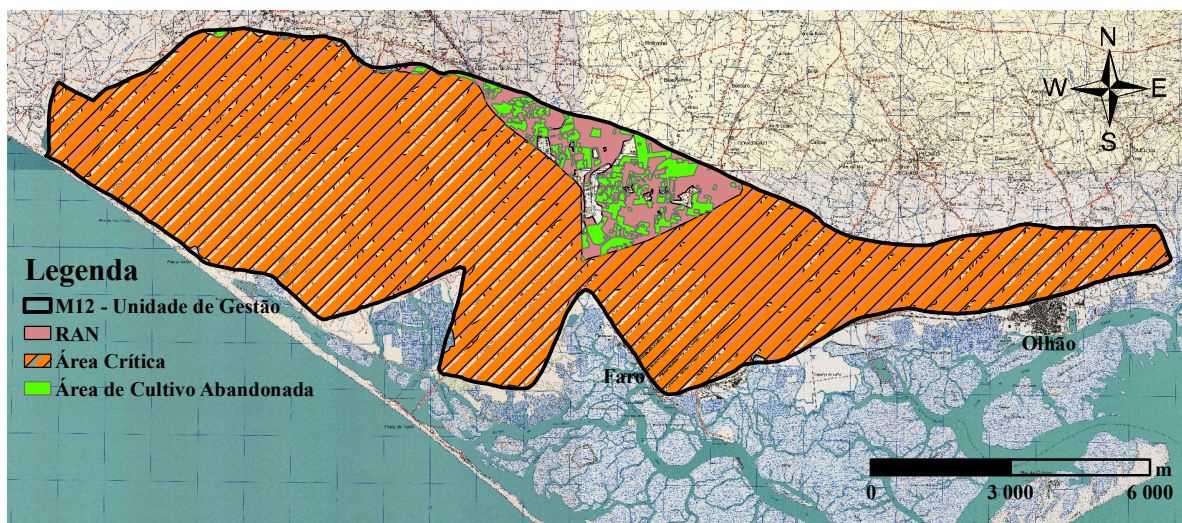


Figura 5.30 - Área de cultivo abandonada abrangida pela RAN fora da Área Crítica

A área de rega total determinada para o quinto cenário é de 1787 hectares e a extração de 14,16 hm³/ano (Figura 5.31).

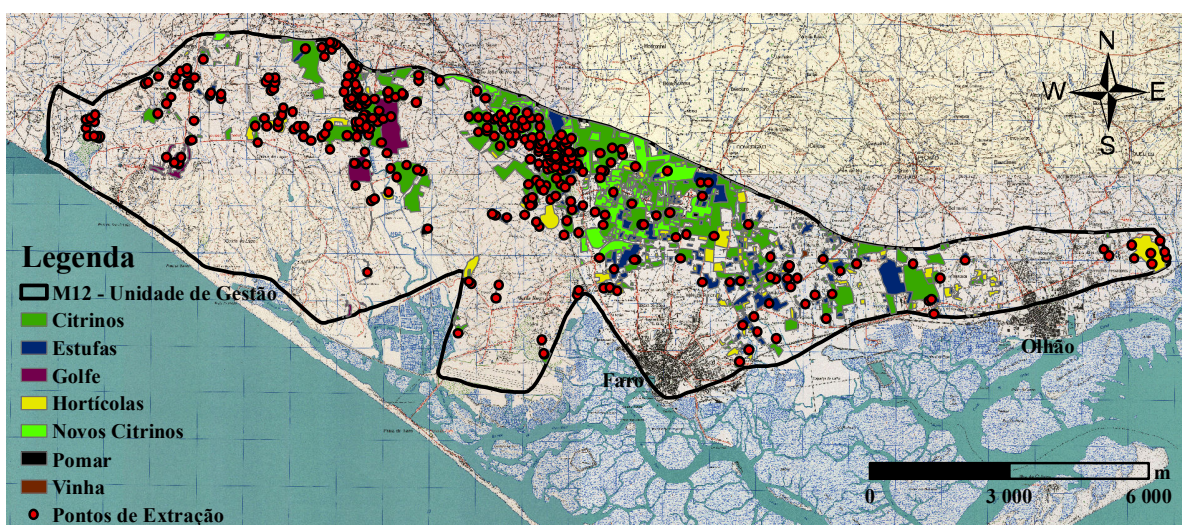


Figura 5.31 - Cenário 5

No Anexo III estão presentes as quantidades de água extraídas pelos diferentes tipos de cultura, bem como o número de furos existentes neste cenário.

O balanço da simulação do cenário 5 está representado no Quadro 5.8.

Quadro 5.8 - Balanço do cenário 5

	Saída (hm ³ /ano)	Entrada (hm ³ /ano)
Oceano Atlântico/Ria Formosa	8,44	0,88
Ribeiras	-	1,66
Transferências de Norte	-	5,91
Extração	14,16	-
Precipitação	-	14,15

A simulação do cenário 5 determinou que o sistema aquífero da Campina de Faro admitiria um volume de água com origem nos sistemas aquíferos M9 e M10 de 5,91 hm³/ano. Calculou-se também uma entrada de água salgada no interior do aquífero freático de 0,88 hm³/ano e uma descarga de água subterrânea no Oceano Atlântico e na Ria Formosa de 8,44 hm³/ano. A mesma estimou um escoamento das camadas superiores para o aquífero semi-confinado de 11,88 hm³/ano e uma saída na direção oposta de 0,97 hm³/ano.

Caso se verifique este cenário, em conformidade com o balanço obtido é expectável que se venham a observar condições para a ocorrência de casos de intrusão.

Na Figura 5.32 estão representados os níveis piezométricos do aquífero freático.

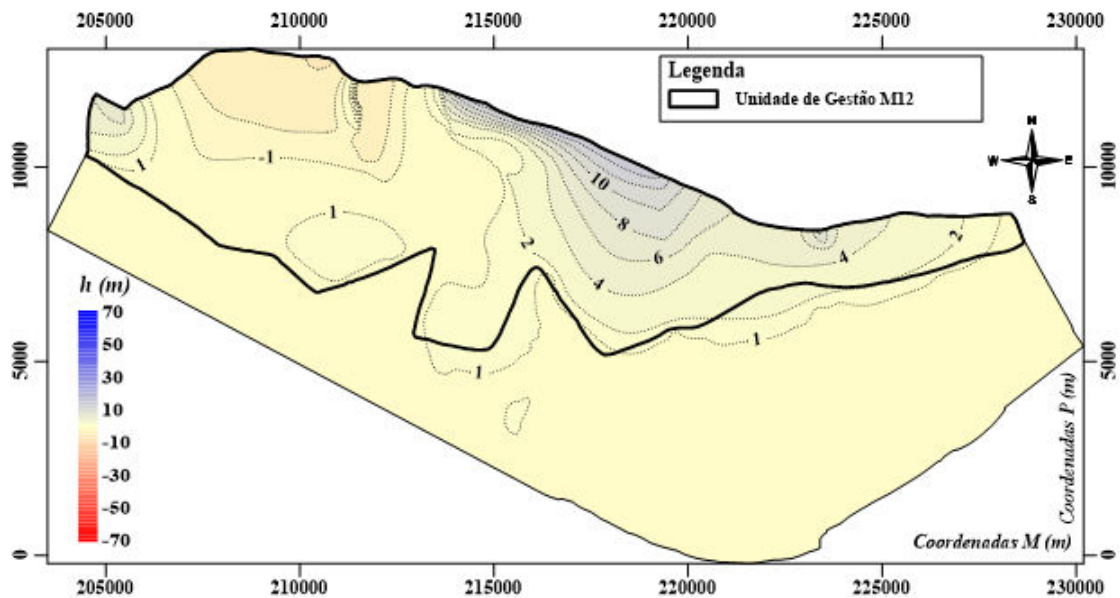


Figura 5.32 - Níveis piezométricos do aquífero freático no cenário 5

A simulação do presente cenário estimou uma piezometria idêntica à registada no caso anterior. Todavia, devido à menor extração de água associada, os níveis piezométricos seriam ligeiramente superiores. Na zona oeste esperar-se-ia novamente a presença de piezometria negativa.

Deste modo, estimou-se um avanço da cunha salina na parte oeste do sistema (Figura 5.33).

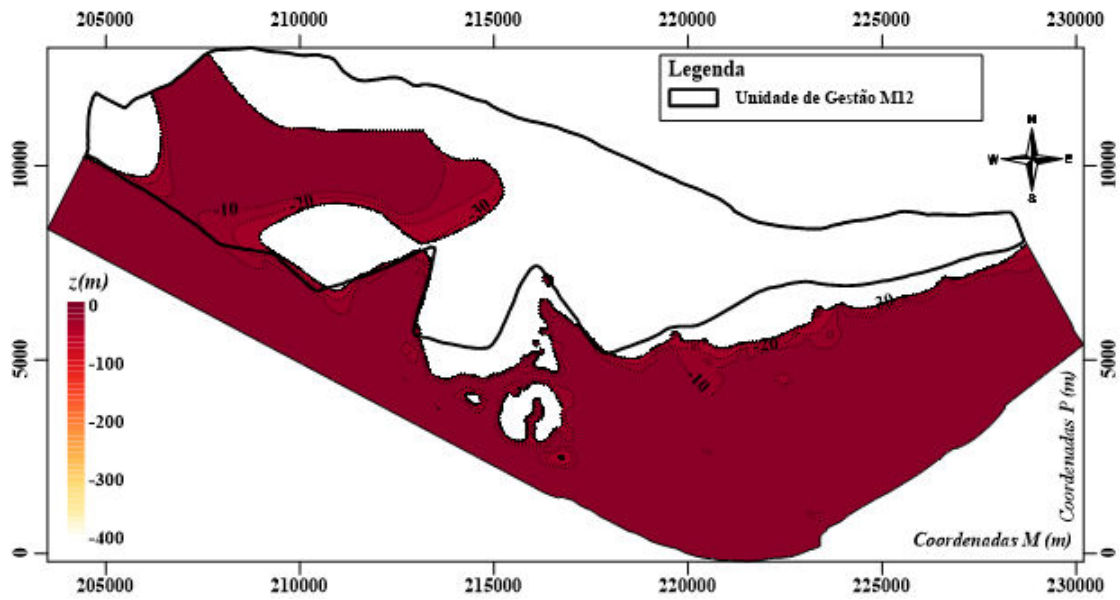


Figura 5.33 - Localização da interface no aquífero freático no cenário 5

Na Figura 5.34 estão representados os níveis piezométricos no aquífero semi-confinado.

