

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Faculdade de Ciências e Tecnologia

**CALIBRAÇÃO DE UM MODELO DE
ESCOAMENTO E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS
DE EXPLORAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO
LUZ-TAVIRA – UMA FERRAMENTA PARA A
GESTÃO DA ÁGUA**

LUIS RICARDO DIAS DA COSTA

Dissertação elaborada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente na
área de especialização Modelação Ambiental

Faro, Junho de 2011

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Faculdade de Ciências e Tecnologia

**CALIBRAÇÃO DE UM MODELO DE
ESCOAMENTO E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS
DE EXPLORAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO
LUZ-TAVIRA – UMA FERRAMENTA PARA A
GESTÃO DA ÁGUA**

LUIS RICARDO DIAS DA COSTA

Dissertação elaborada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente na
área de especialização Modelação Ambiental

Dissertação orientada por:

Prof. Doutor. José Paulo P. G. Monteiro

Prof. Doutor. Tibor Yvan Stigter

Faro, Junho de 2011

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

O conteúdo deste trabalho é da exclusiva responsabilidade do autor

Luis Ricardo Dias da Costa

RESUMO

O presente documento consiste numa dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente na qual se pretendeu caracterizar a distribuição espacial da transmissividade do sistema aquífero Luz-Tavira (SALT) e analisar possíveis cenários de exploração do mesmo. O trabalho de investigação realizado consistiu no desenvolvimento de um modelo numérico em Elementos Finitos para o Sistema Aquífero Luz-Tavira (SALT), envolvendo as etapas de definição de condições fronteira, classes de transmissividade, calibração do modelo por modelação inversa e análise de cenários de exploração. Para tal o autor recorreu a trabalhos de investigação já desenvolvidos na Universidade do Algarve como ponto de partida. A este trabalho já efectuado pretende-se contribuir com a calibração dos parâmetros físicos que controlam o escoamento subterrâneo, de forma a aumentar a fiabilidade da simulação do seu funcionamento hidráulico.

Para atingir os objectivos, o autor propôs-se não só a desenvolver uma caracterização do SALT com base em pesquisas bibliográficas tão extensa quanto possível, como também com a realização de saídas de campo, de forma a contribuir para o conhecimento do seu funcionamento. Posteriormente procede-se à redefinição e reestruturação do modelo numérico de escoamento, baseado em casos semelhantes e em trabalhos já desenvolvidos sobre o mesmo, aliando a este modelo todo o conhecimento obtido sobre o SALT.

O facto do SALT nalgumas fases ser caracterizado como um aquífero multicamada, aliado às suas formações carbonatadas carsificadas e à sua heterogeneidade, resultam numa dificuldade acrescida no desenvolvimento de um modelo de escoamento, o que inspirou o autor a elaborar os esforços necessários na obtenção de informação, de forma a permitir a definição das condições de fronteira e dos detalhes necessários à elaboração de um modelo tão fiável quanto possível.

A determinação dos parâmetros hidráulicos que controlam o escoamento subterrâneo é o maior desafio que se coloca à calibração de um modelo como o que se pretende desenvolver. A abordagem da calibração, automática ou por tentativa erro, que se implementou, poderá permite alcançar uma distribuição de valores de transmissividade passível de gerar simulações realistas do comportamento hidráulico do sistema.

A redefinição de novas condições de fronteira, zonas de transmissividade e infiltração permitiram aproximar o modelo desenvolvido à piezometria real observada na região,

pelo que posteriormente se prosseguiu à calibração das zonas de transmissividade do modelo pelo método de modelação inversa.

A calibração do modelo por modelação inversa possibilitou o aumento de precisão das simulações realizadas para este sistema aquífero. Desta forma procedeu-se a uma análise de diferentes regimes de exploração, consoante as diferentes condições de exploração a que o aquífero foi exposto nas últimas duas décadas. Destes cenários, verificou-se que os que implicam uma maior exploração do aquífero resultaram num rebaixamento piezométrico bastante significativo (da ordem dos 13 a 14 metros), revelando a alta vulnerabilidade do SALT. Por outro lado, num cenário em que apenas vigoram captações para abastecimento privado das habitações que não têm acesso à rede de abastecimento de água, identificou-se o fenómeno de aumento de tal forma do nível piezométrico que poderá também resultar em impactes nos ecossistemas agrícolas, visto que em certas regiões registaram-se medidas inferiores a 1 metro de profundidade.

A análise aos cenários de exploração evidencia a vulnerabilidade e a elevada capacidade de resposta do aquífero Luz-Tavira. Desta forma destaca-se a sensibilização da questão de se alcançar um equilíbrio entre recarga e descarga do sistema, tarefa essa que exige estudos futuros mais aprofundados sobre o modelo, entre eles a simulação em regime transitório do mesmo e a definição dos coeficientes de armazenamento.

Palavras Chave: Sistema aquífero Luz-Tavira; Modelos numéricos de escoamento; Cenários de exploração de água; Calibração inversa.

ABSTRACT

This document consists of a dissertation for an Integrated Master of Science degree in Environmental Engineering in which the author pretends to portray the transmissivity's spatial distribution for the Luz-Tavira aquifer system (SALT) and study hypothetical scenarios of groundwater abstraction on this system. The research work carried out consisted in the development of a numerical model in finite elements for the Aquifer System Luz-Tavira (SALT), involving the stages of boundary conditions and transmissivity classes definition, the classes of transmissivity calibration by inverse modelling and analysis of hypothetical scenarios of water exploration. As a starting point of this project, the author used results and data obtained in previous investigation projects developed at the University of the Algarve. The additional contribution to the previous obtained results will be provided by the calibration of physical parameters that control the groundwater flow, in order to increase the reliability of hydraulic operation simulation.

To guarantee the achievement of his goals, the author sets himself to, not only develop the characterization of SALT based on bibliographic research as detailed as possible, but also to include field data collection, in order to contribute to the knowledge regarding the SALT dynamics. Subsequently, the author will proceed with the redefinition of the groundwater flow numeric model, based on similar case-studies and projects already developed upon this system's model and by gathering together the obtained knowledge of the SALT and the numerical modeling skills.

The fact that SALT, in some stages is characterized as a multi-layer aquifer allied to its karst carbonate formations plus its heterogeneity in general, creates an enormous difficulty in developing a reliable flow model. These facts inspired the work to include all necessary efforts to obtain information about the SALT, in order to allow the definition of the boundary conditions and the necessary details for the preparation of a model as reliable as possible.

The determination of hydraulic parameters that control the groundwater flow is the greatest challenge for the calibration of a model such as this one. The calibration method, either automatic or trial or by trial and error approach, which was implemented provided the chance to achieve a distribution of transmissivity values that generates realistic simulations of hydraulic system behavior.

The redefinition of the new boundary condition, transmissivity and infiltration classes allowed the simulations to approach the developed model to the piezometric map observed, which lead to the next step, the calibration of the model's transmissivity layers through inverse modeling method.

The calibration through inverse modeling method allowed the increase of the model's precision for the tested simulations in this system. This way, the work then proceeded with the analysis of different exploitations scenarios, according to the exploitation conditions registered in this region for the last two decades. From these scenarios, it was evident that stronger exploration scenarios resulted in a very significant demotion in groundwater level (around 13 to 14 meters), which reveals the high vulnerability of the SALT. On the other hand, for the scenario consisting only in remote private water abstractions for houses without access to the water distribution network, a phenomenon of piezometric level increase was identified. This increase was so high that in some regions water was registered at levels lower than 1 meter depth, resulting in agriculture impacts.

The analysis of scenarios of exploitation indicates the vulnerability and quick reaction to abstraction of the aquifer Luz-Tavira. Therefore, it is important to state the awareness regarding the issue of achieving a balance between the system's recharge and discharge, which requires more detailed future studies on the model, including simulation on transient condition and the definition of the coefficients of storage.

Keywords: Aquifer System Luz-Tavira; Numerical groundwater flow model; water exploration scenarios; inverse modeling.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos Professores José Paulo Monteiro e Tibor Stigter, pela orientação prestada, pelos seus conselhos e apoio enérgico que sempre demonstraram, cuja vontade de alcançar sempre um aperfeiçoamento ao nível do trabalho desenvolvido contagiou o autor do trabalho.

Uma grande palavra de apreço também dirigida aos meus colegas e amigos Rui Hugman e Pedro Abrantes, Miguel Viegas, Cristele Santos, Andreia Martins, Rui Cristina, Inês Mendes, Miguel Gomes e Edgar Guia, pelo apoio técnico que me providenciaram ou pela força e motivação que me transmitiram durante o seguimento do trabalho desenvolvido.

Uma forte palavra de agradecimento também a todos amigos e colegas, que de uma forma ou outra, sempre me apoiaram ao longo dos últimos anos

Por fim, mas provavelmente mais importante, gostava de agradecer à minha família mais directa e padrinhos, pela sua paciência, apoio emocional e financeiro, sem os quais não teria a oportunidade de desenvolver este projecto.

ÍNDICE

RESUMO.....	i
ABSTRACT	iii
AGRADECIMENTOS.....	v
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE QUADROS.....	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Âmbito	3
1.2. Conceitos Gerais de Modelação em Aquíferos	5
1.3. Objectivos	6
2. CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	8
2.1. Enquadramento Geográfico.....	8
2.2. Precipitação	10
2.3. Balanço Hídrico	14
2.3.1. Fontes de Recarga.....	15
2.3.2. Fontes de Descarga.....	15
2.3.3. Evolução do Uso da Água.....	16
3. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DO SALT	18
3.1. Enquadramento Geológico	18
3.2. Qualidade Química da Água do SALT	20
3.3. Enquadramento Hidrogeológico Regional.....	21
3.4. Piezometria	23
3.4.1. Piezometria do SALT – Estudos prévios	24
3.4.2. Recolha e Análise de Dados Piezométricos	26
3.4.3. Análise Piezométrica para um Registo Temporal	27
3.4.4. Análise de Amplitudes	32
4. CONCEITOS GERAIS DO PROCESSO DE MODELAÇÃO.....	36
4.1. Modelação Numérica em Aquíferos	37
4.2. Princípios Físicos Simulados Pelo Modelo	38
4.3. Modelo de Escoamento em Regime Permanente.....	39
4.4. Modelo Numérico de Escoamento.....	40
4.5. Metodologia de Calibração Inversa	42
4.5.1. Estimativa de Parâmetros Através de Modelação Inversa	44

4.5.2.	Coeficiente de Correlação	44
5.	MODELO DE ESCOAMENTO DO SALT	46
5.1.	Etapas Prévias ao Projecto de Construção do Modelo SALT	46
5.2.	Software de Modelação	49
5.2.1.	Modelo FEN	49
5.2.2.	Algoritmo PEST	50
5.3.	Descrição das variantes do Modelo Implementado	51
5.3.1.	Fase 0	51
5.3.2.	Fase 1	53
5.3.2.1.	Condições Fronteira	53
5.3.2.2.	Classes de Infiltração	54
5.3.2.3.	Classes de Transmissividade	55
5.3.2.4.	Balanço	56
5.3.3.	Fase 2	57
5.3.3.1.	Condição Fronteira	58
5.3.3.2.	Classes de Infiltração	58
5.3.3.3.	Classes de transmissividade	59
5.3.3.4.	Balanço	60
5.3.4.	Fase 3	61
5.3.4.1.	Condição Fronteira	61
5.3.4.2.	Classes de Infiltração	62
5.3.4.3.	Classes de Transmissividade	63
5.3.4.4.	Balanço	64
6.	OPTIMIZAÇÃO DO MODELO	67
6.1.	Optimização Inicial	68
6.1.1.	Dados de Entrada	68
6.1.2.	Análise dos resultados da optimização	69
6.2.	Optimização Manual	72
6.2.1.	Calibração Manual da Transmissividade e ajuste piezométrico	73
6.3.	Optimização Final	75
6.3.1.	Dados de Entrada	75
6.3.2.	Análise dos resultados de Optimização	76
7.	ANÁLISE DE CENÁRIOS	80
7.1.	Simulação do Balanço hídrico em Condições Naturais	80
7.2.	Simulação do Regime de Exploração – Cenário 1	82
7.2.1.	Mapa de resíduos entre regime natural e cenário 1	87

7.3. Simulação do regime de exploração – Cenário 2	88
7.3.1. Mapa de resíduos entre Regime Natural e Cenário 2	92
7.4. Simulação do regime de exploração – Cenário 3	92
7.4.1. Mapa de resíduos entre Regime Natural e Cenário 3	96
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E BIBLIOGRAFIA	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Identificação dos 17 Sistemas Aquíferos diferenciados do Algarve. Fonte: Almeida <i>et al.</i> (2000).....	2
Figura 2.1. Enquadramento geográfico do SALT. Fonte: Almeida <i>et al.</i> 2000	9
Figura 2.2. Localização geográfica do sistema aquífero Luz-Tavira., relativamente ao mapa do Algarve (lado esquerdo) e relativamente aos restantes aquíferos do Algarve (lado direito). Adaptado de Almeida <i>et al.</i> (2000).	9
Figura 2.3. Localização do SALT (com limites a vermelho) na Carta Topográfica 1:25000 folha n.º 608.....	10
Figura 2.4. Precipitação média anual do Algarve para o período 1959/60-1990/91. Fonte: Nicolau, 2002.....	11
Figura 2.5. Localização geográfica das Estações Meteorológicas do Algarve nas imediações do SALT e dos Sistemas Aquíferos Peral-Moncarapacho e Malhão.	11
Figura 2.6. Evolução das precipitações mensais no posto de Quelfes. Fonte: MCOTA, 2003.	12
Figura 2.7. Variação da precipitação anual na estação meteorológica de Picota para o período de 1934/35 – 2005/06. Fonte: SNIRH (2010).....	13
Figura 3.1. Enquadramento litoestratigráfico do Sistema Aquífero Luz de Tavira; Fonte: Almeida <i>et al.</i> (2000).....	19
Figura 3.2. Diagrama de Piper relativo às águas do sistema de Luz-Tavira. Fonte: Almeida <i>et al.</i> (2000).....	20
Figura 3.3. Localização das estações hidrométricas e das nascentes monitorizadas no sistema aquífero Luz de Tavira. Fonte: Reis (2007).....	22
Figura 3.4. Carta hidrogeológica da Campina da Luz. Fonte: Stigter & Carvalho Dill (2001).	24
Figura 3.5. Padrão de fluxo no aquífero superior da Campina da Luz no fim de uma época de chuva (esquerda) e no fim de verão de um ano pouco chuvoso (direita). Fonte: Stigter & Carvalho Dill (2001).....	25
Figura 3.6. Base de dados de todas as captações e respectiva fonte, cujos registos foram utilizados durante o desenvolvimento da presente dissertação.....	26
Figura 3.7. Base de dados de piezómetros considerados para realizar mapa piezométrico. Registos ULA identificados com a denominação DP ou DL, registos SNIRH identificados como 608(7)/xxx . Estão também representados os sistema-aquíferos cujo escoamento poderá ter ou ser influenciado directamente pelo SALT. .	27
Figura 3.8. Mapa piezométrico do SALT realizado com registos de Maio de 2007 do SNIRH e da ULA.....	28

Figura 3.9. Localização dos piezóemetros considerados para a realização do mapa e respectivo mapa piezométrico do SALT resultante.	31
Figura 3.10. Localização dos piezómetros utilizados para definir as amplitudes piezométricas do aquífero.....	32
Figura 3.11. Isopiezas representantes da piezometria Máxima (a preto) e Média (a cinzento tracejado).	34
Figura 3.12. Mapas de Isopiezas representantes da piezometria mínima e média.	34
Figura 3.13. Identificação das principais zonas de recarga e descarga do SALT.....	35
Figura 5.1. Etapas iniciais da construção do modelo. Geração da rede e sua edição no SIG. Fonte: Monteiro <i>et al.</i> (2003b).....	46
Figura 5.2. Conjunto de nós da malha de elementos finitos gerada para simulação do escoamento do SALT	47
Figura 5.3. Exemplo de atribuição de classes de recarga, de acordo com as litologias presentes e respectivas taxas de infiltração sugeridas por Almeida <i>et al.</i> (2000). Em baixo mostra-se (à esquerda) a distribuição de equipotenciais simuladas, juntamente com as as linhas de corrente que ilustram a direcção de fluxo e, à direita, um mapa de isopiezas para o sector identificado do aquífero, construído com dados de Março de 1998. Fonte: Monteiro <i>et al.</i> , (2003b).....	48
Figura 5.4. Representação das Condições fronteira do modelo conceptual do SALT para a Fase 0, identificadas com contorno mais grosso a preto.....	52
Figura 5.5. Resultados da simulação obtida para as condições da Fase 0 do modelo.	53
Figura 5.6. Representação das Condições fronteira do modelo conceptual do SALT para a Fase 1, identificadas com contorno mais grosso a preto.....	54
Figura 5.7. Delimitação das classes de infiltração do modelo SALT na Fase 1.....	55
Figura 5.8. Delimitação das classes de transmissividade do modelo SALT para a Fase 1.	56
Figura 5.9. Resultados da simulação do modelo na com as condições da Fase 1.....	57
Figura 5.10. Representação das Condições fronteira do modelo conceptual do SALT para a Fase 2, identificadas com Contorno mais grosso a preto.....	58
Figura 5.11. Delimitação das classes de transmissividade do modelo SALT para a Fase 2.	59
Figura 5.12. Resultados da simulação do modelo nas condições descritas na Fase 2. As condições de fronteira encontram-se representadas por contornos mais grossos a preto.	60
Figura 5.13. Condições de fronteira do modelo conceptual do SALT Para a Fase 3. A vermelho estão representadas as zonas de recarga e descarga, a preto os limites do SALT. Os pontos pretos correspondem aos nós da malha de elementos finitos representativa do SALT.	62

Figura 5.14. Delimitação das classes de infiltração do modelo SALT na Fase 3.....	63
Figura 5.15. Delimitação das classes de transferência do modelo SALT para a Fase 3.	64
Figura 5.16. Resultados da simulação do modelo nas condições descritas na Fase 3..	65
Figura 6.1. Delimitação das classes de transferência do modelo SALT utilizadas no processo de optimização.	67
Figura 6.2. Localização dos pontos de amostragem utilizados para a calibração do modelo com a ferramenta PEST.....	69
Figura 6.3. Gráfico de dispersão do modelo de calibração dos potenciais hidráulicos observados (eixo xx) vs. potenciais hidráulicos simulados (eixo yy).	70
Figura 6.4. Mapa piezométrico obtido após a optimização inicial.....	71
Figura 6.5. Gráfico de dispersão dos potenciais hidráulicos observados (eixo xx) vs. potenciais hidráulicos simulados (eixo yy) após a optimização final.....	77
Figura 6.6. Mapa piezométrico obtido após a optimização inicial.....	79
Figura 7.1. Equipotenciais geradas a partir dos resultados de uma simulação numérica de escoamento tendo em conta as condições naturais de funcionamento hidráulico do sistema.	81
Figura 7.2. Sistema Aquífero de Luz-Tavira com representação das 277 captações. .	83
Figura 7.3. Sistema Aquífero de Luz-Tavira com a representação das áreas regadas, bem como das 204 captações que extraem água para rega. Fonte: Rodrigues (2007).	84
Figura 7.4. Equipotenciais geradas a partir dos resultados de uma simulação numérica de escoamento tendo em conta as extracções do cenário 1 sobrepostas às condições naturais de funcionamento hidráulico do sistema.....	85
Figura 7.5. Rebaixamentos produzidos pela introdução das captações do cenário 1 no modelo de funcionamento hidráulico natural do aquífero.	88
Figura 7.6. Sistema Aquífero de Luz-Tavira com representação da distribuição espacial das 273 captações para rega e abastecimento privado, de acordo com a legenda apresentada.....	89
Figura 7.7. Equipotenciais geradas a partir dos resultados de uma simulação numérica de escoamento tendo em conta as as extracções do cenário 2 sobrepostas às condições naturais de funcionamento hidráulico do sistema.....	90
Figura 7.8. Rebaixamentos produzidos pela introdução das captações do cenário 2 no modelo de funcionamento hidráulico natural do aquífero.	92
Figura 7.9. Sistema Aquífero de Luz-Tavira com a representação da distribuição espacial das 251 captações para abastecimento privado.	93

Figura 7.10. Equipotenciais geradas a partir dos resultados de uma simulação numérica de escoamento tendo em conta as as extracções do cenário 3 sobrepostas às condições naturais de funcionamento hidráulico do sistema.	94
Figura 7.11. Rebaixamentos produzidos pela introdução das captações do cenário 3 no modelo de funcionamento hidráulico natural do aquífero.	96

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1. Piezómetros utilizados na realização do mapa piezométrico e respectiva fonte, Piezometria, data de recolha dos dados e coordenadas X e Y.	29
Quadro 3.2. Registos piezométricos obtidos na saída de campo a 3 de Fevereiro de 2011 e consequente conversão dos mesmos para Maio de 2007.....	30
Quadro 3.3. Registos piezométricos considerados para a região do caso de estudo..	31
Quadro 3.4. Dados piezométricos para determinação da piezometria Máxima, Mínima, Média e Amplitude. Fonte: SNIRH e Stigter & Carvalho Dill (2001).....	33
Quadro 5.1. Dados do balanço do modelo para a Fase 0	52
Quadro 5.2. Síntese dos dados das condições fronteiras para a Fase 1.....	54
Quadro 5.3. Distribuição das classes de infiltração e respectiva infiltração para a Fase I.	55
Quadro 5.4. valores atribuídos às classes de transmissividade do modelo SALT para a Fase 1. (*) valores máximos, mínimos e médios definidos segundo Almeida <i>et al.</i> 2000.	56
Quadro 5.5. Balanço do regime hídrico respectivo às condições da Fase 1 do Modelo.	57
Quadro 5.6. Síntese dos dados das condições fronteiras para a Fase 2.....	58
Quadro 5.7. Distribuição das classes de infiltração e respectiva infiltração para a Fase II.	59
Quadro 5.8. valores atribuídos às classes de transmissividade do modelo SALT para a Fase 2. (*) valores máximos, mínimos e médios definidos segundo Almeida <i>et al.</i> 2000.	60
Quadro 5.9. Balanço do regime hídrico respectivo às condições da Fase 2 do Modelo.	61
Quadro 5.10. Dados das condições fronteiras para a Fase 3.....	62
Quadro 5.11. Distribuição das classes de infiltração e respectiva infiltração para a Fase 3.	63
Quadro 5.12. Valores atribuídos às classes de transmissividade do modelo SALT para a Fase 3. (*) valores máximos, mínimos e médios definidos segundo Almeida <i>et al.</i> 2000.	64
Quadro 5.13. Balanço do regime hídrico respectivo às condições da Fase 3 do Modelo.	65

Quadro 6.1. Dados da calibração do modelo, com piezometria real e valor calculado após optimização do modelo, nó correspondente ao ponto de observação e o resíduo entre o valor piezométrico real e calculado pelo modelo.....	69
Quadro 6.2. Valores atribuídos às classes de transmissividade do modelo SALT através da calibração.....	71
Quadro 6.3. Balanço do regime hídrico respectivo às condições obtidas na optimização inicial.	72
Quadro 6.4. Variantes de valores de transmissividade testadas durante a optimização manual.....	73
Quadro 6.5. Classes de transmissividade obtidas após calibração manual	74
Quadro 6.6. Diferentes variantes de calibração testadas e respectivos balanços obtidos para o Cenário 1.....	76
Quadro 6.7. Dados da calibração do modelo, com piezometria real e valor calculado após optimização do modelo, nó correspondente ao ponto de observação e o resíduo entre o valor piezométrico real e calculado pelo modelo.....	77
Quadro 6.8. Valores atribuídos às classes de transmissividade do modelo SALT através da calibração.....	78
Quadro 6.9. Balanço do regime hídrico respectivo às condições obtidas na optimização final.....	79
Quadro 7.1. Síntese da simulação representada na figura 7.1.....	81
Quadro 7.2. Captações e Extracções consideradas para o regime de exploração do Cenário 1	85
Quadro 7.3. Dados de síntese da simulação representada na Figura 7.4.....	86
Quadro 7. 4. Dados devolvidos pelo modelo FEN para o balanço geral do SALT, para o Cenário 1.....	87
Quadro 7. 5. Captações e Extracções consideradas para o regime de exploração do Cenário 2.....	89
Quadro 7.6. Dados de síntese da simulação representada na Figura 7.7.....	90
Quadro 7.7. Dados devolvidos pelo modelo FEN para o balanço geral do SALT, para o Cenário 2.....	91
Quadro 7.8. Captações e Extracções consideradas para o regime de exploração do Cenário 3.....	93
Quadro 7.9. Dados de síntese da simulação representada na Figura 40.....	94
Quadro 7.10.Dados devolvidos pelo modelo FEN para o balanço geral do SALT, para o Cenário 3.....	96

INTRODUÇÃO

Os modelos numéricos que visam a representação do funcionamento hidráulico de sistemas aquíferos constituem actualmente uma das metodologias mais avançadas para compreender os fenómenos que controlam o movimento de águas e contaminantes no subsolo. Assim, o aperfeiçoamento destes modelos é muito importante como forma de fornecer elementos para as ferramentas da gestão integrada da água (Martins, 2007).

A utilização de modelos numéricos pode servir diversos fins, inclusive para testar ou aperfeiçoar diferentes modelos conceptuais de escoamento e estimar parâmetros hidráulicos, como transmissividade (Costa, 2006). Após a calibração do modelo, é possível prever a variação do volume de água do aquífero face a determinados padrões de exploração e condições climáticas. Ainda, prosseguindo para simulações em regime transitório, é possível determinar o coeficiente de armazenamento, tornando o processo de modelação numa caminhada que visa um aperfeiçoamento do modelo em questão.

No Algarve, a maioria dos sistemas aquíferos são cársicos e costeiros e constituem o reservatório com maior capacidade de armazenamento de água na região, tendo desempenhado um importante papel nesta temática ao longo dos tempos. Monteiro *et al.* (2002a) indicam mesmo que, nas últimas décadas, estas reservas asseguraram o consumo de água de 80% do abastecimento urbano, agrícola e industrial na região do Algarve. Actualmente, com a implementação do Sistema Multimunicipal, passou-se a recorrer a mais água superficial, essencialmente para o consumo humano. No entanto estima-se que actualmente, mesmo nos períodos em que as condições climáticas permitem o abastecimento de água pelas barragens, as águas subterrâneas continuam a suportar cerca de 62% do consumo de água na região (Monteiro *et al.*, 2005).

A gestão dos recursos hídricos é um caso particularmente relevante na região do Algarve. Por um lado, o facto de representar uma região semi-árida implica a necessidade de um plano de gestão de água racional e equilibrado devido às elevadas variações sazonais e inter-anuais de precipitação. Por outro lado, de acordo com Santos & Miranda (2006), o risco de ocorrência de secas extremas tem tendência a

umentar significativamente num futuro próximo, tanto em termos de frequência como em termos de intensidade, devido às alterações climáticas.

Desta forma, a gestão das águas subterrâneas assume um papel vital na gestão dos recursos hídricos da região, na qual existem 17 sistemas aquíferos diferenciados com importância à escala regional (Figura 1.1), nos quais as rochas carbonatadas (sobretudo jurássicas e miocénicas) constituem o suporte litológico mais importante, quer pela sua extensão geográfica quer pelo volume de água armazenado (Almeida *et al.*, 2000).

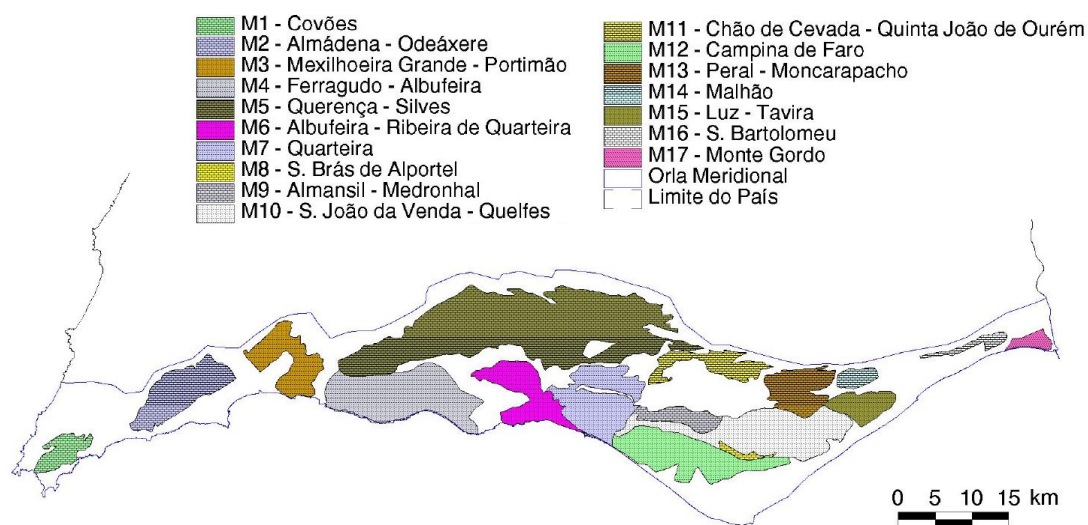


Figura 1.1. Identificação dos 17 Sistemas Aquíferos diferenciados do Algarve.
Fonte: Almeida *et al.* (2000)

Os aquíferos do Algarve são, na sua maioria, cársicos costeiros, característicos por se comportarem como reservatórios com maior capacidade de armazenamento de água na região e por terem desempenhado um importante papel no abastecimento de água da região.

No entanto, desde 2000 que se têm implementado grandes obras na região que levam ao abandono das captações de água subterrânea, em detrimento das águas superficiais, nomeadamente através do Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água do Algarve (SMAAA) para assegurar o abastecimento urbano a partir de barragens e a definição de perímetros de rega, também com fonte de água superficial, para a rega.

De acordo com os autores Monteiro *et al.* (2002a), de futuro será necessário não só complementar a origem das águas de abastecimento público aquando da ocorrência de rupturas devidas a problemas de quantidade ou qualidade ou outros associados a problemas de água em barragens, como também rumar para uma estratégia de uso

conjunto devidamente planeado e integrado, baseado numa origem mista da água (superficial e subterrânea).

Como tal, é importante o contributo para o conhecimento acerca das quantidades, fluxos e capacidade de resposta dos aquíferos da região. Neste âmbito, têm sido desenvolvidos na Universidade do Algarve (UAlg) modelos numéricos de escoamento para os vários aquíferos algarvios.

1.1. Âmbito

O desenvolvimento de trabalhos e projectos sobre o funcionamento hidráulico dos aquíferos algarvios que tem vindo a ser desenvolvido na UAlg tem resultado num enorme contributo para o conhecimento dos mesmos e conseqüentemente apoio à gestão e decisão. Existe inclusive um projecto de investigação, designado OPTEXPLOR, desenvolvido no âmbito de um Acordo Específico de Cooperação entre as Águas do Algarve S.A., a UAlg, o IMAR – Centro Interdisciplinar de Coimbra (Universidade de Coimbra) e o CVRM/Centro de Geo-sistemas (Instituto Superior Técnico/UAlg), cujo objectivo se foca na criação de um instrumento de apoio à tomada de decisão para o planeamento e gestão do SMAAA, que aplica princípios de modelos numéricos de escoamento de recursos hídricos subterrâneos.

Os modelos numéricos são fundamentais na análise da precisão de comportamentos hipotéticos de escoamentos subterrâneos e, numa etapa posterior, em prever efeitos na alteração de condições naturais por via de actividades antropogénicas que poderão interferir com o escoamento subterrâneo (Monteiro & Silva., 1998). Tendo em conta que a região do SALT esteve sujeita a alterações significativas nos regimes de exploração é importante determinar as conseqüências dessas alterações para o escoamento de água subterrânea na região.

A variação extrema da precipitação sazonal e anual em zonas semi-áridas como o Algarve cria graves dificuldades a nível do planeamento e gestão de abastecimento sustentável de água. Além do que, a intensidade e frequência de secas em Portugal irá provavelmente aumentar significativamente no futuro

próximo (Santos & Miranda, 2006). Ao mesmo tempo, o consumo de água na região aumenta continuamente, devido ao crescimento da população e do turismo. O turismo, só por si, é responsável por 10 milhões de visitantes cada ano, maioritariamente durante os meses de verão. No entanto é a agricultura que é a maior consumidora de água na região, sendo responsável por cerca de 72% do consumo (Monteiro & Costa, 2004).

Durante os últimos anos, investigadores, docentes e estudantes na Universidade do Algarve têm investido esforços para desenvolver modelos que aproximem o escoamento subterrâneo de aquíferos no Algarve, entre eles o Sistema Aquífero Luz-Tavira (SALT). Esses esforços originaram a construção da base do modelo numérico sobre o qual o trabalho desenvolvido nesta tese é baseado. Neste âmbito, a pesquisa e trabalho apresentados representam o próximo passo num conjunto de trabalhos desenvolvidos que no seu todo podem culminar numa ferramenta com uma utilidade potencialmente muito importante para a investigação no ramo da água subterrânea e mais importante, para a sua gestão sustentável.

O actual trabalho surge então no âmbito de aprofundar os conhecimentos já adquiridos com base nas tecnologias disponíveis que permitam obter um maior conhecimento acerca do funcionamento hidráulico dos aquíferos, para que a sua gestão seja mais eficiente e permitir desta forma precaver problemas a curto, médio e longo prazo.

O Sistema Aquífero Luz-Tavira (SALT) será o objecto de estudo da presente dissertação de mestrado, sobre o qual irão incidir os esforços de implementação e calibração de um modelo conceptual de escoamento do mesmo, de forma a poder facultar uma ferramenta útil para a gestão dos recursos hídricos desta região

Pretende-se com o trabalho desenvolvido no presente ensaio, criar uma ferramenta que permita a análise de impactes de cenários de exploração do SALT relativamente à distribuição espacial piezométrica do modelo. Para tal desenvolveu-se um modelo em elementos finitos adaptado ao SALT (Monteiro *et al.* 2002a, 2002b, 2003a, 2003b; Vieira & Monteiro, 2003) e procedeu-se a

recolha bibliográfica e a saídas de campo, de forma a obter mais dados informação sobre o caso de estudo e implementá-los no modelo, com o âmbito de: (1) definir a geometria do domínio de escoamento; (2) condições de fronteira do modelo; (3) recarga e balanço hidrológico; (4) distribuição espacial das variáveis de estado; e (5) Parâmetros hidráulicos, nomeadamente, zonamento das classes de transmissividade.

1.2. Conceitos Gerais de Modelação em Aquíferos

A ideia de determinar a distribuição de transmissividades no domínio de escoamento a partir de medições de potenciais hidráulicos em captações é tão antiga como a prática de modelação de escoamentos subterrâneos (Carrera & Neuman, 1986).

Bennett & Meyer (1952) foram os primeiros autores a determinar propriedades de aquíferos a partir de medições de potenciais hidráulicos. O trabalho de Stallman (1956) foi a primeira tentativa documentada de alcançar aquele objectivo com recurso a meios informáticos, que, interpolando os valores provenientes de medições de potenciais hidráulicos nos nós de uma rede de diferenças finitas e assumindo que os coeficientes de recarga e de armazenamento eram conhecidos, conseguiu simular a distribuição de transmissividade na área abrangida pela rede (Martins, 2007).

Esta experiência inicial revelou, desde logo, algumas dificuldades associadas à implementação e resolução do “problema inverso”. Em primeiro lugar, Stallman (1956) notou que as soluções tendiam a ser instáveis. Para ultrapassar essa instabilidade assumiu a transmissividade como constante em vastas áreas do aquífero (zonas) e usou o método dos mínimos quadrados para estimar o valor dos parâmetros de transmissividade (T) nessas zonas. O autor do trabalho observou também que estas zonas não deviam ser muito grandes, pois caso contrário, poderia perder-se informação importante sobre a variação espacial dos parâmetros o que, por sua vez, poderia constituir um obstáculo à obtenção de uma aproximação satisfatória entre valores simulados e observados.

Posteriormente, Neuman (1973) classificou os métodos para determinação do valor dos parâmetros em dois grupos (adaptado de Martins, 2007):

- “Directos” em que se assume os parâmetros de transmissividade como desconhecidos e os potenciais hidráulicos como conhecidos no contexto da formulação de Cauchy; fazendo com que o balanço de massa nos nós seja linear nas transmissividades e o problema possa ser solucionado “directamente” sem que seja necessário proceder de forma iterativa.

- “Indirectos” quando o problema não é linear nos parâmetros e deve ser solucionado iterativamente em simulações repetidas. Na sua essência, o método indirecto consiste numa versão automática do procedimento manual de calibração tentativa e erro.

Segundo o mesmo autor, o método indirecto produz melhores soluções devido ao facto da aplicação do método dos mínimos quadrados aos resíduos de potenciais hidráulicos contribuir sempre para filtrar parte do “ruído” da informação piezométrica utilizada no processo de calibração, o que com os métodos directos não se verifica.

1.3. Objectivos

O objectivo principal do presente trabalho consiste no estudo do funcionamento hidráulico do Sistema Aquífero Luz-Tavira, através da simulação em regime permanente de diferentes cenários de exploração, com base num modelo numérico de escoamento.

Como tal, numa primeira etapa a procede-se aos ajustes das condições de fronteira do modelo e dos parâmetros hidráulicos, nomeadamente, as classes de transmissividade do SALT. Numa segunda etapa, proceder-se-á à calibração inversa do modelo de escoamento do SALT, com o propósito de aproximar as classes de transmissividade definidas na etapa anterior. Na 3ª etapa, serão abordados diferentes cenários de exploração e análise dos mesmos. Assim, o autor pretende dar continuidade a uma linha de trabalho

desenvolvida na Universidade do Algarve na área da modelação numérica de escoamento sobre o aquífero Luz-Tavira.

Os principais objectivos consistem em definir um modelo de escoamento que:

- Apresente as condições de fronteira mais indicadas para o modelo;
- Represente com fidelidade a piezometria observada;
- Represente os escoamentos estimados no aquífero;
- Permita o estudo de cenários de exploração do aquífero;
- Permita a sugestão de um cenário de exploração mais equilibrado entre recarga e descarga do aquífero.

CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

Nesta secção do trabalho será feita uma revisão do estado actual do conhecimento, também conhecido como estado da arte, no que diz respeito ao Sistema Aquífero Luz-Tavira, a fim de permitir ao autor a familiarização com o sistema e as suas características externas da região, nomeadamente, a localização, a precipitação e o Balanço Hídrico. Este capítulo, consiste num complemento aos capítulos 3 e 4, nos quais se abordam respectivamente, a caracterização hidrogeológica da região do caso de estudo e as bases para a implementação de um modelo de escoamento de recursos hídricos num modelo de elementos finitos. A informação recolhida e apresentada nestes 3 capítulos permitirá ao autor definir as condições necessárias para que numa etapa posterior se possa proceder à adaptação do caso de estudo ao modelo matemático de escoamento do SALT. Será assim necessário, por um lado, efectuar uma síntese sobre o estado actual do conhecimento hidrogeológico sobre o aquífero Luz-Tavira, no que respeita à sua contextualização a diferentes níveis, como o geográfico, a evolução histórica de exploração e climático.

Esta etapa contribui para a determinação e concretização, adequação e enquadramento científico a implementar no trabalho com a finalidade de permitir um conhecimento mais apurado acerca das características externas do aquífero Luz-Tavira, que podem afectar o seu funcionamento hidráulico.

2.1. Enquadramento Geográfico

O Sistema Aquífero Luz-Tavira situa-se na unidade hidrológica da Orla Meridional pertencente à bacia hidrográfica das Ribeiras do Sotavento. A nível cartográfico, o SALT está registado na folha 608 da Carta Topográfica na escala 1:25 000 do IGeoE, na folha 53-B do Mapa Corográfico de Portugal na escala 1:50 000 do IPCC (Figura 2.1).

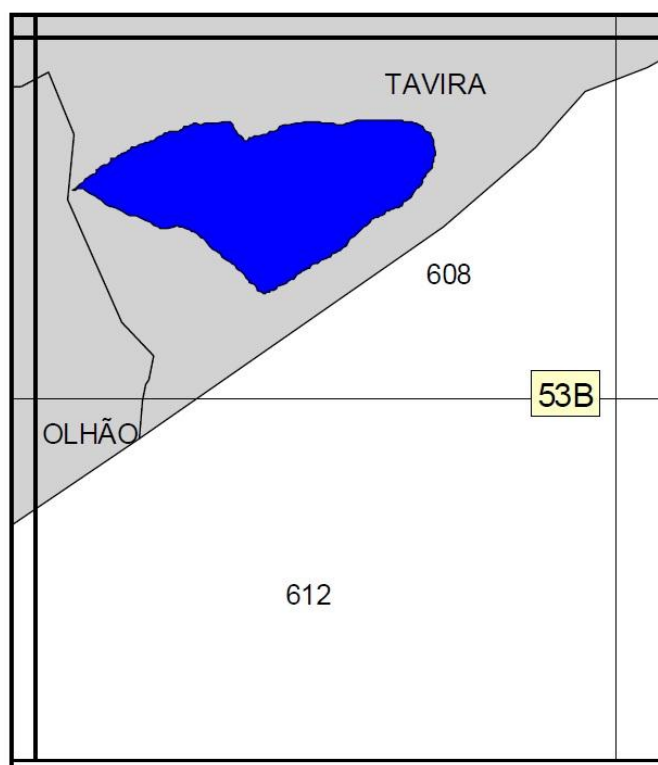


Figura 2.1. Enquadramento geográfico do SALT.
Fonte: Almeida *et al.* 2000

Em termos administrativos, o SALT enquadra-se na sua totalidade no concelho de Tavira, Distrito de Faro e a sua localização geográfica apresenta-se nas Figura 2.2 e Figura 2.3. Tem uma área de 28 km², é limitado a Sul pela Ria Formosa, no entanto, para efeitos do presente trabalho, considera-se como sendo o mar, a Oeste pelas formações do cretácico inferior e a Norte pelos calcários margosos e margas do Peral, do Oxfordiano (Almeida *et al.*, 2000).



Figura 2.2. Localização geográfica do sistema aquífero Luz-Tavira., relativamente ao mapa do Algarve (lado esquerdo) e relativamente aos restantes aquíferos do Algarve (lado direito).
Adaptado de Almeida *et al.* (2000).

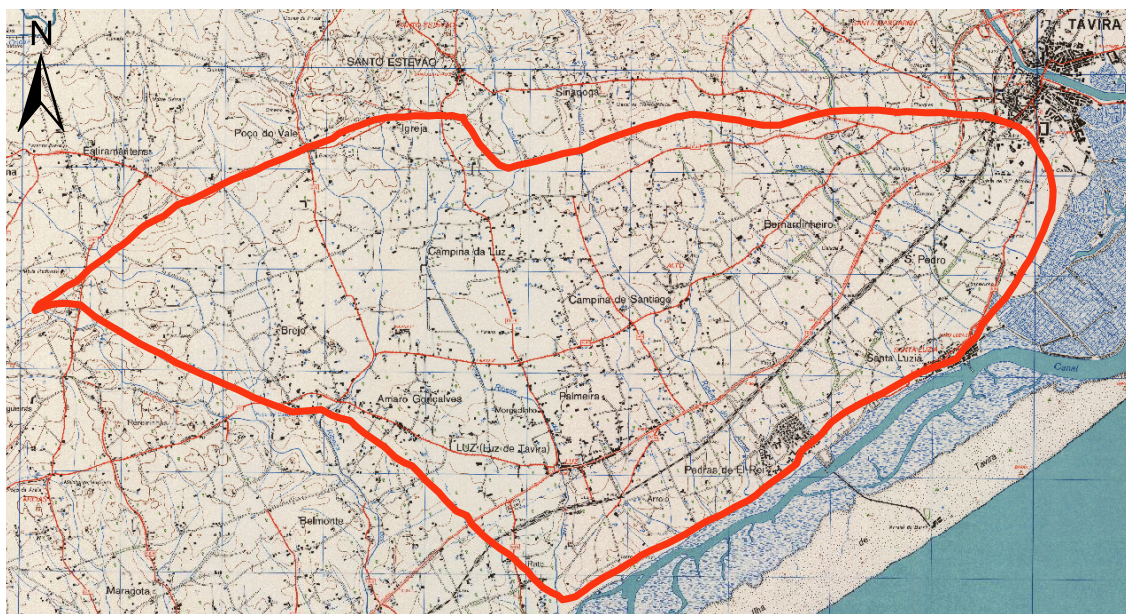


Figura 2.3. Localização do SALT (com limites a vermelho) na Carta Topográfica 1:25000 folha n.º 608.

Os limites do aquífero são facilmente reconhecíveis através das cartas geológica e topográfica e também através da foto aérea, sendo que o limite a leste é formado pela maré tidal do Rio Gilão, que atravessa a cidade de Tavira. Já a fronteira a oeste é provavelmente formada por uma falha NE-SO através de Santo Estêvão, que coloca as margas em contacto com a litologia responsável pelo transporte de água, os Calcários do Dogger (Bonte, 1999).

A área do SALT é densamente povoada quando comparada com o resto de Portugal, tal como sucede com o resto do Algarve. Visto a principal fonte de receita ser a agricultura, a população encontra-se dispersa por toda a região, com concentrações em pequenas localidades como Luz de Tavira e Santo Estêvão. Uma nova fonte de receita para os habitantes locais é o turismo, como se pode verificar pela vila de Pedras de El-Rei, construída por motivos turísticos e situada a sudeste do caso de estudo (Bonte, 1999).

2.2. Precipitação

A região do aquífero Luz-Tavira caracteriza-se por um clima mediterrânico, com a temperatura média anual do ar de 17.3 °C, e precipitação média de 531 mm, segundo dados da estação meteorológica do aeroporto de Faro (Stigter *et al.*, 2006).

A autora Nicolau (2002) estudou a precipitação em Portugal e, através de técnicas avançadas, determinou os valores de precipitação médios anuais com uma resolução de 1km², no período de 1959/60 a 1990/91. Quanto à distribuição da precipitação para

o Algarve (Figura 2.4) a autora chegou a valores de precipitação entre os 414 mm/ano e os 1847 mm/ano, sendo que na área em estudo a precipitação média é de 605,3 mm/ano.

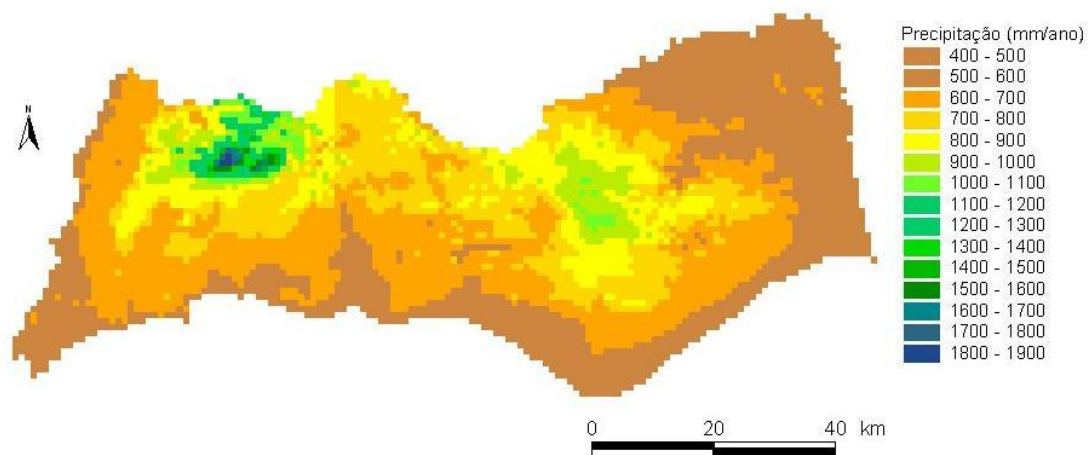


Figura 2.4. Precipitação média anual do Algarve para o período 1959/60-1990/91.

Fonte: Nicolau, 2002.

Os postos meteorológicos de Quelfes e Picota, cuja localização geográfica se apresenta na Figura 2.5 (onde também estão representadas as principais estações meteorológicas nas imediações do SALT), registam uma precipitação média entre 1981 e 2010 de 606,7 e 608,6 mm, de acordo com os dados retirados do SNIRH, valores esses semelhantes aos estimados por Nicolau (2002) para a região do SALT.

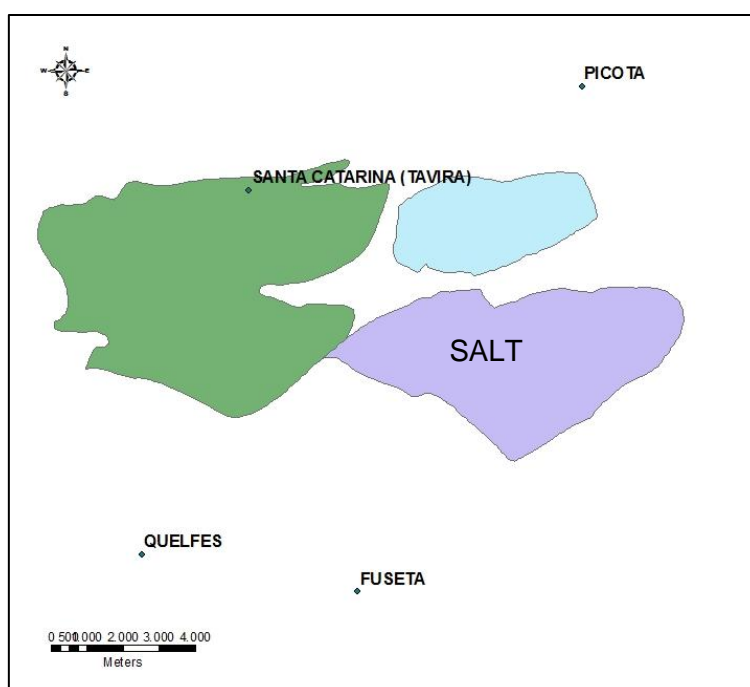


Figura 2.5. Localização geográfica das Estações Meteorológicas do Algarve nas imediações do SALT e dos Sistemas Aquíferos Peral-Moncarapacho e Malhão.

Das estações meteorológicas na Figura 2.5, procedeu-se a uma análise de quantidade de dados a fim de averiguar qual a que apresentava um maior número de dados, de forma a melhor poder representar a precipitação no SALT (Quadro 2.1).

Quadro 2.1. Número de dados das estações meteorológicas de Fuseta, Picota, Quelfes e Santa Catarina. Fonte: SNIRH 2010

Estação	Parâmetro	Unidade	N.º Valores	Data Início	Data Final
FUSETA	Precipitação anual	Mm	5	01-10-1980	01-10-1984
PICOTA	Precipitação anual	Mm	69	01-10-1934	01-10-2006
PICOTA	Precipitação diária	Mm	19343	01-10-1955	07-01-2010
PICOTA	Precipitação horária	Mm	69269	15-03-2001	07-01-2010
QUELFES	Precipitação anual	Mm	20	01-10-1981	01-10-2005
QUELFES	Precipitação diária	Mm	9823	01-08-1980	27-02-2008
QUELFES	Precipitação horária	Mm	55352	04-07-2001	27-02-2008
SANTA CATARINA	Precipitação anual	Mm	42	01-10-1960	01-10-2001
SANTA CATARINA	Precipitação diária	Mm	15775	03-10-1959	10-12-2002
SANTA CATARINA	Precipitação horária	Mm	12552	05-07-2001	10-12-2002

As estações meteorológicas de Quelfes e Picota apresentam maior número de registos de precipitação, como tal, recorre-se com mais frequência aos seus dados em exercícios de modelação que incidam no SALT.

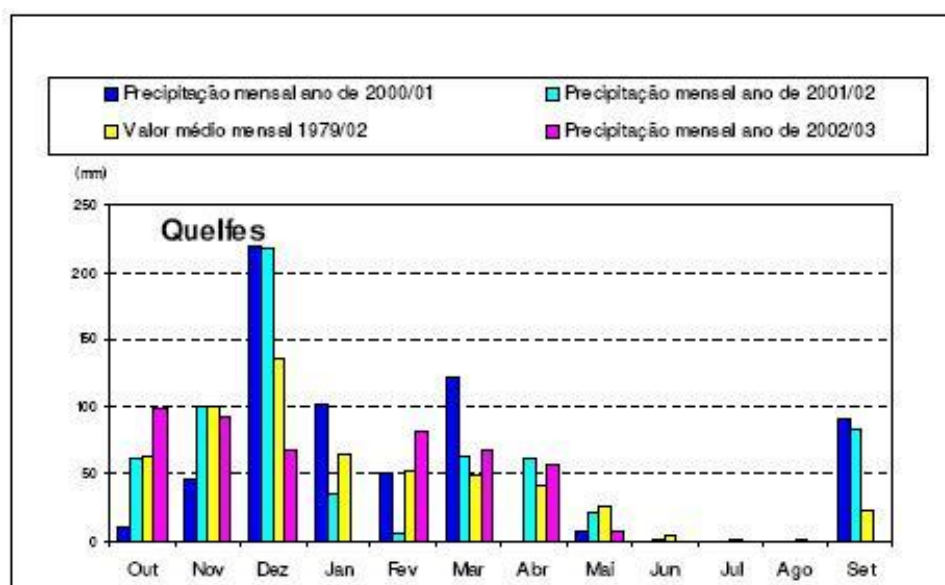


Figura 2.6. Evolução das precipitações mensais no posto de Quelfes.

Fonte: MCOTA, 2003.

Na Figura 2.6 é possível verificar a evolução da precipitação mensal da região, segundo consta nos registos da estação de Quelfes, com destaque para o mês de Dezembro como o mês que geralmente apresenta a maior precipitação e a precipitação quase nula para os meses de Junho, Julho e Agosto.

A variação anual da precipitação na região pode ser verificada na Figura 2.7 cujos registos pertencem à estação meteorológica de Picota. Segundo esta estação os dados variaram entre 180,9 mm/ano (1944) e 1353,9 mm/ano (1989). Os dados de precipitação revelam a existência de anos secos intercalados com anos húmidos, num padrão regular de 2 a 5 anos. A precipitação média plurianual registada é de 608,6 mm/ano.

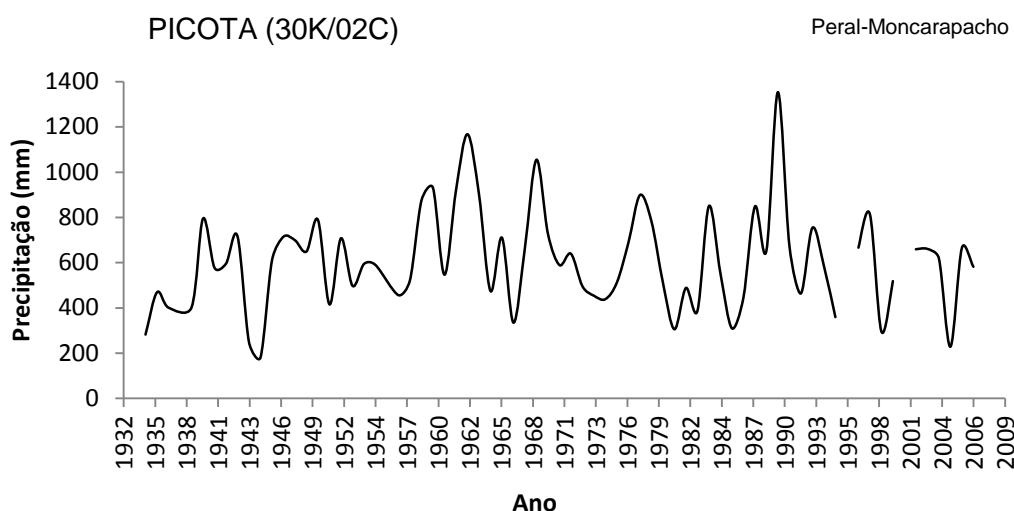


Figura 2.7. Variação da precipitação anual na estação meteorológica de Picota para o período de 1934/35 – 2005/06.
Fonte: SNIRH (2010).

O clima Algarvio é tipicamente mediterrâneo, com temperatura média anual de 16,3 °C (Loureiro & Coutinho, 1995). A evapotranspiração excede a precipitação em larga escala (Faria *et al.* 1981) e os escoamentos da região reflectem a forte sazonalidade da precipitação na região (com coeficientes de variação de 30%). Durante o ano destacam-se dois períodos distintos: uma estação que se pode classificar como chuvosa entre Outubro e Março, e uma estação em que as chuvas se tornam raras, entre Abril e Setembro.

Considerando os tipos climáticos definidos pelo índice hídrico (Ih) que conjuga os índices de humidade e de aridez, os quais por sua vez relacionam precipitação, temperatura e evapotranspiração, verifica-se que o concelho de Tavira possui um clima com características de clima sub-húmido seco do tipo C1, em que $-20\% \leq I_h \leq 0\%$ (MAOT, 2004).

2.3. Balanço Hídrico

As referências bibliográficas de estimativas do balanço hídrico do SALT apresentam uma grande dispersão consoante o estudo efectuado. Este valor estima-se através da subtracção da descarga do aquífero à recarga do mesmo.

Almeida *et al.* (2000) abordou este problema definindo diferentes taxas de recarga em função do solo e calculou a mesma em função da precipitação, obtendo um valor de aproximadamente 4 hm³/ano para a recarga. O mesmo autor referiu que as extracções do aquífero foram da ordem dos 0,8 hm³/ano para abastecimento público e de 3 hm³/ano para a rega.

Monteiro *et al.* (2003a) estimaram o balanço hídrico do SALT em 6 hm³/ano por modelação numérica do aquífero, no entanto, não foram consideradas as extracções de água no mesmo. Vieira & Monteiro (2003) estimaram a recarga do SALT através de modelação numérica em 4,77 hm³/ano, através de modelação numérica com o método de Elementos finitos.

Santos & Miranda. (2006) estimam os mesmos dados em 0,001 hm³/ano para o consumo humano e de 0,4 hm³/ano para a rega. Os valores apresentados pelos últimos autores são relativamente mais baixo, o que se justifica porque os autores realizaram a sua estimativa baseada apenas nas captações licenciadas sobre o aquífero, quando na realidade se estima que o número de captações em vigor seja significativamente mais elevado que as que estão licenciadas.

Reis (2007), através dos valores fornecidos por Almeida *et al.* (2000), estimou a recarga em 4,8 hm³/ano ao incluir o parâmetro de recarga artificial dos aquíferos, provenientes maioritariamente da rega intensiva. Relativamente à descarga, Reis (2007) estimou um valor de 3,2 hm³/ano para o total das captações que extraem água do aquífero e 0,4 hm³/ano a partir das nascentes naturais. Por fim a mesma autora estimou o balanço hídrico em 1,2 hm³/ano.

Os recursos médios renováveis são estimados em cerca de 4 hm³/ano, valor próximo da estimativa das extracções, pelo que o sistema se encontra explorado no seu máximo. Actualmente, neste sistema aquífero a situação é bastante favorável, atingindo os valores máximos registados desde o início das observações (1983). Tal facto dever-se-á por um lado, à diminuição das extracções e por outro, à rega com

origem em água de superfície do sistema Odeleite-Beliche, que veio induzir uma recarga adicional no aquífero (MAOT, 2004).

2.3.1. Fontes de Recarga

Devido à irregularidade das precipitações no sul do país, as recargas anuais podem sofrer oscilações consideráveis, o que leva por vezes a situações de sobreexploração temporária de alguns sistemas. No entanto, após um período de precipitações elevadas as reservas são repostas, verificando-se mesmo a rejeição de parte da recarga através de nascentes temporárias (MAOT, 2004).

Almeida *et al.* (2000) sugerem uma conexão hidráulica entre o Sistema Aquífero Peral-Moncarapacho e o SALT, e consideraram também uma recarga por precipitação de 20% para os depósitos detríticos e 50% para os calcários.

Bonte (1999) sugere uma recarga a norte do aquífero devido aos elevados níveis piezométricos que aí se destacam e um súbito gradiente nos limites a norte do SALT. Esta recarga poderá ser influenciada pelo sistema aquífero Malhão. Os escoamentos N-S provocados por falhas podem ser encontrados por todo o Algarve e são frequentemente importantes para a recarga dos aquíferos (De Vries *et al.*, 1999).

2.3.2. Fontes de Descarga

O SALT foi um aquífero extremamente explorado no passado, através de captações para abastecimento público, rega e uso privado.

Relativamente ao volume de água extraído do aquífero, Almeida *et al.* (2000) basearam os seus cálculos de acordo com dados fornecidos pelo Inventário de Saneamento Básico em 1994 para as extracções para consumo humano e em dados fornecidos pela Direcção Regional de Ambiente e Ordenamento do Território do Algarve para extracções para rega. Reis (2007) definiu as extracções de água subterrânea através de estimativas, referindo que poderão ter um erro associado significativo, no entanto, os valores atribuídos pela autora são de 0,205 hm³/ano para o abastecimento público e 3 hm³/ano para a rega.

A principal fonte actual de descarga do SALT é no entanto no sector sudeste, onde ocorre a descarga directa para o mar. Tal como indicado por Bonte (1999) o sector sudeste é caracterizado por um elevado gradiente no escoamento, indicando a existência de uma barreira, junto à zona de descarga do aquífero para o mar (Bonte, 1999).

2.3.3. Evolução do Uso da Água

A evolução histórica dos consumos de água nesta área encontra-se caracterizada detalhadamente em Stigter (2005) e Vieira *et al.* (2006).

Nas últimas décadas, devido a fenómenos de seca e à elevada população flutuante que se verifica nos períodos de verão, bem como a um incremento da agricultura de regadio, registaram-se alguns problemas no que diz respeito à sobreexploração dos sistemas aquíferos que culminou na diminuição dos níveis freáticos. Tendo em conta os problemas atrás referidos, definiram-se uma série de programas que visaram uma utilização mais frequente de águas superficiais. Destaca-se desta forma a definição dos perímetros de Rega e Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Águas do Algarve (SMAAA). A implementação dos Perímetros de rega foi delimitada pelo Instituto de Desenvolvimento Rural e Hidráulica (IDRHa), abrange a área estudo, Campina da Luz, e iniciou a sua fase experimental em 2000 (Rodrigues, 2007) e consiste na construção de reservas de água superficial como forma de armazenamento de água com a finalidade de rega, sendo que desde então procedeu-se à implementação de mais perímetros de rega na região. O SMAAA foi definido para satisfazer as necessidades relativas ao abastecimento público do Algarve, através essencialmente das barragens de Odeleite, Beliche e Odelouca.

A agricultura tem sido das formas de ocupação do solo mais predominantes nesta área por muitos séculos, tornando-se mais intensiva com a introdução da rega no fim do século 19 (Stigter *et al.*, 2006). Actualmente dominam as culturas de citrinos na zona central e viticultura nas zonas mais a sul (Stigter *et al.*, 2006).

A água subterrânea era a única fonte de rega até ao ano 2001, ano a partir do qual a área foi incluída no perímetro de rega, que abastece o sotavento Algarvio com albufeiras e reservas de água superficial, construídas sobre duas principais linhas do rio Guadiana, que forma fronteira com Espanha (Stigter *et al.*, 2006). Essas reservas também foram utilizadas para o abastecimento público de água a partir de 1999, resultando no encerramento de um grande número de captações municipais de água subterrânea (Stigter *et al.*, 2006).

A área total do perímetro de rega é de 8621 ha e o volume médio regado estima-se em 57 hm³/ano (Mota & Dias, 2000)

A agricultura intensiva na região, cuja fonte de água provém do perímetro de rega essencialmente, provoca uma recarga artificial do aquífero, que permitiu a reactivação

de nascentes, formando pontos de descarga do aquífero, que antigamente só seriam activados em períodos de elevada precipitação (Stigter et al., 2006).

O aumento da descarga do aquífero aliado à recarga artificial com água superficial do perímetro de rega resultou em efeitos na hidrogeologia do aquífero superior, funcionando como uma diluição dos contaminantes das águas subterrâneas. Destacam-se as diminuições dos níveis de Cloretos (Cl^-), Nitratos (NO_3^-) e sulfatos (SO_4^{2-}) e um aumento nas concentrações de Cálcio (Ca^{2+}) (Stigter *et al.*, 2006). O factor mais importante destes consiste na diminuição do nível de nitratos das antigas captações de águas para consumo público, a partir de 2001 (Stigter *et al.*, 2006).

3. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DO SALT

O presente capítulo, tal como referido no capítulo anterior, consiste num complemento à síntese de informação necessária para o trabalho de modelação necessário realizar para a implementação do modelo de escoamento do sistema aquífero Luz-Tavira, juntamente com as secções 2 e 4 da presente dissertação. Nomeadamente, nesta secção, proceder-se-á ao estudo das características internas do aquífero Luz-Tavira, com o intuito de melhor perceber como se desenvolve o escoamento do aquífero, Para tal, procedeu-se à recolha bibliográfica no específica à geologia, ao enquadramento hidrogeológico regional, em particular no que diz respeito à resposta do aquífero face a factores externos, à resposta piezométrica do SALT e ainda à recolha de dados piezométricos com o intuito de facilitar o estudo do escoamento do SALT.

3.1. Enquadramento Geológico

O suporte litológico deste sistema hidrogeológico é constituído pelos Calcários Bioconstruídos de Cerro da Cabeça, Calcários do Escarpão (Jurássico superior), Formação de Cacela (Miocénico), Camadas de Morgadinho (Pliocénico) e, em menor extensão, estão ainda presentes formações cretácicas. As Areias e Cascalheiras de Faro-Quarteira constituem uma cobertura de espessura reduzida ou irregular que recobre parcialmente as restantes formações (Monteiro *et al.*, 2003a).

As formações aquíferas dominantes são os Calcários Bioconstruídos de Cerro da Cabeça, Calcários do Escarpão (Jurássico superior), Formação de Cacela (Miocénico) e Camadas de Morgadinho (Pliocénico). Ocupam menor extensão as formações do Cretácico e as Areias e Cascalheiras de Faro-Quarteira constituem apenas uma cobertura de espessura reduzida ou irregular (Figura 3.1) (Almeida *et al.*, 2000).

De acordo com a caracterização dos aquíferos de Portugal elaborada por Almeida *et al.* (2000), o sistema aquífero da Luz-Tavira, com uma área de 28 km², é limitado a Sul pelo mar, a Oeste pelas formações do Cretácico inferior, e a Norte pelos calcários margosos e margas do Peral, do Oxfordiano. Trata-se de um sistema multiaquífero, constituído por um aquífero cársico, livre e confinado, cujo suporte são os Calcários Bioconstruídos de Cerro da Cabeça e Calcários do Escarpão, a que se sobrepõe um aquífero poroso, também ele livre a confinado, este por sua vez suportado por formações detrítico-carbonatadas terciárias (Figura 3.1).

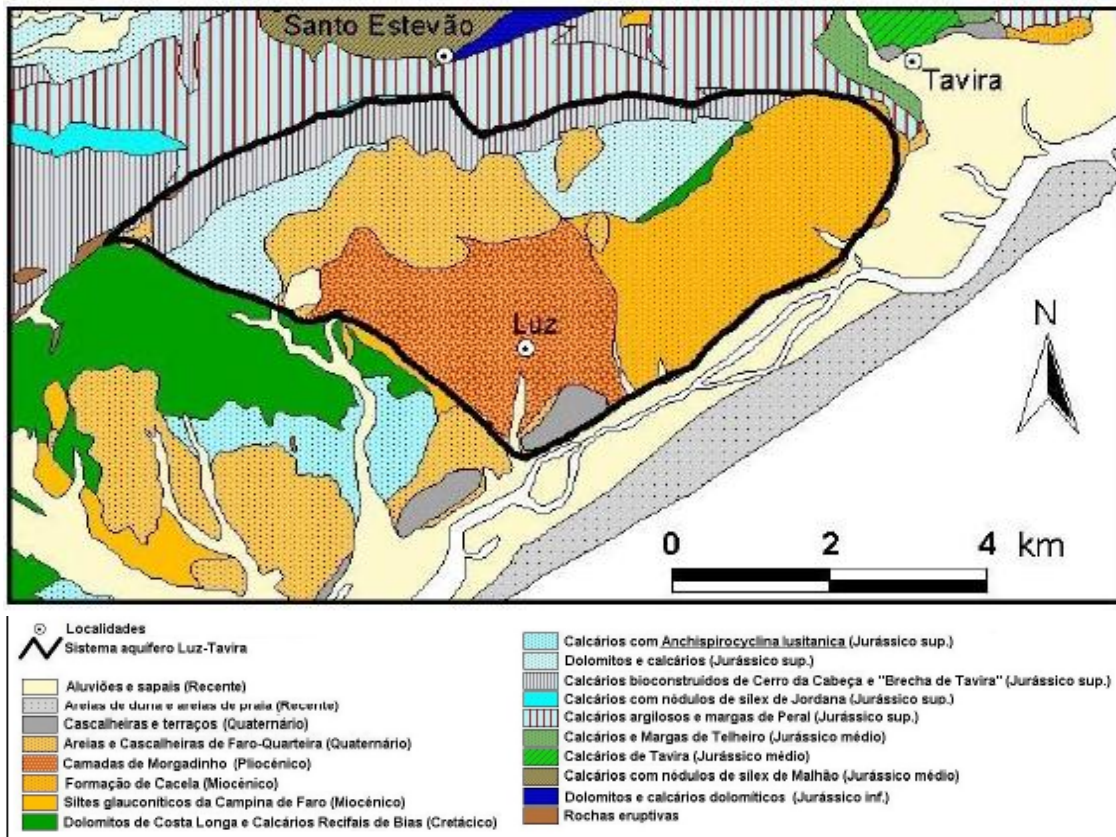


Figura 3.1. Enquadramento litoestratigráfico do Sistema Aquífero Luz de Tavira;
 Fonte: Almeida *et al.* (2000)

Localmente existem conexões hidráulicas entre estes dois aquíferos, como é demonstrado pela existência de artesianismo repuxante em alguns poços implantados em níveis miocénicos, enquanto a curta distância os níveis se situam alguns metros abaixo do solo (Silva, 1984).

A evidência de uma anomalia gravimétrica, correspondente a um diapiro de orientação N53°E, situado a NE de Moncarapacho, bem como as condições estruturais existentes na região e os limites das séries litológicas, favorecem a existência de um fluxo subterrâneo de direcção sensivelmente E-O entre a zona do cerro da Cabeça e Tavira (Silva, 1984).

A topografia na região do caso de estudo é irregular, com zonas relativamente planas no centro da área, com cerca de 40 m de altitude e inclinações bastantes acentuadas perto da Luz de Tavira, onde o terreno baixa para 20 m, e a Norte, onde existem colinas que atingem cotas acima dos 100 m, sendo que esta irregularidade topográfica está fortemente ligada às diferentes unidades geológicas presentes no terreno (Stigter *et al.*, 2001). Ao longo da costa ocorre uma elevação do terreno até 25 m,

caracterizada por uma vegetação maioritariamente de pinheiros, sendo que também se identificam algumas zonas com actividade agrícola (Bonte, 1999)

A transmissividade depende principalmente na porosidade secundária causada por carsificação e por falhas que conduzem a água. Os calcários do Miocénico são inclusivé caracterizados por captações com elevada produtividade, que podem chegar aos 60 l/s (Bonte, 1999).

3.2. Qualidade Química da Água do SALT

As águas deste sistema apresentam uma qualidade fraca, quer para abastecimento, quer para regadio. De facto, os Valores Máximos Recomendáveis (VMRs) estabelecidos para água para consumo humano, são ultrapassados em quase todas as análises de cloretos, cálcio, magnésio, sódio, condutividade e dureza. Por outro lado, verifica-se elevada frequência de violações dos Valores Máximos Admissíveis (VMAs) referentes ao magnésio e dureza, quanto à qualidade para rega, os VMRs relativos aos cloretos e condutividade são ultrapassados na maioria das análises (Almeida *et al.*, 2000).

A fácies dominante é bicarbonatada cálcica, como indicado na Figura 3.2.

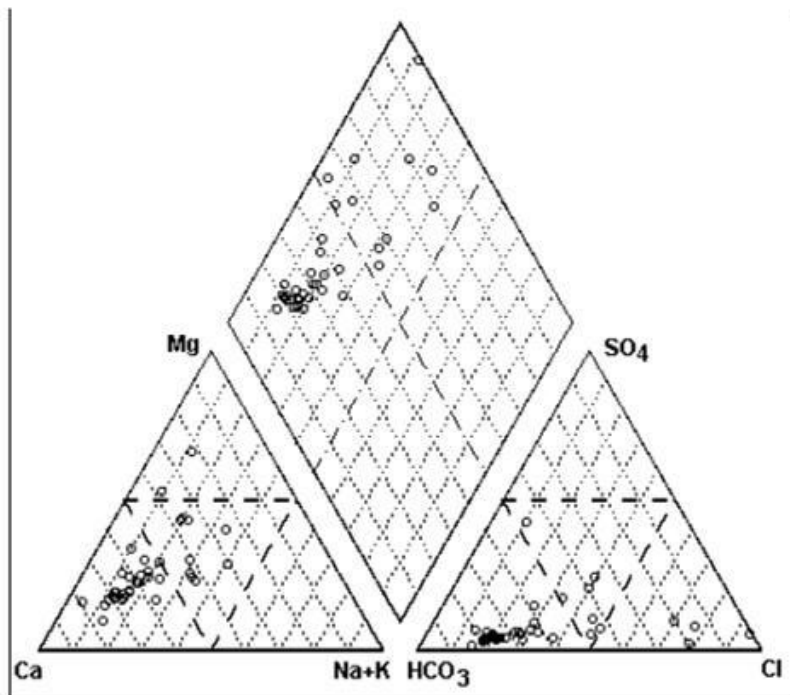


Figura 3.2. Diagrama de Piper relativo às águas do sistema de Luz-Tavira. Fonte: Almeida *et al.* (2000).

Quanto à tendência evolutiva dos nitratos, observa-se que, a partir de 1995, houve um aumento brusco, passando-se de valores perto dos 30 mg/L para valores superiores a 40 mg/L (Almeida *et al.*, 2000).

Apesar de alguns problemas em geral de qualidade da água no passado, as práticas agrícolas na área melhoraram desde 2001, quando esta foi ligada ao perímetro de rega das barragens do Beliche e Odeleite, reduzindo drasticamente o uso da água subterrânea para a rega. Segundo Stigter *et al.* (2006), notaram-se diminuições na carga de azoto da água de rega, aumento da quantidade de descarga das águas subterrâneas e diminuição das concentrações de NO_3^- nas águas de descarga. Inclusive, a evolução hidroquímica, simulada, revela um efeito de diluição e consequente redução da salinidade e da concentração de NO_3^- , apesar deste último parâmetro se encontrar ainda acima do VMA em muitos pontos (Stigter, 2005).

3.3. Enquadramento Hidrogeológico Regional

Neste sistema aquífero estão instaladas estações hidrométricas (Figura 3.3) nas ribeiras da Luz, Mosqueiros e Arroio, a jusante das nascentes existentes no leito das linhas de água. Entre Janeiro e Setembro de 2005, o volume de água registado foi de 135 000 m³, sendo 52440 m³ proveniente da ribeira dos Mosqueiros, que se infiltrou a jusante, contribuindo para a recarga do sistema aquífero S. João da Venda – Quelfes.

No ano hidrológico 2005/06, o escoamento destas linhas de água, que é proveniente, em grande parte, das nascentes existentes no leito das ribeiras referidas foi de 269500 m³, sendo cerca de 141500 m³, proveniente da ribeira dos Mosqueiros (Reis, 2007).

Os caudais mais frequentes, parâmetro também denominado de produtividade do SALT, oscilam entre 3 e 6 l/s, sendo a mediana 6 l/s e o máximo 20 l/s (MAOT, 2004; Almeida *et al.* 2000).

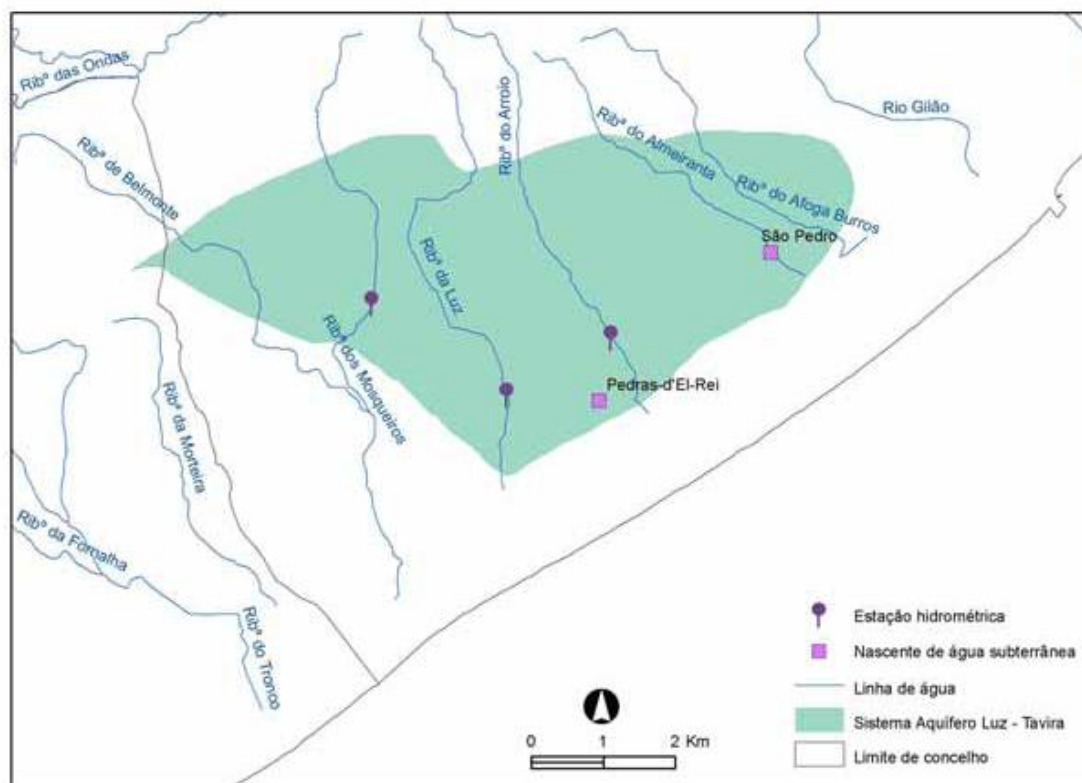


Figura 3.3. Localização das estações hidrométricas e das nascentes monitorizadas no sistema aquífero Luz de Tavira.
Fonte: Reis (2007).