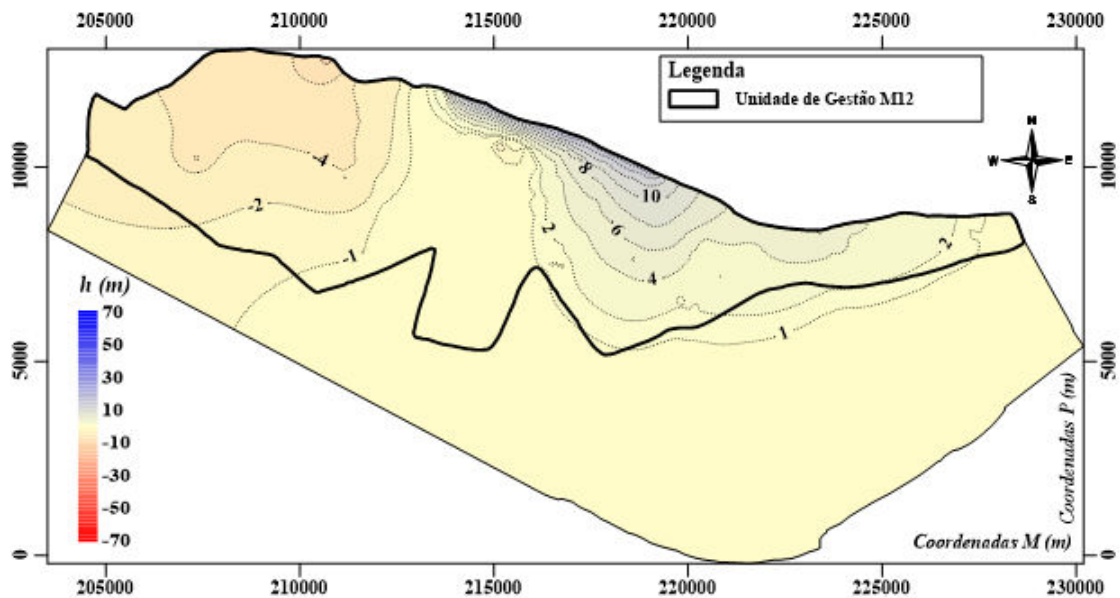


Figura 5.34 - Níveis piezométricos do aquífero semi-confinado no cenário 5

Similarmente ao verificado no aquífero freático, também no aquífero semi-confinado foram estimados níveis piezométricos baixos na zona oeste, com uma variação piezométrica entre os -2 e -7,5 metros em relação ao nível médio do mar.

Determinou-se que o avanço da intrusão salina afete essencialmente a área referida. Os resultados sugeriram igualmente a possível ocorrência deste fenómeno numa pequena extensão na zona este do sistema (Figura 5.35).

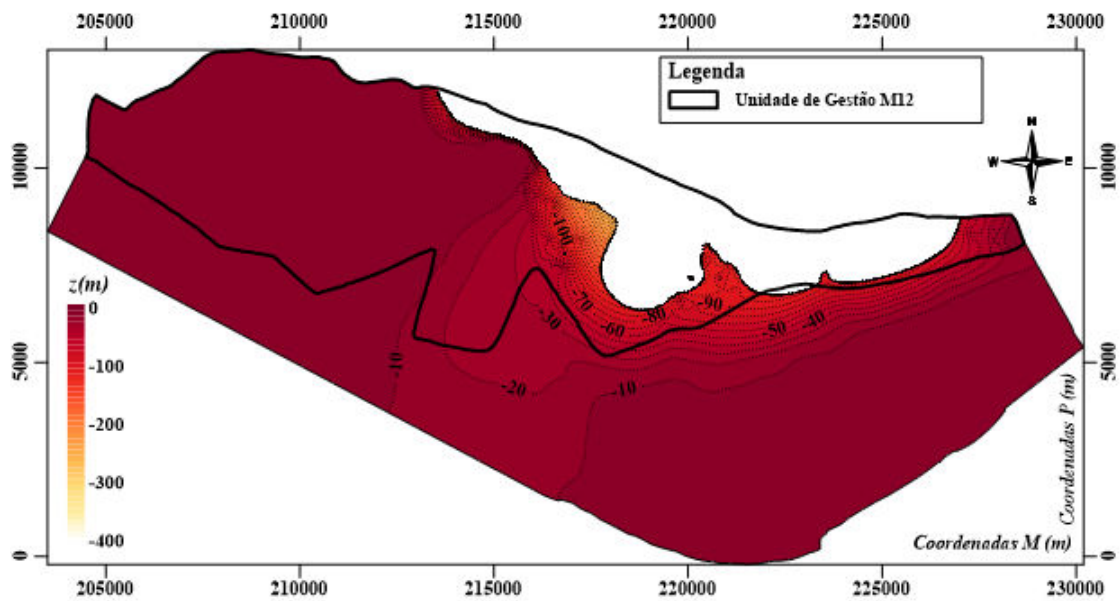


Figura 5.35 - Localização da interface no aquífero semi-confinado no cenário 5

Dada a similaridade entre este cenário e o simulado anteriormente, também neste será expectável um aumento de avanços da intrusão salina, especialmente nas áreas envoltas às urbanizações de Vale do Lobo e Quinta do Lago.

Comparativamente aos restantes cenários hipotéticos de incremento da atividade agrícola, este foi o que apresentou a menor extensão de intrusão salina nos aquíferos freático e semi-confinado.

5.2.6 Alterações Climáticas - Efeitos previstos entre 2020 e 2050

Neste cenário realizou-se uma simulação do sistema aquífero da Campina de Faro tendo em conta os efeitos das alterações climáticas esperados para a região algarvia entre 2020 e 2050. Para este cenário considerou-se como referência o estado atual do sistema.

De acordo com a previsão estimada por Stigter et al. (2014), durante este período de tempo conjeturou-se uma redução média da recarga direta anual de 5% e um aumento médio da procura de água para fins agrícolas de 14%.

No Quadro 5.9 está representado o balanço da simulação deste cenário.

Quadro 5.9 - Balanço do cenário climático previsto entre 2020 e 2050

	Saída (hm ³ /ano)	Entrada (hm ³ /ano)
Oceano Atlântico/Ria Formosa	7,83	0,95
Ribeiras	-	1,58
Transferências de Norte	-	5,71
Extração	13,85	-
Precipitação	-	13,44

Com a diminuição expectável da recarga (precipitação e caudais das ribeiras) mais o aumento esperado da extração de água (devido à maior evapotranspiração das plantas), a simulação estimou que o sistema da Campina de Faro viria a necessitar de maiores quantidades de água provenientes dos sistemas a norte. Esperar-se-ia uma transferência oriunda de norte de 5,71 hm³/ano, valor superior ao considerado na atualidade. Previu-se igualmente uma redução da descarga subterrânea do aquífero freático para a Ria Formosa e Oceano Atlântico (7,83 hm³/ano) e um aumento de entrada de água salgada no interior deste (0,95 hm³/ano). A simulação calculou uma contribuição de 11,71 hm³/ano das camadas superiores ao aquífero semi-confinado e um fluxo no sentido contrário de 0,90 hm³/ano.

De acordo com o balanço resultante da simulação deste cenário climático, presume-se que num futuro próximo a possibilidade de ocorrência de fenómenos de intrusão salina no sistema da Campina de Faro venha a aumentar.

Na Figura 5.36 estão representados os níveis piezométricos do aquífero freático.

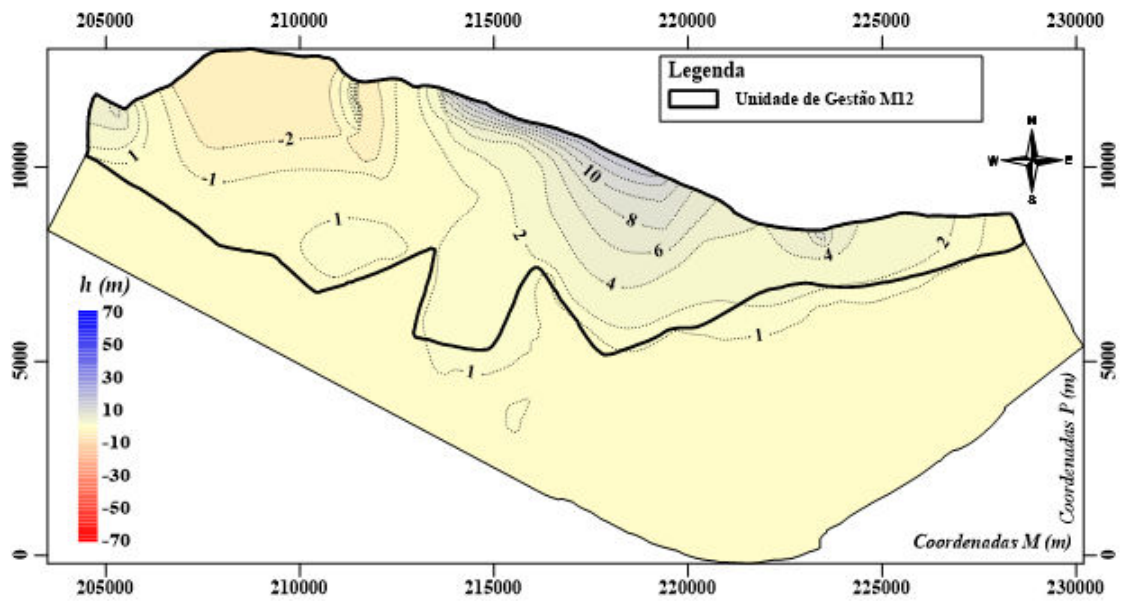


Figura 5.36 - Níveis piezométricos do aquífero freático entre 2020 e 2050

Comparativamente ao registado na situação atual, entre 2020 e 2050 estima-se uma redução geral dos níveis piezométricos em toda a área compreendida pela Unidade de Gestão no aquífero freático, sendo esta mais acentuada na zona oeste.

Face à redução esperada dos níveis e à expectável presença de piezometria negativa na zona oeste, supõe-se um aumento extensivo da intrusão salina no respetivo local (Figura 5.37).