Os valores de transmissividade estimados a partir de diferentes autores apresentam valores similares. Almeida *et al.* (2000) estimaram este valor, através do caudal, em 25 a 1938 m²/dia, com um valor mediano e médio 104 e 384 m²/dia respectivamente. Silva (1984) estimou este em 24 a 30 m²/dia e 500 a 2000 m²/dia de acordo com a localização. Estas gamas de valores indicam a enorme heterogeneidade apresentada pelo SALT.

Segundo a maioria das referências, o escoamento do SALT pode ser considerado maioritariamente de NO-SE, sendo no entanto importante referir que as falhas jogam um papel importante nomeadamente as falhas N-S as que conduzem preferencialmente a água e as que actuam como barreira ao fluxo (Stigter & Carvalho Dill, 2001).

Em anos de baixa precipitação os níveis de água subterrânea no SALT são relativamente mais baixos e como tal verifica-se um fenómeno de sumidouro na região central do aquífero, ao contrário do escoamento predominante direccionado de NO-SE. Segundo Bonte (1999) existem três possíveis explicações para este fenómeno:

- A explicação mais óbvia remete para a significância das extracções nesta secção do terreno. No entanto, esta hipótese é enfraquecida pelo facto de que a condutividade apresenta valores baixos, quando na sua generalidade, este valor é elevado em regiões em que se identifiquem redes de extracção de água significativas, devido à evapotranspiração que ocorre na região. Como tal, o mesmo autor assume que a rede de extracção não é tão significativa.

- As propriedades hidráulicas que regem o transporte de água nesta área são diferentes. Por exemplo, se os calcários desta região forem menos cársicos, a porosidade secundária diminui. Isto irá resultar directamente num menor coeficiente de armazenamento, o que resulta num abaixamento piezométrico mais acentuado, mantendo-se as mesmas condições de extracção de água.

- Uma falha pode direccionar a água para uma circulação mais profunda, ou fornecer um atalho para um aquífero mais profundo, o que provoca a percolação da água para níveis mais baixos. Segundo o autor, existe uma falha que intercepta os carbonatos do jurássico a sul de Santo Estêvão que tornam esta hipótese viável.

Bonte (1999) indica no seu trabalho que o limite a sudoeste do aquífero é impermeável, devido ao elevado gradiente que se verifica nessa região nos mapas piezométricos obtidos pelo mesmo autor. O fluxo predominante NO-SE também indica a impermeabilidade do aquífero na secção Sudoeste.

3.4. Piezometria

Nesta sub-secção pretende-se abordar estudos prévios à piezometria na região do caso de estudo, como forma de compreender o comportamento piezométrica no SALT e o escoamento que neste ocorre, e também, proceder a uma análise da recolha de dados piezométricos, com o intuito de averiguar o comportamento actual do aquífero. A análise destes dados terá incidência directa nos dados do modelo, nomeadamente na definição das condições de fronteira e na reestruturação das camadas de transferência utilizadas no modelo.

De destacar que apenas foi encontrado um estudo prévio que aborde com relevância a piezometria na área do SALT, nomeadamente Stigter & Carvalho Dill (2001), o que demonstra a necessidade de desenvolver mais estudos nesta área.

3.4.1. Piezometria do SALT – Estudos prévios

Os autores Stigter & Carvalho Dill (2001) efectuaram um estudo no qual foram medidos os níveis piezométricos de 29 noras na região da Campina da Luz (Figura 3.4), durante o período de Agosto de 1997 a Setembro de 1999.

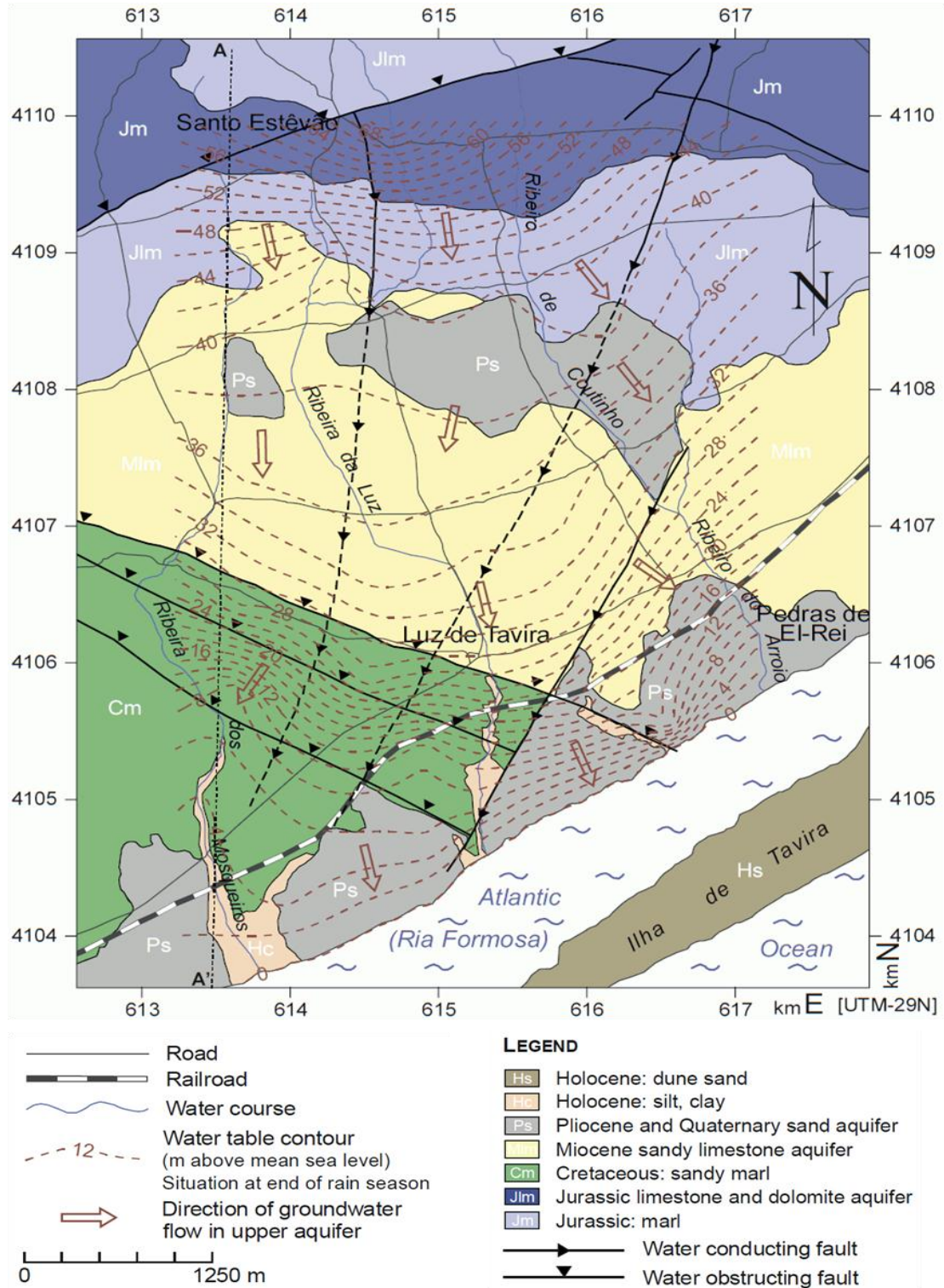


Figura 3.4. Carta hidrogeológica da Campina da Luz.
Fonte: Stigter & Carvalho Dill (2001).

Através da interpretação dos resultados foi possível observar as diferenças espaciais no comportamento dos níveis piezométricos nas noras da Campina da Luz. A subida do nível piezométrico provocada pelas chuvas do inverno de 97/98, é muito acentuada em algumas noras, ultrapassando os 10 m e alcançando valores de 15 m nas noras mais a Norte. Por outro lado, o inverno pouco chuvoso de 98/99, associado aos verões secos, fez com que os níveis descessem até grandes profundidades, chegando em alguns casos a provocar a seca completa de algumas noras. Estes factores permitiram concluir que o aquífero miocénico tem uma capacidade de resposta muito rápida e um comportamento hidráulico muito dinâmico, com recargas e descargas rápidas de água subterrâneo.

Por outro lado, os mesmos autores verificaram que a maioria das noras a sul captam águas das margas do Cretácico, no entanto estas apresentam variações piezométricas mais suaves, na ordem dos 2 a 5 m. A presença destas zonas não só influencia as oscilações dos níveis piezométricos, mas também tem o seu impacto no padrão de fluxo, aumentando o gradiente hidráulico nesta zona, fenómeno esse que pode ser observado na Figura 3.5.

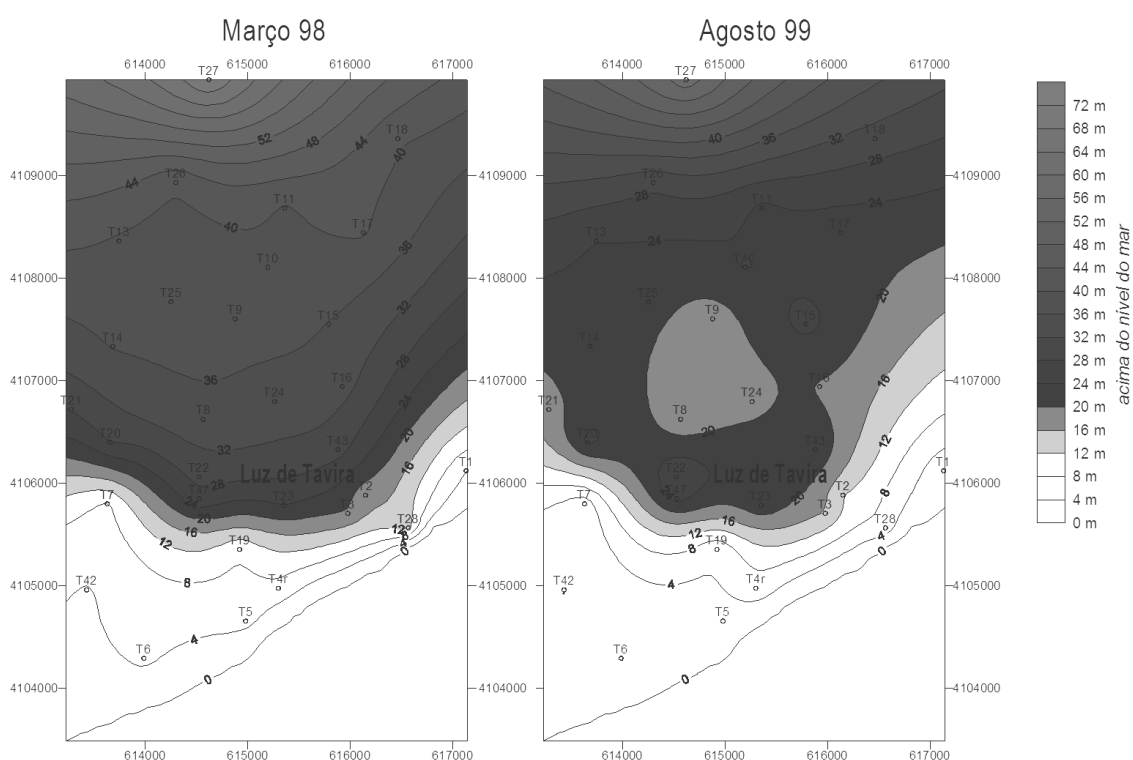


Figura 3.5. Padrão de fluxo no aquífero superior da Campina da Luz no fim de uma época de chuva (esquerda) e no fim de verão de um ano pouco chuvoso (direita).
 Fonte: Stigter & Carvalho Dill (2001).

Como se pode constar através da Figura 3.5, após um período chuvoso (Março 98) os níveis piezométricos são significativamente superiores quando comparados com um

cenário após um longo período de seca (Agosto 99) e, conseqüentemente, também a descarga será superior para o primeiro período. O gradiente hidráulico é maior no primeiro período, sobretudo no centro da Campina da Luz. Na zona Sudoeste as falhas NO-SE são directamente e indirectamente responsáveis pelo aumento do gradiente hidráulico. De forma directa funcionam como barreira para o escoamento das águas subterrâneas, enquanto que de forma indirecta induzem uma alteração abrupta na geologia, de calcários miocénicos, com alta transmissividade, a Norte, para margas cretácicas pouco permeáveis a sul.

3.4.2. Recolha e Análise de Dados Piezométricos

Para o trabalho desenvolvido na presente dissertação, numa primeira etapa foram utilizadas 4 séries de dados piezométricos distintas: (1) Base de dados da SNIRH; (2) dados recolhidos pelo Investigador Tibor Stigter no âmbito do trabalho desenvolvido em Stigter & Carvalho Dill (2001); (3) dados recolhidos por um grupo de estudantes holandeses da Universidade Livre de Amesterdão - ULA (*Vrije Universiteit Amsterdam*) no âmbito de uma excursão que decorre com uma periodicidade anual.

Na Figura 3.6 encontram-se referenciados as todas as captações recolhidas de fonte bibliográfica ou de estudos prévios, identificadas consoante a fonte.

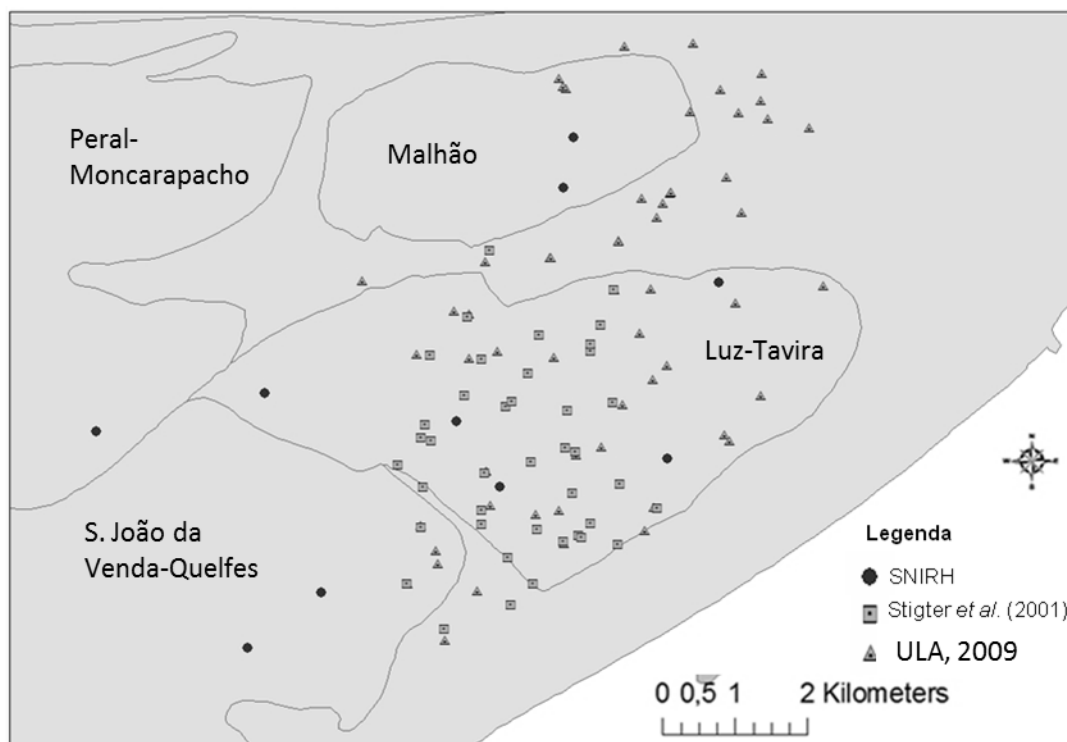


Figura 3.6. Base de dados de todas as captações e respectiva fonte, cujos registos foram utilizados durante o desenvolvimento da presente dissertação.

Para a análise piezométrica num registo temporal foram utilizados dados provenientes das fontes (1) e (3) para o período de Maio de 2007, visto que estas apresentavam um maior número de registos e distribuição espacial sobre a região do caso de estudo. Já para a análise de amplitudes piezométricas, que requerem uma série de dados mais completa em termos de registos temporais, foram utilizadas as fontes (1) e (2), pois estas apresentam um intervalo temporal de registos mais amplo.

Numa segunda etapa, posteriormente abordada nesta secção, foi realizada uma saída de campo com o intuito de recolher dados piezométricos no sector Oeste do aquífero, visto esta região apresentar pouca informação piezométrica.

3.4.3. Análise Piezométrica para um Registo Temporal

A análise à piezometria iniciou-se, como referido no capítulo 3.4.2., através da utilização dos registos das medidas piezométricas obtidas no site do SNIRH (SNIRH, 2010) que estão disponíveis ao público, e de um estudo por parte de um grupo de alunos holandeses, cujos dados foram cedidos pela ULA (Figura 3.7).

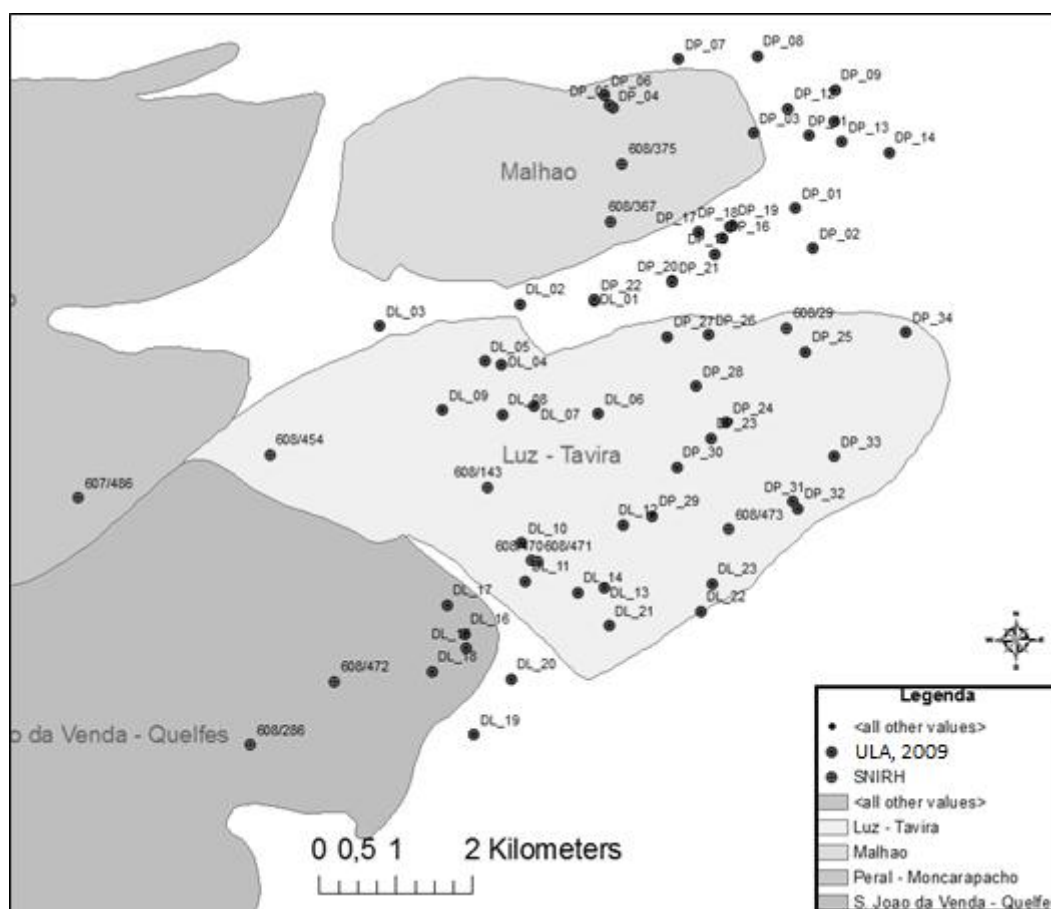


Figura 3.7. Base de dados de piezómetros considerados para realizar mapa piezométrico. Registos ULA identificados com a denominação DP ou DL, registos SNIRH identificados como 608(7)/xxx. Estão também representados os sistema-aquíferos cujo escoamento poderá ter ou ser influenciado directamente pelo SALT.

A escolha deste conjunto de dados para o período em questão, deve-se ao facto de o período de Maio de 2007 representar a amostra com maior número de registos e distribuição espacial no SALT, com o fim de representar a piezometria observada com maior significância (Figura 3.7). Como tal optou-se por este período de tempo para a realização do mapa piezométrico para um registo temporal e respectiva análise.

De forma a realizar o mapa piezométrico e a distribuição espacial do potencial hidráulico no SALT, dos piezómetros referenciados na Figura 3.7, foram seleccionados apenas os que se incluem dentro do SALT. Nesta etapa foi também excluído o piezómetro 608/470, devido à enorme discrepância de valor de piezometria relativamente aos registos de piezómetros nas suas imediações, o que leva a crer que o mesmo estará a retirar água de um sub-aquífero. Assim sendo, no Quadro 3.1 apresenta-se a informação relativa aos piezómetros considerados para a realização do mapa piezométrico para o registo temporal de Maio de 2007.

Após a análise e selecção de piezómetros considerados para a piezometria do SALT, procedeu-se então à elaboração do mapa piezométrico do SALT (Figura 3.8) com os dados referidos no Quadro 3.1. O ID dos piezómetros do registo ULA depende com a localização destes, de tal forma que o identificador DP está para Dutch-Pedras, como tal são todos os piezómetros a Este de Pedras-del-Rei, enquanto que o identificador DL significa Dutch-Luz de Luz de Tavira, sendo esta denominação atribuída pelos autores da leitura dos registos no local.

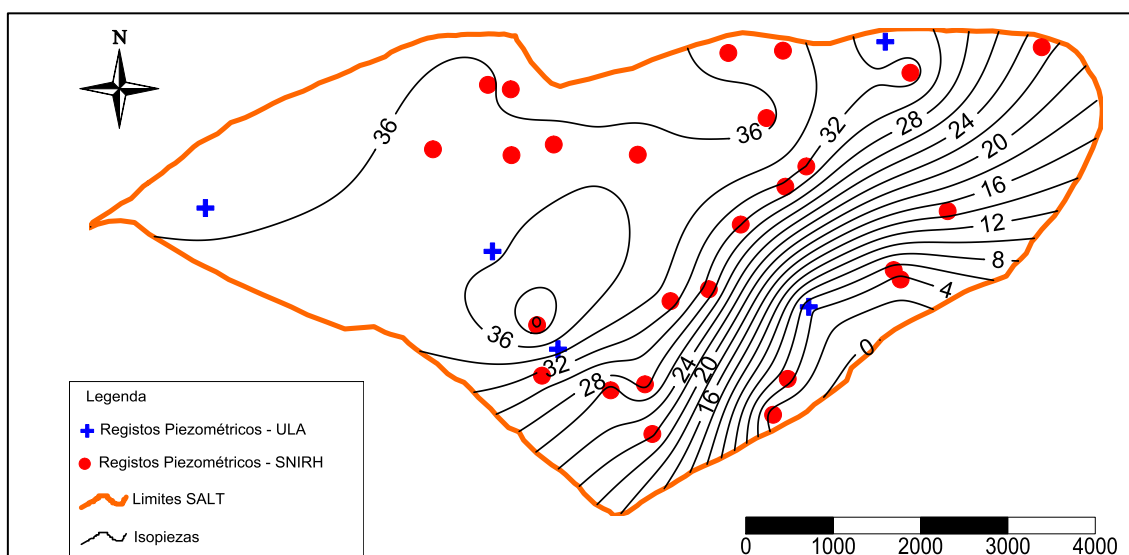


Figura 3.8. Mapa piezométrico do SALT realizado com registos de Maio de 2007 do SNIRH e da ULA.

Quadro 3.1. Piezómetros utilizados na realização do mapa piezométrico e respectiva fonte, Piezometria, data de recolha dos dados e coordenadas X e Y.

ID	Fonte	Piezometria	Data	Coord X	Coord Y
608/143	SNIRH	35,48	09_05_2007	237000,00000000	15420,00000000
608/29	SNIRH	30,25	04_05_2007	240900,00000000	17500,00000000
608/454	SNIRH	36,51	09_05_2007	234150,00000000	15850,00000000
608/471	SNIRH	34,71	04_05_2007	237650,00000000	14450,00000000
608/473	SNIRH	4,52	04_05_2007	240140,00000000	14870,00000000
DL_04	Registo ULA	37,10	Maio	237181,47987500	17027,58066390
DL_05	Registo ULA	35,40	Maio	236954,65111900	17071,90531810
DL_06	Registo ULA	35,55	Maio	238442,47570400	16378,96637560
DL_07	Registo ULA	35,50	Maio	237608,29951700	16479,91285850
DL_08	Registo ULA	34,87	Maio	237188,64550300	16374,47378360
DL_09	Registo ULA	35,55	Maio	236409,18501300	16432,49566820
DL_10	Registo ULA	39,25	Maio	237442,90071000	14688,64679470
DL_11	Registo ULA	31,30	Maio	237491,49731000	14187,21755320
DL_12	Registo ULA	32,90	Maio	238767,18232300	14926,56170230
DL_13	Registo ULA	28,56	Maio	238514,01828100	14101,16942600
DL_14	Registo ULA	25,30	Maio	238173,77016400	14041,73267520
DL_21	Registo ULA	22,30	Maio	238587,24045600	13608,55181140
DL_22	Registo ULA	0,90	Maio	239785,85424200	13799,35839570
DL_23	Registo ULA	4,78	Maio	239931,34754300	14155,32304630
DP_23	Registo ULA	31,50	Maio	239907,44374000	16061,49008720
DP_24	Registo ULA	31,95	Maio	240115,96877500	16262,43210580
DP_25	Registo ULA	33,20	Maio	241149,18399500	17191,70722680
DP_26	Registo ULA	34,75	Maio	239883,89723100	17410,94487230
DP_27	Registo ULA	35,35	Maio	239341,58151100	17388,24323730
DP_28	Registo ULA	36,50	Maio	239720,84248500	16742,60854720
DP_29	Registo ULA	29,20	Maio	239148,16279600	15044,29261130
DP_30	Registo ULA	30,05	Maio	239464,75886500	15685,95364360
DP_31	Registo ULA	5,05	Maio	240983,28237000	15234,25163690
DP_32	Registo ULA	3,50	Maio	241052,03654900	15140,98832940
DP_33	Registo ULA	14,83	Maio	241519,12471300	15818,97469470
DP_34	Registo ULA	22,65	Maio	242452,75538000	17445,08984650

Para mais informação acerca dos registos piezométricos para o período de Maio de 2007, consulte o Anexo I.a.

A interpolação por krigagem destes dados permite-nos definir as direcções predominantes dos fluxos de água subterrânea, que formam a base para o modelo conceptual do sistema aquífero com a definição do mapa piezométrico do SALT para o período de Maio de 2007, tal como se pode ver na Figura 3.8.

O mapa da Figura 3.8, resultado da interpolação por krigagem, sugere um fluxo predominante de Noroeste (principal área de recarga) para Sudeste (principal área de descarga, para o mar), com um gradiente hidráulico mais macio na região noroeste do

SALT e mais forte na região sudoeste do mesmo. Também se identifica um fluxo norte-sul na secção mais central do aquífero, causado eventualmente pela recarga proveniente do Sistema Aquífero do Malhão.

Para além dos dados retratados, realizou-se também uma saída de campo a 3 de Fevereiro de 2011, com o intuito de retirar medições no quadrante Oeste, onde não existe informação suficiente para caracterizar essa mesma área. Assim, aguardou-se a ocorrência de um período de chuva para retirar dados nesta zona do SALT, de forma a tentar inserir esta informação nos dados já existentes de piezometria. Para além disso, pretendeu-se determinar com maior rigor, a interação e possíveis transferências de água entre o SALT e o Sistema Aquífero Peral-Moncarapacho (SAPM).

No Quadro 3.2 apresentam-se os dados obtidos na saída de campo e a sua conversão para com os dados utilizados para realizar o mapa piezométrico, com valores de Maio de 2007. Essa conversão foi realizada por regressão linear entre os registos dos mesmos piezómetro para o período de 2007 e da data da saída de campo.

Quadro 3.2. Registos piezométricos obtidos na saída de campo a 3 de Fevereiro de 2011 e consequente conversão dos mesmos para Maio de 2007.

ID	Tipo	Coordenada X	Coordenada Y	Piezometria (m)	Conversão Mai-07
WP56	Poço	237442,560	14691,740	38,816	33,28649
WP58	Nora	237739,359	15636,069	40,729	34,92697
WP59	Nora	236609,182	16436,610	42,404	36,36336
WP60	Furo	236591,227	15947,875	41,89	35,92258
WP61	Furo	236516,025	15853,923	41,428	35,5264
WP62	Nora	236446,737	15846,671	40,517	34,74517
WP63	Nora	235322,199	15924,294	42,455	36,40709
WP63b	Furo	235324,672	15927,726	42,472	36,42167
WP65	Nascente	235409,785	15182,452	37,003	31,73176
WP66	Poço	234762,320	15723,323	43,209	37,05368
WP67	Nora	235185,340	15396,706	40,105	34,39186
WP68	Nascente	235270,197	15074,418	32,248	27,65413
608/454	Furo	234188,603	15755,194	42,575	36,51

A fim de se realizar a conversão dos dados da saída de campo para Maio de 2007, registou-se a piezometria do piezómetro 608/454 como referência a partir da qual se procedeu à conversão dos restantes registos para Maio de 2007.

Na Figura 3.9 apresenta-se a localização dos registos piezométricos considerados para a realização do mapa piezométrico (tendo em conta os registos recolhidos e referidos no Quadro 3.3) e o mapa piezométrico resultante da integração destes dados

com os registos já existentes. Este será o mapa piezométrico de referência inicial a partir do qual se irá implementar e tentar aproximar o modelo de escoamento do SALT.

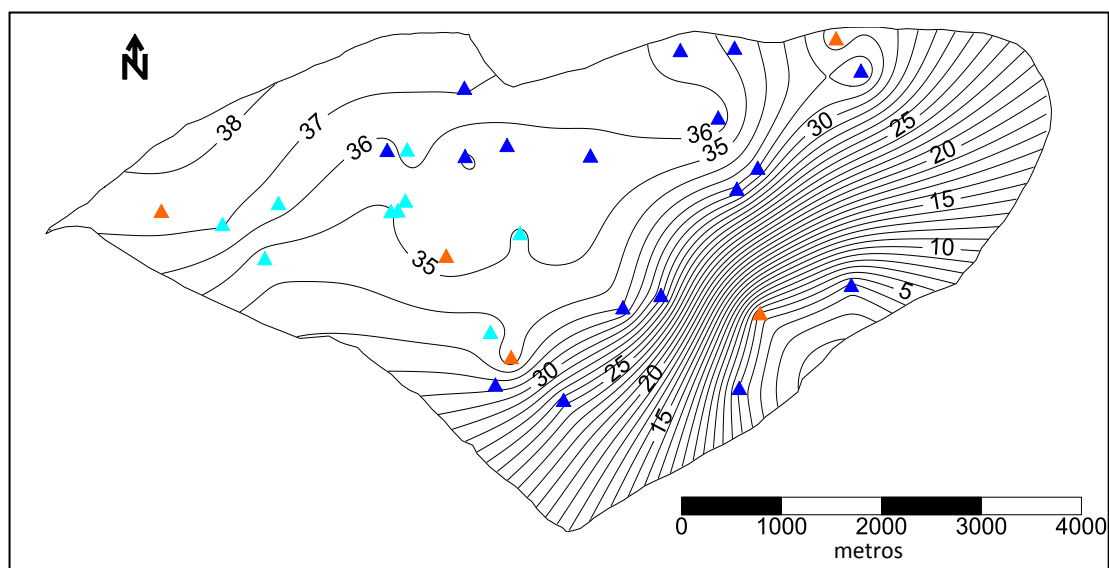


Figura 3.9. Localização dos piezómetros considerados para a realização do mapa e respectivo mapa piezométrico do SALT resultante.

Na realização do mapa da Figura 3.9, foram excluídos os registos referente às nascentes (WP68 e WP65) e ainda os registos DL05, DL10, DL13, DL21, DL22, DP30, DP31, DP33 e DP34, por se admitir que apresentavam erros de medição, uma vez que apresentavam inconformidade no valor piezométrico obtido nestes registos, tendo em conta os piezómetros circundantes. Como tal, apresenta-se no Quadro 3.3, a listagem definitiva dos registos piezómetros considerados para o caso de estudo.

Quadro 3.3. Registos piezométricos considerados para a região do caso de estudo

ID	FONTE	Piezometria	ID	FONTE	Piezometria
608/143	SNIRH	35,48	DP25	ULA	33,20
608/29	SNIRH	30,25	DP26	ULA	34,75
608/454	SNIRH	37,51	DP27	ULA	35,35
608/471	SNIRH	34,71	DP28	ULA	36,50
608/473	SNIRH	4,52	DP29	ULA	29,20
DL04	ULA	37,10	DP32	ULA	3,50
DL06	ULA	35,55	WP56	3-Fev	33,29
DL07	ULA	35,50	WP58	3-Fev	34,93
DL08	ULA	34,87	WP59	3-Fev	36,36
DL09	ULA	35,55	WP60	3-Fev	35,92
DL11	ULA	31,30	WP61	3-Fev	35,53
DL12	ULA	32,90	WP62	3-Fev	34,75
DL14	ULA	25,30	WP63	3-Fev	36,41
DL23	ULA	4,78	WP66	3-Fev	37,05
DP23	ULA	31,50	WP67	3-Fev	34,39
DP24	ULA	31,95			

3.4.4. Análise de Amplitudes

A fim de melhor perceber o regime de escoamentos no SALT, procedeu-se também a uma análise de amplitudes do mesmo, com recurso a dados multi-temporais, através de registos de piezometria máxima e mínima. Para tal, recorreu-se aos dados dos piezómetros da SNIRH (SNIRH 2010) e também aos dados de medições realizadas pelo Prof. Dr. Tibor Stigter no âmbito do trabalho realizado em Stigter & Carvalho Dill (2001).

Dos piezómetros do SNIRH, os períodos de tempo dos registos são variados, sendo que alguns destes registos datam desde 1978 (608/29) até ao presente. Quanto aos registos do Professor Tibor Stigter foram realizados entre 16 de Setembro de 1997 a 27 de Agosto de 1999, somando um total de 46 pontos de amostragem.

No Quadro 3.4 e Figura 3.10 apresentam-se os piezómetros utilizados para realizar o mapa de amplitudes piezométricas, que após o tratamento de dados e exclusão de registos necessários, apresenta um universo de 44 pontos de amostragem.

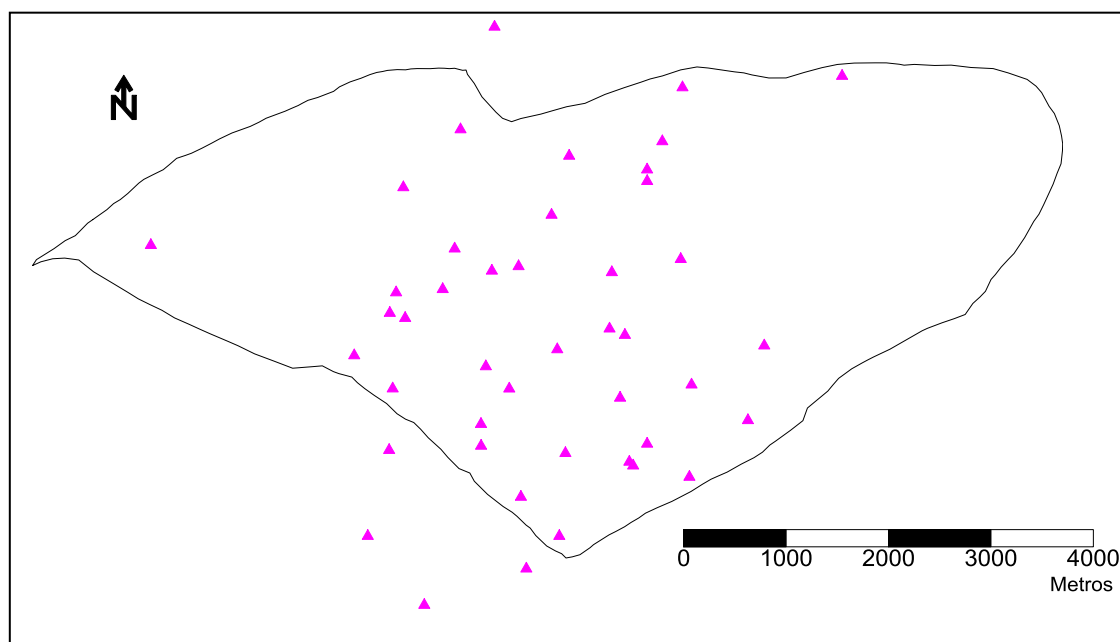


Figura 3.10. Localização dos piezómetros utilizados para definir as amplitudes piezométricas do aquífero.

Para mais informação acerca dos registos destas captações, nomeadamente, coordenadas, piezometrias máximas, mínimas e amplitudes, número de valores, data inicial e final de registos para cada piezómetros, consulte o Anexo I.b.

Quadro 3.4. Dados piezométricos para determinação da piezometria Máxima, Mínima, Média e Amplitude.

Fonte: SNIRH e Stigter & Carvalho Dill (2001)

Coordenadas		Piezometria				ID piezo	Fonte
Coord X	Coord Y	Max	Min	Média	Amplitude		
240900	17500	43,92	1,50	27,28	42,42	608/29	SNIRH
237000	15420	38,10	0,18	31,19	37,92	608/143	SNIRH
234150	15850	44,71	5,91	32,88	38,8	608/454	SNIRH
237480	15600	38,37	-6,11	14,99	44,48	608/462	SNIRH
237650	14450	37,88	12,03	31,42	25,85	608/471	SNIRH
240140	14870	6,50	-2,20	2,99	8,7	608/473	SNIRH
239980	14142	3,97	1,08	2,53	2,89	T1	Stigter & Carvalho Dill (2001)
238996	13912	18,23	12,10	15,17	6,13	T2	Stigter & Carvalho Dill (2001)
238822	13736	20,21	12,75	16,48	7,46	T3	Stigter & Carvalho Dill (2001)
238139	13012	7,10	7,00	7,05	0,1	T4r	Stigter & Carvalho Dill (2001)
237817	12694	6,00	1,64	3,82	4,36	T5	Stigter & Carvalho Dill (2001)
236820	12340	5,19	1,30	3,25	3,89	T6	Stigter & Carvalho Dill (2001)
236477	13851	8,90	1,36	5,13	7,54	T7	Stigter & Carvalho Dill (2001)
237421	14667	34,98	16,77	25,88	18,21	T8	Stigter & Carvalho Dill (2001)
237741	15644	37,30	17,90	27,60	19,4	T9	Stigter & Carvalho Dill (2001)
238063	16145	40,14	18,30	29,22	21,84	T10	Stigter & Carvalho Dill (2001)
238235	16721	39,89	23,12	31,51	16,77	T11	Stigter & Carvalho Dill (2001)
236615	16414	39,74	17,93	28,84	21,81	T13	Stigter & Carvalho Dill (2001)
236545	15388	36,20	22,43	29,32	13,77	T14	Stigter & Carvalho Dill (2001)
238652	15585	36,19	21,00	28,60	15,19	T15	Stigter & Carvalho Dill (2001)
238779	14973	33,55	19,73	26,64	13,82	T16	Stigter & Carvalho Dill (2001)
238997	16474	40,73	25,00	32,87	15,73	T17	Stigter & Carvalho Dill (2001)
239341	17388	41,12	30,16	35,64	10,96	T18	Stigter & Carvalho Dill (2001)
237764	13394	8,48	4,23	6,36	4,25	T19	Stigter & Carvalho Dill (2001)
236512	14451	28,26	24,18	26,22	4,08	T20	Stigter & Carvalho Dill (2001)
236136	14774	28,27	17,66	22,97	10,61	T21	Stigter & Carvalho Dill (2001)
237374	14105	29,62	26,82	28,22	2,8	T22	Stigter & Carvalho Dill (2001)
238198	13821	24,44	22,71	23,58	1,73	T23	Stigter & Carvalho Dill (2001)
238119	14833	34,07	18,20	26,14	15,87	T24	Stigter & Carvalho Dill (2001)
237117	15816	37,53	21,70	29,62	15,83	T25	Stigter & Carvalho Dill (2001)
237174	16978	40,81	29,10	34,96	11,71	T26	Stigter & Carvalho Dill (2001)
237506	17980	72,35	58,45	65,40	13,9	T27	Stigter & Carvalho Dill (2001)
239409	13589	14,57	6,52	10,55	8,05	T28	Stigter & Carvalho Dill (2001)
238996	16587	36,18	21,80	28,99	14,38	T34	Stigter & Carvalho Dill (2001)
238629	15035	33,55	19,73	26,64	13,82	T39	Stigter & Carvalho Dill (2001)
236268	13013	4,61	-0,04	2,33	4,57	T42	Stigter & Carvalho Dill (2001)
238732	14361	30,00	23,33	26,67	6,67	T43	Stigter & Carvalho Dill (2001)
238860	13699	18,13	15,76	16,95	2,37	T45	Stigter & Carvalho Dill (2001)
237375	13892	27,00	25,16	26,08	1,84	T47	Stigter & Carvalho Dill (2001)
239324	15713	21,00	21,00	21,00	0	T55	Stigter & Carvalho Dill (2001)
236633	15139	26,53	26,15	26,34	0,38	T64	Stigter & Carvalho Dill (2001)
236483	15188	26,12	25,27	25,70	0,85	T81	Stigter & Carvalho Dill (2001)
239144	16862	25,43	25,43	25,43	0	T106	Stigter & Carvalho Dill (2001)
239430	14489	19,47	16,32	17,90	3,15	T111	Stigter & Carvalho Dill (2001)

Segundo a análise aos mapas de amplitudes realizados (Figura 3.11 e Figura 3.12) pode-se desde já tirar uma breve ilação, isto é, o comportamento do regime hídrico do SALT aparenta ter duas fases, uma para períodos de seca, e uma para os restantes períodos.

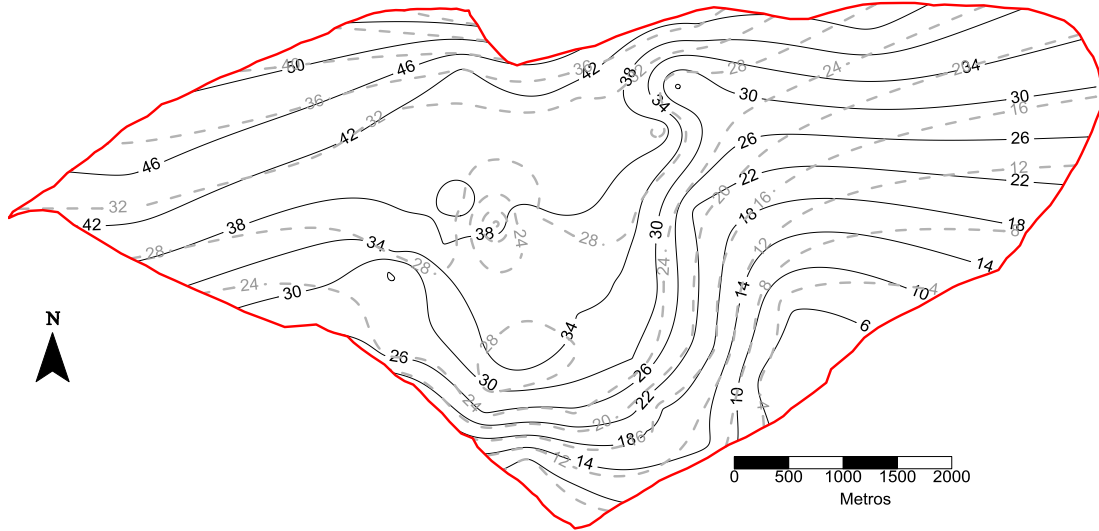


Figura 3.11. Isopiezias representantes da piezometria Máxima (a preto) e Média (a cinzento tracejado).

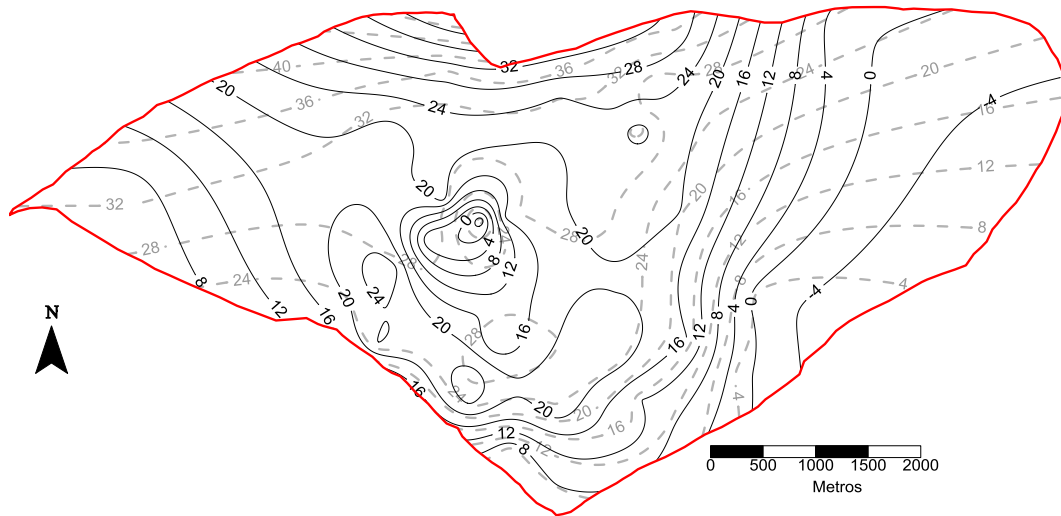


Figura 3.12. Mapas de Isopiezias representantes da piezometria mínima e média.

Não obstante as diferenças nos escoamentos em regime de seca ou regime normal, os gradientes definidos sugerem duas zonas principais de recarga, uma a Norte do aquífero, indicando a possibilidade de recarga por parte do Sistema Aquífero Malhão (SAM) e, uma a Oeste, sugerindo a recarga por parte do Sistema Aquífero Peral-Moncarapacho (SAPM).

No que diz respeito a zonas de descarga, a análise dos mapas piezométricos sugere a existência de apenas uma zona significativa de descarga sendo esta para o mar, Sudeste do SALT, tal como já fora sugerido por Almeida *et al.* (2000).

Ao analisar-se a piezometria mínima, os gradientes obtidos neste mapa sugerem a possibilidade de descarga do SALT para o Sistema Aquífero S. João da Venda-Quelfes. No entanto, estudos da qualidade da água a Oeste do SALT, nomeadamente Stigter & Carvalho Di5ll (2001) e Bonte (1999) indicam que as águas a Oeste do limite do SALT provêm de outra fonte, uma vez que a sua composição química é claramente diferente da água do SALT. Também Almeida *et al.* (2000) indica que a principal zona de descarga do SALT ocorre na zona sudeste do aquífero. Como tal, são consideradas duas zonas de recarga, a norte e noroeste, e uma zona de descarga significativa a sudeste SALT (Figura 3.13).

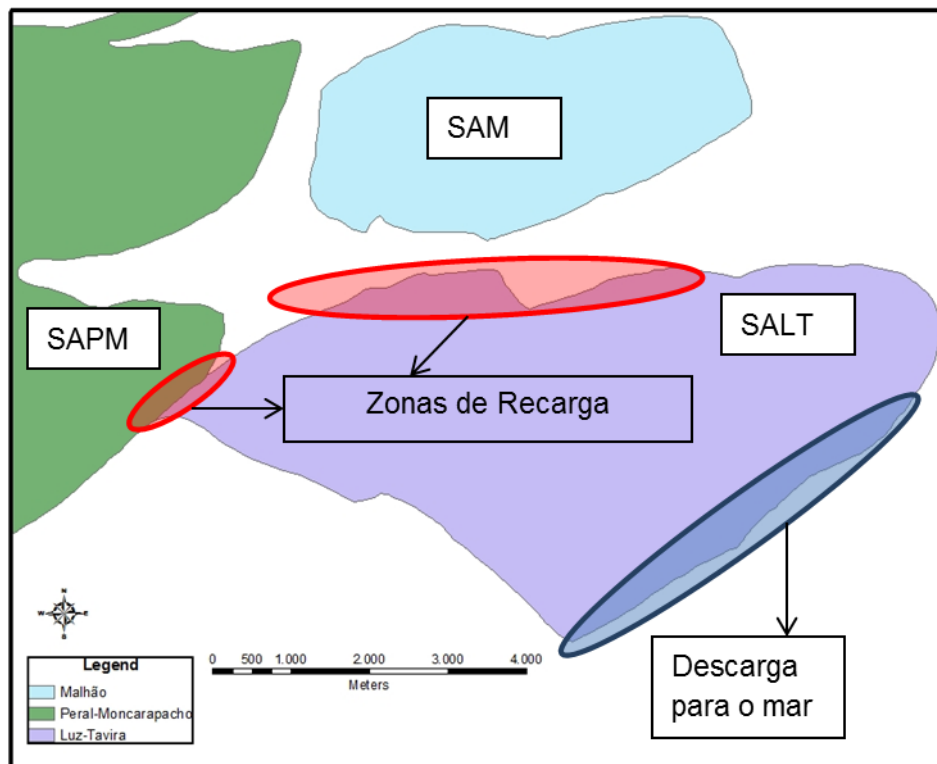


Figura 3.13. Identificação das principais zonas de recarga e descarga do SALT.

4. CONCEITOS GERAIS DO PROCESSO DE MODELAÇÃO

No que diz respeito à modelação de sistemas aquíferos, uma abordagem possível consiste na utilização de modelos de parâmetros distribuídos. Estes são usados para obter informação detalhada sobre a variabilidade do fluxo de escoamento subterrâneo (Costa, 2006).

Nos casos em que se recorre ao uso de modelos de parâmetros distribuídos, as soluções são calculadas com programas informáticos. Os passos geralmente necessários para implementar um modelo numérico no âmbito da hidrogeologia são geralmente cinco (Gable *et al.*, 1996): (1) Informação geológica é reunida e armazenada em ficheiros de computador acessíveis; (2) Definição de uma framework geológica, que representa a geometria do domínio de escoamento associado a um sistema de coordenadas; (3) Geração de uma malha (ou rede) de elementos finitos – 1-D, 2-D ou 3-D – que respeite os dados originais; (4) O programa informático utiliza a malha para resolver as equações diferenciais que representam os princípios físicos do problema, neste caso a lei de Darcy combinada com a equação de continuidade; (5) Por último, na fase de avaliação de desempenho (calibração do modelo) os resultados são avaliados, através da comparação dos valores calculados com os dados provenientes de medições de campo.

Os modelos numéricos que visam a representação do funcionamento hidráulico de sistemas aquíferos constituem actualmente uma das metodologias mais avançadas para compreender os fenómenos que controlam o movimento da água e dos contaminantes por ela transportados no subsolo. Podem, por consequência, constituir importantes ferramentas para a gestão da água.

A sua utilização pode visar diversos fins, sendo estes usados para testar ou aperfeiçoar diferentes modelos conceptuais, estimar parâmetros hidráulicos, e, no que se refere directamente às preocupações práticas da gestão de recursos hídricos, prever as possibilidades de resposta do aquífero a determinados cenários de exploração e condições climáticas.

A metodologia dos modelos numéricos pode-se sintetizar em 4 simples etapas: (1) Análise e descrição de modelos conceptuais; (2) Calibração; (3) Validação; e (4) Previsão de futuros cenários possíveis (Hugman, 2009). Estes modelos podem ser fundamentais à resposta de questões como (Monteiro *et al.*, 2002a): (1) Onde e que

quantidade de água pode ser explorada de forma sustentável para abastecimento público; (2) Quais os efeitos de diferentes cenários de exploração nos níveis piezométricos da região; (3) A importância do volume explorado quando comparado com o balanço hídrico do aquífero; (4) Qual a influência, perante diferentes cenários de exploração, na intensificação de fenómenos indesejáveis.

4.1. Modelação Numérica em Aquíferos

Os modelos numéricos de águas subterrâneas estão entre as mais importantes ferramentas disponíveis para a gestão dos recursos de águas subterrâneas. Os modelos podem ser usados para testar ou refinar diferentes modelos conceptuais, estimar parâmetros hidráulicos e, mais importante para a gestão de recursos hídricos, prever como um aquífero poderia responder às mudanças no regime de exploração e às alterações climáticas (Scanlon *et al.*, 2003).

Diversos modelos foram desenvolvidos com sucesso para aquíferos fracturados, contudo a sua aplicação em aquíferos cársicos foi mais problemática. Os aquíferos cársicos, por norma, são altamente heterogéneos, sendo dominados por diversos níveis de porosidade e podem exibir permeabilidades e regimes de escoamento diferenciados (Scanlon *et al.*, 2003). O facto dos aquíferos cársicos poderem frequentemente apresentar regimes de escoamento duplos, um rápido (através de fracturas) e outro mais lento (difusão) consiste das principais dificuldades à sua modelação (Taylor & Greene, 2001) e, por conseguinte, são susceptíveis de ter uma componente de escoamento turbulento, que pode ser problemático, uma vez que a maioria dos modelos numéricos se baseiam na lei de Darcy, que assume um escoamento laminar (Scanlon *et al.*, 2003).

Apesar destas dificuldades, Taylor & Greene (2001) referem que os modelos numéricos estão entre as melhores ferramentas quantitativas para melhor compreender o funcionamento dos componentes hidrológicos de aquíferos cársicos e para prever como o sistema funciona como um todo. No entanto apesar da modelação de processos cársicos ser possível e os modelos numéricos de escoamento permitirem simular os gradientes hidráulicos, escoamentos subterrâneos e as descargas de nascentes de água, muitas vezes as previsões relativamente à direcção, destino e velocidade do escoamento, não são correctas (Quinlan *et al.*, 1996).

De acordo com Monteiro (2001) a modelação dupla em contínuo e discreta são abordagens que permitem obter uma descrição mais realista dos processos de escoamento em de aquíferos carbonatados ou cársicos, no qual o padrão de escoamento regional é fortemente influenciado pela rede de fracturas. No entanto, esses métodos não são comumente aplicados em hidrogeologia excepto para a investigação e fins académicos, principalmente devido à elevada quantidade de dados necessários para descrever sistemas cársicos (Scanlon *et al.*, 2003).

Assim, a escolha de um modelo adequado para aproximar a simulação de aquíferos cársicos deve considerar alguns factores, nomeadamente: (1) se pretende simular o escoamento de água subterrânea ou o transporte de partículas, (2) o nível de carsificação do aquífero e (3) a disponibilidade de informação (Scanlon *et al.*, 2003).

4.2. Princípios Físicos Simulados Pelo Modelo

Huyakorn & Pinder (1983) descrevem os princípios físicos que o autor se propõe a simular para a dissertação. De seguida procede-se a uma descrição desses mesmos métodos, adaptada de Monteiro (2001):

A forma mais explícita da equação diferencial em derivadas parciais que descreve o escoamento de água subterrânea de densidade num meio poroso saturado baseia-se na conjugação da lei de Darcy, que exprime a conservação do momento, com a equação de continuidade, que exprime a lei de conservação da massa do fluido (1).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Em que:

K_{xx} , K_{yy} and K_{zz} são os valores da condutividade hidráulica [LT^{-1}] ao longo dos eixos cartesianos x , y e z que se assume que são paralelos às direcções de maior condutividade hidráulica, h é o potencial hidráulico [L], Q é um fluxo volumétrico por unidade de volume [$L^3 T^{-1} L^{-3}$] que representa as perdas e ganhos de fluido e S_s é o armazenamento específico, necessário para a simulação das variações transitórias do volume armazenado de água [L^{-1}].

A condutividade hidráulica define-se pela expressão:

$$K = \frac{\rho g k}{\mu} \quad (2)$$

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

O nível piezométrico, também denominado por potencial hidráulico (h , [L]), corresponde à energia por unidade de massa do fluido, se for negligenciada a energia cinética, e expressa-se pela soma do potencial de elevação z [L] do fluido e do potencial de pressão p [$ML^{-1}T^{-2}$] num dado ponto:

$$h = \left(\frac{p}{\rho g} \right) + z \quad (3)$$

O armazenamento específico [L^{-1}] é definido pela expressão:

$$S_s = \rho g (\alpha + n\beta) \quad (4)$$

em que α é a compressibilidade do meio poroso [LT^2M^{-1}], n é a porosidade efectiva (adimensional) e β é a compressibilidade da água [LT^2M^{-1}].

A equação (1) é frequentemente expressa numa forma mais compacta utilizando os operadores diferenciais de divergência e de gradiente:

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \text{div} \left(-[K] \overrightarrow{\text{grad}h} \right) = Q \quad (5)$$

4.3. Modelo de Escoamento em Regime Permanente

No caso particular da descrição de escoamento em regime permanente as variáveis são independentes do tempo. Neste caso, a equação (5) reduz-se à equação (6):

$$\text{div} \left(-[K] \overrightarrow{\text{grad}h} \right) = Q \quad (6)$$

A análise dimensional dos parâmetros apresentada só é válida para elementos 3-D, sendo necessário efectuar a generalização para a simulação de escoamento em espaços bidimensionais e unidimensionais. No âmbito deste trabalho, a técnica de discretização utilizada para simular o funcionamento hidráulico dos aquíferos recorre à

utilização de elementos finitos bidimensionais lineares com três nós. Neste caso o parâmetro condutivo utilizado é a transmissividade $T [L^2T^{-1}]$, obtida multiplicando K pela espessura saturada do aquífero.

$$\text{div} \left(-[T] \overrightarrow{\text{grad}} h \right) + Q = 0 \quad (7)$$

O balanço total simulado será igual a zero, pois representa-se um estado médio permanente do sistema, ou seja, a recarga e as saídas têm o mesmo valor à escala global do domínio de escoamento.

Para as simulações transitórias, o parâmetro capacitivo tridimensional atrás descrito $S_s [L^{-1}]$ é substituído pelo coeficiente de armazenamento $S [-]$ que se obtém pela multiplicação de S_s pela espessura saturada do aquífero.

4.4. Modelo Numérico de Escoamento

A equação que descreve o escoamento da água subterrânea pode ser resolvida para condições particulares de fronteira através do Método de Elementos Finitos (FEM), que consiste numa abordagem com sucesso reconhecido que permite integrar equações parciais diferenciais espaciais e simular o escoamento em geometrias com domínios de escoamento complexos. A utilização do FEM é descrita pelos autores por vários autores ((Huyakorn *et al.*, 1983), (Kinzelbach, 1986), (Wang *et al.*, 1982) e (Bear *et al.*, 1987)).

O FEM é implementado em diversos domínios comerciais e públicos para resolver problemas na hidrogeologia. O método Galerkin de pesos residuais é o mais recorrido para determinar a matriz de elementos. Este é descrito por Monteiro (2001):

O domínio de escoamento divide-se em elementos finitos, caracterizados pela sua forma, condutividade hidráulica e armazenamento específico. Assim, a equação 5 apresenta-se da seguinte forma:

$$L(h) = 0 \quad (8)$$

Em que L é o operador diferencial e h a variável dependente Potencial hidráulico.

A solução empírica \hat{h} define-se para as variáveis desconhecidas como uma função quadrática ou uma função linear polinomial, como expresso na equação (9):

$$\hat{h} \cong \sum_{j=1}^n N_j h_j \quad (9)$$

em que h_j consiste no conjunto de valores de parâmetros de pontos de nódulos, N_j são os parâmetros da função de interpolação e n o total de pontos de nódulos que definem a malha representativa da geometria do domínio escoamento.

Quando se substitui h por \hat{h} na equação (9) define-se uma solução aproximada. Assim, o resíduo r , define-se como na equação (10):

$$r = L(\hat{h}) \neq 0 \quad (10)$$

Para se minimizar o resíduo ao longo do domínio de escoamento, define-se uma equação integral para assegurar que as bases das funções possa satisfazer a equação parcial diferencial de escoamento. Isto acontece definindo-se um peso integral de r ao longo dos elementos de domínio de escoamento e posteriormente igualizar este integral a zero. Como consequência, o peso integral será zero ao longe do domínio de escoamento V e ao longo do conjunto de funções de peso n (W_i):

$$\int_V W_i L(\sum_j N_j h_j) dV = 0 \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

Ainda, o método de pesos residuais pretende determinar a variável h_i de uma forma a que o erro seja minimizado no domínio de escoamento V . Segundo o método de Galerkin, a interpolação de funções aplicada e a função de pesos residuais são a mesma ($N_i = W_i$). Após a definição dessas funções (por norma polinomial linear ou quadrática) os valores de \hat{h} calculados na equação (9) combinam-se com a equação (11) para fornecer um sistema de equações através do qual se determina o valor da incógnita \hat{h} para cada um dos pontos nodais da malha de elementos finitos (equação 12):

$$[A]. \{\hat{h}\} = \{f\} \quad (12)$$

Em que $[A]$ é a matriz global variável, $\{\hat{h}\}$ o vector de variáveis incógnitas e $\{f\}$ o elemento da fonte.

Ao combinar os valores de todos os elementos, incluindo as condições fronteiras previamente definidas, o sistema de equações lineares algébricas múltiplas resolve-se utilizando diferentes soluções de algoritmos.

4.5. Metodologia de Calibração Inversa

Neste capítulo proceder-se-á à descrição em detalhe dos conceitos associados ao método inverso e ao software de calibração PEST (Doherty, 2002).

Os modelos de escoamento subterrâneo são geralmente implementados para simular o comportamento hidráulico de um aquífero, podendo ser utilizados para prever a “resposta” de um aquífero a determinado(s) cenário(s) de exploração, períodos de seca ou dispersão de contaminantes (Costa, 2006).

A maioria dos modelos que simulam o escoamento subterrâneo são modelos de parâmetros distribuídos e os parâmetros usados na derivação das equações que governam o escoamento não são directamente mesuráveis do ponto de vista físico e têm de ser determinados a partir de registos históricos de observações. A determinação dos valores dos parâmetros hidráulicos e a sua distribuição no domínio de escoamento consiste actualmente o maior desafio que se coloca à calibração de um modelo deste tipo (Costa, 2006).

De grosso modo, a modelação inversa refere-se ao processo de obter informação acerca do modelo, a partir de medidas do que está a ser modelado. Segundo Carrera *et al.* (2005) em modelação de águas subterrâneas, este processo inclui dois conceitos:

- “Identificação do modelo” aplica-se a métodos para identificar a natureza (classes) do modelo, tal como as equações de funcionamento, condições fronteiras, regime temporal ou padrões de heterogenidade.
- “Estimativa de parâmetros” restringe-se a atribuir valores às propriedades que caracterizam as classes do modelo.

Tratando-se de um modelo numérico, a precisão do modelo depende da confiança dos valores obtidos através da simulação do funcionamento hidráulico do sistema. Como tal, recorre-se ao processo de calibração do modelo de forma a aproximar as simulações da realidade. A forma mais comum de aplicar o método é através de abordagens do tipo tentativa erro.

Usando a abordagem clássica de calibração por tentativa e erro é frequente que seja necessário despender meses de trabalho em busca de uma distribuição de valores de transmissividade (T) passível de gerar simulações realistas do comportamento

hidráulico do sistema (Monteiro *et al.*, 2005a). Como tal recorre-se a uma abordagem de calibração baseada na modelação inversa, que assenta no reajuste dos parâmetros (a transmissividade neste caso), de modo a aproximar os valores que o modelo gera às medições efectuadas no sistema que é simulado.

Neste âmbito, destacam-se os trabalhos de Carrera & Neuman (1986), Poeter & Hill (1997) e Carrera *et al.* (2005) nos quais se expõe uma análise bem fundamentada das vantagens associadas à calibração inversa de modelos deste tipo, estando o mais recente integrado numa edição especial do *Hydrogeology Journal* que aborda exclusivamente o futuro da hidrogeologia.

A utilização de modelos inversos, tais como os de regressão não-linear e mínimos-quadrados melhoram o nível de análise aos modelos de fluxo de água subterrânea. Actualmente, as limitações mais significativas na utilização desta técnica devem-se à falta de informação nos requisitos necessários à sua implementação, tal como aos benefícios que apresenta (Martins, 2007).

Os benefícios do recurso à calibração inversa podem ser apresentados da seguinte forma (Poeter & Hill 1997):

- 1- Determinação mais célere dos parâmetros mais adequados;
- 2- Quantificação de:
 - a. Calibração de qualidade;
 - b. Limitações de dados e necessidades;
 - c. Limites de confiança nas estimativas e previsões de parâmetros.
- 3- Identificação de problemas que são facilmente ignorados durante a calibração não automatizada.

A utilização de modelos inversos facilita a avaliação da fiabilidade da previsão, devido ao facto dos resultados envolverem não só parâmetros estimados, potenciais e fluxos hidráulicos, mas também intervalos de confiança, aplicados a ambos.

Análises de sensibilidade, desvio padrão e correlações podem ser utilizados para apoiar a avaliar os valores estimados, tal como os resultados calculados pelo modelo, verificando se os dados fornecidos ao modelo são suficientes ou se é necessário introduzir novos dados de forma a melhorar a sua performance (Martins, 2007).

Com a utilização de modelos inversos para determinar valores de parâmetros que aproximem os resultados às observações de campo, o modelador evita a tediosa calibração tentativa-e-erro a alterar valores de parâmetros, sendo que desta forma se pode despendar mais tempo a colocar outras questões importantes acerca do sistema hidrológico (Poeter & Hill 1996).

4.5.1. Estimativa de Parâmetros Através de Modelação Inversa

Na modelação inversa, para além da geometria, propriedades do material e condições de fronteira do modelo, o modelador pode fornecer também dados utilizados para a calibração, nomeadamente, definição de parâmetros, observações de campo (por exemplo, medidas de potencial hidráulico e escoamentos), valores de parâmetros determinados independentemente e variância dos potenciais hidráulicos, fluxos e parâmetros (Martins, 2007).

Após implementação do modelo com as estimativas iniciais de parâmetros, um código automático de calibração:

- 1) determina as diferenças (resíduos) entre os valores observados e simulados de potencial, escoamento e parâmetros, em todos os pontos e períodos do modelo;
- 2) procede aos quadrados dos resíduos para eliminar valores negativos e enfatizar os resíduos maiores;
- 3) mede a importância do quadrado dos resíduos através do nível de incerteza especificada pelo modelador, para cada observação, expresso como o inverso da variância do erro das observações;
- 4) soma o peso dos resíduos para obter uma medida total (função objectiva) da aproximação dos valores simulados às observações de campo;
- 5) calcula a sensibilidade (isto é, quanto se alteram os potenciais hidráulicos e fluxo calculados aquando de uma alteração nos valores de parâmetros);
- 6) usa a sensibilidade e resíduos para ajustar os valores de parâmetros para minimizar a função objectivo;
- 7) repete os passos 4 a 6 com o intuito de aperfeiçoar o modelo.

4.5.2. Coeficiente de Correlação

O coeficiente de correlação, R , fornece uma medida do ajuste da simulação à realidade, tal como definido por Cooley & Naff (1990). Ao contrário da função objectiva, o coeficiente de correlação é independente do número de observações envolvidas no processo de estimativa de parâmetros e dos níveis absolutos de incerteza associadas a essas observações.

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

$$R = \frac{(w_i c_i - m)(w_i c_{oi} - m_o)}{[(w_i c_i - m)^2 (w_i c_{oi} - m_o)^2]^{1/2}}$$

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 o valor médio do peso de todas as observações, e
- m_o é a média do peso de todos os valores gerados pelo modelo para as observações respectivas observações.

Por norma, R deve ser superior a 0,9 para que o ajuste entre os resultados do modelo e as observações sejam aceitáveis (Hill, 1998).

5. MODELO DE ESCOAMENTO DO SALT

5.1. Etapas Prévias ao Projecto de Construção do Modelo SALT

Nos últimos anos desenvolveram-se esforços que permitiram criar ou simular aspectos hidrológicos dos aquíferos da região algarvia, entre eles, o SALT. Esses trabalhos permitiram a construção do modelo numérico que será usado na análise a realizar para a dissertação. Nesta secção proceder-se-á à descrição dos trabalhos desenvolvidos na modelação do escoamento do SALT, ou que a permitiram, no passado.

Para desenvolver o modelo de escoamento do SALT foi necessário a criação de uma malha não estruturada de elementos finitos, baseada na geometria do sistema aquífero.

O primeiro passo para a construção do modelo de elementos finitos, que foi a base para o modelo trabalhado nesta tese, consistiu na definição de uma malha de elementos finitos não estruturados (Figura 5.1) representativos do SALT e respectivo conjunto de nós (Figura 5.2).

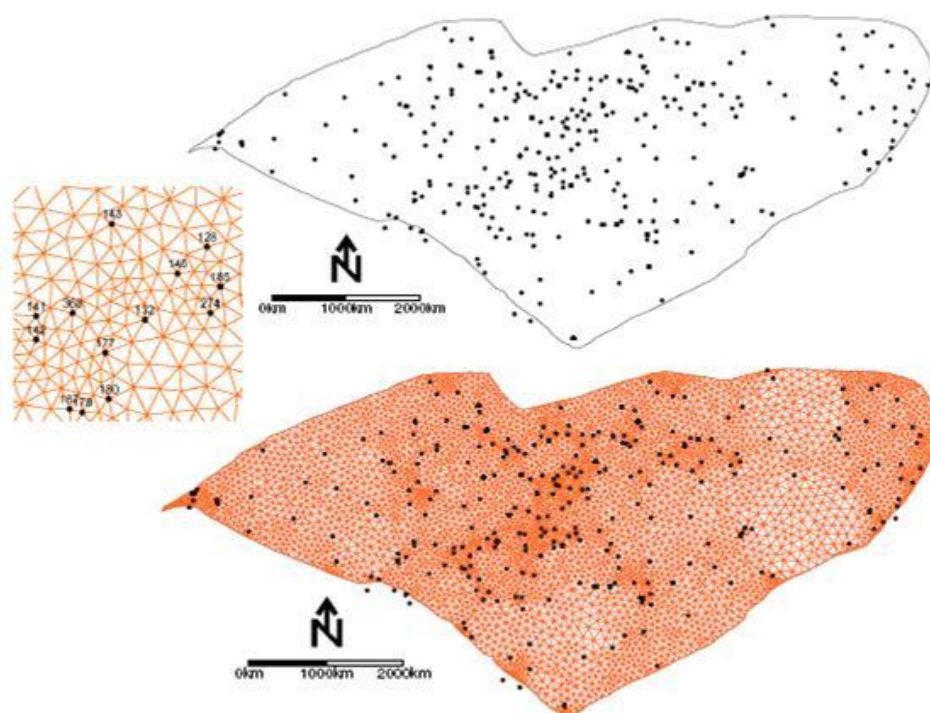


Figura 5.1. Etapas iniciais da construção do modelo. Geração da rede e sua edição no SIG.
Fonte: Monteiro *et al.* (2003b).

O facto de o SALT apresentar uma elevada heterogeneidade e consistir num aquífero multicamada sugere a que a modelação seja feita a 3 dimensões, tal como ao aumento da complexidade do modelo noutros parâmetros, que se justificarão à medida que forem sendo identificadas as limitações da primeira conceptualização e se efectuarem trabalhos de investigação hidrogeológica necessários para colmatar as lacunas de informação que limitam a capacidade de previsão do comportamento hidráulico do SALT (Monteiro *et al.*, 2003a). Os mesmos autores referem a ausência de valores hidráulicos adequados como a maior lacuna dos dados disponíveis. Por outro lado, a distribuição de valores de recarga distribuída, de acordo com os valores de precipitação anual média e as taxas de recarga sugeridas noutros trabalhos, nomeadamente, Almeida *et al.*, (2000) e Silva, (1984), permitem que se possam efectuar facilmente cálculos de balanço para diferentes cenários, quer de precipitação, quer de fracções de recarga para cada litologia.

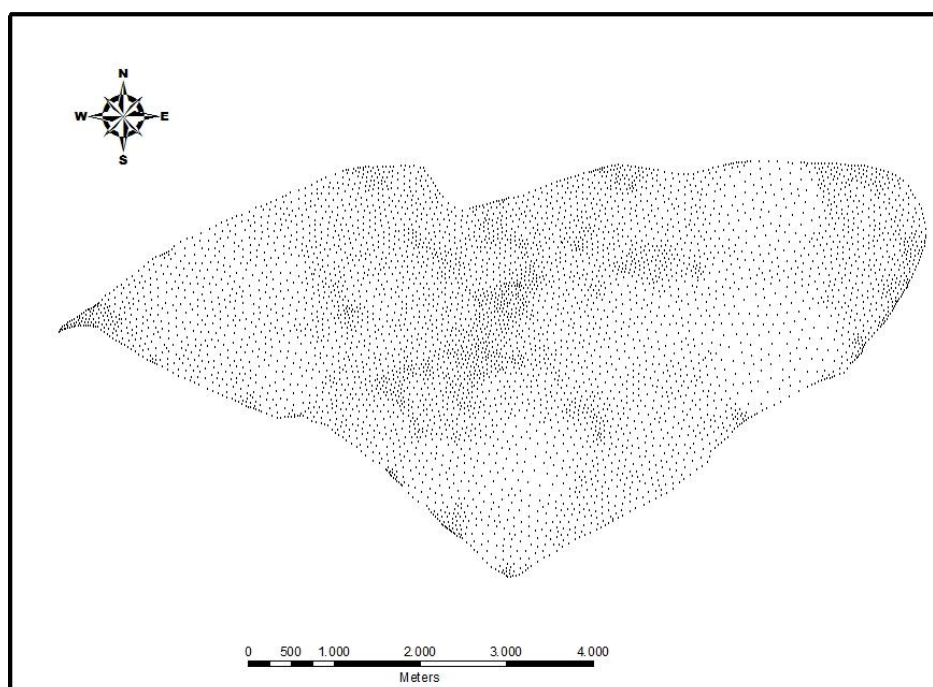


Figura 5.2. Conjunto de nós da malha de elementos finitos gerada para simulação do escoamento do SALT

A condutividade hidráulica (K , [L/T]) expressa a permeabilidade de um meio para a água e estabelece a relação entre o escoamento específico (velocidade de Darcy) e o gradiente hidráulico na lei de Darcy, sendo função do meio e do fluido. A transmissividade (T , [L²/T]) é um parâmetro condutivo bidimensional que é calculado através da multiplicação da condutividade hidráulica horizontal pela espessura do aquífero (Costa, 2006).

As primeiras definições das classes de transferência para o modelo conceptual foram realizadas por Monteiro *et al.* (2003b), e foram baseadas nas categorias litológicas, como é demonstrado na Figura 5.3, através das ferramentas “ArcMap” e “FEMLink”.

As primeiras simulações do modelo, foram realizadas com o valor de transmissividade constante para todas as camadas, sendo este o valor médio indicado por Almeida *et al.* (2000), i.e. 384 m²/dia.

Monteiro *et al.* (2003) realizaram uma simulação do balanço hídrico do SALT, para a qual se obteve um escoamento de 6×10⁶ m³/ano, no entanto, esta simulação não considera as extracções verificadas no sistema aquífero (Figura 5.3). Desta forma, não se verificam as deformações no mapa piezométricos no canto inferior direito.

No entanto, os autores verificaram que a direcção regional do escoamento é compatível com o modelo conceptual de funcionamento hidráulico definido para este sistema aquífero.

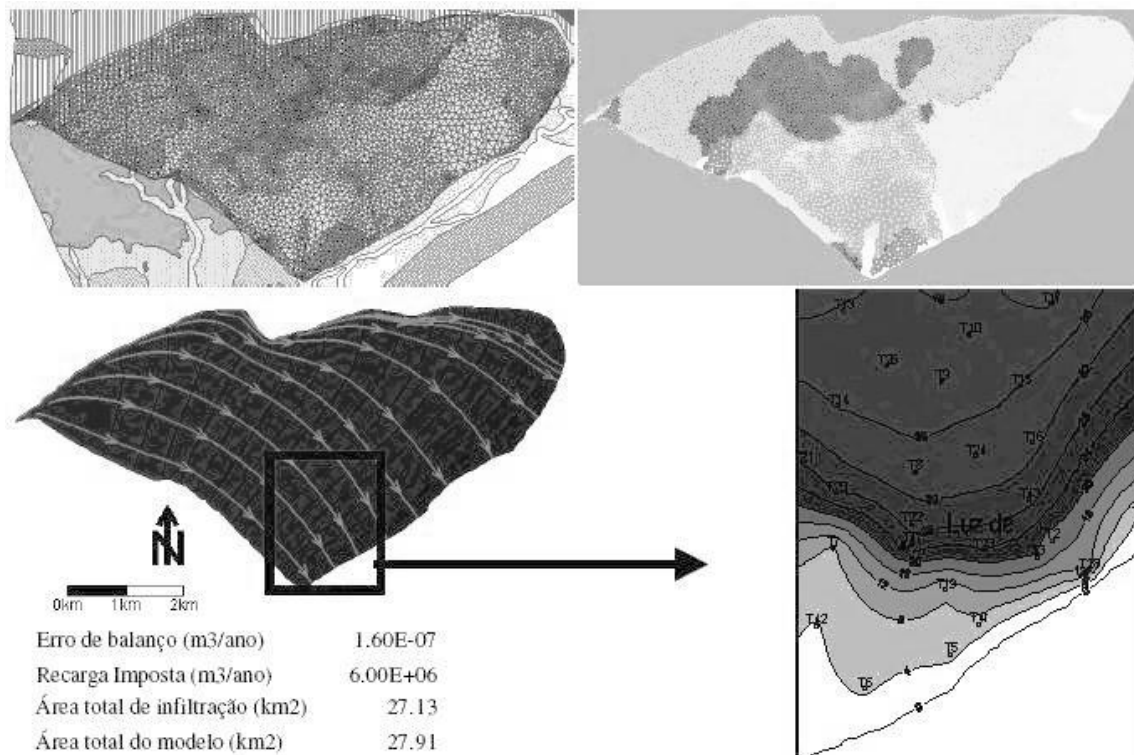


Figura 5.3. Exemplo de atribuição de classes de recarga, de acordo com as litologias presentes e respectivas taxas de infiltração sugeridas por Almeida *et al.* (2000). Em baixo mostra-se (à esquerda) a distribuição de equipotenciais simuladas, juntamente com as as linhas de corrente que ilustram a direcção de fluxo e, à direita, um mapa de isopiezas para o sector identificado do aquífero, construído com dados de Março de 1998.