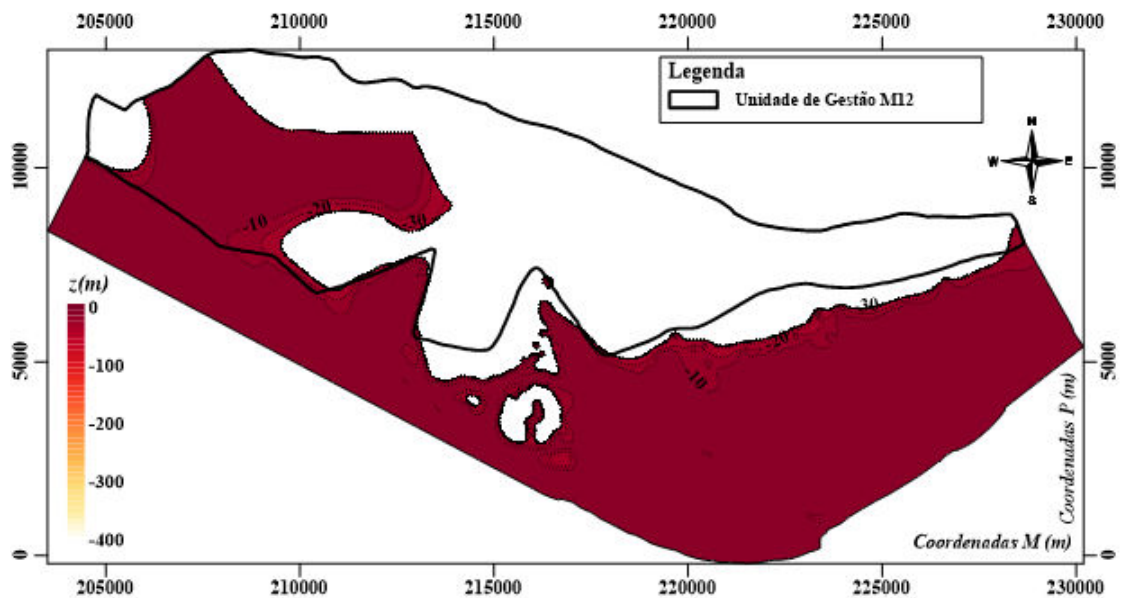


Figura 5.37 - Localização da interface no aquífero freático entre 2020 e 2050

Os níveis piezométricos no aquífero semi-confinado estão representados na Figura 5.38.

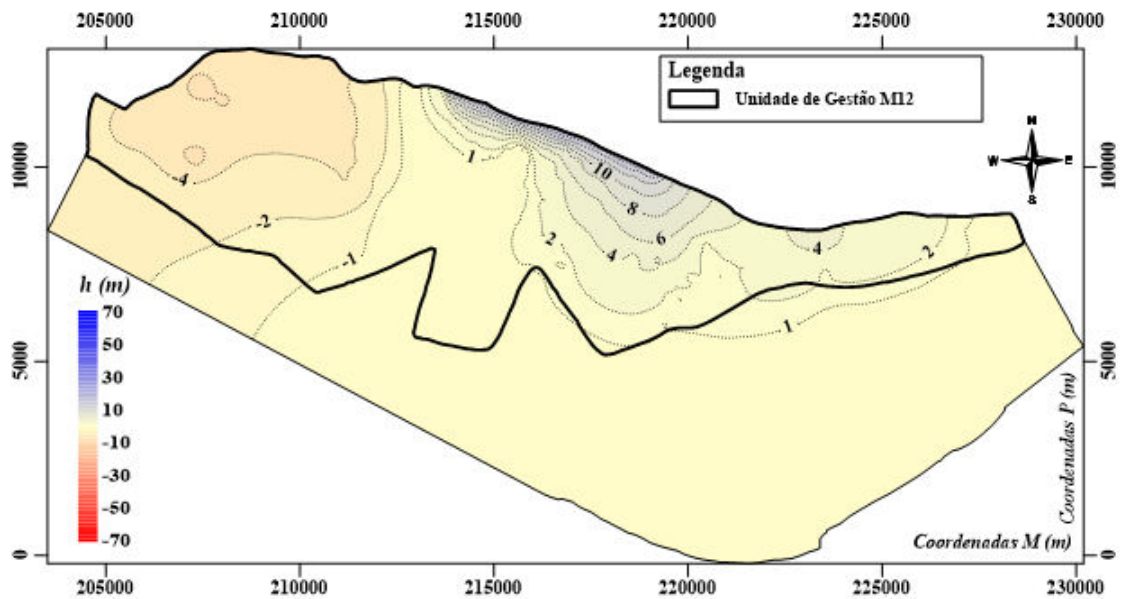


Figura 5.38 - Níveis piezométricos do aquífero semi-confinado entre 2020 e 2050

No aquífero semi-confinado esperar-se-á igualmente uma redução dos níveis piezométricos na zona oeste, com uma variação de piezometria entre os -2 e -7 metros.

Identicamente ao registado no aquífero freático, também no semi-confinado são esperados aumentos da área afetada pelo avanço da cunha salina, nomeadamente na zona oeste. Para além desta zona, os resultados indicaram igualmente um possível avanço da intrusão na zona este (Figura 5.39).

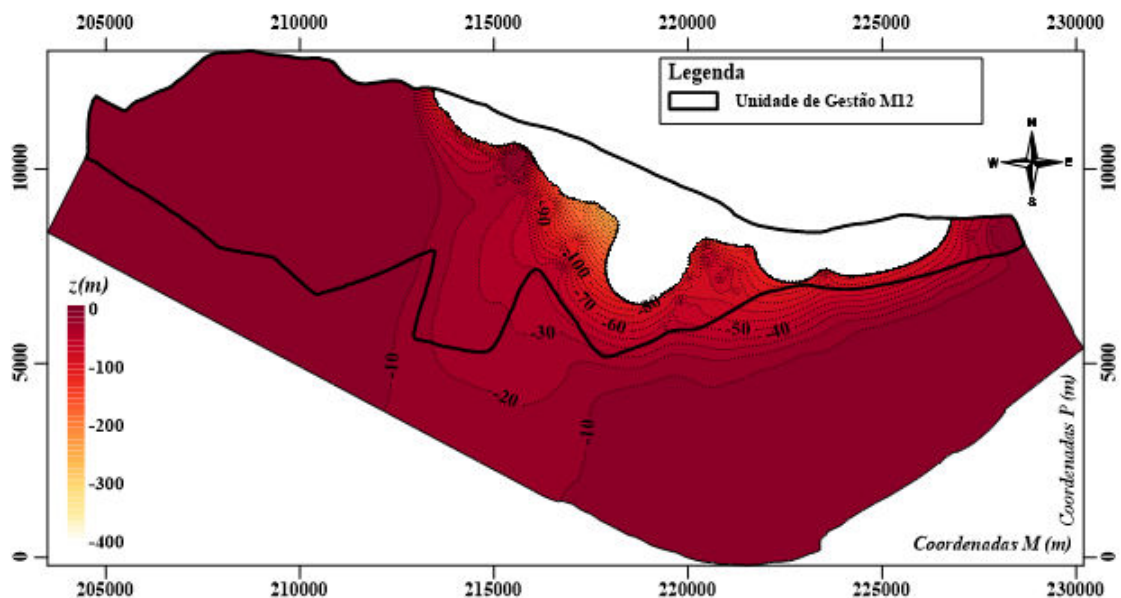


Figura 5.39 - Localização da interface no aquífero semi-confinado entre 2020 e 2050

Em conformidade com os dados obtidos pela simulação deste cenário, mesmo que a APA IP-ARH Algarve impeça o crescimento da atividade agrícola, espera-se que o sistema da Campina de Faro venha a ser afetado por fenómenos de intrusão salina.

Para se evitar o aumento da salinização no futuro, será necessário aplicar-se medidas de adaptação que contribuam para a atenuação dos efeitos resultantes das alterações climáticas.

5.2.7 Alterações Climáticas - Efeitos previstos entre 2069 a 2099

Neste cenário pretendeu-se analisar o comportamento do sistema aquífero da Campina de Faro, tendo em consideração os efeitos das alterações climáticas esperados no Algarve entre 2069 e 2099. Também neste cenário foi considerado como referência o estado atual do sistema.

Em conformidade com a previsão estimada por Stigter et al. (2014), presume-se uma redução média da recarga direta anual de 39% e um aumento médio da procura de água para fins agrícolas de 32%.

No Quadro 5.10 está representado o balanço estimado pela primeira simulação deste cenário.

Quadro 5.10 - Balanço da primeira simulação do cenário climático previsto entre 2069 e 2099

	Saída (hm ³ /ano)	Entrada (hm ³ /ano)
Oceano Atlântico/Ria Formosa	3,41	2,75
Ribeiras	-	1,01
Transferências de Norte	-	7,06
Extração	16,04	-
Precipitação	-	8,63

Motivada pela expectável diminuição acentuada da recarga (precipitação e caudais das ribeiras), aliado ao aumento significativo da extração de água para fins agrícolas (maior evapotranspiração das plantas), a primeira simulação deste cenário estimou uma recarga com origem nas transferências a norte de 7,06 hm³/ano. Todavia, este valor excedeu a soma das recargas máximas estimadas para os sistemas M9 e M10 (4,48 hm³/ano), visto que também estes serão afetados pelos efeitos das alterações climáticas. Concluiu-se que esta simulação sobrestimou o valor desta recarga.

Para se ultrapassar este problema foi necessário realizar-se uma substituição do tipo de condição de fronteira representativa das ditas transferências. Face à impossibilidade de se impor restrições nas condições de fronteira aquando da presença de simulações em regime permanente (no presente caso de *Cauchy*), foi preciso aplicar-se uma nova condição de fronteira (*Neumann*). Só desta forma foi possível impor-se o valor desejável, tendo sido fixado um fluxo constante de 4,48 hm³/ano.

A definição da condição de fronteira aplicada neste cenário como forma de ultrapassar o obstáculo proveniente da sobrestimação da recarga, é válida, como se pode constatar pela visualização dos mapas piezométricos que se encontram no Anexo IV. A sua validação é passível

de constatação uma vez que os resultados não apresentam significativas alterações no cenário de referência (Cenário 1).

No Quadro 5.11 está representado o balanço da segunda simulação deste cenário, na qual foi aplicada a condição de fronteira de *Neumann*.

Quadro 5.11 - Balanço da segunda simulação do cenário climático previsto entre 2069 e 2099

	Saída (hm ³ /ano)	Entrada (hm ³ /ano)
Oceano Atlântico/Ria Formosa	2,84	4,75
Ribeiras	-	1,01
Transferências de Norte	-	4,48
Extração	16,04	-
Precipitação	-	8,63

Com a imposição de um valor menor nas condições de fronteira correspondentes às transferências oriundas de norte, a simulação deste cenário anteviu uma descarga subterrânea do aquífero freático para a Ria Formosa e Oceano Atlântico de 2,84 hm³/ano e uma entrada de água salgada no interior deste de 4,75 hm³/ano. Estimou-se também uma admissão de água no semi-confinado com origem nas camadas superiores de 13,75 hm³/ano e um escoamento inverso de 0,24 hm³/ano.

De acordo com o balanço resultante da simulação deste cenário, a possibilidade de ocorrência de fenómenos de intrusão salina entre 2069 e 2099 será comparativamente superior à situação atual.

Os níveis piezométricos no aquífero freático estão representados na Figura 5.40.