Fonte: Monteiro *et al.*, (2003b).

Rodrigues (2007) apresenta no seu trabalho um estudo sobre os efeitos no balanço hídrico perante diferentes regimes de exploração no SALT. Para tal, a autora definiu 4

cenários: (1) Condições naturais em que se consideram apenas as entradas naturais do sistema tendo em conta os valores de recarga, (2) introdução das captações de rega, abastecimento público e abastecimento privado implantadas no aquífero, (3) abandono das captações para abastecimento público mantendo-se as restantes condições em (2), (4) mantém-se as condições em (3) excepto as captações para rega. Assim, os valores de balanço hídrico do SALT obtidos para os diferentes cenários foram: (1) 2.355×10^{-07} m³/ano, (2) 2.950×10^{-07} m³/ano, (3) $2,853 \times 10^{-07}$ m³/ano e (4) 2.285×10^{-07} m³/ano. Com esta análise, Rodrigues (2007) concluiu que perante um regime de exploração intensivo, a recarga do sistema aquífero não é suficiente para manter o equilíbrio das extracções. No entanto, refere que é de notar que as transferências do sistema aquífero Malhão e Peral-Moncarapacho para o SALT não foram consideradas na modelação.

5.2. Software de Modelação

5.2.1. Modelo FEN

Em termos operativos, o modelo FEN requer três ficheiros de entrada.

- Ficheiro de Coordenadas, que consiste no ficheiro onde é referenciada a Rede de Elementos Finitos (REF), através dos nós e respectivas coordenadas. A extensão deste ficheiro é identificada como *.COR

- Ficheiro de Elementos, onde constam os elementos triangulares que compõem a REF. Além disso, a cada elemento é associado uma identificação (baseada num número do elemento, a cada elemento); a classe de infiltração e transmissividade; o formato do elemento e os nós que envolvem o elemento. A extensão deste ficheiro é identificada como *.ELM. É através deste ficheiro que se pode alterar a classe de transmissividade/infiltração da malha. A criação de uma nova camada de transmissividade é realizada no ficheiro *.par mas neste ficheiro é que são atribuídas as classes de transmissividade.

- Ficheiro de Parâmetros, no qual são definidas as classes de parâmetros, neste caso, as classes de transmissividade e infiltração. São também definidas as condições de fronteira através e respectivo potencial imposto e respectivo nó, condição fronteira e valor do potencial imposto. Por fim, é importante indicar os nós correspondentes a cada uma das fronteiras, para que o ficheiro de resultados que o modelo gera possa

calcular a quantidade de água que passa em cada uma das condições fronteira. O ficheiro de parâmetros é identificado pela extensão *.PAR.

O ficheiro de resultados gerado pelo FEN retorna neste caso o valor piezométrico e o caudal para cada nó da Malha de elementos finitos e a descarga/recarga ocorrente em cada conjunto de nós de uma determinada condição fronteira previamente definida. Posteriormente, através de um editor de imagem é possível criar mapas piezométricos através do ficheiro de resultados gerado pelo FEN.

5.2.2. Algoritmo PEST

O *software* de calibração do modelo utilizado no presente trabalho de investigação foi o PEST (Parameter ESTimation) é um código de calibração automático que tem a potencialidade de ajustar os parâmetros de determinado modelo para que os resultados gerados por este se aproximem o melhor possível dos valores reais do sistema, ou seja, permite calibrar o modelo.

Para permitir o funcionamento do PEST, é necessário fornecer dados válidos observados de variáveis que caracterizam o sistema aquífero, neste caso, o potencial hidráulico medido num conjunto de pontos associados à malha elementos finitos. Posteriormente, o PEST irá aproximar os valores de parâmetros de transmissividade para as diversas zonas de Transmissividade definidas de forma iterativa, até que o modelo aproxime as variáveis (piezometria) o máximo possível os valores observados.

A aplicação de PEST é muito abrangente uma vez que apresenta a potencialidade de executar as tarefas descritas anteriormente para qualquer modelo que use um ou mais ficheiros de entrada (input) do tipo ASCII (ou seja, de texto) e que devolva um ou mais ficheiros do mesmo tipo como saída (output). Desta forma, o modelo não necessita de ser alterado ou adaptado antes de ser sujeito ao processo de estimativa de parâmetros, sendo PEST a adaptar-se ao modelo e não o contrário (Costa, 2006).

O algoritmo PEST necessita da preparação de 3 ficheiros de entrada de forma a proceder à calibração do modelo, são esses ficheiros:

- Um ficheiro "*template*" abreviado a "ptf". É necessário um ptf por cada ficheiro de entrada. Este é necessário para identificar os parâmetros, e quais o modelo terá permissão para atribuir e alterar os respectivos valores.

- Um ficheiro "*Instruction*" abreviado a "pif". É necessário um pif por cada ficheiro de saída (de resultados), nos quais os valores gerados pelo modelo são identificados.

- Um ficheiro “*Control*” abreviado a “*pef*”, que fornece ao PEST os nomes dos ficheiros *Template* e *Instruction*, os nomes dos ficheiros de entrada e saída do modelo correspondente, a dimensão do problema, as variáveis de controlo, os valores iniciais dos parâmetros, os valores das observações e ponderações atribuídas.

5.3. Descrição das variantes do Modelo Implementado

Nesta secção serão abordadas as principais fases desenvolvidas pelo autor com o intuito de aproximar o modelo do SALT à realidade. De notar que este foi um processo cíclico, baseado na tentativa-erro, com a realização de inúmeros ensaios com diferentes fronteiras e camadas de transmissividade e respectivos valores. Nesta etapa apenas serão retratadas fases mais relevantes para a construção do modelo, até à realização da optimização por calibração inversa.

No que respeita às condições Fronteira, considerar-se-ão para todas as simulações 3 condições: (a) Fronteira Sistema Aquífero Peral-Moncarapacho (SAPM); (b) Fronteira Sistema Aquífero Malhão (SAM); e (c) Fronteira Mar. As condições de fronteira foram ajustadas consoante os resultados obtidos. Relativamente às camadas de infiltração apenas se optimizou o modelo, de forma a obter uma recarga proveniente de infiltração na ordem dos 4 hm³/ano e uma distribuição mais real de acordo com a litologia. Quanto às camadas de Transmissividade foram também elas redefinidas de acordo com a piezometria real e os resultados obtidos e os balanços obtidos para cada simulação.

5.3.1. Fase 0

A Fase 0, ponto de partida para o trabalho desenvolvido na actual dissertação, consistiu no modelo com as condições dispostas em Rodrigues (2007), como tal, as condições descritas no presente sub-capítulo consistem no resumo das condições explícitas no trabalho da mesma autora.

No que respeita às condições de fronteira, foram definidas duas condições de fronteira. A Noroeste do SALT, num alinhamento com cerca de 1 km (correspondente a 29 nós) onde o SALT e o SAPM entram em contacto foi definida uma zona de recarga com potencial imposto de 40 m. A sudeste do SALT foi definida uma segunda condição de fronteira com representativa da descarga para o mar, com potencial imposto de 0 m. Na Figura 5.4 apresentam-se as condições de fronteira definidas por Rodrigues (2007).

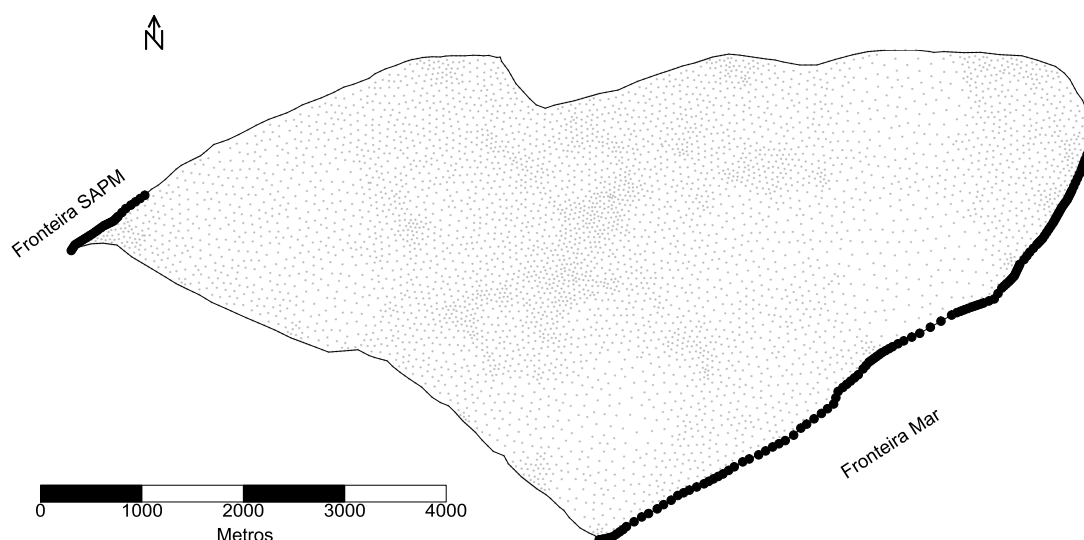


Figura 5.4. Representação das Condições fronteira do modelo conceptual do SALT para a Fase 0, identificadas com contorno mais grosso a preto.

Relativamente às classes de infiltração e transmissividade, a autora utilizou as referências de Monteiro et al. (2003) representadas na (Figura 5.3) e explicadas em detalhe no anexo II.a., no entanto, utilizou valores diferentes para ambos os casos. No que respeita à infiltração, foi utilizado um valor geral de 171,12 mm/ano. Já para a transmissividade, foi também utilizado um único valor médio para todas as classes, sendo este de 2500 m²/dia.

O balanço obtido para as condições descritas neste sub-capítulo apresenta-se no Quadro 5.1 e na representação da Figura 5.5.

Quadro 5.1. Dados do balanço do modelo para a Fase 0

Balanço Fronteira SAPM [hm ³ /ano]	11,5
Balanço fronteira mar [hm ³ /ano]	-16,3
Distribuição Imposta [hm ³ /ano]	4,78

Perante os resultados obtidos para esta Fase, verifica-se a necessidade de adicionar uma condição de fronteira representativa da recarga proveniente do SAM, tal como ajustar os valores de condição fronteira do SAPM de forma a minimizar a recarga obtida pelo modelo proveniente deste sistema. A distribuição imposta, parâmetro relativo à infiltração por precipitação, é também algo desajustada, quando comparado com os valores sugeridos por Almeida *et al.* (2000). Ao analisar o mapa piezométrico da Figura 5.5, verifica-se que o mesmo não obedece aos mapas piezométricos reais que se encontram no capítulo 3.4. Tal facto cinge-se à inexistência de uma recarga a norte do SALT e uma distribuição mais real tanto das classes de infiltração, como de transmissividade.

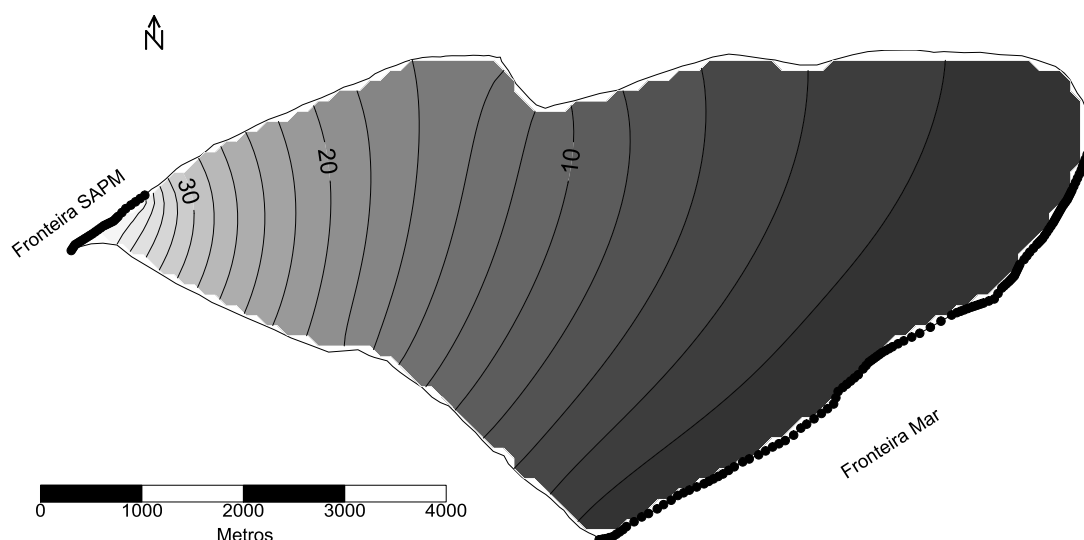


Figura 5.5. Resultados da simulação obtida para as condições da Fase 0 do modelo.

Desta forma, na Fase 1 do modelo, o autor propõe-se a ajustar as camadas de transmissividade e infiltração do modelo e a criar uma condição de fronteira a Norte do modelo.

5.3.2. Fase 1

Na Fase 1 de evolução do modelo foram alteradas as Condições Fronteira, as classes de infiltração e as classes de transmissividade. Esta foi uma fase na qual se pretendeu averiguar o comportamento do modelo face a diferentes condições testadas.

5.3.2.1. Condições Fronteira

As primeiras tarefas desempenhadas no modelo na presente dissertação corresponderam à redefinição das condições fronteira.

Tendo em conta a análise aos mapas piezométricos do capítulo 3.4, procedeu-se à definição das condições fronteira para o modelo conceptual, destacando-se a importância de adicionar a recarga a Norte proveniente do SAM. Como tal, definiram-se duas zonas de recarga, uma a Norte, influenciada pelo aquífero Malhão e outra a Este influenciada pelo aquífero Peral-Moncarapacho, esta última já definida em trabalhos anteriores. A única zona de descarga considerada para o modelo conceptual consiste na fronteira sudeste do aquífero, que está em contacto com o mar. Numa primeira fase, definiram-se as fronteiras do modelo conceptual como se apresentam na Figura 5.6.

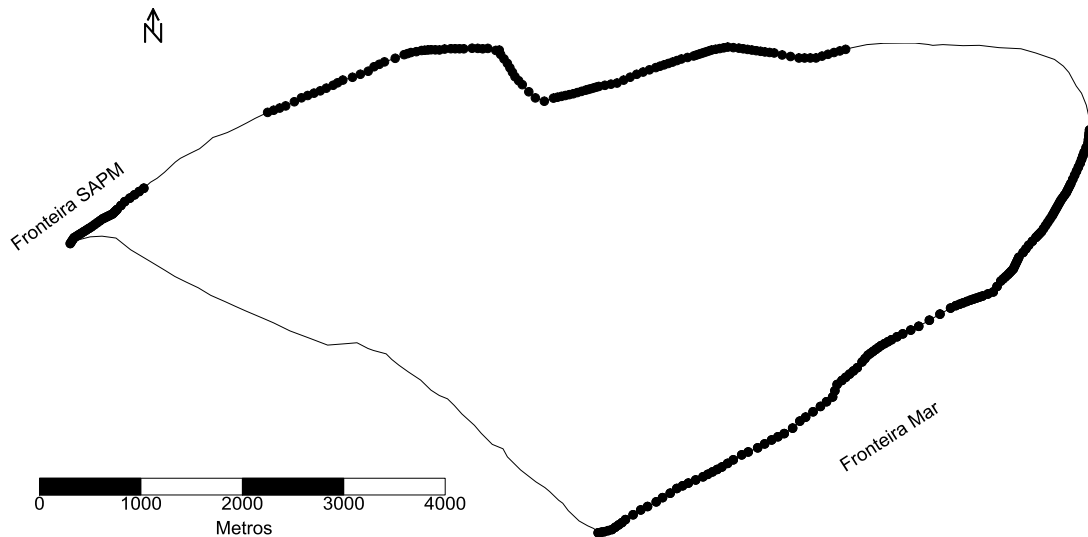


Figura 5.6. Representação das Condições fronteira do modelo conceptual do SALT para a Fase 1, identificadas com contorno mais grosso a preto.

O potencial hidráulico para estas condições fronteiras foi definido tendo base os mapas piezométricos, após definição da condição fronteira. No caso da recarga, definiu-se o potencial hidráulico consoante o mapa piezométrico apresentado nas Figuras 3.4. e 3.9. Para o caso da descarga, definiu-se o potencial imposto com o valor zero, assumindo que o aquífero tem uma descarga directa para o mar. As condições de fronteira foram definidas consoante se apresenta no Quadro 5.2.

Quadro 5.2. Síntese dos dados das condições fronteiras para a Fase 1.

Fronteira	Nº de Nós	Valor (m)
Mar	130	0
SAPM	29	40
SAM	115	70

No Anexo II.b encontra-se toda a informação referente aos nós do modelo que compõem as condições fronteiras e respectivas coordenadas e valor de potencial hidráulico aplicado.

5.3.2.2. Classes de Infiltração

Com base na precipitação, segundo Almeida *et al.* (2000), a recarga será de aproximadamente 4 hm³/ano. Segundo o mesmo, a área de infiltração corresponde a 13,5km² de detritos arenitos e 8,5 km² de calcários. Segundo o mesmo autor, com uma precipitação de 600 mm obtém-se o valor de infiltração de 4,17 hm³/ano. A distribuição espacial das classes de infiltração apresenta-se na Figura 5.7.

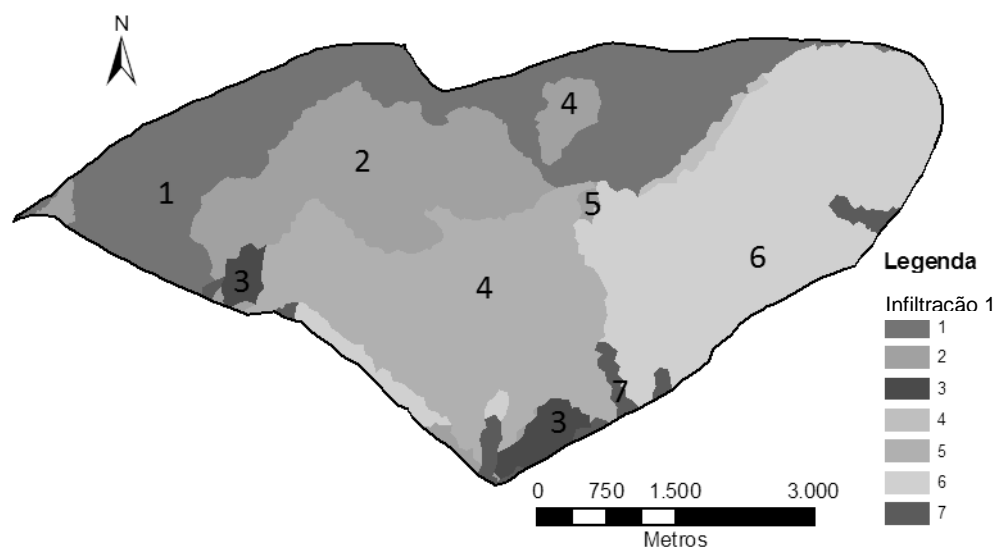


Figura 5.7. Delimitação das classes de infiltração do modelo SALT na Fase 1.

As zonas de recarga por infiltração do modelo na presente fase, para uma precipitação de 600 mm apresentam-se a seguinte distribuição (Quadro 5.3):

Quadro 5.3. Distribuição das classes de infiltração e respectiva infiltração para a Fase I.

Classe	Infiltração [m ³ /s.m ²]	Taxa de infiltração [%]	Infiltração [mm/ano]	Observações
1	9,51293759x10 ⁻⁰⁹	50	300	Calcários
2	3,80517504x10 ⁻⁰⁹	20	120	Areias e Casalheiras
3	3,80517504x10 ⁻⁰⁹	20	120	Aluviões e Sapais
4	0,0	--	0	Cretácico
5	3,80517504x10 ⁻⁰⁹	20	120	Pliocénico (Camadas de Morgadinho)
6	9,51293759x10 ⁻⁰⁹	50	300	Miocénico (Camadas de Morgadinho)
7	0,0	--	0	Aluviões e Ria

Com a actual configuração, a recarga proveniente da precipitação será de 0,1902324 m³/s, o equivalente a 6,00 hm³/ano.

5.3.2.3. Classes de Transmissividade

Definidas as classes de infiltração, procedeu-se à definição das classes de transmissividade. Desta forma, a primeira implementação realizada ao modelo consistiu na definição de uma fina camada a norte, a delimitar toda a Fronteira SAPM, como se apresenta na Figura 5.8.

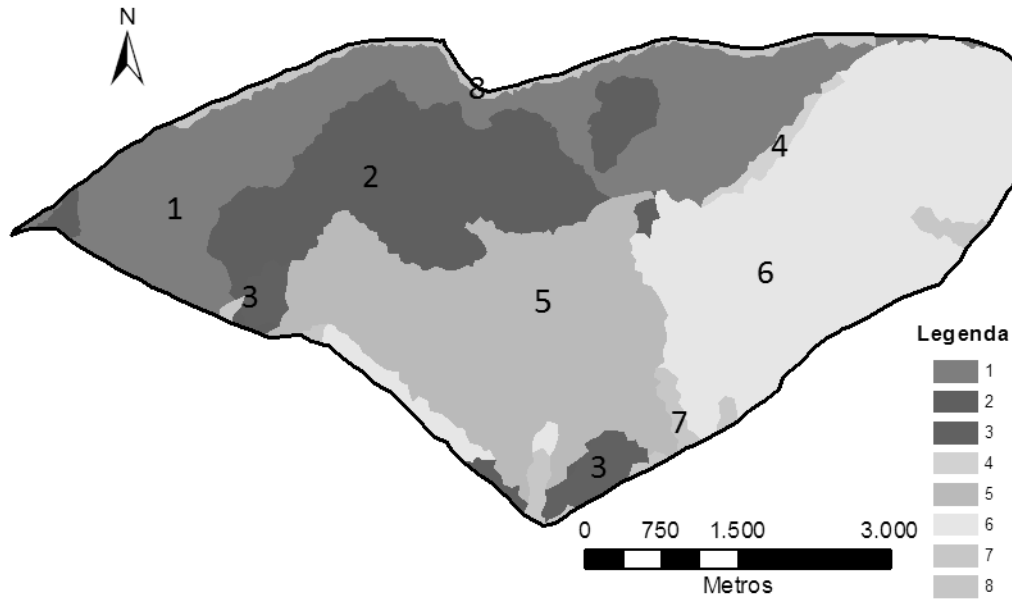


Figura 5.8. Delimitação das classes de transmissividade do modelo SALT para a Fase 1.

Os valores atribuídos às classes de transmissividade apresentam-se de seguida (Quadro 5.4):

Quadro 5.4. valores atribuídos às classes de transmissividade do modelo SALT para a Fase 1.
 (*) valores máximos, mínimos e médios definidos segundo Almeida *et al.* 2000.

Classe	m^2/s	m^2/dia	Observações(*)
1	$5,21 \times 10^{-03}$	450	
2	$2,89 \times 10^{-02}$	2500	Máximo
3	$4,44 \times 10^{-03}$	384	Médio
4	$2,89 \times 10^{-02}$	2500	Máximo
5	$2,89 \times 10^{-02}$	2500	Máximo
6	$2,89 \times 10^{-02}$	2500	Máximo
7	$2,89 \times 10^{-02}$	2500	Máximo
8	$3,47 \times 10^{-04}$	30	Mínimo

A delimitação da camada 8 justifica-se uma vez que segundo a piezometria real se verificou um elevado gradiente junto à fronteira SAPM, daí se ter criado esta nova classe de transmissividade com um valor relativamente baixo.

5.3.2.4. Balanço

A primeira simulação após a redefinição das condições da Fase 1 apresenta-se de seguida na Figura 5.9, cujo escoamento apresenta um sentido predominante de NO-SE como sugerido pela piezometria e revisão bibliográfica.

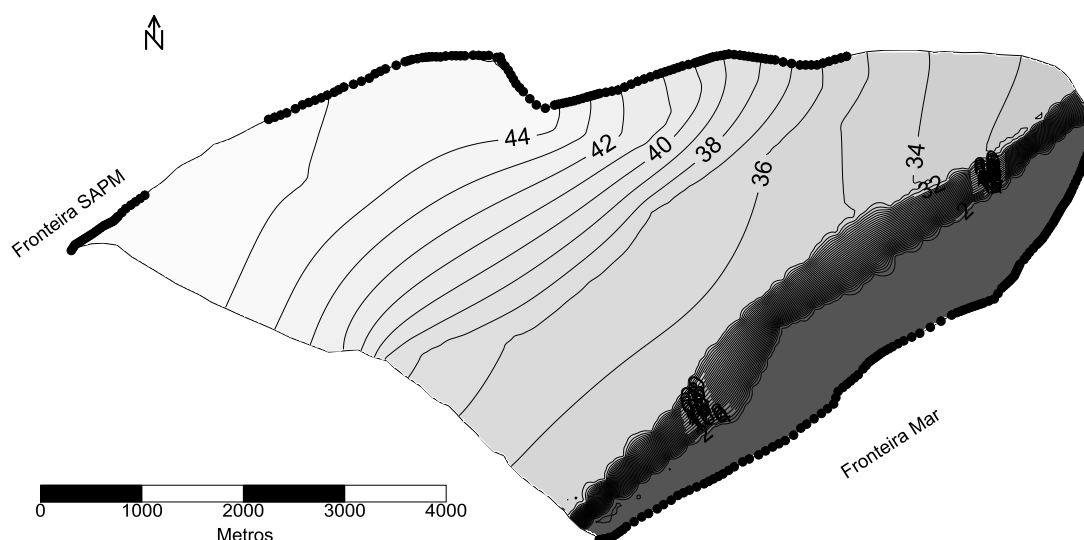


Figura 5.9. Resultados da simulação do modelo na com as condições da Fase 1.

O balanço respectivo à simulação da Fase 1 apresenta-se no Quadro 5.5.

Quadro 5.5. Balanço do regime hídrico respectivo às condições da Fase 1 do Modelo.

Balanço Fronteira SAPM [hm³/ano]	-0,142
Balanço Fronteira SAM [hm³/ano]	1,95
Balanço fronteira mar [hm³/ano]	-7,81
Distribuição Imposta [hm³/ano]	6,00
Balanço total [hm³/ano]	-7,57x10 ⁻⁰⁷

Para a fase 1, identificam-se descargas do sistema através das fronteiras SAPM e Mar e recargas através da fronteira SAM e por parte da infiltração. No entanto, a precipitação registada pelo modelo aparenta ser superior aos dados bibliográficos sugeridos por Almeida *et al.* (2000). O balanço recarga-descarga total do modelo para a fase 1 apresenta um valor próximo de zero, sendo este um indicador da eficiência do modelo, no que respeita às leis do escoamento.

Analisados resultados da fase I, verificou-se a necessidade de redefinir as camadas de transmissividade nesta etapa, de forma a permitir uma aproximação mais eficiente do modelo à realidade, pelo que se prosseguiu para uma redefinição das camadas de transmissividade, consoante os mapas piezométricos apresentados nas Figuras 3.4., 3.5 e 3.9. Relativamente às camadas de infiltração, será necessário configurar os seus valores, com vista a aproximar os valores reais estimados.

5.3.3. Fase 2

Na Fase 2 procedeu-se à reconfiguração da condição de fronteira SAM, ao ajuste dos valores de infiltração do modelo e à reconfiguração das camadas de transmissividade.

Tal como sucedeu para a Fase 1, esta fase consistiu no seguimento de um exercício pedagógico relativo às respostas do modelo perante diferentes condições.

5.3.3.1. Condição Fronteira

Na presente fase, procedeu-se à redefinição das condições de Fronteira, de forma a controlar a entrada de água proveniente destas. Desta forma, reduziu-se a extensão da fronteira SAM e optou-se também por aumentar o valor de potencial hidráulico de forma a evitar perdas de água do sistema nesta fronteira (Figura 5.10).

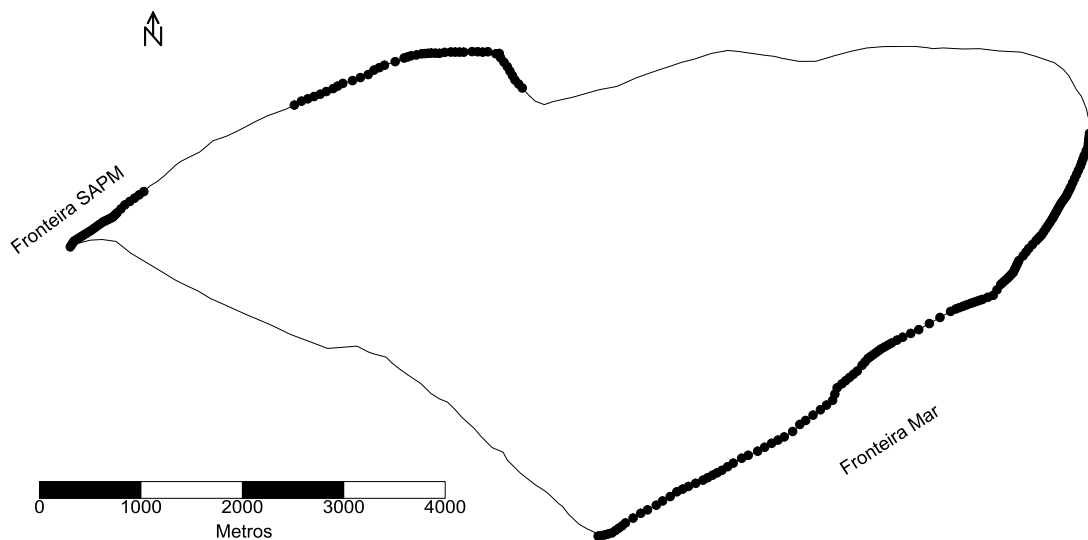


Figura 5.10. Representação das Condições fronteira do modelo conceptual do SALT para a Fase 2, identificadas com Contorno mais grosso a preto

Desta forma, para a fase 2 foram definidas como se apresenta de seguida (Quadro 5.6):

Quadro 5.6. Síntese dos dados das condições fronteiras para a Fase 2.

Fronteira	Nº de Nós	Valor (m)
Mar	130	0
SAPM	29	40
SAM	45	60

No anexoll.c encontra-se toda a informação referente aos nós do modelo que compõem as condições fronteiras e respectivas coordenadas e valor de potencial hidráulico aplicado.

5.3.3.2. Classes de Infiltração

Visto que as condições apresentadas na Fase 1 resultavam num valor de 6,00 hm³/ano, quando o valor estimado rondava os 4,00 hm³/ano, ajustaram-se os valores das camadas de infiltração de acordo com o apresentado no Quadro 5.7. Tal como

para a Fase I, considera-se uma infiltração total de 600 mm, no entanto, reduziu-se a taxa de infiltração das camadas 1 e 6 de 50 para 30%, o que continua a consistir num valor muito realístico de infiltração, tendo em conta as características das litologias em questão.

Quadro 5.7. Distribuição das classes de infiltração e respectiva infiltração para a Fase II.

Classe	Infiltração [m ³ /s.m ²]	Taxa de infiltração [%]	Infiltração [mm/ano]	Observações
1	5,70776255x10 ⁻⁰⁹	30	180	Calcários
2	3,80517504x10 ⁻⁰⁹	20	120	Areias e Cascalheiras
3	3,80517504x10 ⁻⁰⁹	20	120	Aluviões e Sapais
4	0,0	--	0	Cretácico
5	3,80517504x10 ⁻⁰⁹	20	120	Pliocénico (Camadas de Morgadinho)
6	5,70776255x10 ⁻⁰⁹	30	180	Miocénico (Camadas de Morgadinho)
7	0,0	--	0	Aluviões e Ria

De acordo com as características apresentadas no Quadro 5.7, o modelo resultou numa recarga proveniente de infiltração de 0,132 m³/s, o equivalente a 4,17 hm³/ano.

Assim, a única alteração que se verifica nas camadas de infiltração da Fase 1 para a Fase 2, consiste nos valores das diferentes camadas, sendo que a configuração das mesmas se mantém.

5.3.3.3. Classes de transmissividade

Após análise dos mapas piezométricos realizados no capítulo 3.4, decidiu-se alterar as zonas de transmissividade que haviam sido definidas de acordo com as formações litológicas, de forma a que estas correspondessem aos mapas piezométricos. Além disso, criou-se uma camada de transmissividade mais fina junto a cada uma das fronteiras do SAM e SAPM, de forma a permitir um melhor ajuste da transmissividade do sistema nesta zona.

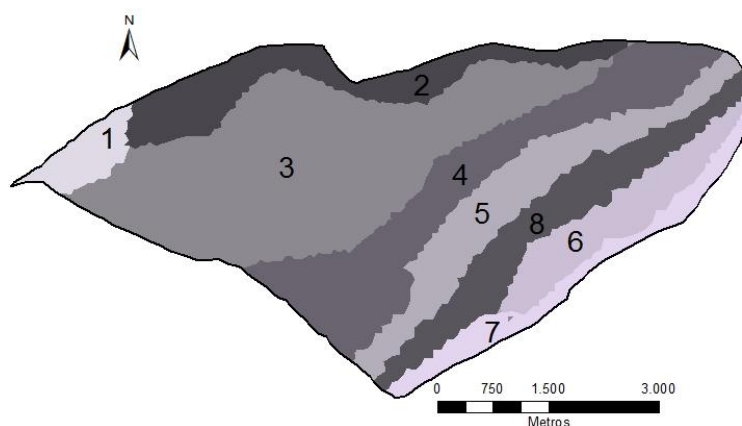


Figura 5.11. Delimitação das classes de transmissividade do modelo SALT para a Fase 2.

Na Figura 5.11 está representada a nova configuração adoptada das camadas de transferência para a fase 2. Os valores atribuídos às classes de transmissividade para a Fase 2 apresentam-se no Quadro 5.8.

Quadro 5.8. valores atribuídos às classes de transmissividade do modelo SALT para a Fase 2.
 (*) valores máximos, mínimos e médios definidos segundo Almeida *et al.* 2000.

Classe	m ² /s	m ² /dia	Observações(*)
1	2,89X10 ⁻⁰⁴	25	Mínimo
2	2,89X10 ⁻⁰⁴	25	Mínimo
3	2,89X10 ⁻⁰²	2500	Máximo
4	2,89X10 ⁻⁰²	2500	Máximo
5	2,89X10 ⁻⁰²	2500	Máximo
6	2,89X10 ⁻⁰²	2500	Máximo
7	2,89X10 ⁻⁰²	2500	Máximo
8	4,44X10 ⁻⁰³	384	Médio

A delimitação das camadas de transmissividade de acordo com os gradientes piezométricos permite ao modelo acertar de forma mais precisa os gradientes piezométricos que sucedem na realidade e também a piezometria observada.

5.3.3.4. Balanço

Após a redefinição das condições da fase 2, apresenta-se o mapa piezométrico resultante na Figura 5.12, na qual, uma vez mais, o escoamento aparenta ser maioritariamente de NO-SE, com um gradiente extremamente elevado junto às fronteiras com o SAM e SAPM, e um gradiente mais baixo na restante extensão do aquífero.

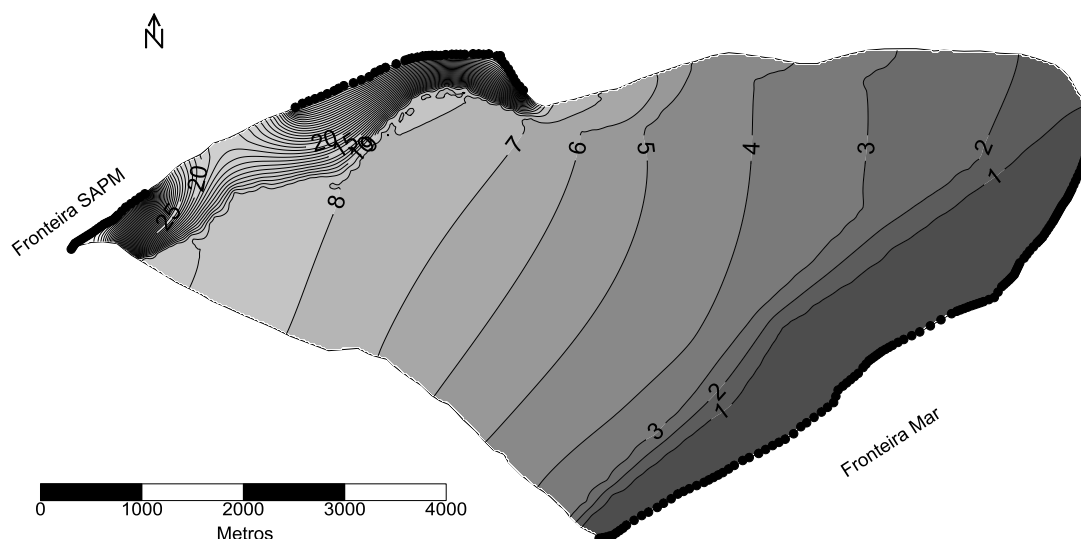


Figura 5.12. Resultados da simulação do modelo nas condições descritas na Fase 2. As condições de fronteira encontram-se representadas por contornos mais grossos a preto.

O balanço proveniente desta simulação apresenta-se no Quadro 5.9.

Quadro 5.9. Balanço do regime hídrico respectivo às condições da Fase 2 do Modelo.

Balanço Fronteira SAPM [hm³/ano]	0,611
Balanço Fronteira SAM [hm³/ano]	1,75
Balanço fronteira mar [hm³/ano]	-6,53
Distribuição Imposta [hm³/ano]	4,17
Balanço total [hm³/ano]	1,26x10 ⁻⁰⁶

Para as condições descritas na fase 2 do modelo, verificam-se recargas do SALT através da infiltração e das fronteiras SAPM e SAM. A recarga por infiltração apresenta valores mais próximos dos citados por Almeida et al. (2000), quando comparado com o valor obtido na fase 1. O balanço total do modelo para a fase 1 apresenta uma vez mais um valor muito próximo de zero, um indicador da eficiência de cálculo do modelo.

Analisando a distribuição espacial da piezometria, denota-se que esta aparenta ter um comportamento menos próximo ao registado pela piezometria real, quando comparado com a fase 1, por apresentar valores muito baixos na maioria do modelo. No entanto, verifica-se que os balanços são bem mais aceitáveis nesta fase. Relativamente aos gradientes, exceptuando o sector Noroeste, o modelo apresenta resultados que têm de ser trabalhados, maioritariamente no sector NO. Apesar dos resultados obtidos para a Fase 2 se afastarem bastante do observado, esta fase foi crucial para entender a dinâmica do modelo, nomeadamente no que respeita aos equilíbrios de balanço do modelo.

5.3.4. Fase 3

A Fase 3 consistiu na última fase antes de se proceder para a optimização do modelo por calibração inversa. Nesta foram uma vez mais registadas alterações na configuração da condição de fronteira SAPM e das classes de transmissividade e, foi ainda incluída uma nova classe de infiltração ao modelo.

5.3.4.1. Condição Fronteira

Comparando os resultados obtidos do modelo na fase 2, com o modelo real, decidiu-se deslocar a condição Fronteira SAM para a direita, ficando esta limitada a Oeste por uma falha, de forma a tentar aproximar mais realisticamente a piezometria observada e o gradiente Norte-Sul verificado na zona Norte centro do Modelo (Figura 5.13).