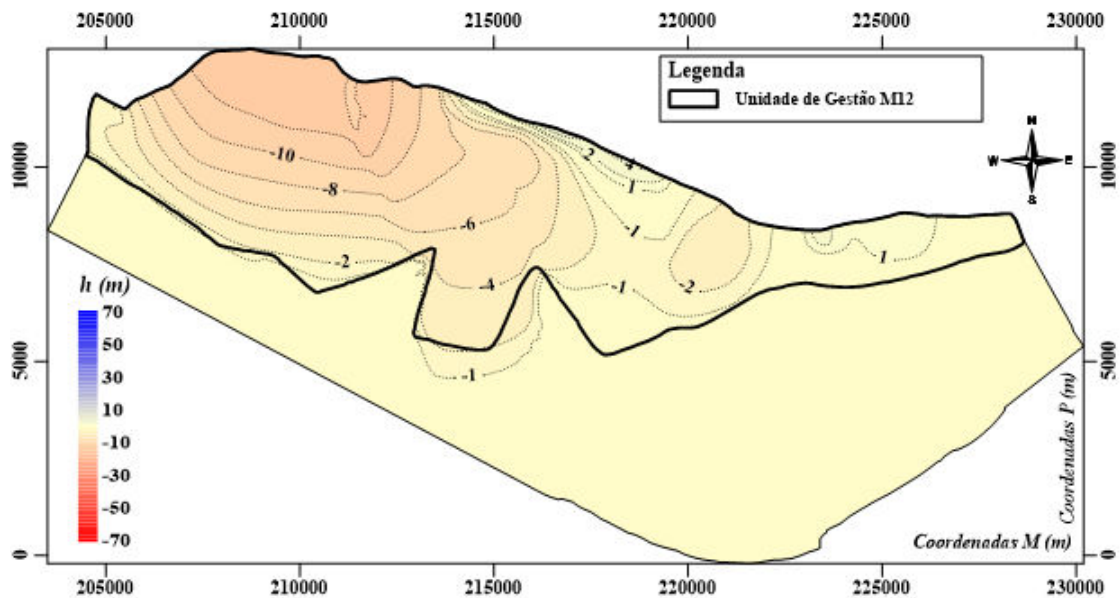


Figura 5.40 - Níveis piezométricos do aquífero freático entre 2069 e 2099

O mapa piezométrico do aquífero freático resultante da simulação do cenário climático esperado entre 2069 e 2099, estima uma redução significativa da piezometria em toda a Unidade de Gestão. Este decréscimo da piezometria será maior na área onde atualmente subsiste maior exploração agrícola e turística, ou seja, na zona oeste do sistema da Campina de Faro.

Presume-se que existirá um aumento expressivo da extensão da intrusão salina neste aquífero na área abrangida pela Unidade de Gestão (Figura 5.41).

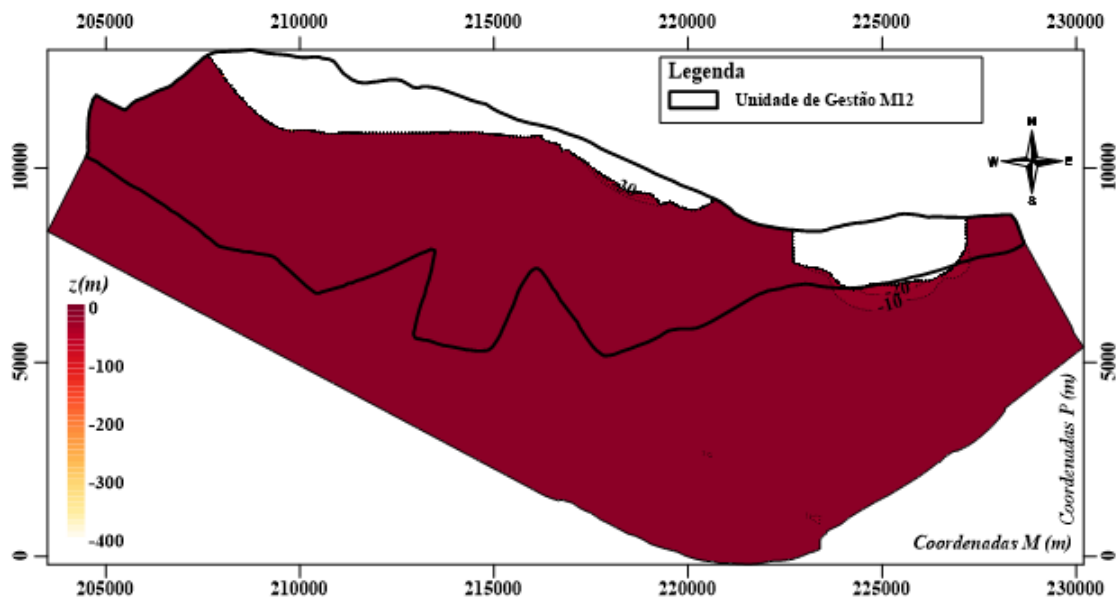


Figura 5.41 - Localização da interface no aquífero freático entre 2069 e 2099

Na Figura 5.42 estão representados os níveis piezométricos no aquífero semi-confinado.

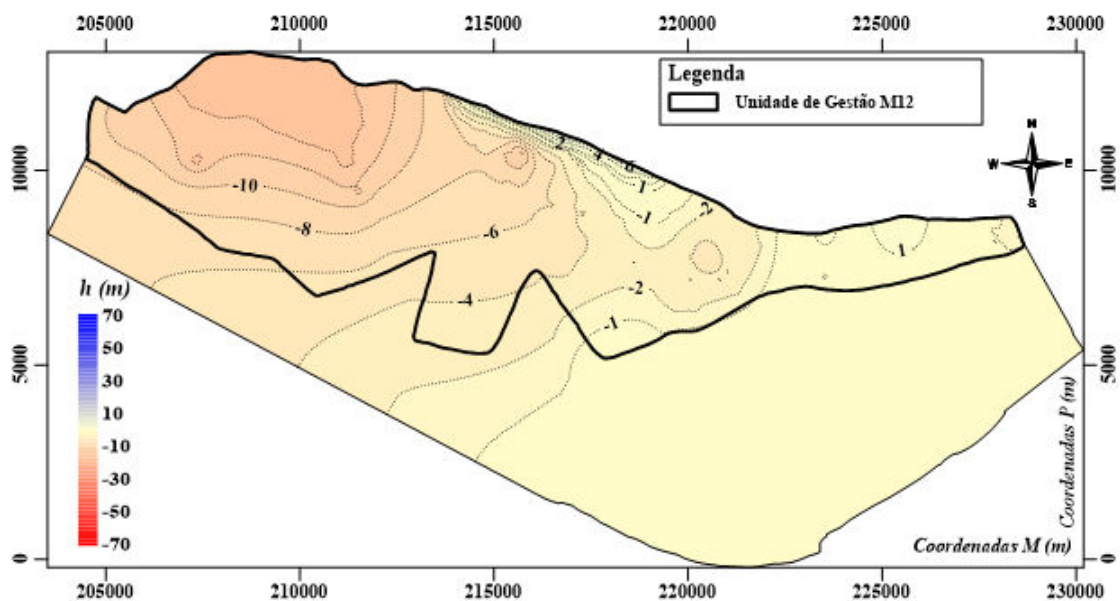


Figura 5.42 - Níveis piezométricos do aquífero semi-confinado entre 2069 e 2099

No aquífero semi-confinado é igualmente esperado uma redução significativa da piezometria. Para além dos habituais níveis piezométricos negativos estimados na zona oeste, aguarda-se igualmente uma diminuição destes na zona central.

Em relação à intrusão salina neste aquífero, antevê-se um avanço considerável da sua extensão em toda a área abrangida pela Unidade de Gestão. A interface apenas se encontrará a diferentes cotas nos locais onde os resultados da simulação estimaram a presença de piezometria positiva (Figura 5.43).

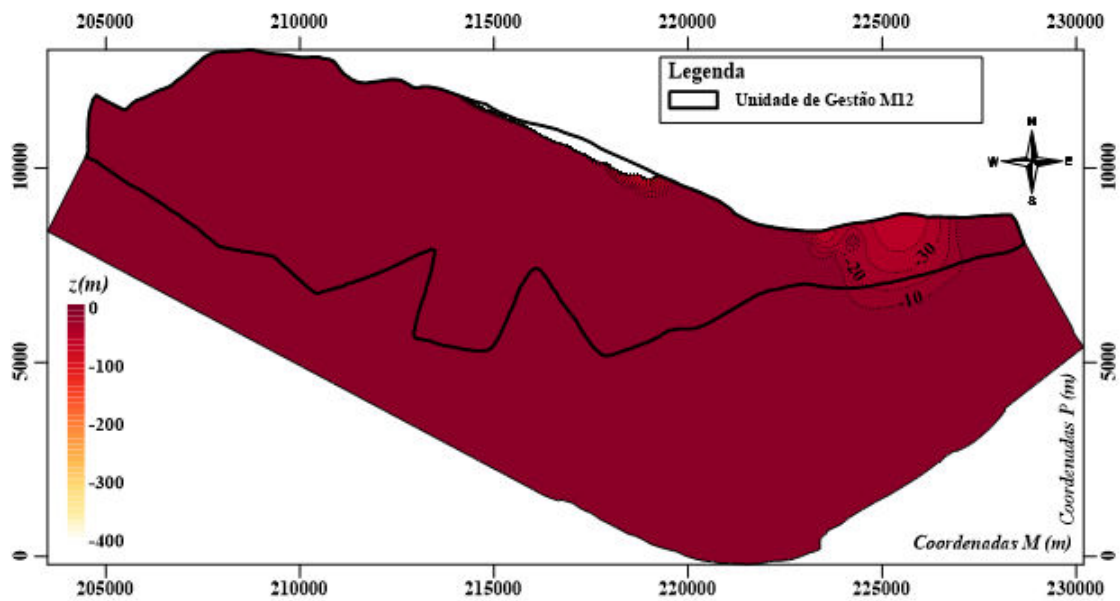


Figura 5.43 - Localização da interface no aquífero semi-confinado entre 2069 e 2099

De acordo com os resultados obtidos, mesmo que a entidade gestora imponha restrições ao crescimento agrícola é expectável que o sistema aquífero da Campina de Faro venha a ser severamente afetado por fenómenos de intrusão salina. Comparando este cenário com o caso mais extremo de aumento da exploração agrícola (Cenário 2), apesar da simulação ter estimado um volume inferior de água salgada no sistema, os resultados revelaram uma área afetada pela intrusão salina significativamente maior.

Uma vez mais se comprova a necessidade de serem aplicadas medidas de adaptação, com vista à atenuação do eventual aumento da salinização deste sistema provocado pelos efeitos das alterações climáticas.

6 Discussão dos Resultados

A simulação do impacto da exploração do sistema aquífero da Campina de Faro demonstrou claramente que este já se encontra num estado de sobre-exploração. Apesar de não se verificar ainda uma deterioração significativa da qualidade da água, os resultados demonstraram que o atual regime de exploração não é sustentável a longo prazo. Tal como esperado, qualquer cenário associado a um hipotético crescimento da atividade agrícola e consequente aumento da extração, apresentará impactos ambientais ainda mais expressivos. Assim sendo, não se considera viável qualquer redução à limitação imposta em toda a extensão da Área Crítica.

No que respeita às simulações referentes à redução de recarga e aumento de procura de água subterrânea associadas às alterações climáticas esperadas na região, o panorama apresentado foi ainda mais pessimista. Os valores médios destes fatores apresentaram impactos mais significativos a longo termo (final do século XXI), comparativamente ao conjeturado no caso mais extremo de incremento agrícola. Todavia, a determinação exata dos impactos climáticos é um processo complexo devido à elevada incerteza associada às previsões estimadas por Stigter et al. (2014). Estes autores determinaram intervalos de percentagem relativos à redução da recarga dos aquíferos e ao aumento da procura de água subterrânea.

Face a antevisão de que o sistema da Campina de Faro venha a ser afetado no futuro, é importante a aplicação de medidas de mitigação, de forma a evitar-se o aumento gradual da salinização e prolongar a sua sustentabilidade.

A análise dos balanços hídricos dos vários cenários simulados demonstrou que o sistema da Campina de Faro, carece de uma forte dependência de recarga proveniente de aquíferos localizados a norte. Na atual análise não foi tido em conta o efeito do aumento de exploração agrícola nestes aquíferos, tendo sido apenas analisada a área sobrejacente à da Campina de Faro. No entanto, num estudo preliminar focado nos sistemas aquíferos que contribuem para a bacia da Ria Formosa, foi possível visualizar os efeitos na extensão da cunha salina nos aquíferos costeiros, admitindo aumentos da exploração em aquíferos localizados a montante (Hugman et al. 2015). Estes resultados evidenciam a fragilidade de se considerar os sistemas aquíferos como simples “Unidades de Gestão”, sem ter em consideração a existência de possíveis interligações entre si.

7 Conclusão

A realização deste trabalho teve como objetivo a simulação de cenários de exploração e de alterações climáticas no sistema aquífero da Campina de Faro, contribuindo-se desta forma para a análise do hipotético avanço da intrusão salina. Para tal foi idealizado um modelo conceptual do funcionamento deste sistema, o qual foi traduzido num modelo numérico de escoamento. Face à incerteza relacionada com a contribuição proveniente de aquíferos localizados a norte, em conformidade com a situação atual, testou-se em regime permanente três variantes do modelo numérico no que concerne à forma de entrada de água. A variante correspondente à extensão de recarga lateral (em todas as camadas) entre as ribeiras do Biogal e do Rio Seco, foi a que apresentou melhores resultados, tendo sido estimada uma recarga média anual de 5,13 hm³ com origem nos sistemas aquíferos de Almancil-Medronhal (M9) e São João da Venda-Quelfes (M10).

Os resultados indicaram que o sistema da Campina de Faro já se encontra num estado de sobre-exploração, existindo condições favoráveis à ocorrência de intrusão salina, nomeadamente nas áreas envolventes de Vale do Lobo e Quinta do Lago. Concluiu-se que o atual regime de exploração não será sustentável a longo prazo, facto corroborado pelo recente aumento da concentração de cloretos registado nas áreas referidas. Em relação ao hipotético crescimento da atividade agrícola, é expectável um aumento extensivo da intrusão salina e consequentemente de impactes ambientais ainda mais significativos. Logo, não é considerado viável qualquer redução à limitação imposta na extensão considerada como Área Crítica. Porém, mesmo que a APA IP-ARH Algarve decida manter as atuais restrições, serão igualmente esperados aumentos consideráveis do avanço da cunha salina, em consequência das alterações climáticas previstas para o presente século.

Constatou-se que a sustentabilidade deste sistema enquanto fonte de abastecimento de água está dependente da implementação de medidas de adaptação, como por exemplo: redução da exploração atual com recurso a culturas com menores dependências hídricas, aumento da eficiência de rega, aplicação conjunta de recursos hídricos superficiais e subterrâneos e utilização de água residual tratada para fins agrícolas.

Num modo geral, os objetivos propostos nesta dissertação foram alcançados. Todavia, com o intuito de se complementar o estudo até então desenvolvido, atendendo as variabilidades inter e intra-anuais da precipitação e da extração, sugere-se a elaboração de um modelo numérico de escoamento em regime transitório. Este poderá ser utilizado como modelo de transporte de massa, tornando possível a realização de uma análise mais detalhada das diferenças de densidade e uma determinação mais exata relativa à ocorrência de intrusão salina.

8 Referências Bibliográficas

- Ackerman, D.J., Rosseau, J.P., Rattray, G.W. & Fisher, J.C. (2010). Steady-State and Transient Models of Groundwater Flow and Advective Transport, Eastern Snake River Plain Aquifer, Idaho National Laboratory and Vicinity, Idaho: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5123, Reston, VA, USA. 220 pp.
- Alcobia, S., Bettencourt, P., Monteiro, J.P., Chambel, A., Nunes, L., Martins, R., Silva, M.O., Sena, C. & Duque, J. (2013). As Águas Subterrâneas nos Planos de Gestão das Bacias Hidrográficas do Sul de Portugal - Estado, Pressões e Medidas. Actas do 11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa (SISLUBA). Org. APRH, ABRH, AMCT, INGRH., Maputo, Moçambique. 12 pp.
- Almeida, C., Mendonça, J., Jesus, M. & Gomes, A. (2000). Sistemas Aquíferos de Portugal Continental: INAG, Lisboa, Portugal.
- Anderson, M.P. & Woessner, W. (1992). Applied groundwater modelling. Simulation of flow and advective transport: Academic Press, San Diego, CA, USA. 381 pp.
- Austin, M.J., Masselink, G., McCall, R.T. & Poate, T.G. (2013). Groundwater dynamics in coastal gravel barriers backed by freshwater lagoons and the potential for saline intrusion: Two cases from the UK. *Journal of Marine Systems*, Volume 123-124, 19-32 pp.
- Bear, J. & Verruijt, A. (1987). Modeling Groundwater Flow and Pollution: D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, The Netherlands. 414 pp.
- Bowen, R. (1986). Groundwater: Springer Science & Business Media, New York, NY, USA. 428 pp.
- Carrera, J., Alcotea, A., Medina, A., Hidalgo, J. & Slooten, L.J. (2005) Inverse problem in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, Volume 13, 206-222 pp.
- Cheng, A.H.D. & Ouazar, D. (2003). Coastal Aquifer Management-Monitoring, Modeling, and Case Studies: CRC Press, Boca Raton, FL, USA. 296 pp.
- Cooley, R.L. & Naff, R.L. (1990). Regression Modeling of Ground-Water Flow. In *Techniques of Water-Resources Investigations - Book 3: US Geological Survey*, Washington, DC, USA. 241 pp.
- Diamantino, C. (2009). Recarga artificial de aquíferos: Aplicação ao sistema aquífero da Campina de Faro. Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Geologia, na especialidade de Hidrogeologia. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. 322 pp.
- Diersch, H.-J. (2014). FEFLOW - Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media: Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Germany. 996 pp.
- Doherty, J. (2002). PEST - Model-Independent Parameter Estimation. Watermark Computing, Corinda, Australia. 279 pp.
- Fetter, C.W. (2001). Applied Hydrogeology, 4th edition: Prentice Hall, New Jersey, NJ, USA. 598 pp.

- Geinaert, W., Beers, V., P.H., de Vries, J.J. & Hoogeveen, H. (1982). A GeoElectric survey of the Miocene Aquifer between Quarteira and Olhão. Hydrogeologic Studies in the East Algarve, Portugal. Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands.
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33:L08707.
- Hugman, R., Monteiro, J.P., Viegas, J., Góis, A., Costa, L. & Stigter, T.Y. (2015). Re-assessing the coastal groundwater management policy in the Algarve (Portugal) based on estimates of the potential for seawater intrusion. 42nd IAH Congress, Rome, Italy.
- Hugman, R., Stigter, T.Y. & Monteiro, J.P. (2013). The importance of temporal scale when optimising abstraction volumes for sustainable aquifer exploitation - A case study in semi-arid South Portugal. *Journal of Hydrology*, Volume 490, 1-10 pp.
- Huyakorn, P. & Pinder, G. (1983). *Computational Methods in Subsurface Flow*, 3rd edition: Academic Press, New York, NY, USA. 473 pp.
- Karant, K.R. (1987). *Ground Water Assessment - Development and Management*: Tata McGraw-Hill Education, New Delhi, India. 720 pp.
- Kinzelbach, W. (1986). *Groundwater Modelling - An Introduction With Sample Programs in Basic*, Vol. 25: *Developments in Water Science*, New York, NY, USA. 333 pp.
- Liu, L. (2006). Saline Water Intrusion, in *Natural and Human Induced Hazards*, from *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Developed under the Auspices of the UNESCO: Eolss Publishers [<http://www.eolss.net>] Oxford, UK.
- Lobo Ferreira, J.P. (1981). Mathematical model for the evaluation of the recharge of aquifers in semiarid regions with scarce (lack) hydrogeological data. *Proceedings of Euromech 143/2-4 Setp. 1981*: A.A. Balkema (Ed. A. Verruijt & F.B.J Barends). Rotterdam, The Netherlands.
- Lobo Ferreira, J.P., Diamantino, C., Oliveira, M., Moinante, M.J., Dimitriadis, K., Styllas, M., Soupilas, T., Maheras, P., Anagnostopoulou, C., Tolika, K., Vafiadis, M., Machairas, C., Sanchez-Vila, X., Vasquez-Suné, E., Barbieri, M., Bensabat, J., Hadad, A., Rabi, A. & Tamimi, A. (2006). Questionnaire on Test Site Characterization - Five Questionnaires are available for each teste site: Portugal, Spain, Greece, Israel and Palestine (Month 03): Milestone M21 of GABARDINE Project, Lisboa, Portugal.
- Lobo Ferreira, J.P., Leitão, T.E., Martins, T., Oliveira, M.M., Monteiro, J.P. & Novo, M.E. (2013). Variabilidade Climática, Recursos Hídricos Subterrâneos e Ecossistemas Dependentes de Águas Subterrâneas. In *Livro de resumos do 9º Seminário sobre Águas Subterrâneas*. Campus de Caparica: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Almada, Portugal, 61-64 pp.
- Manuppella, G. (1992). *Carta Geológica da Região do Algarve, na Escala 1: 100 000 e respectiva Notícia Explicativa*: Direcção Geral de Geologia e Minas - Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, Portugal.
- Manuppella, G., Ramalho, M., Telles Antunes, M. & Pais, J. (1987). *Carta Geológica de Portugal, na escala 1:50 000, Folha 53-A e respectiva Notícia Explicativa*: Direcção Geral de Geologia e Minas - Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, Portugal.
- Ministério da Agricultura do Mar do Ambiente e do Ordenamento do Território (2012a). *Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas que integram a Região Hidrográfica das Ribeiras do*