De forma a reduzir a entrada de água em demasia e a manter os níveis do aquífero próximos aos observados, decidiu-se diminuir os valores das condições de fronteira SAPM e SAM para 38 e 40 metros respectivamente.

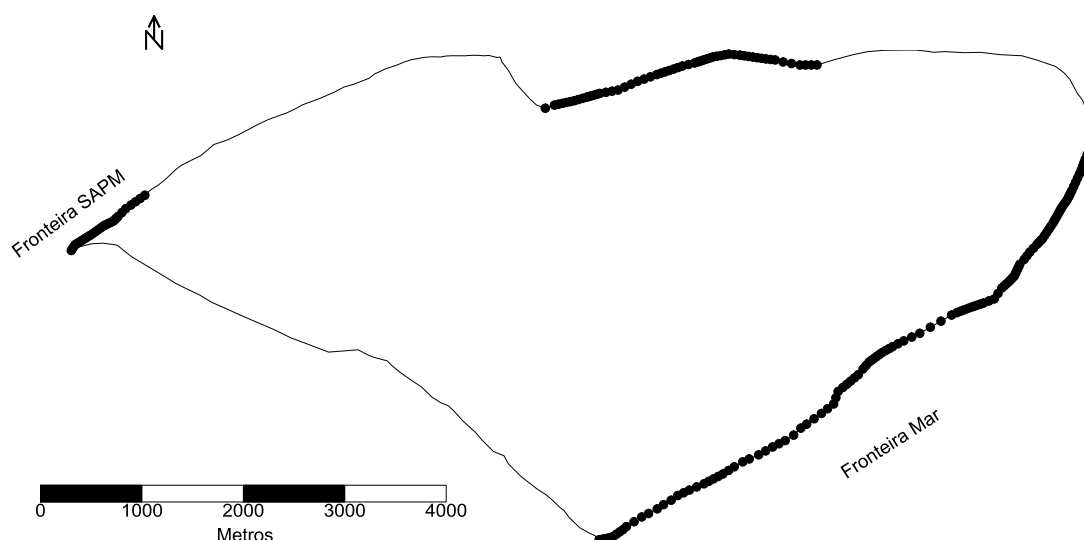


Figura 5.13. Condições de fronteira do modelo conceptual do SALT Para a Fase 3. A vermelho estão representadas as zonas de recarga e descarga, a preto os limites do SALT. Os pontos pretos correspondem aos nós da malha de elementos finitos representativa do SALT.

Desta forma, para a fase 3 foram definidas condições de fronteira consoante se apresenta no quadro seguinte (Quadro 5.10):

Quadro 5.10. Dados das condições fronteiras para a Fase 3

Fronteira	Nº de Nós	Valor (m)
Mar	130	0
SAPM	29	38
SAM	59	40

No Anexo II encontra-se toda a informação referente aos nós do modelo que compõem as condições fronteiras e respectivas coordenadas e valor de potencial hidráulico aplicado.

5.3.4.2. Classes de Infiltração

A única diferença das classes de infiltração da fase 2 e 3 consiste no facto da adição da oitava camada de infiltração referente à representação das Cascalheiras e Terraços (do quaternário) referentes nas cartas geológica e litológica do aquífero, identificada com cor rosa (Classe de infiltração 8) na Figura 5.14.

Os valores para as classes restantes mantiveram-se iguais ao estabelecido na Fase2, enquanto que a camada 8 foi atribuído o valor 0 de infiltração.

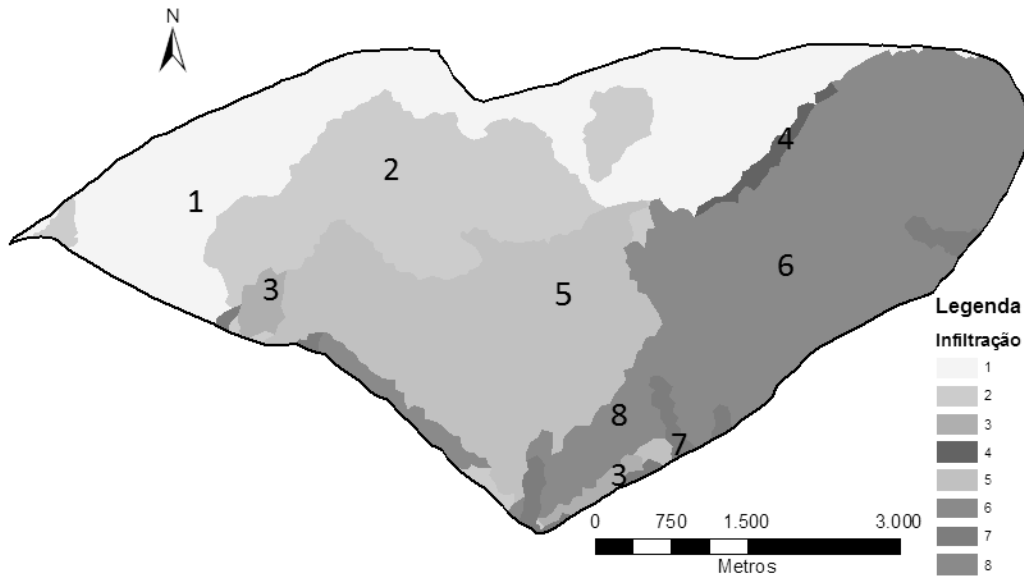


Figura 5.14. Delimitação das classes de infiltração do modelo SALT na Fase 3.

De acordo com as características apresentadas no Quadro 5.11 a recarga do modelo proveniente da infiltração é de 0,129 m/s, o equivalente a 4,07 hm³/ano.

Quadro 5.11. Distribuição das classes de infiltração e respectiva infiltração para a Fase 3.

Classe	Infiltração [m ³ /s.m ²]	Taxa de infiltração [%]	Infiltração [mm/ano]	Observações
1	5,70776255x10 ⁻⁰⁹	30	180	Calcários
2	3,80517504x10 ⁻⁰⁹	20	120	Areias e Cascalheiras
3	3,80517504x10 ⁻⁰⁹	20	120	Aluviões e Sapais
4	0,0	--	0	Cretácico
5	3,80517504x10 ⁻⁰⁹	20	120	Pliocénico (Camadas de Morgadinho)
6	5,70776255x10 ⁻⁰⁹	30	180	Miocénico (Camadas de Morgadinho)
7	0,0	--	0	Aluviões e Ria
8	0,0	--	0	Cascalheiras e Terraços

Verifica-se então que a inclusão da camada número 8 de infiltração, referente a Cascalheiras e Terraços do quaternário, como principal alteração das camadas de infiltração da fase 2 para a fase 3 resultou numa redução da recarga de infiltração de 4,17 para 4,07 hm³/ano.

5.3.4.3. Classes de Transmissividade

Após a comparação entre os mapas piezométricos reais (capítulo 3.4) e modelado da fase 2 (Figura 5.12) procedeu-se a uma nova reconfiguração das fronteiras das camadas de transferências e respectivos valores, consoante se apresenta na Figura 5.15.

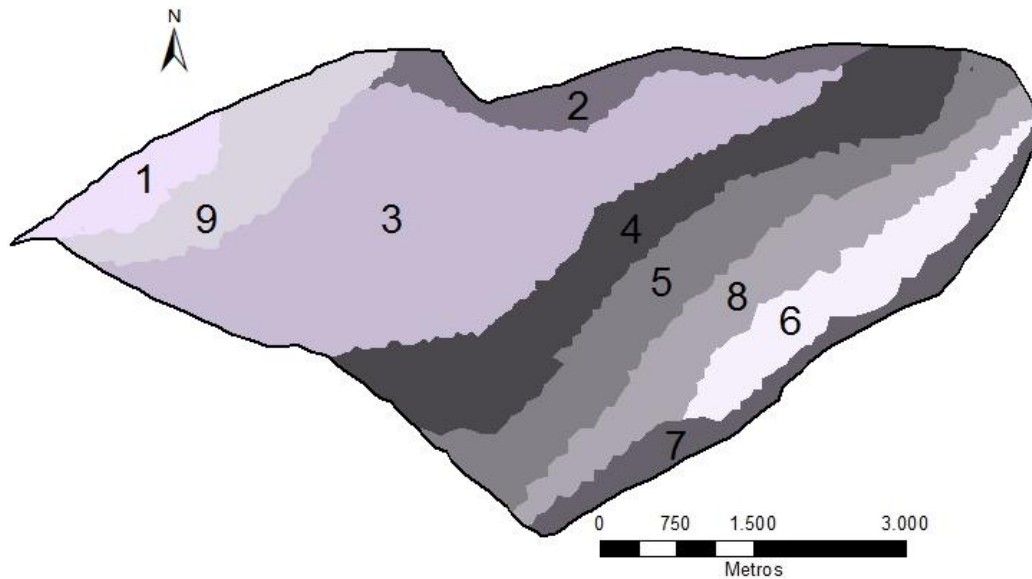


Figura 5.15. Delimitação das classes de transferência do modelo SALT para a Fase 3.

No Quadro 5.12 apresentam-se os valores de transmissividade atribuídos às classes de transmissividade da fase 3.

Quadro 5.12. Valores atribuídos às classes de transmissividade do modelo SALT para a Fase 3.
 (*) valores máximos, mínimos e médios definidos segundo Almeida *et al.* 2000.

Classe	m ² /s	m ² /dia	Observações(*)
1	2,89X10 ⁻⁰⁴	25	Mínimo
2	2,89X10 ⁻⁰⁴	25	Mínimo
3	2,89X10 ⁻⁰²	2500	Máximo
4	2,89X10 ⁻⁰²	2500	Máximo
5	2,89X10 ⁻⁰²	2500	Máximo
6	2,89X10 ⁻⁰²	2500	Máximo
7	2,89X10 ⁻⁰²	2500	Máximo
8	4,44X10 ⁻⁰³	384	Médio
9	4,44X10 ⁻⁰³	384	Médio

As primeiras simulações exercidas com a actual configuração de camadas de transmissividade permitiram uma aproximação piezométrica mais próxima da real, quando comparada com as fases anteriores. A fase que se seguiu consistiu na calibração do modelo com o método de modelação inversa, através do software PEST (Parameter ESTimation).

5.3.4.4. Balanço

Após a reconfiguração das condições do modelo consoante explícito na fase 3 procedeu-se à análise dos resultados do mesmo. Na Figura 5.16 encontram-se representados os resultados obtidos para o modelo nas condições descritas na fase 3.

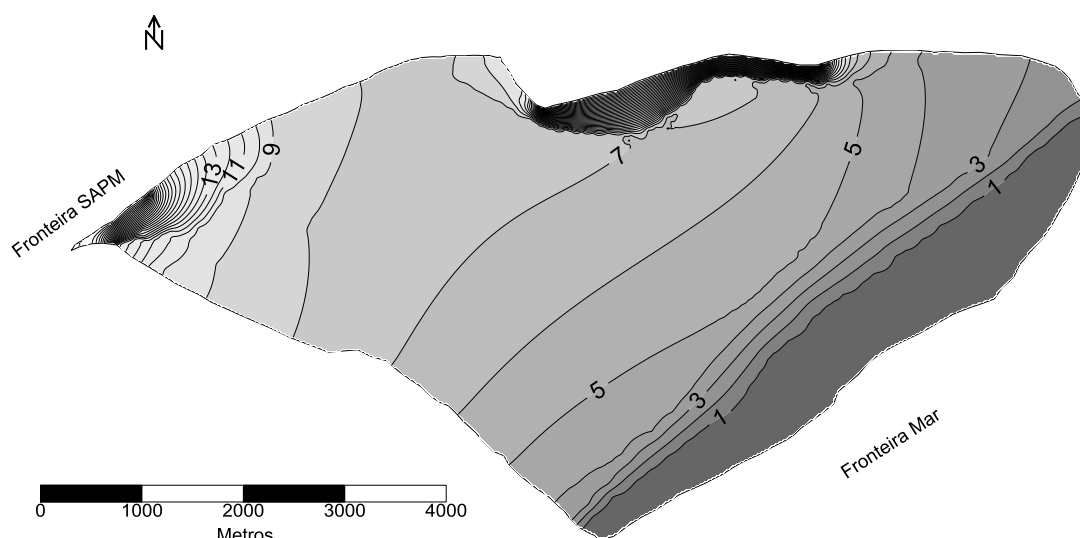


Figura 5.16. Resultados da simulação do modelo nas condições descritas na Fase 3..

Verifica-se uma vez mais o escoamento predominante NO-SE, no entanto, destacam-se zonas com gradiente mais suave e outras com gradiente mais abrupto e também zonas em que o escoamento aparente ter uma influência de N-S, na zona central do modelo, factos que são reconhecíveis na piezometria real (Figuras 3.4, 3.5 e 3.9). Por outro lado, os valores piezométricos obtidos na maioria da área de estudo são significativamente inferiores aos obtidos para o mapa piezométrico real. No entanto, admite-se que este é um factor que pode ser controlado através da correcta atribuição de valores de transmissividade às respectivas camadas, processo a que se procede durante a calibração do modelo, abordada capítulo 5.

O balanço do modelo para a fase 3 apresenta-se no Quadro 5.13. Como é possível verificar, detecta-se alimentação do aquífero através das fronteiras SAPM e SAM e através da infiltração, sendo a única fronteira de descarga a fronteira Mar. O balanço total do modelo aproxima-se do zero, uma vez mais, um valor representativo da eficiência do modelo.

Quadro 5.13. Balanço do regime hídrico respectivo às condições da Fase 3 do Modelo.

Balanço Fronteira SAPM [hm³/ano]	5,15x10 ⁻⁰¹
Balanço Fronteira SAM [hm³/ano]	3,67
Balanço Fronteira Mar [hm³/ano]	-8,25
Distribuição Imposta [hm³/ano]	4,07
Balanço total [hm³/ano]	9,46x10 ⁻⁰⁷

Analisando os dados obtidos para a fase 3, verificou-se que o modelo aparenta retratar com maior fidelidade o que sucede na realidade, no que respeita ao balanço hídrico e aos gradientes, quando comparado com as fases anteriores. Verifica-se que a distribuição piezométrica do modelo é extremamente reduzida quando comparado com

a realidade. No entanto, admite-se que esta é uma lacuna que poderá ser corrigida com a calibração das classes de transmissividade. Desta forma decidiu-se proceder para a optimização do modelo, através da ferramenta de calibração inversa das camadas de transferência do modelo, de forma a tentar obter uma simulação mais próxima da realidade, nomeadamente, no que respeita aos níveis piezométricos observados, aos balanços registados pelas condições de fronteira e aos gradientes observados.

6. OPTIMIZAÇÃO DO MODELO

No Capítulo 6 proceder-se-á à optimização do modelo de escoamento em regime permanente do SALT, nomeadamente através da calibração inversa das camadas de transferência e da optimização dos restantes parâmetros, quando necessário.

Durante o próprio processo de calibração foram testadas várias variantes do modelo, nomeadamente no que respeita aos pontos de observações utilizados, às condições de fronteira e também à subdivisão das camadas de transmissividade, com o intuito de obter um conjunto de parâmetros que possibilite o melhor enquadramento entre potenciais hidráulicos medidos e calculados.

A optimização no seu todo pode-se dividir em 3 etapas: a) Optimização inicial; b) Optimização manual; c) Optimização final. A distinção destas 3 etapas é necessária, visto que após a optimização inicial, verificou-se a necessidade de ajustar alguns parâmetros do modelo.

Durante todo o processo ocorrido no presente capítulo, utilizou-se sempre a mesma configuração das camadas de transferência (Figura 6.1) e condições de fronteira, no entanto, procedeu-se a alterações aos seus valores e ajustes aos pontos de observação utilizados para calibração.

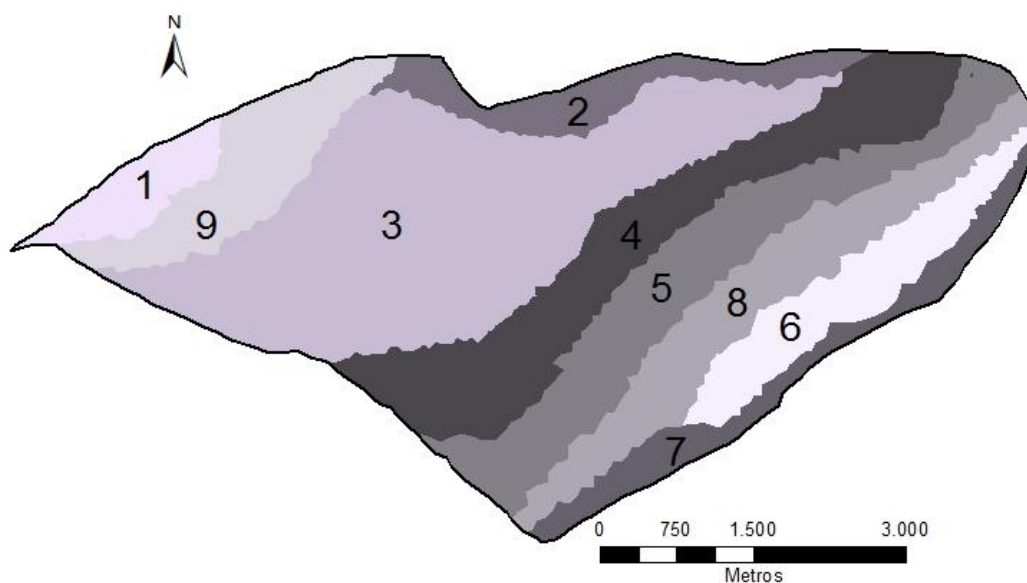


Figura 6.1. Delimitação das classes de transferência do modelo SALT utilizadas no processo de optimização.

6.1. Optimização Inicial

Como forma de iniciar este capítulo, é importante referir que a calibração do modelo não ocorreu uma única vez em todo o processo de evolução do modelo. Foi um processo cíclico que ocorreu entre redefinição de camadas de transferência e calibração, com a filosofia de tentativa erro. No entanto, no presente relatório apresenta-se apenas se irá dar destaque às variantes do modelo que apresentaram os melhores resultados e que resultaram na obtenção do modelo final.

De forma a calibrar o modelo através de medições de potencial hidráulico, foram definidas zonas de transmissividade. Até à etapa de calibração foram testadas várias fases e variantes do modelo, sendo que por fim optou-se por prosseguir para a calibração com as condições descritas na Fase 3, (capítulo 5.3.4). A subdivisão dessas zonas de transmissividade foi baseada sobretudo no registo de mapas piezométricos (recolhidos nas fontes bibliográficas e na saída de campo). Optou-se por realizar a definição das camadas de transmissividade através dos mapas piezométricos ao invés das camadas geológicas, visto que para a segunda opção se estavam a obter dados de distribuição piezométrica irreais quando comparados com a realidade.

Desta forma, a optimização inicial baseou-se na modelação inversa do modelo, com vista a calibrar as camadas de transmissividade, através da ferramenta PEST.

6.1.1. Dados de Entrada

Para a calibração inversa inicial utilizaram-se 33 pontos de amostragem, provenientes de 2 fontes (SNIRH e registos da ULA) e da saída de campo efectuada a 3 de Fevereiro (identificados com WP), cuja localização se pode verificar na Figura 6.2.

No Anexo H estão representados os dados respectivos aos pontos de amostragem representados no mapa da Figura 6.2 para a calibração do modelo.

Após o tratamento de dados dos 33 pontos de observação, adaptaram-se os mesmos ao modelo, e procedeu-se então à calibração inversa do modelo através do PEST.

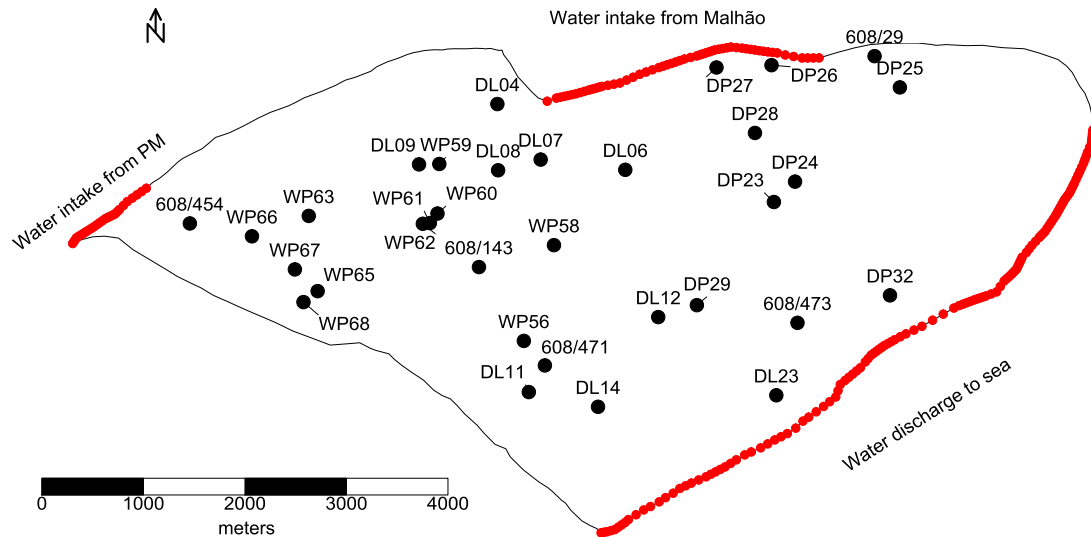


Figura 6.2. Localização dos pontos de amostragem utilizados para a calibração do modelo com a ferramenta PEST.

6.1.2. Análise dos resultados da optimização

Após a calibração das camadas de transmissividade, procedeu-se a uma nova simulação do mesmo, de forma a poder comparar-se os resultados deste com a realidade.

Quadro 6.1. Dados da calibração do modelo, com piezometria real e valor calculado após optimização do modelo, nó correspondente ao ponto de observação e o resíduo entre o valor piezométrico real e calculado pelo modelo.

Nó	Valor medido	Valor calculado	Resíduo	Nó	Valor medido	Valor calculado	Resíduo
171	36,51	37,3904	-0,88042	2253	34,71	32,1498	2,56019
337	37,05	36,1453	0,90469	2293	31,3	30,7867	0,51327
467	34,39	35,467	-1,07702	2748	35,55	34,8506	0,69941
476	36,41	35,6765	0,73346	2924	25,3	28,0975	-2,79748
565	32,23	35,3986	-3,16856	3093	32,9	30,2823	2,61775
588	31,73	35,3713	-3,64127	3378	29,2	30,4048	-1,20483
991	35,55	35,3249	0,22511	3595	35,35	36,0428	-0,69283
1021	34,75	35,1477	-0,39766	3835	36,5	34,0824	2,41761
1056	35,53	35,1432	0,38685	3966	31,5	31,2031	0,29693
1122	36,36	35,2959	1,06411	4041	34,75	35,4463	-0,69629
1123	35,92	35,14	0,77997	4127	31,95	33,0054	-1,05537
1437	35,48	34,8004	0,67956	4203	4,52	4,6193	-0,0993
1545	34,87	35,1307	-0,26072	4210	4,78	0,35283	4,42717
1658	37,1	35,5109	1,58912	4580	30,25	32,4175	-2,16747
1927	35,5	35,2665	0,23353	4605	3,5	0,83923	2,66077
2008	33,29	33,7453	-0,45525	4640	33,2	30,5903	2,60975
2043	34,93	34,6101	0,31991				

No Quadro 6.1 estão representados os dados devolvidos pelo modelo e a respectiva comparação com as observações de campo, após a calibração.

De acordo com o descrito no Capítulo 4.5.2, uma forma de medir a eficiência do modelo pode ser através do coeficiente de correlação R. É consensual admitir-se um valor de R superior a 0,9 como um bom indicador para os resultados obtidos pelo modelo comparativamente às observações de campo.

A presente simulação, foi, de todas as variantes do modelo abordadas na etapa de optimização inicial, a que apresentou um coeficiente de correlação mais elevado, nomeadamente de 0,9839, como tal, pode-se considerar que o modelo representa uma reprodução bastante fiel da realidade.

Na Figura 6.3 apresenta-se um mapa de dispersão entre os valores reais observados e os valores obtidos para o modelo após a calibração do mesmo por modelação inversa das camadas de transmissividade e uma vez mais, verifica-se que os resultados obtidos foram bastante próximos dos valores reais de piezometria.

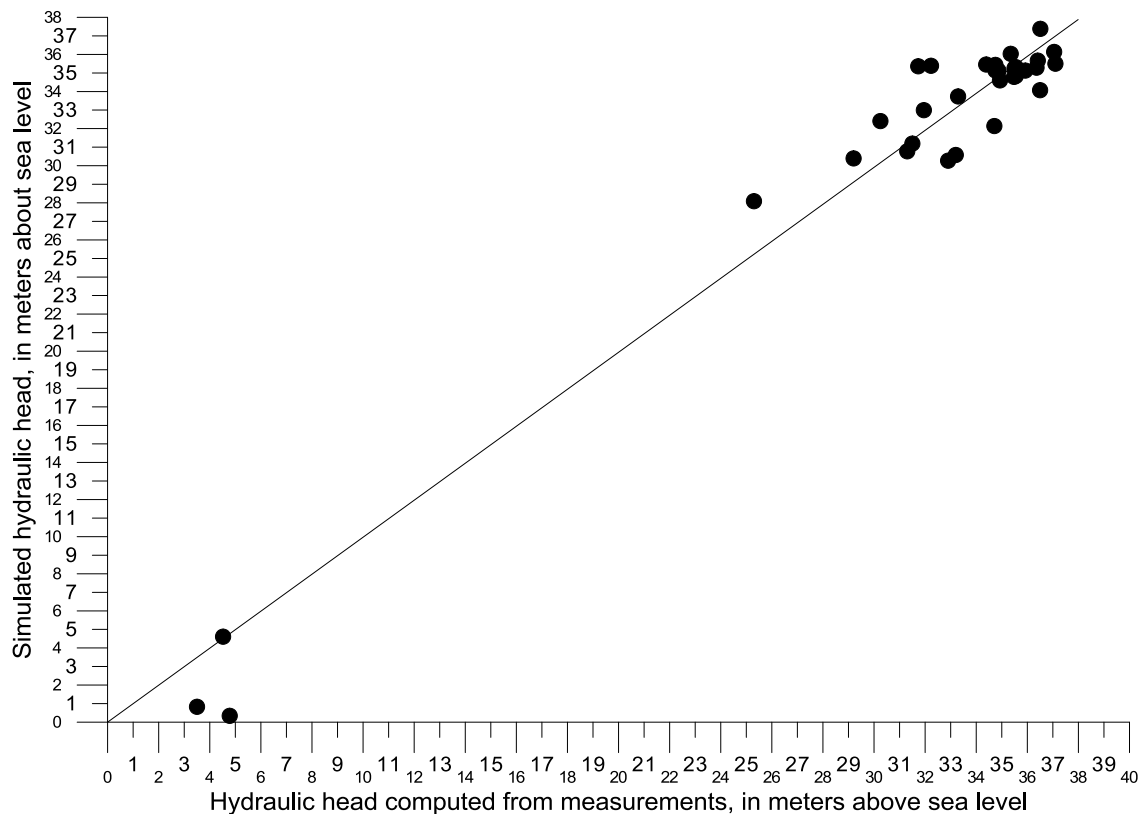


Figura 6.3. Gráfico de dispersão do modelo de calibração dos potenciais hidráulicos observados (eixo xx) vs. potenciais hidráulicos simulados (eixo yy).

Desta forma pode-se considerar que a calibração automática foi, matematicamente bem sucedida. De seguida procede-se à análise das transmissividades devolvidas pela optimização, do mapa piezométrico obtido e dos balanços registados.

Os valores de transmissividade na calibração do modelo variaram entre os 50 m²/dia e os 3114 m²/dia, sendo que estes valores se destacam dos apresentados por Almeida *et al.* (2000) e Silva (1980) que sugerem uma gama de valores de transmissividade do SALT a variar entre 20 e os 2000 m²/dia. No entanto, os valores de transmissividade devolvidos pelo modelo apresentam uma distribuição bastante realista ao longo da região do SALT, isto porque a calibração automática atribuiu valores de transmissividade T mais altos em zonas que se esperavam apresentar um maior fluxo e menores valores de T em zonas com gradientes mais acentuados. Este facto contribui para um aumento da consistência do modelo conceptual proposto.

O Quadro 6.2 apresenta os valores de transmissividades calculados para cada classe a partir da calibração inversa.

Quadro 6.2. Valores atribuídos às classes de transmissividade do modelo SALT através da calibração

Classe	T (m ² /s)	T (m ² /dia)
1	7,04x10 ⁻⁰⁴	61
2	2,85x10 ⁻⁰³	246
3	3,60x10 ⁻⁰²	3114
4	5,84x10 ⁻⁰³	505
5	3,07x10 ⁻⁰²	2654
6	2,35x10 ⁻⁰²	2034
7	2,20x10 ⁻⁰²	1898
8	5,80x10 ⁻⁰⁴	50
9	8,74x10 ⁻⁰⁴	76

O mapa piezométrico obtido a partir dos novos parâmetros de transmissividade apresenta-se na Figura 6.4 e os respectivos balanços no Quadro 6.3.

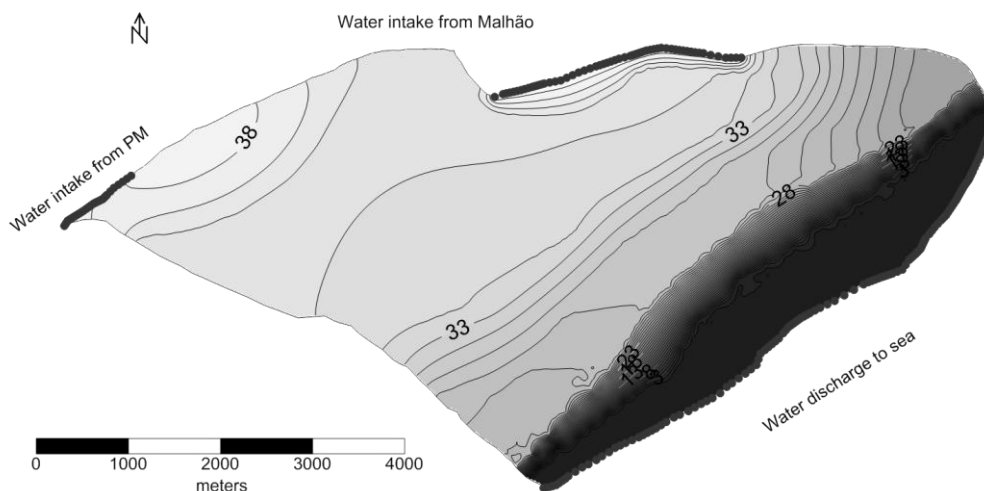


Figura 6.4. Mapa piezométrico obtido após a optimização inicial

Quadro 6.3. Balanço do regime hídrico respectivo às condições obtidas na optimização inicial.

Balanço Fronteira SAPM [hm³/ano]	5,34x10 ⁻⁰³
Balanço Fronteira SAM [hm³/ano]	5,15
Balanço fronteira mar [hm³/ano]	-9,21
Distribuição Imposta [hm³/ano]	4,07
Balanço total [hm³/ano]	-6,05x10 ⁻⁰⁷

Analisando os valores de balanço obtidos e o mapa piezométrico obtidos após a etapa da optimização inicial, verifica-se que o balanço obtido para a fronteira SAM é exagerado, tendo em conta que o balanço do SAM é entre 2 a 3 hm³/ano e que se estima que na sua maioria, este não é escoado directamente para o SALT. Quanto à piezometria observada, apresenta um comportamento idêntico, excepto no sector Este Centro do aquífero, com valores ligeiramente acima dos observados no mapa piezométrico real.

Tendo em conta que no regime de exploração máximo, o sistema SALT irá provocar um aumento da entrada de água das fronteiras SAM e SAPM, considera-se que o valor obtido nesta simulação é exagerado, logo é necessário trabalhar o modelo de forma a minimizar a entrada de água proveniente da fronteira SAM.

Como tal, verificou-se a necessidade de realizar ajustes ao modelo, pelo que se avançou para a etapa da optimização manual do mesmo, que será abordada no sub-capítulo seguinte.

6.2. Optimização Manual

A optimização manual consistiu numa etapa de âmbito pedagógico e conhecimento das características e respostas do modelo, perante diferentes condições de simulação do modelo do SALT, de forma a estudar alternativas que permitissem estimar a obtenção de balanços aceitáveis para o modelo. O principal objectivo desta fase, consistiu sobretudo para perceber e detectar eventuais deficiências na rede piezométrica. Esta fase permitiu definir também as condições ideais para iniciar calibração inversa automática do modelo através da ferramenta PEST, que será abordada no capítulo 6.3.

Como tal, foram realizadas várias alterações aos valores de transmissividade e ajuste de observações piezométricas, seguido, da análise aos balanços obtidos para o Regime Natural (sem funcionamento de captações) e para o cenário de exploração máxima do modelo (com o funcionamento das captações de abastecimento privado,

público e de rega) obtidos através da simulação do modelo. As condições e volumes de extracção do cenário máximo de exploração (doravante designado por cenário 1) encontram-se no capítulo 7.2.

Esta etapa consistiu numa metodologia de tentativa erro, com a execução de várias variantes de condições de transmissividade do modelo.

6.2.1. Calibração Manual da Transmissividade e ajuste piezométrico

De entre as variantes testadas, apresentam-se neste documento apenas as mais relevantes para a optimização para o modelo. O ponto de partida da optimização manual baseou-se na alteração dos valores de transmissividade obtidos na optimização inicial (Quadro 6.2). Procedeu-se à alteração das classes de transmissividade 1 e 9 em simultâneo (adjacentes à fronteira SAPM) e 2 (adjacente à fronteira SAM). Que serão doravante designadas por T1, T9, e T2 respectivamente.

O Quadro 6.4 tal, apresenta o resumo de algumas das condições testadas e balanços obtidos para Cenário 1 e Regime Natural. A coluna 1 consiste na variante; as colunas 2 e 3 consistem no factor pelo qual se multiplicou o valor de transmissividade T2, T1 e T9 obtidos na optimização inicial; a coluna 4 identifica a variante testada (Cen 1 para cenário 1 e RN para Regime Natural) e; as colunas 5, 6 e 7 representam os balanços obtidos para as condições de fronteira do SAPM, SAM e Mar.

Quadro 6.4. Variantes de valores de transmissividade testadas durante a optimização manual

Variante	T2	T1 & T9	Cenário	Bal_SAPM	Bal_SAM	Bal_Mar
1	0,1x	10x	Cen 1	4,74E+06	3,17E+06	-2,27E+06
			RN	1,62E+06	1,49E+06	-1,02E+08
2	0,1x	100x	Cen 1	9,10E+06	1,83E+06	-5,29E+06
			RN	3,22E+06	9,98E+05	-8,06E+06
3	0,1x	20x	Cen 1	6,25E+06	2,71E+06	-3,31E+06
			RN	2,17E+06	1,32E+06	-7,56E+06
4	0,2x	100x	Cen 1	8,19E+06	3,20E+06	-5,75E+06
			RN	2,70E+06	1,78E+06	-8,55E+06
5	0,2x	80x	Cen 1	7,87E+06	3,35E+06	-5,58E+06
			RN	2,59E+06	1,83E+06	-8,49E+06
6	0,15x	80x	Cen 1	8,30E+06	2,69E+06	-5,35E+06
			RN	2,83E+06	1,46E+06	-8,36E+06
7	0,18x	70x	Cen 1	7,83E+06	3,18E+06	-5,38E+06
			RN	2,61E+06	1,72E+06	-8,40E+06
8	0,16x	70x	Cen 1	8,01E+06	2,91E+06	-5,28E+06
			RN	2,71E+06	1,57E+06	-8,34E+06

Perante os resultados de balanço obtidos, optou-se pela variante 5 (que apresenta um factor de correlação de 0.915247 entre os registos reais e os valores calculados). De notar que o valor máximo obtido para o balanço da condição de fronteira T2 foi da ordem dos 3 hm³/ano, superior ao balanço do Malhão assumido em Almeida *et al.* (2000) no entanto, assume-se que ainda serão realizados os ajustes piezométricos necessários e, se procederia à calibração inversa do modelo uma vez mais, no sub-capítulo 6.3.

Assim sendo, as classes de transmissividade iniciais a implementar no processo de calibração inversa automática final, são as correspondentes à variante 5, que se apresentam no Quadro 6.5.

Quadro 6.5. Classes de transmissividade obtidas após calibração manual

Classe T	m²/s	m²/dia
1	5,63E-02	4866,4
2	5,69E-04	49,2
3	3,60E-02	3113,9
4	5,84E-03	505,0
5	3,07E-02	2654,3
6	2,35E-02	2033,8
7	2,20E-02	1897,7
8	5,80E-04	50,1
9	6,99E-02	6043,6

Após o ajuste manual das camadas de transmissividade, procedeu-se ao ajuste piezométrico das observações reais.

Assim, do Quadro 6.1, removeram-se as observações referentes às nascentes, nomeadamente os registos WP 65 e WP68, cujos nós são respectivamente o 588 e 565, uma vez que estes podem induzir no modelo o efeito de in-flow isto é, um aumento piezométrico local indesejado.

Adicionalmente, surgiu a necessidade de aumentar o nível piezométrico dos registos 608/454 (nó 171) e 608/29 (nó 4580), de 36,51 para 37,51m no primeiro caso e de 30,25 para 34m no segundo caso. Estas alterações vão de encontro ao comportamento piezométrico real esperado. Além disso, ambos os piezómetros estão situados em furos extremamente profundos, o que pode resultar num escoamento vertical, sendo este um facto que pode implicar um registo piezométrico mais baixo que o potencial hidráulico real nesses locais.

6.3. Optimização Final

Tal como ocorreu com a Optimização Inicial, a Optimização Final também foi alvo de várias variantes, cujo resultado final, apresentado no presente sub-capítulo, consistiu na conjugação de todo um trabalho cíclico sobre o modelo do SALT e as suas condições, principalmente as condições de fronteira, e os parâmetros de transmissividade.

Neste capítulo serão então abordados os dados de entrada do modelo e as últimas alterações ao modelo antes de correr a calibração inversa automática com o algoritmo PEST e posteriormente, analisados os dados obtidos após a optimização, com o modelo definitivo para correr os diferentes cenários de exploração, etapa essa que será abordada no capítulo 7.

6.3.1. Dados de Entrada

Para a calibração inversa final, utilizaram-se 31 pontos de amostragem, após o ajuste piezométrico previamente explicado no capítulo 6.2.1. Os valores iniciais de transmissividade para a calibração inversa apresentam-se no Quadro 6.5, também no capítulo 6.2.1.

No processo de calibração, surgiu também a necessidade de ajustar as condições de fronteira do modelo, nomeadamente as fronteira SAPM e SAM. Este processo foi realizado através da realização de várias variantes de calibração, alternando os valores de condição de fronteira diferentes, e consequente análise dos balanços máximos obtidos (isto é, para o cenário 1) para as fronteiras SAPM e SAM.

Assim sendo, realizaram-se 9 variantes de calibração do modelo, com diferentes variantes das condições de fronteira, partindo do pressuposto que os balanços do SAM e do SAPM teriam de ser inferiores a 3 hm³/ano e 10 hm³/ano respectivamente na simulação para o cenário máximo de exploração. No Quadro 6.6 apresentam-se algumas das diferentes variantes testadas e os respectivos balanços obtidos para o cenário 1.