- Algarve (RH8), Volume I-Relatório Parte 2, Tomo 2 (Caracterização das massas de água superficiais e subterrâneas). Faro, Portugal. 260 pp.
- Ministério da Agricultura do Mar do Ambiente e do Ordenamento do Território (2012b). Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas que integram a Região Hidrográfica das Ribeiras do Algarve (RH8), Volume I-Relatório Parte 2, Tomo 3C Anexos. Faro, Portugal. 104 pp.
- Monaco, A. & Prouzet, P. (2014). *The Land-Sea Interactions*: ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc. London, UK. 314 pp.
- Monteiro, J.P. (2001). Characterisation of a carbonate aquifer for the application of a regional discrete continuum flow model (Castelo de Vide carbonate aquifer - Alentejo, Portugal). Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Ciências, Faculté des Sciences - Université de Neuchâtel, Neuchâtel, Switzerland. 138 pp.
- Monteiro, J.P., Ribeiro, L., Martins, R., Martins, L. & Bento, L. (2006). Monitorização e Modelação dos Aquíferos Costeiros do Algarve. Actas do VII Congresso Nacional de Geologia. Pólo de Estremoz da Universidade de Évora, Estremoz, Portugal, 557-560 pp.
- Monteiro, J.P., Santos, J. & Martins, R. (2002). Avaliação dos Impactes Associados a Alterações no Regime de Exploração de Sistemas Aquíferos do Algarve Central Usando Modelos Numéricos. Actas do III Congresso Ibérico sobre Gestão e Planificação da Água, Sevilla, Spain, 717-724 pp.
- Nicolau, R. (2002). Modelação e Mapeamento da Distribuição Espacial da Precipitação - Uma Aplicação a Portugal Continental. Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor. Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal. 356 pp.
- Poeter, E.P. & Hill, M.C. (1997). Inverse Models - A Necessary Next Step in Ground-Water Modeling. *Ground Water*, Volume 35, 250-260 pp.
- Reilly, T. (2001). System and Boundary Conceptualization in Ground-Water Flow Simulation. In *Techniques of Water-Resources Investigations - Book 3*. US Geological Survey, Washington, DC, USA. 38 pp.
- Reis, E. & Gago, C. (2013). Plano Específico de Gestão da Água (PEGA) na Área Crítica do Algarve - Contributos para a sua elaboração. In Livro de resumos do 9º Seminário sobre Águas Subterrâneas. Campus de Caparica: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Almada, Portugal, 57-60 pp.
- Santos, F.D. & Miranda, P. (2006). Alterações Climáticas em Portugal - Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação - Projecto SIAM II: Gradiva, Lisboa, Portugal. 500 pp.
- Scanlon, B.R., Mace, R., Barret, M. & Smith, B. (2003). Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA. *Journal of Hydrology*, Volume 276, 137-158 pp.
- Silva, A.V., Portugal, A. & Freitas, L. (1986). Modelo de Fluxo Subterrâneo e Salinização dos Aquíferos Costeiros entre Faro e Fuseta, T.72, Fasc 1/2: Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, Portugal.

- Silva, M.L. (1988). Hidrogeologia do Algarve Oriental. Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Geologia, na especialidade de Hidrogeologia. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. 260 pp.
- SNIRH, 2015. Monitorização - Águas Subterrâneas. Disponível em: <http://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=2&idItem=1>
- Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water - the state of the science. *Hydrogeology Journal*, Volume 10, 52-67 pp.
- Stigter, T.Y. (2005). Integrated Analysis of Hydrogeochemistry and Assessment of Groundwater Contamination Induced by Agricultural Practices. Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Ciências da Engenharia. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal. 195 pp.
- Stigter, T.Y. & Dill, A.C. (2001). Estudo geológico e hidrogeoquímico das regiões abrangidas pelo projecto. Relatório da Acção 3 do projecto "Efeitos do uso intensivo de fertilizantes e produtos fitossanitários na qualidade do solo e das águas subterrâneas" do Programa Interreg II. Faro, Portugal. 67 pp.
- Stigter, T.Y., Monteiro, J.P., Nunes, L.M., Vieira, J., Cunha, M.C., Ribeiro, L., Nascimento, J. & Lucas, H. (2009). Screening of sustainable groundwater sources for integration into a regional drought-prone water supply system. *Hydrology and Earth System Sciences*, Volume 13(7), 1185-1199 pp.
- Stigter, T.Y., Nunes, J.P., Pisani, B., Fakir, Y., Hugman, R., Li, Y., Tomé, S., Ribeiro, L., Samper, J., Oliveira, R., Monteiro, J.P., Silva, A., Tavares, P.C.F., Shapouri, M., Cancela da Fonseca, L. & El Himer, H. (2014). Comparative assessment of climate change and its impacts on three coastal aquifers in the Mediterranean. *Regional Environmental Change*, Volume 14 (S1), 41-56 pp.
- Stigter, T.Y., Van Ooijen, S.P.J., Post, V.E.A., Appelo, C.A.J. & Dill, A.C. (1998). A hydrogeological and hydrochemical explanation of the groundwater composition under irrigated land in a Mediterranean environment, Algarve, Portugal. *Journal of Hydrology*, Volume 208, 262-279 pp.
- Van Camp, M., Coetsiers, M., Martens, K. & Walraevens, K. (2010). Effects of multi-annual climate variability on the hydrodynamic evolution (1833 to present) in a shallow aquifer system in northern Belgium. *Hydrological Sciences Journal*, Volume 55 (5), 763-779 pp.
- Van Ooijen, S.P.J., Post, V.E.A. & Stigter, T.Y. (1996). Hydrogeology and hydrochemistry of groundwater in the Campina de Faro, Portugal. Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands.
- Wang, H.F. & Anderson, M.P. (1982). Introduction to groundwater modeling. Finite difference finite element methods: Freeman, New York, NY, USA. 237 pp.
- Werner, A.D., Bakker, M., Post, V.E.A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C.T. & Barry, D.A. (2013). Seawater intrusion processes, investigation and management - Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*, Volume 51, 3-26 pp.

Anexo I

A estrutura geológica da Campina de Faro definida com base em *logs* de furos e de piezómetros e da interpretação de SEVs está representada no Quadro A.1.

Quadro A.1 - Informação referente à estrutura geológica da Campina de Faro

Fonte dos dados	Coordenadas (m)		Profundidade da base (m)		
	M	P	Miocénico Detrítico	Miocénico argilo-silto-arenoso	Miocénico calcário e calco-arenoso
Furos e SEVs do LNEC					
LNEC3	219342	8579	-34		
LNEC4	220506	7589	-48		
LNEC5	220462	8010	-40		
VES1	219034	10305	-23		
VES2	219196	8667	-36		
VES5	218844	8628	-76		
INVENTAR LNEC					
611000004/JK15	218850	9170		-68	-270
611000002/JK2	218520	8130		-63	-82
611071008	217060	7740		-73	-170
611071001	216820	7820		-19	-59
611071007	217740	7240		-68	
611071006	217810	9980		-41	-47
611071004	216300	9300		-29	-197
611071003	216400	9150		-30	-205
611071002/JK16	219150	8600		-45	-191
611071010	218750	8800		-77	-108
611071011	218750	8740		-63	-82
Furos Silva et al. (1986)					
A	215828,52	9316,81	-42	-50	
B	216613,04	9005,71	-50	-75	-175
C	217072,93	9452,08	-29	-58	-142
D	217465,19	8924,56	-47	-74	
F	218844,85	9059,82	-92	-133	
G	219196,53	8559,35	-42	-50	-183
I	216328,99	8613,45	-36	-58	
J	216788,88	7517,83	-21	-42	
L	218209,12	8383,51	-22	-49	
M	219183,01	7112,05	-33	-60	-80
N	217843,92	10750,59		-24	-29
O	217816,87	9722,60	-37	-74	
Furos Silva (1988)					

1	216213,94	10984,36		0	
2	216692,77	10799,98		-1	
3	217229,01	10769,4		-0	
4	217940,73	10915,83		-18	
5	219048,27	11390,54		-9	
6	219166,33	11294,55		-10	
7	218783,86	10616,78		-9	
8	219066,62	10409,30		-40	
9	218557,00	9823,95		-37	
10	217754,67	10043,04		-49	
11	217425,22	9454,82		-35	
12	218189,64	9248,53		-43	
13	218727,01	9527,43		-27	
14	219217,01	9664,19		-23	
15	219346,36	9449,60		0	
16	218725,67	9159,82		-68	
17	219086,26	8947,99		-47	
18	218922,99	8385,53		-72	
19	218239,92	8839,92		-57	
20	218407,06	8307,58		-38	
21	218153,23	8407,07		-53	
22	218049,69	8528,80		-52	
23	217346,06	8778,81		-37	
24	216895,86	8962,19		-37	
25	216542,78	9626,13		-29	
26	216187,12	9553,86		-32	
27	216145,11	9008,64		-41	
28	216213,39	8834,94		-42	
29	216714,84	8571,94		-51	
30	216755,76	7766,41		-20	
31	216795,99	7519,05		-38	
32	219117,48	7425,90		-14	
1A	205716	11007		-41	
2A	209650	8713		-32,5	
3A	209261	9704		-22	
4A	210226	9562		-31	
5A	211042	8783		-50	
6A	210471	10403		-26	
7A	209762	10588		-8	
8A	210672	10725		-6	
9A	211176	11943		20	
10A	211087	12230		35	
11A	211691	12004		25	
12A	211814	11821		20	
13A	214017	8864		-36	

14A	214674	7246		-27	
15A	215923	10038		-17	
16A	216845	7600		-27,5	
17A	216815	7854		-9,5	
18A	216761	8673		-40	
19A	216262	8927		-32	
20A	216258	9149		-31	
21A	216940	9054		-23	
22A	217391	8863		-24	
23A	216332	9642		-18	
24A	216592	9708		-12	
25A	217460	9536		-18	
26A	216248	11060		25	
27A	216725	10872		25	
28A	217780	10113		-29	
29A	218233	9324		-23	
30A	218587	9898		-18	
31A	218767	9594		-8	
32A	219251	9729		-2,5	
33A	219390	9508		20	
34A	218771	9229		-51	
35A	219116	8993		-30	
36A	218282	8915		-37	
37A	218092	8602		-32	
38A	218206	8489		-33	
39A	218452	8381		-22	
40A	218968	8458		-60	
41A	219167	7498		-4	
Valores bibliográficos correspondentes à interpolação da informação de Stigter (2005) e Silva (1988)					
1X	217933	5190		-35	
2X	217933	5190		-40	
3X	219486	5835		-35	
4X	220636	6101		-30	
5X	221973	6831		-30	
6X	223199	7014		-30	
7X	224748	6989		-30	
8X	225924	7215		-25	
9X	227458	7708		-25	
10X	227944	7793		-20	
11X	228189	7842		-20	
12X	228376	7903		-25	
13X	228443	7949		-25	
14X	228606	8056		-25	
15X	220523	7446		-5	

16X	221334	7258		-5	
17X	222761	7681		2	
18X	223056	8194		-9	
19X	227902	8209		-12	
20X	227588	8522		-12	
21X	224142	7285		-5	
22X	226025	7410		-5	
23X	227596	7853		-5	
24X	220008	7989		-9	
25X	220684	8548		-9	
26X	221097	8886		-9	
27X	208883	12960		20	
28X	224757	8563		-10	
29X	222164	8400		-9,5	
30X	222739	7718		-5	
31X	222770	7690		-7	
SEVs Van Ooijen et al. (1996)					
SEV1T	217546,36	8213,24		-45	
SEV2T	216766,94	10225,29		-2	-20
SEV3T	219115,90	7949,77		-20	
SEV4T	219938,76	6429,33		-19	-110
SEV5T	216383,51	8569,52		-34	
SEV6T	216531,66	6630,62		-37	
SEV7T	218211,86	10238,06		-45	-51
Geinaert et al. (1982)					
P	219189,14	10840,02			-21
Q	218919,60	9820,44		-25	-85
R	218720,37	9281,36		-43	-121
S	218626,62	8894,62		-36	-150
T	218333,64	8800,87		-39	-214
U	218485,99	8496,17		-43	
W	218286,76	7933,65		-50	
SEV49	216200,74	8261,78			-339
SEV52	217185,15	8660,24			-312
SEV57	218943,04	8789,15			-215
SEV56	218110,97	8554,77			-284
SEV55	218368,80	9339,86			-149
SEV54	218907,88	10195,46			-69

ANEXO II

No aquífero freático a aplicação do método analítico de *Ghyben-Herzberg* teve em conta a elevação da base da formação do Miocénico detrítico, correspondente ao fundo deste aquífero ou topo da camada confinante (Figura A.1).