De entre as variantes testadas, optou-se pela variante 1, visto ser a única que apresenta um balanço de água proveniente do SAM com um valor realista. Assim sendo, as condições de fronteira utilizadas na optimização são nomeadamente de 45 m para o SAM e 38 m para o SAPM. De facto, esta variante apresenta os resultados que mais se assemelham à piezometria observada.

Quadro 6.6. Diferentes variantes de calibração testadas e respectivos balanços obtidos para o Cenário 1.

Variante	Condição de Fronteira (m)		Balanço (m ³ /ano)		
	SAM	SAPM	SAPM	SAM	Mar
1	45	38	6,93E+06	9,73E+05	-2,27E+06
2	45	40	7,02E+05	3,75E+06	1,19E+06
3	45	45	3,84E+05	8,42E+06	-3,17E+06
4	40	38	3,92E+05	5,63E+06	-3,80E+05
5	40	40	5,12E+05	6,13E+06	-1,00E+06
6	40	45	1,51E+06	3,09E+06	1,04E+06
7	38	38	4,56E+05	5,00E+06	1,85E+05
8	38	40	5,22E+05	6,81E+06	-1,69E+06
9	38	45	3,95E+05	7,90E+06	-2,66E+06

Definidas as condições de fronteira, considera-se que o modelo apresenta todas as condições para seguir para a calibração automática final, antes de prosseguir para a análise de cenários.

6.3.2. Análise dos resultados de Optimização

Após a definição dos dados de entrada necessários para a calibração inversa, nomeadamente, as condições de fronteira, os valores iniciais das classes de transmissividade, o ajuste das classes de infiltração e as observações reais, procedeu-se então à calibração automática final do modelo e à comparação dos dados obtidos com o observado na realidade.

Como tal, no Quadro 6.7 estão representados os dados de registos piezométricos reais e dos respectivos dados devolvidos pelo modelo e o resíduo entre ambos obtidos após a calibração automática do modelo. O coeficiente de correlação r^2 entre os valores observados e calculados 0,9927, o que é um valor muito bom.

A Figura 6.5 consiste no gráfico de dispersão entre os valores reais de piezometria e o respectivo valor calculado pelo modelo após a optimização final. Verifica-se que há uma dispersão menor quando comparado com o gráfico de dispersão referente à optimização inicial (Figura 6.3), o que pode ser comprovado pelo coeficiente de correlação respectivo à Figura 6.3 ($r^2=0,9839$) ser inferior ao da Figura 6.5 ($r^2=0,9927$).

Quadro 6.7. Dados da calibração do modelo, com piezometria real e valor calculado após optimização do modelo, nó correspondente ao ponto de observação e o resíduo entre o valor piezométrico real e calculado pelo modelo.

Nó	Valor medido	Valor calculado	Resíduo	Nó	Valor medido	Valor calculado	Resíduo
171	37,51	36,6924	0,817647	2293	31,3	30,7892	0,510817
337	37,05	36,0435	1,00651	2748	35,55	35,183	0,367032
467	34,39	35,8531	-1,46313	2924	25,3	26,9206	-1,62061
476	36,41	35,826	0,584014	3093	32,9	30,7953	2,10467
991	35,55	35,5867	-3,67E-02	3378	29,2	29,1267	7,33E-02
1021	34,75	35,5845	-0,834472	3595	35,35	34,815	0,53503
1056	35,53	35,574	-4,40E-02	3835	36,5	34,5152	1,9848
1122	36,36	35,5577	0,802338	3966	31,5	32,6122	-1,11218
1123	35,92	35,554	0,365962	4041	34,75	34,6535	9,65E-02
1437	35,48	35,481	-1,02E-03	4127	31,95	33,7986	-1,84857
1545	34,87	35,4632	-0,593206	4203	4,52	6,41781	-1,89781
1658	37,1	36,2451	0,854894	4210	4,78	3,75699	1,02301
1927	35,5	35,3945	0,105526	4580	34	35,0468	-1,04678
2008	33,29	34,847	-1,55704	4605	3,5	3,8271	-0,327101
2043	34,93	35,3473	-0,417347	4640	33,2	31,3098	1,8902
2253	34,71	32,7222	1,98775				

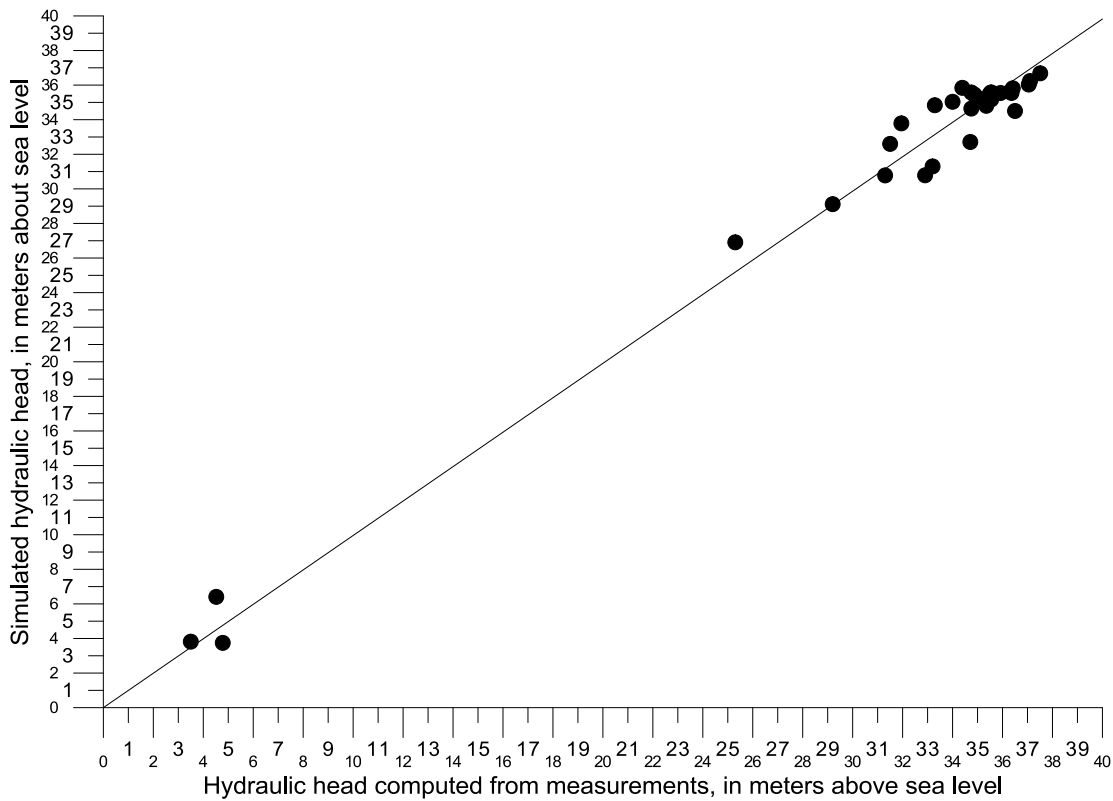


Figura 6.5. Gráfico de dispersão dos potenciais hidráulicos observados (eixo xx) vs. potenciais hidráulicos simulados (eixo yy) após a optimização final.

Considerando que o coeficiente de correlação obtido na optimização final é superior ao obtido na optimização inicial, pode-se considerar que o modelo foi matematicamente melhorado.

De seguida procedeu-se à análise dos valores de transmissividade obtidos, e dos balanços obtidos e respectivo mapa piezométrico.

Os valores de transmissividade obtidos após a optimização final variam entre os 9,5 e os 12284,1 m²/dia. A gama de valores de transmissividade não corresponde à bibliografia consultada, que varia entre 50 e 2000 m²/dia (Almeida *et al.*, 2000 e Silva, 1984). No entanto, tal como sucedido na optimização inicial, obtiveram-se valores mais baixos de transmissividade em zonas que se esperavam obter gradientes de escoamento mais fortes e valores mais elevados onde o gradiente aparenta ser mais suave, sendo que os resultados obtidos de piezometria se assemelham bastante ao observado. No Quadro 6.8 apresentam-se os valores de transmissividade obtidos a partir da calibração inversa final.

Quadro 6.8. Valores atribuídos às classes de transmissividade do modelo SALT através da calibração.

Classe T	m ² /s	m ² /dia
1	1.718054E-02	1484,4
2	1.095303E-04	9,5
3	0.142177	12284,1
4	2.591704E-03	223,9
5	1.477382E-03	127,6
6	8.845096E-02	7642,2
7	1.184616E-03	102,4
8	5.456020E-04	47,1
9	1.393792E-02	1204,2

O mapa piezométrico obtido após a calibração final e os respectivos balanços apresentam-se na Figura 6.6 e Quadro 6.9 respectivamente.

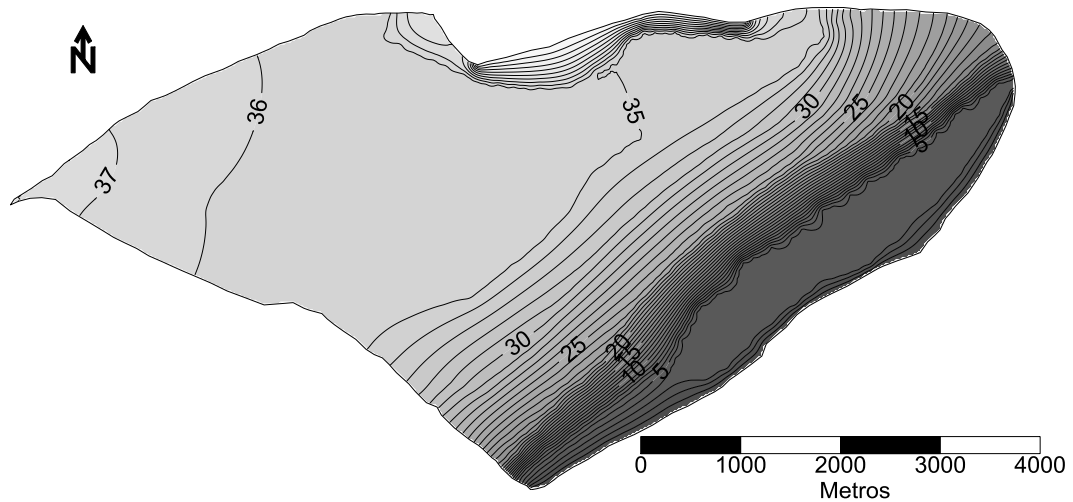


Figura 6.6. Mapa piezométrico obtido após a optimização inicial

Analisando o mapa piezométrico, verifica-se que o mesmo apresenta um comportamento idêntico ao mapa piezométrico real, com gradientes mais elevados a Norte e a Este do SALT e com um gradiente extremamente suave na zona central.

Quadro 6.9. Balanço do regime hídrico respectivo às condições obtidas na optimização final.

Balanço Fronteira SAPM [hm³/ano]	0,889
Balanço Fronteira SAM [hm³/ano]	0,359
Balanço Fronteira mar [hm³/ano]	-5,31
Distribuição Imposta [hm³/ano]	4,07
Balanço total [hm³/ano]	-9,467x10 ⁻⁰⁷

Quanto aos valores obtidos para o balanço, são valores que se inserem na gama esperada, sendo o balanço tanto do SAPM como do SAM inferiores a 1hm³/ano.

O Balanço total do sistema consiste no somatório das três fronteiras e da distribuição imposta (e ainda dos caudais impostos quando existentes). O facto de este valor ser perto de zero, indica que o sistema está a funcionar bem, uma vez que em regime permanente, considera-se que toda a água que entra no sistema tem que sair.

Considera-se que o modelo foi optimizado com sucesso e pode-se então prosseguir para a etapa de análise de cenários, com as condições definidas após a optimização final.

7. ANÁLISE DE CENÁRIOS

O presente capítulo consiste na análise de diferentes cenários de exploração, utilizando como ferramenta o modelo de escoamento subterrâneo do SALT que foi construído e aperfeiçoado consoante se descreve ao longo da dissertação.

Serão abordados 3 regimes de exploração do SALT que representam várias épocas com diferentes condições de exploração a que o aquífero esteve sujeito que serão ainda comparadas com um Regime Natural de funcionamento do aquífero que assume a não existência de captações no sistema, consoante foi definido no capítulo 6.3. De notar que as condições definidas no Capítulo 6.3 vão de encontro às condições observadas actualmente no sistema, as quais se assumem como condições de regime natural, visto que tem vindo a ocorrer um abandono da maioria das captações vigentes na região desde 2001 devido aos perímetros de rega e à entrada em vigor do SMAAA.

Tal como em todas as etapas apresentadas na dissertação, as simulações realizadas neste capítulo ocorrem em regime permanente.

7.1. Simulação do Balanço hídrico em Condições Naturais

A simulação do balanço hídrico em condições naturais representa a situação de referência com a qual se irá comparar as restantes simulações, de forma a avaliar as variações no funcionamento do SALT aquando das alterações do seu regime de exploração. Assim sendo, neste caso apenas se simulam as entradas naturais no sistema tendo em conta os valores de recarga distribuídos espacialmente de acordo com as classes de infiltração que foram ajustados no capítulo 5 e também a recarga proveniente dos SAPM e do SAM.

Foram definidas 3 condições de fronteira para o potencial imposto, nomeadamente i) na zona de descarga do aquífero (linha de costa) a Sudoeste, com o valor 0 m; ii) a Oeste na fronteira entre o SAPM e SALT, com o valor definido a 38 m; e iii) a Norte, considerando a recarga proveniente do SAM, com o valor definido em 45 m. A distribuição espacial dos potenciais hidráulicos calculados para o Regime Natural apresenta-se no mapa de equipotenciais da Figura 7.1 As condições definidas para correr o modelo são apresentadas no capítulo 6.3.2, capítulo em que através da

optimização do modelo se definiram os critérios de entrada do modelo e se definiu o Regime Natural do SALT.

Uma vez que todas as simulações são efectuadas em regime permanente, é possível comparar directamente os valores totais de recarga e as saídas para a linha de costa dos diferentes cenários com os valores de recarga calculados pelo modelo conceptual em condições naturais.

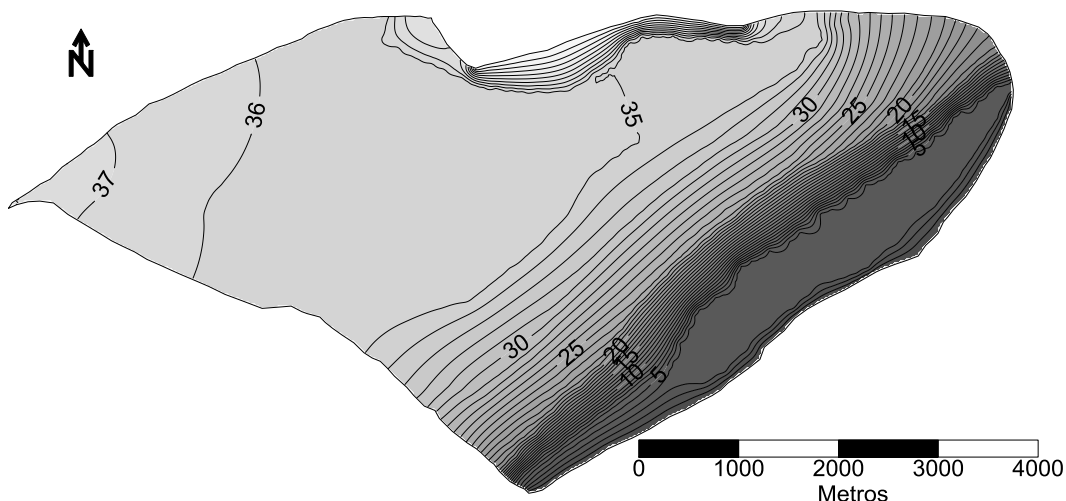


Figura 7.1. Equipotenciais geradas a partir dos resultados de uma simulação numérica de escoamento tendo em conta as condições naturais de funcionamento hidráulico do sistema.

Analisando o mapa de equipotenciais da Figura 7.1 verificam-se duas principais áreas de recarga, nas fronteiras do Malhão e do Peral Moncarapacho, resultantes num fluxo maioritário NO-SE. Destaca-se a ocorrência de uma zona com um gradiente muito suave, na ordem dos 35 m de piezometria, na zona central do aquífero e um súbito aumento do mesmo gradiente para SE. Os valores máximos de piezometria verificam-se a N e NO do modelo, atingindo os 45 m e vão decrescendo até aos 0 m junto à fronteira com o mar.

Quadro 7.1. Síntese da simulação representada na figura 7.1

Balanço recarga-descarga natural [hm³/ano]	-9,467x10 ⁻⁰⁷
Distribuição Imposta - Infiltração [hm³/ano]	4.07E+00
Balanço em nós com pot. Imposto [hm³/ano]	Peral-Moncarapacho: 0,889
	Malhão: 0.359
	Mar: -5,31
Saída em nós com Caudal Imposto [hm³/ano]	0,00E+00
Área total do domínio de escoamento [km²]	26,27

O Quadro 7.1 apresenta a síntese dos dados do modelo. De referir que o parâmetro “Balanço recarga-descarga natural [hm³/ano]” se refere ao balanço de todas as entradas e saídas de água naturais, isto é, não estão incluídas as extracções artificiais para consumo privado, público ou rega. O Parâmetro “Distribuição Imposta – Infiltração [hm³/ano]” refere-se à infiltração resultante da precipitação, cujos parâmetros estão distribuídos no modelo em 8 zonas de recarga (Ver Capítulo 5.3.4.2). Quanto ao parâmetro “Balanço em nós com pot. Imposto [hm³/ano]” diz respeito ao balanço nas fronteiras definidas com um potencial imposto. O parâmetro “Saída em nós com caudal Imposto [hm³/ano]” corresponde ao total simulado de extracção em furos.

A recarga calculada por infiltração pelo modelo com as condições definidas para as classes de infiltração consoante o Regime Natural (Figura 5.11) corresponde a um valor de recarga de 4,07 hm³/ano, valor esse muito idêntico ao estimado por Almeida *et al.* (2000) de 4,00 hm³/ano.

Tendo em conta o regime natural modelado, verifica-se recarga proveniente da infiltração (4,07 hm³/ano) e das condições de fronteira SAM (0,359 hm³/ano) e SAPM (0,889 hm³/ano), resultantes numa recarga total do SALT de 5,31 hm³/ano. Verifica-se que esta recarga é totalmente escoada para o mar.

Neste caso, o valor de saídas em nós com caudal imposto no modelo é nulo, uma vez que se trata de uma simulação em regime natural e, portanto, não são consideradas extracções do sistema.

7.2. Simulação do Regime de Exploração – Cenário 1

A variante do modelo apresentada nesta secção difere da anterior pela introdução das captações de rega, abastecimento público e abastecimento privado implantadas no sistema aquífero. Deste modo, esta simulação representa o regime de exploração do aquífero na primeira fase temporal descrita na secção 7.1 e 2.3.3 do relatório sobreposta às condições naturais de funcionamento do mesmo.

Um factor a ter em conta no que respeita ao presente cenário de simulação é o facto de ser difícil estabelecer a data exacta em que CM Tavira abandonou as captações existentes neste sistema aquífero com vista ao abastecimento público tendo em conta

que não existem registos precisos deste evento. Esta circunstância deve-se sobretudo, ou em parte, ao facto de mesmo antes de se passar a efectuar o abastecimento público por águas superficiais, através da construção do sistema multimunicipal baseado na utilização das barragens de Odeleite e Beliche, já estas captações tinham sido preteridas pela referida entidade às captações instaladas no SAM, sistema esse situado a norte do SALT (Rodrigues, 2007).

Para o actual cenário consideraram-se 277 captações, de acordo com o inventário da CCDR-Algarve, das quais 4 para abastecimento público, 22 para rega, 69 para abastecimento privado e 182 para abastecimento privado e rega, conforme a distribuição espacial representada na Figura 7.2.

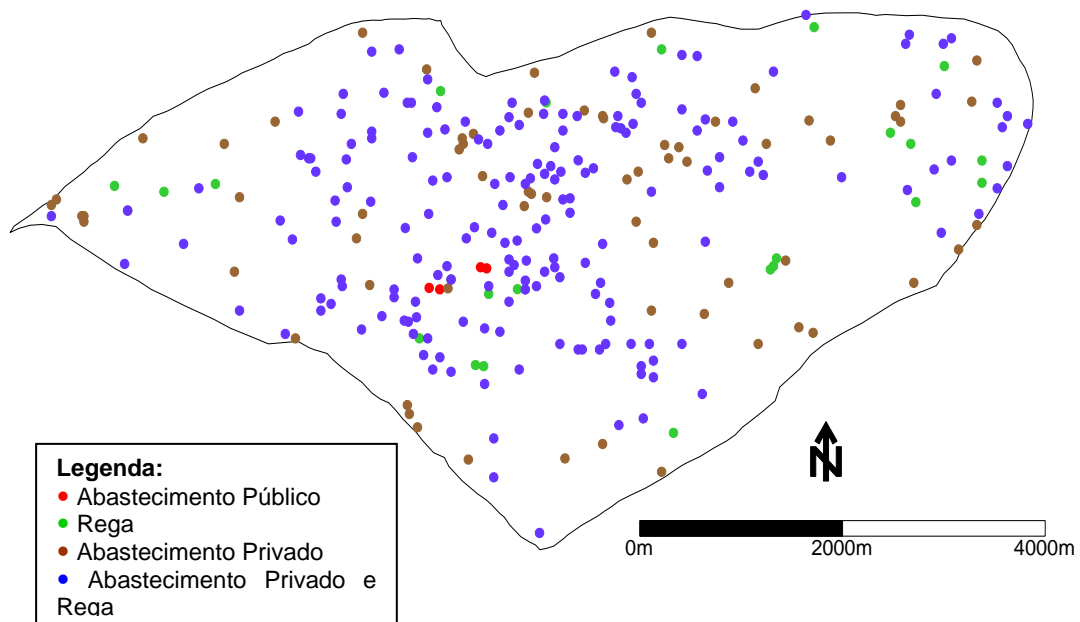


Figura 7.2. Sistema Aquífero de Luz-Tavira com representação das 277 captações.

As 4 captações para abastecimento público, pertencentes à CM Tavira, possuem, segundo os autores Almeida *et al.* (2000), um caudal total de extracção de 800 000 m³/ano, o que, por simplificação, corresponde a 200 000 m³/ano por captação.

Das restantes 273 captações, considerou-se que apenas 204 extraem água para rega, uma vez que são as que se incluem no interior, ou num raio de 50 metros das áreas regadas do SALT, tal como se pode ver na Figura 7.3 (Rodrigues, 2007).

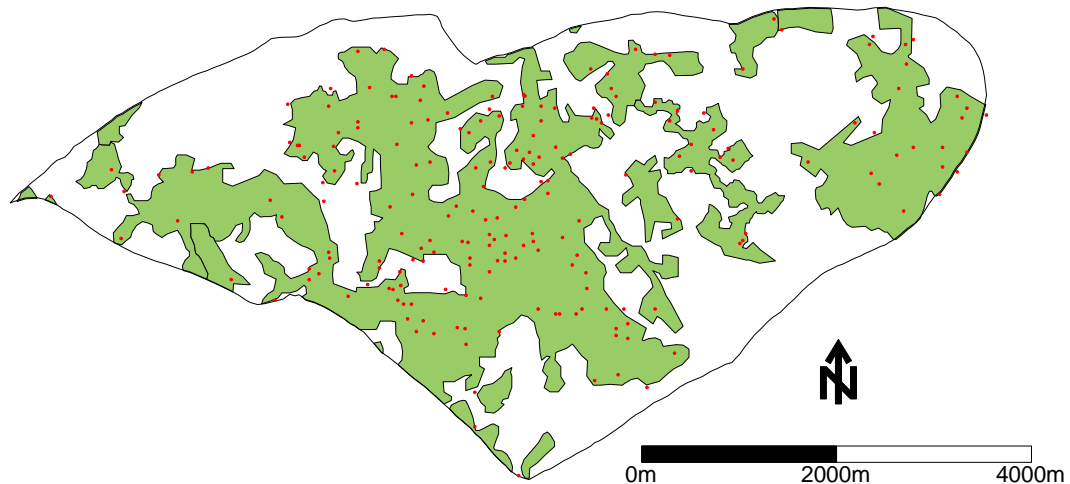


Figura 7.3. Sistema Aquífero de Luz-Tavira com a representação das áreas regadas, bem como das 204 captações que extraem água para rega.
Fonte: Rodrigues (2007).

A rega predominante na zona de estudo é sobretudo de citrinos, portanto considerou-se o valor de 800 mm/ano para rega (IDRHa), representativo desse tipo de cultura (Rodrigues, 2007). Por outro lado, assume-se uma percentagem de fluxo de retorno de 15% (Stigter *et al.* 2006), tendo em conta que o método de rega empregue é o chamado gota-a-gota e o facto de se saber que, de forma a evitar a salinização do solo, os agricultores efectuam um excesso de rega. Posto isto e atendendo ao facto de a área total de rega ser de 1299,36 ha (Monteiro *et al.* 2006; Nunes, 2006) obtém-se um volume total de 8 835 648 m³/ano (subtraindo já os 15% do fluxo de retorno). Assumindo, por simplificação, que todas as captações operam o mesmo caudal de extracção, e que este é constante ao longo do ano (regime permanente) tem-se, assim, o valor de 43 312 m³/ano por captação. Ou seja, o caudal de operação de cada uma das captações é de 0,00137 m³/s, isto é, 1,37 l/s.

Relativamente à estimativa do consumo para uso doméstico nas zonas rurais (abastecimento privado) assumiu-se uma densidade populacional de 100 hab/km² (Censos 2001), um consumo diário de 200 l/hab e uma área de 27,91 km² (Sistema aquífero), de acordo com os cenários definidos em Rodrigues (2007), o que resulta num consumo total de 558 200 litros para consumo privado na região do SALT. Desta forma e, tendo em conta as 251 captações (total de captações que asseguram este tipo de abastecimento), obtém-se um caudal de extracção de 806,20 m³/ano por captação, o que corresponde a 0,0256 l/s. No Quadro 7.2 estão sintetizadas as extracções por tipo de captação para o actual cenário.

Quadro 7.2. Captações e Extracções consideradas para o regime de exploração do Cenário 1

Tipo de Abastecimento	Número de captações	Caudal de Extracção [m ³ /ano. captação]	Caudal de Extracção [l/s. captação]	Caudal de extracção total [m ³ /ano]	Caudal de Extracção total [%]
Abastecimento Público	4	200 000	6,34	800 000	8,13
Abastecimento Privado	69	806,2	0,0256	55 628	0,57
Rega	22	43 312	1,37	952 864	9,69
Abastecimento privado e rega	182	44 118,2	1,40	8 029 512	81,62
Total	277	288 236,4	9,1356	9 838 004	100

A distribuição espacial dos potenciais hidráulicos calculados pelo modelo apresenta-se no mapa de equipotenciais da Figura 7.4.

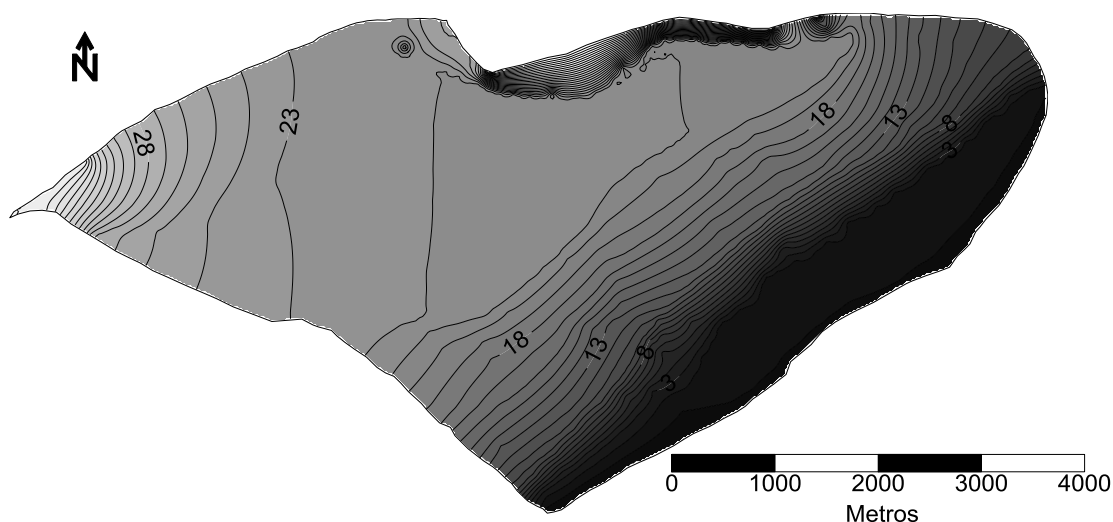


Figura 7.4. Equipotenciais geradas a partir dos resultados de uma simulação numérica de escoamento tendo em conta as extracções do cenário 1 sobrepostas às condições naturais de funcionamento hidráulico do sistema.

Analisando o mapa de equipotenciais da Figura 7.4 para o Cenário 1 verifica-se uma brusca diminuição dos níveis piezométricos quando comparado com o regime natural modelado. O fluxo dominante mantém na sua maioria o regime NE-SO, no entanto, verifica-se um gradiente muito brusco junto à fronteira com o SAPM, o que não sucedia na simulação do Regime Natural (Doravante designado por RN). Tal como para o regime natural, destaca-se a ocorrência de uma zona com um gradiente muito suave na zona central do SALT, no entanto com um valor piezométrico na ordem dos 20 m, bem menor que o valor apresentado para o regime natural modelado (35 m).

O Quadro 7.3, à semelhança do Quadro 7.1 para o regime natural, apresenta os dados de síntese do modelo para o cenário 1.

Quadro 7.3. Dados de síntese da simulação representada na Figura 7.4.

Balanço recarga-descarga natural [hm³/ano]	9,71E+00
Distribuição Imposta - Infiltração [hm³/ano]	4.07E+00
Balanço em nós com pot. Imposto [hm³/ano]	Peral-Moncarapacho: 6,93E+00
	Malhão: 9,73E-01
	Mar: -2,27E+00
Saída em nós com caudal Imposto [hm³/ano]	Público: -7,99E-1
	Privado: -1,56E-03
	Rega: -8,92E-01
	Privado + Rega: -7,83E+00
	Total (modelo): -9,71E+00
Área total do domínio de escoamento [km²]	26,27

A distribuição imposta calculada pelo modelo, correspondente à infiltração, mantém, tal como esperado, o valor obtido para o modelo em Regime Natural, 4,07 hm³/ano.

Relativamente ao balanço natural do sistema para o actual cenário, verificam-se recargas provenientes da fronteira SAPM (6,93 hm³/ano), da fronteira do SAM (0,973 hm³/ano) e da infiltração (4,07 hm³/ano), resultante numa recarga natural total de 12,0 hm³/ano, dos quais 2,27 hm³/ano são escoados para a fronteira Mar. Comparando os valores de recarga com o Regime Natural, verifica-se um acréscimo de entradas de água de 5,31 para 12,0 hm³/ano e uma diminuição da descarga para o mar de 5,31 para 2,27 hm³/ano. É importante referir também o aumento da recarga proveniente da fronteira SAM para mais do dobro (comparado com o Regime Natural) e também o extremo aumento do balanço da fronteira SAPM para cerca de 8 vezes o valor apresentado em RN (0,359 para 6,39 hm³/ano). Convém recordar que este é o cenário que representa o período temporal em que o SALT foi explorado com maior intensidade, com extracções que ascenderam aos 9 838 004 m³/ano. Como tal considera-se que deverão ser as conexões hidráulicas com o SAPM e SAM a suprimir as diferenças entre a recarga natural e os valores extraídos, de forma a manter o equilíbrio do balanço hídrico, sem que haja ocorrência de intrusão salina.

No que respeita às saídas em nós com caudal imposto, isto é, as extracções artificiais (cujo valor real é estimado em 9,8x10⁶ m³/ano), as mesmas correspondem ao valor total de extracções calculado pelo modelo, que para o cenário actual apresenta um

total de 277 captações (Quadro 7.2). A soma algébrica das extracções do modelo ascende a um valor modelado de $9,71 \times 10^6$ m³/ano. A discrepância entre o valor modelado e o valor real estimado deve-se ao facto do modelo calcular para cada um dos 277 nós onde estão situadas as captações, o valor extraído pela captação, mas terá também em conta a infiltração (distribuição imposta).

Importante referir que o “valor Total (Modelo)” consiste no valor devolvido pelo modelo, e não na soma algébrica das restantes categorias de extracção.

O balanço geral do SALT para o cenário 1 calculou-se tendo em conta os valores síntese devolvidos pelo modelo, neste caso representados no Quadro 7. 4.

Quadro 7. 4. Dados devolvidos pelo modelo FEN para o balanço geral do SALT, para o Cenário 1.

Entradas por distribuição imposta [hm ³ /ano]	4,067x10 ⁰
Saídas em nós com caudal imposto [hm ³ /ano]	-9,706x10 ⁰
Balanço em nós com potencial imposto [hm ³ /ano]	5,640x10 ⁰
Balanço total [hm ³ /ano]	0

O valor total de balanço em nós com potencial imposto, $5,64 \times 10^0$ hm³/ano resulta da soma algébrica dos valores de recarga, nomeadamente as fronteiras a Oeste (SAPM) a Norte (SAM), juntamente com a descarga, neste caso, apenas para a fronteira mar a sul.

Como se pode verificar através do quadro anterior, o balanço total do aquífero é de 0 hm³/ano, tal como expresso pela equação de fluxo apresentada na secção 4, que exprime o balanço do aquífero em regime permanente. Este resultado é um indicador da excelente qualidade da simulação efectuada pelo modelo.

7.2.1. Mapa de resíduos entre regime natural e cenário 1

De forma obter uma quantificação visual dos impactes produzidos pelas captações no cenário 1 face ao regime natural, procedeu-se à construção de um mapa de resíduos que mostre as diferenças de potenciais calculados por ambas as variantes do modelo. Desta forma será possível verificar quais as zonas mais gravemente prejudicadas pelo funcionamento das captações de acordo com o cenário 1. A representação gráfica dos rebaixamentos produzidos pela implementação do cenário 1 apresenta-se na Figura 7.5.

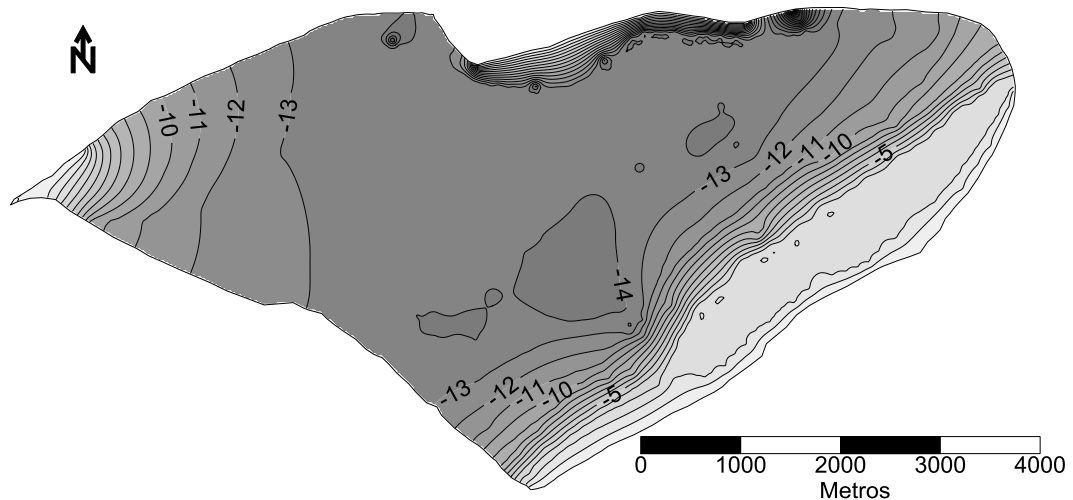


Figura 7.5. Rebaixamentos produzidos pela introdução das captações do cenário 1 no modelo de funcionamento hidráulico natural do aquífero.

Como se pode verificar pelo anterior mapa de rebaixamentos, destaca-se uma zona com maior nível de rebaixamentos registados na zona central do aquífero (cerca de 14m). A justificação para este efeito reside no facto de esta ser uma zona com elevada densidade de captações para rega e também devido à transmissividade naquela zona ser relativamente baixa. É importante destacar que o facto de não se verificar um acentuado rebaixamento localizado na zona das captações públicas pode estar associado à elevada transmissividade do aquífero para a zona em questão, o que contribui para a resposta rápida dos níveis do aquífero.

Em suma, verifica-se que o cenário 1 retrata um regime de exploração extremamente intenso a que o SALT esteve sujeito, originando grandes alterações no seu balanço hídrico natural e no nível piezométrico registado.

7.3. Simulação do regime de exploração – Cenário 2

A variante do modelo apresentada nesta secção difere da anterior pelo abandono das captações para abastecimento público e, portanto, apenas possui as captações para rega e abastecimento privado implantadas no sistema aquífero. Deste modo, esta simulação representa o regime de exploração do aquífero na 2ª fase temporal previamente descrita, sobreposta às condições naturais de funcionamento do mesmo.

Como já foi referido, não se sabe com exactidão qual a data em que as captações para abastecimento público da Campina da Luz deixaram de funcionar, contudo é certo que a partir do início de 1999 todo o abastecimento público passou a ser efectuado por águas superficiais provenientes das barragens de Odeleite e Beliche

com a construção sistema multimunicipal de abastecimento urbano, tendo-se abandonado por completo o uso de águas subterrâneas para este tipo de consumo.

Este horizonte temporal que tem apenas a duração de 2 anos (início de 1999 até finais de 2000) comporta a existência de 273 captações, das quais 22 para rega, 69 para abastecimento privado e 182 quer para abastecimento privado quer para rega, conforme a distribuição espacial representada na Figura 7.6.

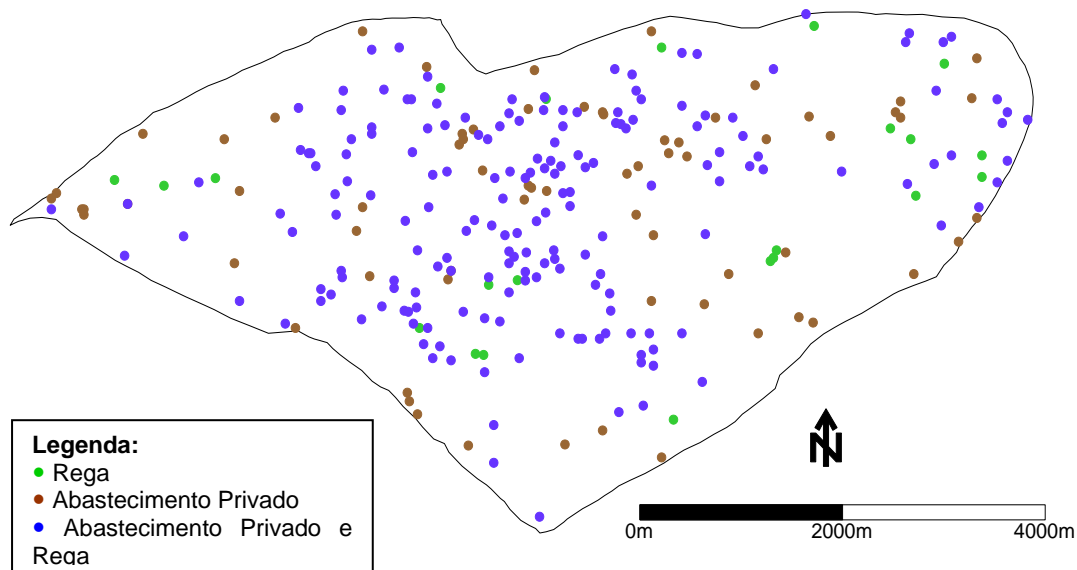


Figura 7.6. Sistema Aquífero de Luz-Tavira com representação da distribuição espacial das 273 captações para rega e abastecimento privado, de acordo com a legenda apresentada.