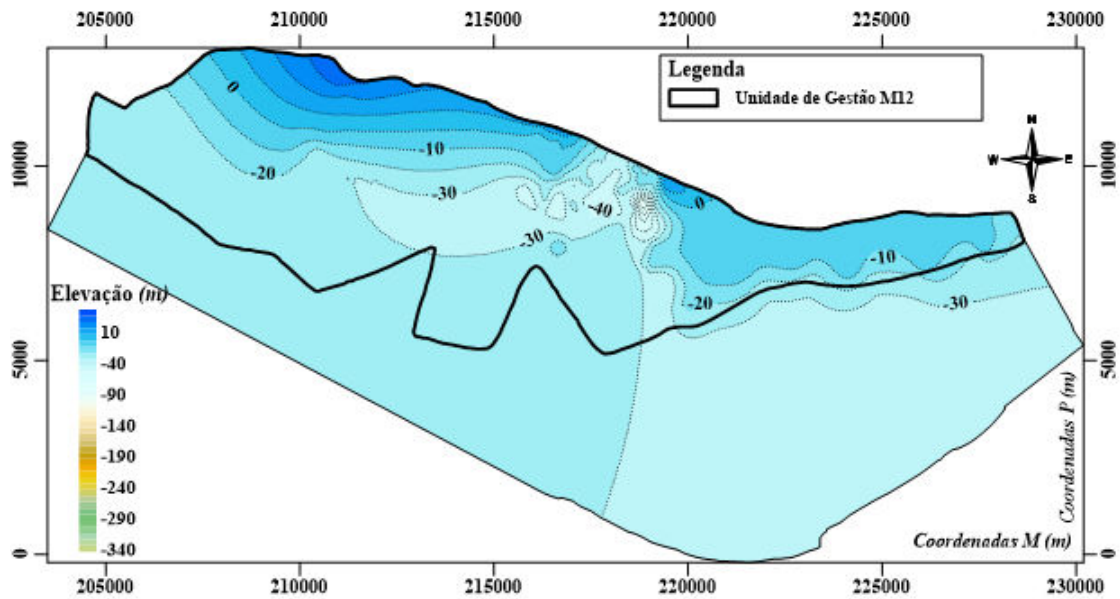


Figura A.1 - Elevação da base da formação do Miocénico detrítico

No aquífero semi-confinado o uso deste método teve em consideração a elevação da base calcária e calco-arenosa do Miocénico, correspondente ao fundo deste aquífero (Figura A.2).

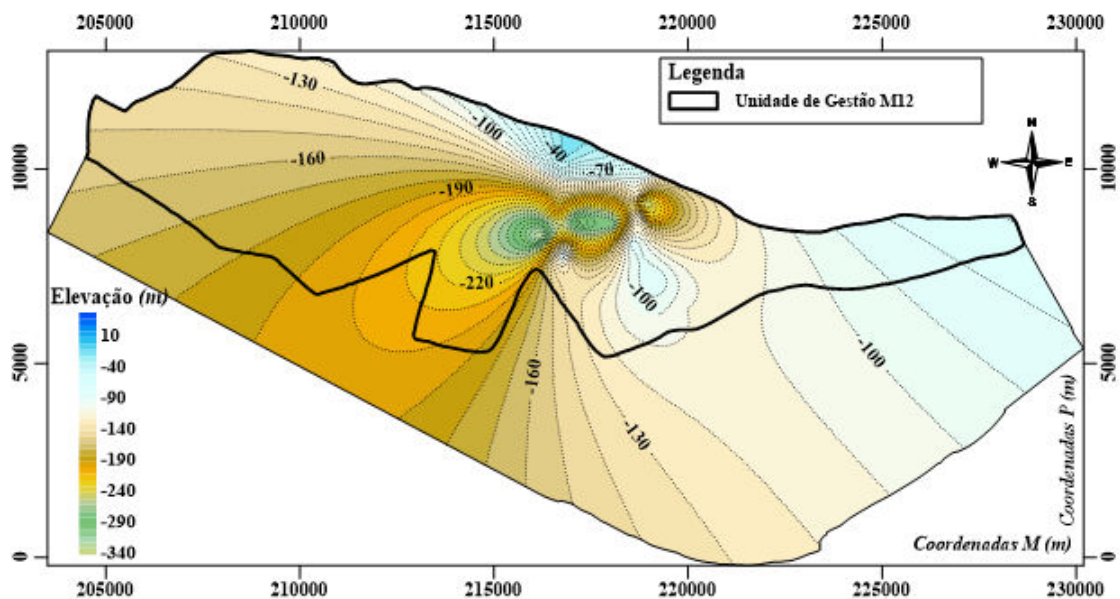


Figura A.2 - Elevação da base calcária e calco-arenosa do Miocénico

ANEXO III

Cenário 1 - Área Regada Atual

Volumes de água extraídos pelos diferentes tipos de cultura no cenário atual (Quadro A.2).

Quadro A.2 - Volumes de água anuais extraídos por cada tipo de cultura no cenário 1

Uso do Solo	Hectares (ha)	Dotação (m ³ /ha.ano)	Extração (m ³ /ano)
Citrios	870,25	6000	5221501
Estufas	264,25	13000	3435296
Golfe	-	-	2428584
Hortícolas	214,98	4750	1021136
Pomar	8,24	4000	32957
Vinha	2,79	600	1675

Número de furos existentes para cada tipo de cultura, bem como os seus caudais de extração diários (Quadro A.3).

Quadro A.3 - Quantidade de pontos de extração existentes no cenário 1 e os seus caudais de extração diários

Uso do Solo	Pontos de Extração	Extração por cada ponto (m ³ /dia)
Citrios	195	73,4
Estufas	47	200,3
Golfe	16	415,9
Hortícolas	53	52,8
Pomar	4	22,6
Vinha	2	2,3

Cenário 2 - Área Regada Atual + Área de Cultivo Abandonada

Volumes de água extraídos pelos diferentes tipos de cultura no cenário 2 (Quadro A.4).

Quadro A.4 - Volumes de água anuais extraídos por cada tipo de cultura no cenário 2

Uso do Solo	Hectares (ha)	Dotação (m ³ /ha.ano)	Extração (m ³ /ano)
Citrios	870,25	6000	5221501
Estufas	264,25	13000	3435296
Golfe	-	-	2428584
Hortícolas	214,98	4750	1021136
Pomar	8,24	4000	32957
Vinha	2,79	600	1675
Novos Citrios	3560,45	6000	21362675

Quantidade de furos existentes para cada tipo de cultura, bem como os seus caudais de extração diários (Quadro A.5).

Quadro A.5 - Quantidade de pontos de extração existentes no cenário 2 e os seus caudais de extração diários

Uso do Solo	Pontos de Extração	Extração por cada ponto (m ³ /dia)
Citrinos	195	73,4
Estufas	47	200,3
Golfe	16	415,9
Hortícolas	53	52,8
Pomar	4	22,6
Vinha	2	2,3
Novos Citrinos	160	365,8

Cenário 3 - Área Regada Atual + Área de Cultivo Abandonada abrangida pela RAN

Volumes de água extraídos pelos diferentes tipos de cultura no cenário 3 (Quadro A.6).

Quadro A.6 - Volumes de água anuais extraídos por cada tipo de cultura no cenário 3

Uso do Solo	Hectares (ha)	Dotação (m ³ /ha.ano)	Extração (m ³ /ano)
Citrinos	870,25	6000	5221501
Estufas	264,25	13000	3435296
Golfe	-	-	2428584
Hortícolas	214,98	4750	1021136
Pomar	8,24	4000	32957
Vinha	2,79	600	1675
Novos Citrinos	2128,97	6000	12773849

Quantidade de furos existentes para cada tipo de cultura, bem como os seus caudais de extração diários (Quadro A.7).

Quadro A.7 - Quantidade de pontos de extração existentes no cenário 3 e os seus caudais de extração diários

Uso do Solo	Pontos de Extração	Extração por cada ponto (m ³ /dia)
Citrinos	195	73,4
Estufas	47	200,3
Golfe	16	415,9
Hortícolas	53	52,8
Pomar	4	22,6
Vinha	2	2,3
Novos Citrinos	132	265

Cenário 4 - Área Regada Atual + Área de Cultivo Abandonada fora da Área Crítica

Volumes de água extraídos pelos diferentes tipos de cultura no cenário 4 (Quadro A.8).

Quadro A.8 - Volumes de água anuais extraídos por cada tipo de cultura no cenário 4

Uso do Solo	Hectares (ha)	Dotação (m ³ /ha.ano)	Extração (m ³ /ano)
Citrinos	870,25	6000	5221501
Estufas	264,25	13000	3435296
Golfe	-	-	2428584
Hortícolas	214,98	4750	1021136
Pomar	8,24	4000	32957
Vinha	2,79	600	1675
Novos Citrinos	347,78	6000	2086694

Número de furos existentes para cada tipo de cultura, bem como os seus caudais de extração diários (Quadro A.9).

Quadro A.9 - Quantidade de pontos de extração existentes no cenário 4 e os seus caudais de extração diários

Uso do Solo	Pontos de Extração	Extração por cada ponto (m ³ /dia)
Citrinos	195	73,4
Estufas	47	200,3
Golfe	16	415,9
Hortícolas	53	52,8
Pomar	4	22,6
Vinha	2	2,3
Novos Citrinos	21	272,2

Cenário 5 - Área Regada Atual + Área de Cultivo Abandonada abrangida pela RAN fora da Área Crítica

Volumes de água extraídos pelos diferentes tipos de cultura no cenário 5 (Quadro A.10).

Quadro A.10 - Volumes de água anuais extraídos por cada tipo de cultura no cenário 5

Uso do Solo	Hectares (ha)	Dotação (m ³ /ha.ano)	Extração (m ³ /ano)
Citrinos	870,25	6000	5221501
Estufas	264,25	13000	3435296
Golfe	-	-	2428584
Hortícolas	214,98	4750	1021136
Pomar	8,24	4000	32957
Vinha	2,79	600	1675
Novos Citrinos	335,43	6000	2012609

Número de furos existentes para cada tipo de cultura, bem como os seus caudais de extração diários (Quadro A.11).

Quadro A.11 - Quantidade de pontos de extração existentes no cenário 5 e os seus caudais de extração diários

Uso do Solo	Pontos de Extração	Extração por cada ponto (m³/dia)
Citrinos	195	73,4
Estufas	47	200,3
Golfe	16	415,9
Hortícolas	53	52,8
Pomar	4	22,6
Vinha	2	2,3
Novos Citrinos	20	275,7

ANEXO IV

A aplicação das condições de fronteira de *Cauchy* e de *Neumann* aquando da simulação do cenário de referência (Cenário 1), não apresentaram alterações significativas.

Piezometria obtida no aquífero freático com a condição de fronteira de *Cauchy* (Figura A.3).

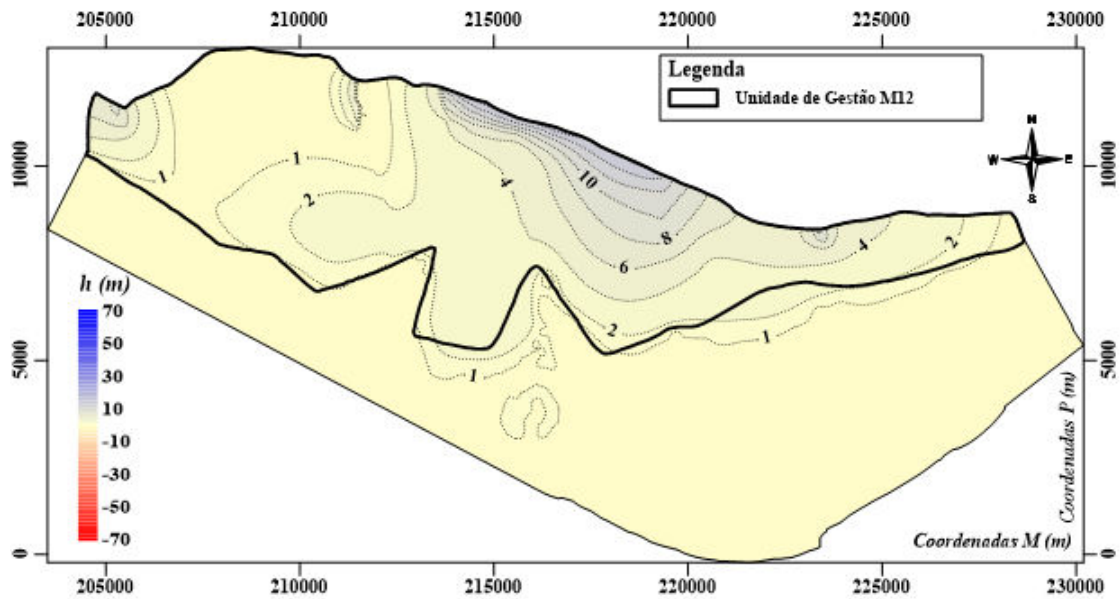


Figura A.3 - Piezometria obtida no aquífero freático com a condição de fronteira de *Cauchy*

Piezometria obtida no aquífero freático com a condição de fronteira de *Neumann* (Figura A.4).

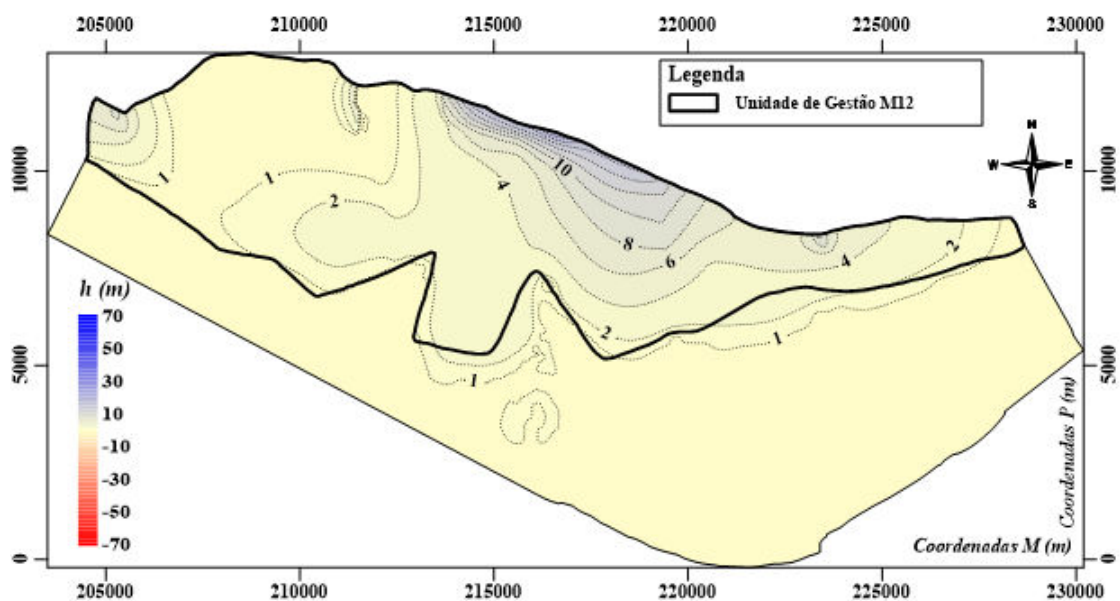


Figura A.4 - Piezometria obtida no aquífero freático com a condição de fronteira de *Neumann*

Piezometria obtida no aquífero semi-confinado com a condição de fronteira de *Cauchy* (Figura A.5).

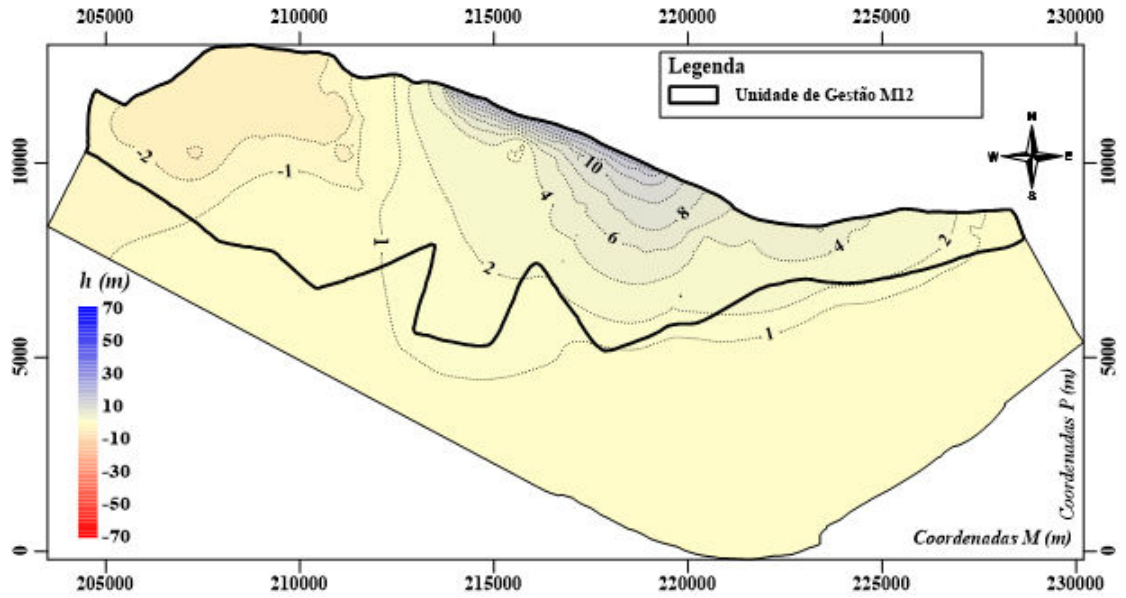


Figura A.5 - Piezometria obtida no aquífero semi-confinado com a condição de fronteira de *Cauchy*

Piezometria obtida no aquífero semi-confinado com a condição de fronteira de *Neumann* (Figura A.6).

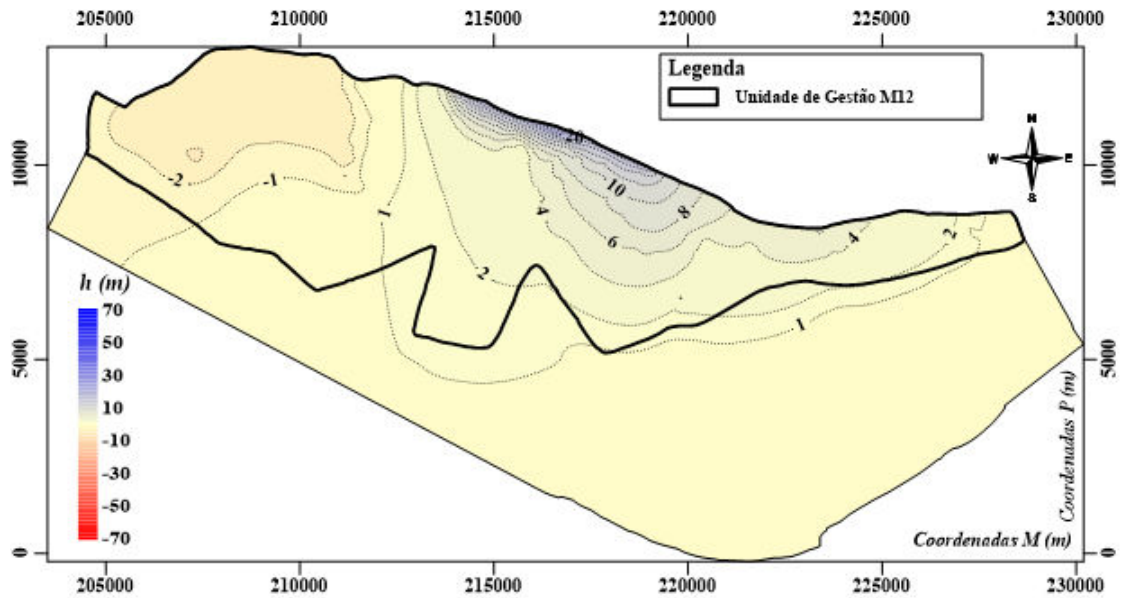


Figura A.6 - Piezometria obtida no aquífero semi-confinado com a condição de fronteira de *Neumann*