Assim sendo, através desta simulação pretende-se explicitar as alterações do balanço hidrológico do SALT quando a sua utilização era efectuada apenas para duas vertentes: abastecimento privado e rega. A descrição deste regime de exploração, em termos de captações e caudais de extracção, encontra-se sintetizado no Quadro 7. 5.

Quadro 7. 5. Captações e Extracções consideradas para o regime de exploração do Cenário 2.

Tipo de Abastecimento	Número de captações	Caudal de Extracção [m ³ /ano. captação]	Caulda de Extracção [l/s. captação]	Caudal de extracção total [m ³ /ano]	Caudal de Extracção total [%]
Abastecimento Privado	69	806,2	0,0256	55 628	0,57
Rega	22	43 312	1,37	952 864	9,69
Abastecimento privado e rega	182	44 118,2	1,40	8 029 512	81,62
Total	273	88 236,4	2,7956	9 038 004	100

A distribuição espacial dos potenciais hidráulicos calculados pelo modelo apresenta-se no mapa de equipotenciais da Figura 7.7.

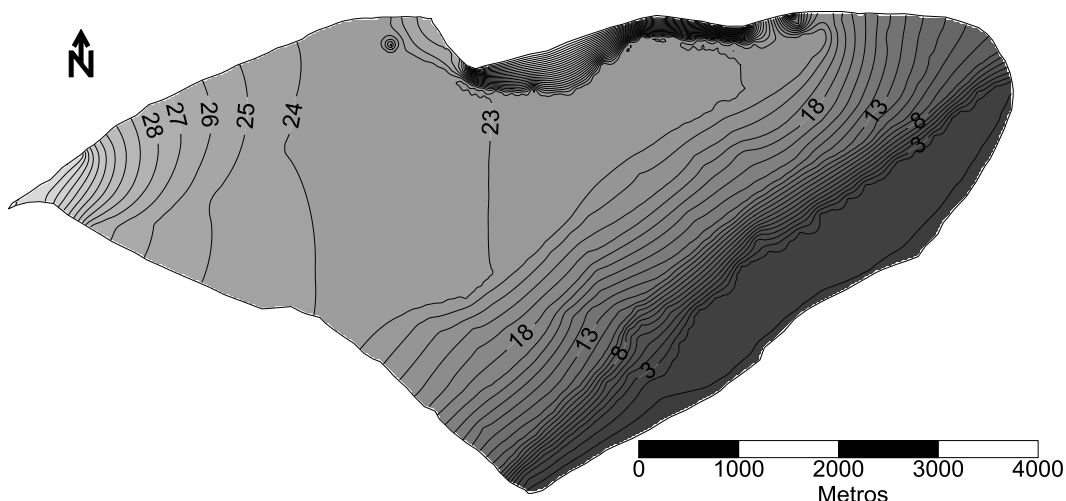


Figura 7.7. Equipotenciais geradas a partir dos resultados de uma simulação numérica de escoamento tendo em conta as as extracções do cenário 2 sobrepostas às condições naturais de funcionamento hidráulico do sistema.

Uma vez mais, tal como para o Cenário 1, verifica-se no mapa de equipotenciais do Cenário 2, que o fluxo dominante sofre alterações quando comparado com o RN, destacando-se um forte fluxo de N-S para o Cenário 2 a Norte e um gradiente significativo no sector Este de O-E. Os valores piezométricos calculados pelo modelo para este cenário são também muito inferiores aos obtidos para o RN.

O Quadro 7.6 apresenta os dados de síntese do modelo para o cenário 2.

Quadro 7.6. Dados de síntese da simulação representada na Figura 7.7.

Balanco recarga-descarga natural [hm³/ano]	8,91E+00
Distribuição Imposta - Infiltração [hm³/ano]	4.07E+00
Balanco em nós com pot. Imposto [hm³/ano]	Peral-Moncarapacho: 6,35E+00
	Malhão: 9,17E-01
	Mar: -2,43E+00
Saída em nós com caudal Imposto [hm³/ano]	Público: 0
	Privado: -1,56E-03
	Rega: -8,92E-01
	Privado + Rega: -7,83E+00
	Total (modelo): -8,91E+00
Área total do domínio de escoamento [km²]	26,27

A distribuição imposta calculada pelo modelo, representativa da recarga por infiltração, mantém o valor de 4,07 hm³/ano, como seria de esperar.

No que respeita ao balanço natural do SALT para o cenário 2, verificam-se recargas provenientes das fronteiras SAPM (6,34 hm³/ano) e SAM (0,917 hm³/ano) e da infiltração (4,07 hm³/ano), resultantes numa recarga natural total de 11,3 hm³/ano, dos quais 2,43 hm³/ano são alvo de descarga através da fronteira mar. Ao comparar estes valores com os obtidos para o RN e o Cenário 1, verifica-se um aumento da recarga natural face ao RN, no entanto esta é ligeiramente inferior à recarga natural obtida para o Cenário 1. Quanto à descarga para o mar, o valor obtido para o Cenário 2 é uma vez mais intermédio, situando-se ligeiramente inferior ao valor obtido para o Cenário 1 e com uma diminuição face ao RN de 5,31 para 2,43 hm³/ano.

O actual cenário, à semelhança do cenário 1, representa um período temporal em que o SALT continuava a ser fortemente explorado, com extracções na ordem dos 9 038 004 m³/ano, promovendo fortes alterações ao funcionamento natural do aquífero.

Pode-se concluir que apesar do abandono das captações para abastecimento público, o presente cenário pouco difere do cenário 1. Em termos de quantificação verifica-se um decréscimo muito reduzido da transferência de água por parte das fronteiras SAPM e SAM para o SALT (0,583 e 0.0559 hm³/ano respectivamente) do cenário 1 para o cenário 2.

O valor real total estimado de extracções artificiais para o Cenário 2 é da ordem dos 9 hm³/ano. Para o modelo do cenário 2, que contava com 273 captações, obteve-se um valor modelado de 8,91 hm³/ano

O balanço geral do SALT para o cenário 2 calculou-se tendo em conta os valores sínteses devolvidos pelo modelo, nesta caso representados no Quadro 7.7:

Quadro 7.7. Dados devolvidos pelo modelo FEN para o balanço geral do SALT, para o Cenário 2.

Entradas por distribuição imposta [hm ³ /ano]	4,067x10 ⁰
Saídas em nós com caudal imposto [hm ³ /ano]	-8,906x10 ⁰
Balanço em nós com potencial imposto [hm ³ /ano]	4,839x10 ⁰
Balanço total [hm ³ /ano]	0

Como se pode verificar através do quadro anterior, o balanço total do aquífero é de 0 hm³/ano, tal como expresso pela equação de fluxo apresentada na secção 4, que exprime o balanço do aquífero em regime permanente. Este resultado é um indicador da excelente qualidade da simulação efectuada.

7.3.1. Mapa de resíduos entre Regime Natural e Cenário 2

Uma vez mais, procedeu-se à elaboração de um mapa de rebaixamentos produzidos pelas bombagens como forma a facilitar a visualização do impacto a nível do rebaixamento do actual regime de exploração comparado com o RN. Tal como descrito na secção 7.2.1, este consiste num mapa de resíduos que explicita as diferenças de potenciais calculados pela simulação de balanço hídrico para o RN e pela simulação do funcionamento das captações para rega e uso privado sobrepostas ao balanço hídrico natural.

Ao observar o mapa de rebaixamentos (Figura 7.8), a zona onde se registam os rebaixamentos mais acentuados continua a ser a mesma que no Cenário 1. O facto de ser nesta zona que se regista uma maior densidade de captações para rega, cujos volumes totais de extracção ascendem aos 97,5% (total das 204 captações) da exploração total do aquífero, contribui em grande medida para os rebaixamentos observados nesta área e consequentemente, o maior responsável pelos impactos provocados no funcionamento hidráulico do SALT.

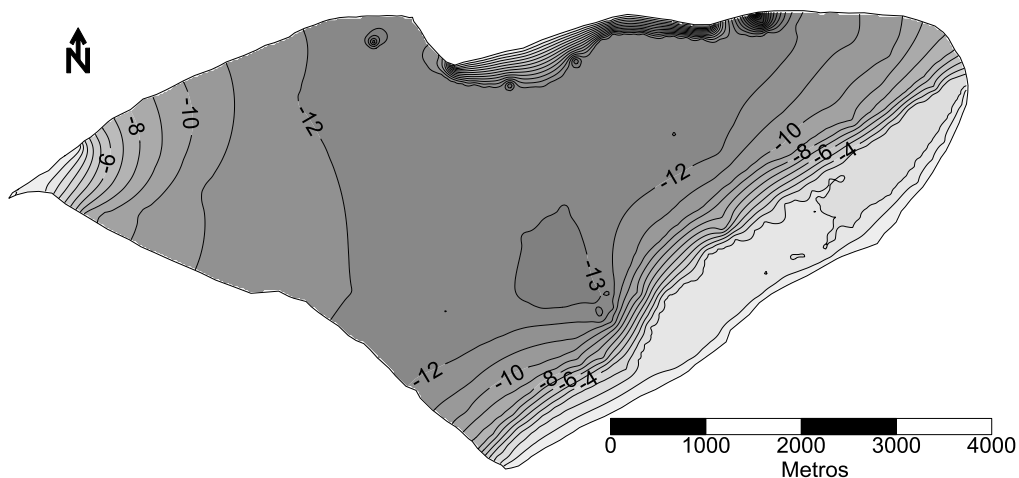


Figura 7.8. Rebaixamentos produzidos pela introdução das captações do cenário 2 no modelo de funcionamento hidráulico natural do aquífero.

Uma vez mais, verifica-se que este cenário retrata um regime de exploração muito intenso, que terá também originado alterações significantes no escoamento e balanço hídrico natural do SALT.

7.4. Simulação do regime de exploração – Cenário 3

A variante do modelo apresentada nesta secção difere da anterior pelo facto de em 2001, como acima mencionado, ter ocorrido o abandono da rega por águas

subterrâneas e, portanto, as extracções efectuadas neste sistema aquífero apenas terem por objectivo o uso doméstico nas áreas rurais sem ligação à rede de abastecimento urbano. Deste modo, esta simulação representa o regime de exploração expresso na 3ª fase temporal descrita na secção tal, ou seja as captações para abastecimento privado sobrepostas às condições naturais de funcionamento do aquífero.

No período temporal aqui ilustrado, que tem início em 2001, estima-se a existência de 251 captações, todas destinadas ao abastecimento privado, conforme a distribuição espacial representada na Figura 7.9.

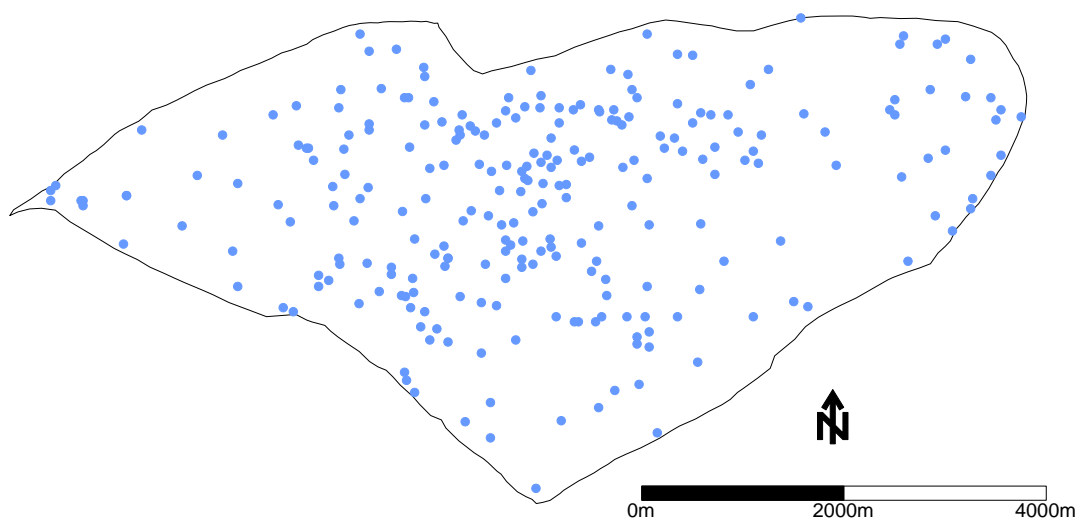


Figura 7.9. Sistema Aquífero de Luz-Tavira com a representação da distribuição espacial das 251 captações para abastecimento privado.

Assim sendo, através desta simulação pretende-se ilustrar as alterações no balanço hidrológico do SALT com base no regime de exploração que é efectuado no actual cenário, sucintamente descrito no Quadro 7.8.

Quadro 7.8. Captações e Extracções consideradas para o regime de exploração do Cenário 3.

Tipo de Abastecimento	Número de Captações	Caudal de Extracção [m³/ano. captação]	Caudal de Extracção [l/s. captação]	Caudal de Extracção Total [m³/ano]
Abastecimento Privado	251	806.2	0.0256	202356

A distribuição espacial dos potenciais hidráulicos calculados pelo modelo apresenta-se no mapa de equipotenciais da Figura 7.10.

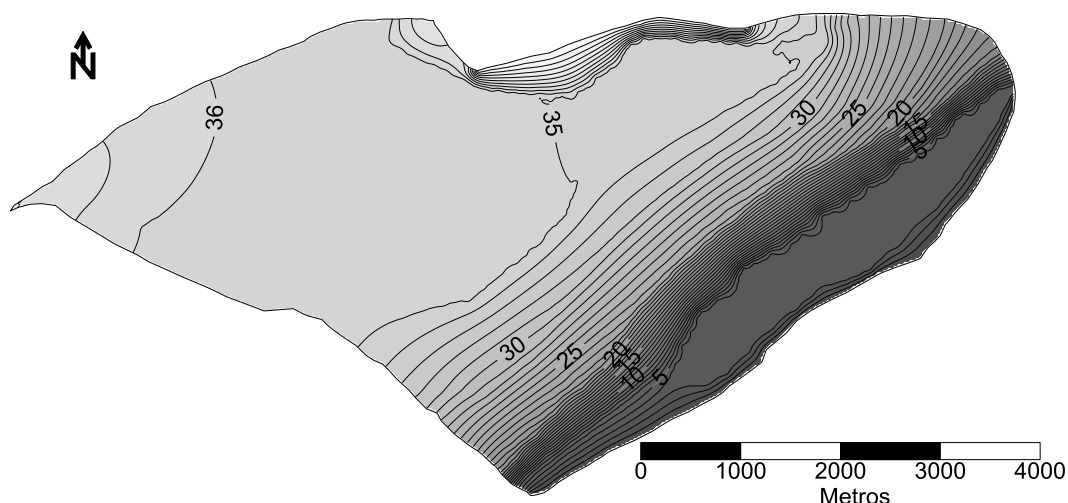


Figura 7.10. Equipotenciais geradas a partir dos resultados de uma simulação numérica de escoamento tendo em conta as as extracções do cenário 3 sobrepostas às condições naturais de funcionamento hidráulico do sistema.

Uma breve análise ao mapa de equipotenciais para o Cenário 3 permite identificar um fluxo de escoamento subterrâneo bem mais idêntico ao RN, quando comparado com os Cenários 1 e 2, bem como valores de potencial mais próximo dos obtidos para o RN.

Quadro 7.9. Dados de síntese da simulação representada na Figura 40

Balço recarga-descarga natural [hm³/ano]	2,01 E-01
Distribuição Imposta - Infiltração [hm³/ano]	4.07E+00
Balço em nós com pot. Imposto [hm³/ano]	Peral-Moncarapacho: 1,01E+00
	Malhão: 3,72E-01
	Mar: -5,25E+00
Saída em nós com caudal Imposto [hm³/ano]	Público: 0
	Privado: -3,79E-02
	Rega: 0
	Privado + Rega: 0
	Total (modelo): -2,01E-01
Área total do domínio de escoamento [km²]	26,27

Tal como sucede para os restantes cenários, o Quadro 7.9, apresenta os dados de síntese do modelo para o cenário 3.

A distribuição imposta calculada pelo modelo, representativa da recarga por infiltração, mantém o valor de 4,07 hm³/ano, como seria de esperar.

Respectivamente ao balanço natural do SALT para o cenário 3, tal como sucedido para os cenários 1 e 2, verifica-se a ocorrência de recarga das fronteiras SAPM (1,01 hm³/ano) e SAM (0,372 hm³/ano) e por parte da infiltração (4,07 hm³/ano), o que resulta numa recarga natural total de 5,45 hm³/ano, dos quais 5,25 hm³/ano sofrem descarga para a fronteira Mar. Comparando estes valores com os obtidos para os Cenários 1, 2 e RN, verifica-se que a recarga natural total para este cenário é ligeiramente superior à ocorrida para o RN (5,31 hm³/ano) e, conseqüentemente, muito inferior à recarga apresentada nos cenários 1 e 2. No que respeita a descarga para o mar, o valor obtido para o actual cenário é ligeiramente inferior ao ocorrido para o RN (de 5,31 para 5,25 hm³/ano), mais do dobro obtido para os cenários 1 e 2, no entanto, que se situam na ordem dos 2,27 e 2,43 hm³/ano.

O actual cenário representa um período em que se interromperam as extracções mais significativas no sistema. Note-se que o volume estimado de extracções actual total é de 202 356 m³/ano, valor extremamente inferior aos estimados para o Cenário 1 (9 838 004 m³/ano) e 2 (9 038 004 m³/ano), como tal, é de prever que o Cenário 3 apresente alterações bastante menos significativas ao regime e funcionamento em condições naturais do aquífero, quando comparado com os efeitos provocados pelos Cenários 1 e 2. É desde já possível afirmar que o Cenário 3 é o que apresenta impactes mais reduzidos não só às quantidades de balanço do SALT, como ao seu próprio regime de escoamento e, para além disso, que as captações para rega consistiam no maior impacte no que diz respeito ao nível piezométrico no sistema.

Comparando a recarga do sistema proveniente das fronteiras SAPM e SAM com os cenários 1 e 2, verifica-se um decréscimo muito significativo, com uma redução de volume de cerca de 7,00 hm³/ano aproximadamente para 1,38 hm³/ano no cenário actual.

O valor de extracções total observado para o Cenário 3 ascende aos 0,202 hm³/ano, ligeiramente superior ao estimado pelo modelo, que se situa na ordem dos 0,201 hm³/ano. Como já foi referido nos cenários anteriores, esta diferença deve-se ao facto do modelo considerar também a infiltração que ocorre quando devolve este valor. Esta simulação conta com 251 captações, todas para consumo humano privado.

O balanço geral do SALT para o cenário 3 foi calculado tendo em conta os valores sínteses devolvidos pelo modelo, neste caso representados no Quadro 7.10.

Quadro 7.10. Dados devolvidos pelo modelo FEN para o balanço geral do SALT, para o Cenário 3.

Entradas por distribuição imposta [hm ³ /ano]	4,067x10 ⁰⁰
Saídas em nós com caudal imposto [hm ³ /ano]	-2,007x10 ⁻⁰¹
Balanço em nós com potencial imposto [hm ³ /ano]	-3,866x10 ⁰⁰
Balanço total [hm ³ /ano]	-1,198x10 ⁻⁰⁶

Como se pode verificar através do quadro anterior, o balanço total do aquífero é da ordem de $-1,2 \times 10^{-06}$ hm³/ano, ou seja, praticamente igual a 0, tal como expresso pela equação de fluxo apresentada na secção 4, que exprime o balanço do aquífero em regime permanente. Este resultado demonstra a excelente qualidade da simulação efectuada.

7.4.1. Mapa de resíduos entre Regime Natural e Cenário 3

Tal como para os cenários anteriores, de forma a avaliar o impacte produzido pelo regime de exploração simulado no Cenário 3 face ao RN, procedeu-se ao cálculo de diferenças de potenciais calculados por ambas as simulações, do que resultou um mapa de resíduos ou de rebaixamentos (Figura 7.11).

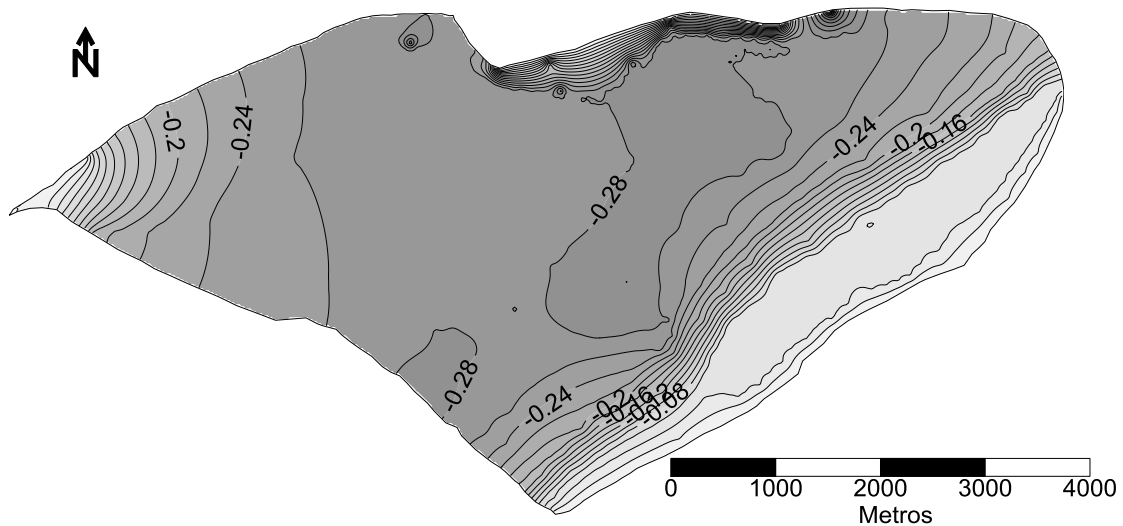


Figura 7.11. Rebaixamentos produzidos pela introdução das captações do cenário 3 no modelo de funcionamento hidráulico natural do aquífero.

Ao observar o anterior mapa de rebaixamentos, verifica-se que os rebaixamentos mais acentuados se registam na mesma zona que para os Cenários anteriores, no entanto, com valores bastante inferiores, com uma redução da ordem dos 12-14 m para os 0,2

m. O próprio valor máximo de rebaixamento obtido (-0,49 m) indica não só que o sistema apresenta uma forte capacidade de recuperação para as condições do Cenário 3, tal como um reduzido impacte no sistema perante tais condições.

Simulados e analisados os cenários de exploração, verifica-se que o cenário 3 não apresenta impactes significativos nos regimes de escoamento e níveis piezométricos do aquífero, comparando com as condições naturais do mesmo. O Cenário 1 é sem dúvida o mais nocivo para o sistema, apresentando rebaixamentos que podem ir até aos 14 m. Por outro lado, pode-se assumir que o cenário 3 apresenta também impactes devido ao elevado nível piezométrico obtido, que nalgumas regiões, resulta em registos de água a profundidades inferiores a 1 m. Este facto pode implicar problemas na agricultura.

No que se refere ao balanço entre os diferentes sistemas, pode-se referir à recarga proveniente do SAM e SAPM para o SALT como recarga induzida pela exploração, isto é, o elevado rebaixamento produzido pela exploração agrícola verificada nos cenários 1 e 2 permite um incremento na recarga proveniente dos sistemas SAM e SAPM.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho realizado nesta dissertação consistiu numa série de etapas que poderão ser discriminadas em análise da piezometria observada, definição das condições de fronteira, definição das zonas de transmissividade e infiltração e calibração dos valores de transmissividade do modelo em elementos finitos de escoamento do SALT em regime permanente.

A análise da piezometria consistiu num processo exaustivo de recolha de dados e medições no campo, a fim de definir um conjunto de dados válidos que permitissem a realização de mapas piezométricos reais para utilizar como referência na construção do modelo. Após esta primeira etapa, redefiniram-se as condições de fronteira do modelo, com atribuição de uma nova condição fronteira a norte do SALT, com um potencial imposto, como resultado da influência do escoamento proveniente do sistema aquífero Malhão.

O passo seguinte consistiu na redefinição das zonas de transmissividade de acordo com a piezometria observada e na redefinição das camadas de infiltração. Posterior à definição das zonas de transmissividade, procedeu-se à calibração do modelo por modelação inversa. Esta etapa permitiu definir a distribuição espacial de transmissividade, o que por seu lado aproximou o funcionamento do modelo à realidade.

Apesar das etapas de construção do modelo estarem bem discriminadas, todo o processo teve uma vertente cíclica, sendo natural saltar da vertente de calibração, para a redefinição das condições de fronteira ou das zonas de transferência, visto que o Sistema Aquífero Luz-Tavira não apresenta um comportamento fácil de retratar através da modelação. A construção do modelo de escoamento do SALT revelou-se uma tarefa complicada, dada a complexidade do sistema e o reduzido conhecimento que se tem acerca do mesmo. No entanto, pode-se considerar que o modelo final obtido representa com alguma precisão o observado, não só a nível piezométrico, como também a nível dos gradientes obtidos. O coeficiente de correlação entre os valores de piezometria observados e os valores calculados pelo modelo é de 0,9927, o que representa uma correlação extremamente elevada entre o valor observado e o calculado pelo modelo.

Após a calibração do modelo, considerou-se o modelo apto como ferramenta para analisar cenários de exploração. Foram simulados cenários de exploração detectados

na região durante os últimos anos e conseqüentemente, procedeu-se à análise dos mesmos. Desta análise concluiu-se que sob um regime de sobre-exploração, o SALT ressentiu-se sob a forma de apresentar um elevado rebaixamento nos seus níveis piezométricos. No entanto, verificou-se que é possível obter um equilíbrio entre recarga e extracção do sistema, visto que num regime em que apenas as captações para consumo privado estão em funcionamento, o impacto no sistema a nível piezométrico é praticamente nulo. No entanto, este cenário resulta noutra tipo de impactes, respeitantes à baixa profundidade a que se regista a água, que, nalgumas zonas é inferior a 1 m e, como tal, poderão surgir impactes nos ecossistemas agrícolas.

Relativamente aos balanços registados entre o SALT e os sistemas que contribuem para a sua recarga (SAM e SAPM), verifica-se a ocorrência do fenómeno de recarga induzida aquando da sobre-exploração do aquífero. Isto é, a extracção de água provocada pela agricultura permite um incremento na recarga do SALT proveniente dos sistemas SAPM e SAM.

De forma a possibilitar conclusões mais apuradas acerca dos regimes de exploração, e, mais importante, acerca dos contributos hidráulicos entre os diferentes sistemas, é necessário dar seguimento ao trabalho efectuado na presente dissertação, com a realização do modelo em regime transitório, a fim de verificar os efeitos dos episódios de precipitação no regime de escoamento do SALT, a definição dos coeficientes de armazenamento e a variação piezométrica em função do tempo e precipitação na região.

No seu todo, considera-se que os objectivos da dissertação foram alcançados, culminando este trabalho na obtenção de uma ferramenta capaz prever as respostas do Sistema Aquífero Luz-Tavira perante diferentes cenários de exploração.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E BIBLIOGRAFIA

Almeida, C., Mendonça, J., Jesus, M. e Gomes, A. (2000). Sistemas Aquíferos de Portugal Continental, Relatório. Lisboa: INAG, 2000.

Barret, M. e Charbeneu, R. (1996). A Parsimonious Model for Simulation of Flow and Transport in a Karst Aquifer. Center for Research in Water Resources. Univ. of Texas (Austin). 149 pp.

Bear, J. e Verruijt, A. (1987). Modeling Groundwater Flow and Pollution. Dordrech. The Netherlands : D. Reidel Publ.Co, 1987. 414 pp.

Bennett, R. e Meyer, R. (1952). Geology and groundwater resources of the Baltimore area. Mines and Water Resour. Bull. 4, Maryland Dep. of Geol., 1952.

Bonte, M. (1999). A Chemical and Isotopic Study After the Hydrogeochemical Processes Occurring Under Irrigated Land in Campina da Luz, Algarve, Portugal. MSc, Vrije Universiteit, Amsterdam, 76 pp.

Carrera, J., Alcolea, A., Medina, A., Hidalgo, J. e Sooten, L. J. (2005). Inverse problem in hydrogeology. J Hydrogeol (Ed. Especial: The future of Hydrogeology), Vol.13, 206-222 pp.

Carrera, J. e Neuman, S. (1986). Estimation of Aquifer Parameters Under Transient and Steady-State Conditions. Water Resources Research, 1986, Vols. 22, no 2, 199-242 pp.

Cooley, R. e Naff R. (1990). Regression of Ground-water flow. US Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, book 3, chapter B4, 232 pp.

Costa, J. (2006). Calibração Inversa de Um Modelo de Escoamento Subterrâneo, com Aplicação aos Sistemas Aquíferos de Albuferia-Ribeira de Quarteira e Quarteira. Dissertação elaborada no âmbito do Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2006. 119 pp.

Custodio, E. e Llamas, R. (1976). Hidrologia Subterranea - Tomo II. Barcelona : Ed. Ómega, 1976. ISBN: 9788428202817.

De Vries, J., e Schwan, J., (1999). Groundwater resources in Algarve, Portugal. Internal report Hydrology Department, Vrije Universiteit, Amsterdam.

Doherty, J. (2002). PEST – Model Independent Parameter Estimation. Watermark Numerical Computing. Corinda, Australia, 279 pp.

Faria, J., Godinho, S., Almeida, M. e Machado, M. (1981). Estudo Hidroclimatológico da Região do Algarve. O Clima de Portugal. Fasc. XXVII. INMG, Lisboa.

Gable, C., Trease, H. e Cherry, T. (1996). Geological applications of automatic grid generation tools for Finite Elements Applied to Porous Flow Modeling. Numerical Grid Generation in Computational Fluid Dynamics and Related Fields. Soni, B. K.; Thompson, J. F.; Hausser, H.; Eisman, P. R., 1996, Vols. Engineering Research Center, Mississippi State Univ. Press, 9 pp.

Hill, M. (1998). Methods and Guidelines for Effective Model Calibration. Water Resource Investigations Report 98-4005, US Geological Survey, Water Resources Division, Denver.

Hugman, R. (2009). Transient-State Calibration of a Ground-Water Flow Model and Simulation of Scenarios of Development for the Almádena-Odeáxere Aquifer System. Dissertação elaborada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente na área de Modelação Ambiental, Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Faro, 2009.

Huyakorn, P. e Pinder, G. (1983). Computational Methods in Subsurface Flow. New York (EUA) : Academic Press, 1983. 473 pp.

Kinzelbach, W. (1986). Groundwater modelling. An introduction with sample programs in Basic. Developments in Water Science, 1986, Vol. 25, 333 pp.

Loureiro, N. e Coutinho, M. (1995). Rainfall Changes and Rainfall Erosivity Increase in the Algarve (Portugal). Catena, 24, 99. 55-67 pp.

MAOT, Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território (2004). Plano Regional de Ordenamento do Território - Algarve. Volume 2. Anexo H.: Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Algarve, 2004.

Martins, J. (2007). Inverse Calibration of a Groundwater Flow Model for the Almádena-Odeáxere Aquifer System (Algarve – Portugal). Dissertação elaborada no âmbito do

Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente . Faro, 2007.

MCOTA, Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente. (2003). Recursos Hídricos no Algarve. Situação em Novembro de 2003. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Algarve. s.l. : Direcção de Serviços de Monitorização Ambiental, 2003.

Monteiro, J. (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 obtenção do grau de Doutor em Ciências, Faculdade de Ciências da Universidade de Neuchâtel. Suíça, 2001. 138 pp.

Monteiro, J. e Costa, M. (2004). Dams, Groundwater Modelling and Water Management at the Regional Scale in a Coastal Mediterranean Area (The Southern Portugal Region–Algarve). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, nº3, June 2004, 2004. 157-169 pp 157-169..

Monteiro, J., Martins, P. e Martins, R. (2005). Estudo Hidrogeológico para o Dimensionamento do Sistema de Abastecimento de Água do Campo de Golfe e estruturas Turísticas Associadas de Vila Sol. Actas do 7º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (SILUSBA). Univ. Évora. Org. APRH, ABRH, AMCT, INGRH. Resumo e doc. elect. CD-ROM, 2005. 15 pp.

Monteiro, J., Martins, R. e Santos, I. (2002b). Implementação de Ferramentas de Pré e Pós Processamento Para um Modelo de Elementos Finitos Usando um Sig. 6º Congresso da Água. Tema: Planeamento e Gestão dos Recursos Hídricos APRH, Porto.

Monteiro, J., Nunes, G. e Martins, J. (2006). Quantificação do consumo de água subterrânea na agricultura por métodos indirectos – Detecção remota. IX Encontro de Utilizadores de Informações Geográficas (ESIG). 15-17 de Novembro, Tagus Park, Oeiras. Doc. Electrónico em CD-ROM. 15 pp.

Monteiro, J., Nunes, L., Vieira, J., Martins, R., Stigter, T., Santos, J. e Reis, E. (2003b). Síntese Bidimensional dos Modelos Conceptuais de Funcionamento Hidráulico de Seis Sistemas Aquíferos do Algarve (Baseada em Modelos Numéricos de Escoamento Regional). in Ribeiro, L. & Peixinho de Cristo, F. (eds.) As Águas Subterrâneas no Sul

da Península Ibérica. Associação Internnacional de Hidrogeólogos, APRH Publicações, Lisboa. 159-169 pp.

Monteiro, J., Ribeiro, L. (2005). Impacto da Exploração de Água Subterrânea no Sector Ocidental do Sistema Aquífero de Querença-Silves.

Monteiro, J.; Santos, J. e Martins, R. (2002a). 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, 2002.

Monteiro, J. e Silva, M. (1998). Modelação Matemática de Escoamento em Aquíferos Cársicos – Discussão de Objectivos e Métodos Baseada num Caso de Estudo. Actas do 4º Congresso da Água. Tema: Águas subterrâneas APRH. Pp255-266 and electronic document CD-ROM 15 pp.

Monteiro, J., Stigter, T. e Martins, R.R. (2003a). Modelo Matemático de Simulação de Escoamento Regional do Aquífero da Luz de Tavira (Algarve-Portugal). Ciências da Terra. Revista do Dep. Ciênc. da Terra. Actas do VI Congresso Nacional de Geologia. Univ. Nova de Lisboa. Fac. Ciênc. e Tecn., 2003, Vols. Resumo pp 66 e documento electrónico em CD-Rom. 4 pp.

Mota, A. e Dias, A., (2000). Aproveitamento Hidroagrícola do Sotavento Algarvio. Lisboa, Portugal : IHERA, 2000. 23 pp.

Neuman, S. (1973). Calibration of distributed parameter groundwater flow models viewed as a multiple-objective decision process under uncertainty. Water Resources. 9(4), 1973. 1006-1021 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, FCT, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa (Portugal). 356 pp.

Nunes, G. (2006). Quantificação do consumo de água subterrânea na agricultura por métodos indirectos – Detecção remota. Aplicação ao Sistema Aquífero Querença-Silves. Projecto tecnológico em Engenharia do Ambiente. Universidade do Algarve, Faro.

Poeter, E., e Hill, M. (1996). Unrealistic Parameter Estimates in Inverse Modelling: A Problem or a Benefit Calibration? MODELcare, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.

Poeter, E. e Hill, M. (1997). Inverse Models: A Necessary Next Step in Ground-Water Modeling. *Ground Water J.*, Vol.35, No.2, Março-Abril.

Quinlan, J. (1996). The applicability of numerical models to adequately characterize ground-water flow in karstic and other triple-porosity aquifers. *Subsurface Fluid-Flow (Ground-Water and Vadose Zone) Modeling*, 1996. 114-133 pp.

Reis, E. (2007). Contribuição para o Cálculo do Balanço Hídrico dos Principais Sistemas Aquíferos do Algarve : Ministério do Ambiente do Ordenamento do Território e Desenvolvimento regional, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Algarve, 2007.

Rodrigues, F. (2007). Avaliação dos Impactes associados a Alterações no Regime de Exploração do Sistema Aquífero Luz-Tavira através do uso de um Modelo Numérico de Escoamento. Projecto Tecnológico em Engenharia do Ambiente, Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente. Faro, 2007.

Santos, F. e Miranda, P. (2006). Alterações climáticas em Portugal: Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação (Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts, and Adaptation). Project SIAM II. Gradiva, Lisbon, Portugal, 2006.

Scanlon, B., Mace, R., Barret, M. e 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*, 2003, Vol. 276. 137–158 pp.

Silva, M. (1984). Hidrogeologia do Algarve Oriental. Dissertação para Obtenção do Grau de Doutor em Geologia. Hidrogeologia do Algarve Oriental. Departamento de Geologia da FCUL, 1984. 260 pp.

Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH). (2010). - «<http://snirh.pt/index.php?idMain=2&idItem=1>» Acedido em Abril de 2010.

Stallman, R. (1956). Numerical analysis of regional water levels to define aquifer hydrology. *Eos Trans. AGU*, 37(4), 1956. 451-460pp.

Stigter, T. e Carvalho Dill, A., (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. (2005). Integrated analysis of hydrogeochemistry and assessment of groundwater contamination induced by agricultural practises. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Ciências da Engenharia, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal ,2005. 195 pp..

Stigter, T., Carvalho Dill, A., Ribeiro, L. e Reis, E. (2006). Impact of the shift from groundwater to surface water irrigation on aquifer dynamics and hydrochemistry in a semi-arid region in the south of Portugal. 2006, Vol. 85. 121-132 , pp.

Taylor, J. e Greene, E. (2001). Quantitative Approaches in Characterizing Karst Aquifers. U.S. Geological Survey Karst Interest Group Proceedings, Fevereiro de 2001, 13-16 pp.

Vieira, J. e Monteiro, J. (2003). Atribuição de Propriedades a Redes Não Estruturadas de Elementos Finitos Triangulares (Aplicação ao Cálculo da Recarga de Sistemas Aquíferos do Algarve) . As Águas Subterrâneas no Sul da Península Ibérica. Assoc. Intern. Hidrog. APRH publ., 2003. 183-192 pp.

Vieira, J., Cunha, M., Lucas, H., Monteiro, J., Nunes, L. e Ribeiro, L. (2006). Desenvolvimento de um instrumento de apoio à decisão para a gestão do Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água do Algarve. 2006, 12º Encontro Nacional de Saneamento Básico (ENaSB), 24 a 27 de Outubro. Estoril, Portugal.

Wang, H. e Anderson, M. (1982). Introduction to groundwater modeling finite difference and finite element methods. New York : Freeman, 1982. 237 pp.