



# Calibração de um modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica da Ribeira de Quarteira

**Tiago Carmo Correia**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente**

**Dissertação efetuada sob a orientação de:**

Professora Doutora Amélia Carvalho

Professor Doutor Tibor Stigter

**FARO**

**2013**

# Calibração de um modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica da Ribeira de Quarteira

## DECLARAÇÃO DE AUTORIA DE TRABALHO

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

O autor:                         Tiago Correia                        

## COPYRIGHT

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

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar o maior agradecimento vai para o meu núcleo familiar e namorada por todo o apoio concedido em momentos mais conturbados da realização deste trabalho. O vosso apoio foi especial e fez a diferença pois sem ele teria certamente desistido face às dificuldades encontradas.

Agradeço também a todos os elementos académicos da Universidade do Algarve que me auxiliaram na resolução de diversas adversidades, erros do modelo e na elevação do moral nomeadamente os meus colegas e amigos de curso sem os quais não teria atingido esta meta.

Não podia deixar de constar nesta lista o Doutor Tibor Stigter pela coragem com que me ajudou em tudo o que conseguiu neste desafio. A sua coragem, persistência e polivalência académica (domina um pouco de tudo!) foram sem dúvida um catalisador deste trabalho.

Por fim, mas não menos especial, um grande agradecimento ao pessoal da Universidade de Aveiro que me recebeu de braços abertos e que sem dúvida me fizeram dar passos de gigante em direção a esta grande meta. Cada dia de trabalho foi equivalente a um mês com vocês! Obrigado a todos que me fizeram sentir em casa e principalmente ao Doutor João Pedro Nunes e ao Doutor João Rocha que foram os meus mentores numa fase crucial pois tratam o SWAT por tu!

**OBRIGADO!**

## RESUMO

O Algarve é uma região que apresenta algumas particularidades no que toca às necessidades hídricas e respetiva disponibilidade. O consumo de água é relativamente elevado e as necessidades hídricas são mais elevadas nos meses de Verão quando a precipitação é escassa. Deste modo é de grande importância a realização de uma boa gestão dos recursos hídricos de modo a garantir a sustentabilidade dos recursos naturais. Neste âmbito surge a aplicação de *softwares* de modelação hidrológica que permitem realizar prognósticos simulando as condições a que o meio está sujeito.

Na presente dissertação pretende-se aplicar o modelo SWAT para modelar as condições atuais registadas na bacia hidrográfica da Ribeira de Quarteira. Pretende-se também realizar a modelação de cenários de alterações climáticas previstas para dois períodos futuros: 2020-2050 e 2069-2099.

A construção do modelo foi realizada em ArcSWAT, a análise de *outputs* foi feita em SWAT\_Check e para a calibração e validação do modelo utilizou-se o *software* SWAT-CUP4. Os resultados obtidos na calibração e validação são relativamente satisfatórios tendo em conta a fraca qualidade e quantidade dos dados de entrada disponíveis e considerando-se o meio geológico cársico onde se pretendeu realizar a modelação.

Os cenários simulados tiveram como base dois modelos climáticos realizados no âmbito do projeto CLIMWAT (ICTP-REGCM3 e CNRM-RM5.1). Os resultados de ambos modelos apontam para um aumento de temperatura e diminuição generalizada de precipitação que têm como consequência um aumento significativo de evapotranspiração real e uma diminuição muito grande de recarga profunda e do caudal instantâneo. Um dos modelos aponta para, no período 2020-2050, um aumento de eventos extremos (secas e cheias). Estas previsões vêm reforçar a grande necessidade de uma boa gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave: gestão integrada de água, SWAT, modelação hidrológica, Ribeira de Quarteira, alterações climáticas.

## ABSTRACT

The Algarve is a region with some peculiarities in relation to water needs and availability. The water consumption is relatively high and water needs increase during the summer months when rainfall is scarce. It is therefore very important to conduct a proper management of water resources to ensure the sustainability of the natural resources. In this context the application of adequate hydrological modeling software allows making predictions by simulating the environment conditions.

This dissertation intends to apply SWAT to model the actual meteorological conditions recorded in the basin of Ribeira de Quarteira. It also aims intended to perform the modeling of projected climate change scenarios for two future periods: 2020-2050 and 2069-2099.

The model construction was performed in ArcSWAT, the analysis was made in SWAT\_Check and for calibration and validation of the model SWAT-CUP4 was used. The results obtained in the calibration and validation are relatively satisfactory, taking into account the poor quality and quantity of the available input data and considering the geological formations (partly karst) where the modeling took place.

The simulated scenarios were based on two climate models implemented under the project CLIMWAT (ICTP-REGCM3 and CNRM-RM5.1). The results of both models show an increase in temperature and decrease in precipitation which results in a significant increase in evapotranspiration and a decrease in deep recharge and instantaneous flow rate. In the period 2020-2050, one model points to an increase of extreme events (droughts and floods). These predictions reinforce the need of good hydrological management practices.

Keywords: integrated water management, SWAT, hydrological modeling, Ribeira de Quarteira, climate change.

## ÍNDICE GERAL

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Âmbito .....	1
1.2	Objetivo .....	1
1.3	Gestão de recursos hídricos no Algarve .....	1
1.4	Disponibilidade vs necessidades hídricas.....	3
1.5	Utilidade dos modelos hidrológicos .....	5
1.6	Organização da dissertação.....	6
2.	MODELO SWAT.....	7
2.1	ArcSWAT .....	10
2.2	SWAT_Check.....	10
2.3	SWAT-CUP4.....	10
3.	CASO DE ESTUDO.....	15
3.1	Enquadramento regional.....	15
3.2	Caracterização regional .....	16
3.3	Hidrogeologia .....	18
3.3.1	Recursos hídricos superficiais.....	18
3.3.2	Recursos hídricos subterrâneos .....	20
3.3.3	Conexões hidráulicas .....	21
3.4	Topografia.....	22
3.5	Uso de solo .....	25
3.6	Tipo de solo.....	26
3.7	Clima .....	28
3.8	Tratamento de dados .....	30
4.	APLICAÇÃO DO MODELO SWAT .....	35
4.1	Estratégia de calibração do modelo .....	36
4.1.1	Manipulação dos dados de entrada .....	37
4.1.2	Parametrização inicial do modelo .....	39
4.1.3	Simulação e análise do modelo em ArcSWAT .....	42
4.1.4	Introdução do modelo em SWAT-CUP4 .....	45

4.2 SWAT-CUP4.....	45
4.2.1 Preparação dos parâmetros e dados de entrada.....	46
4.2.2 Calibração do modelo.....	51
4.2.3 Validação do modelo.....	60
5. CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS.....	63
5.1 ICTP-REGCM3.....	63
5.2 CNRM-RM5.1.....	71
6. CONCLUSÃO.....	81
BIBLIOGRAFIA.....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Enquadramento regional da bacia hidrográfica da ribeira de Quarteira ....	15
Figura 3.2 - Unidades geomorfológicas presentes no Algarve e respetivo enquadramento na bacia hidrográfica da ribeira de Quarteira .....	17
Figura 3.3 - Bacia hidrográfica da ribeira de Quarteira e cursos de água que constituem a ribeira de Quarteira .....	19
Figura 3.4 - Bacia hidrográfica da ribeira de Quarteira e respetivos sistemas aquíferos .....	21
Figura 3.5 – Representação do modelo digital de terreno da bacia hidrográfica da ribeira de Quarteira .....	23
Figura 3.6 – Representação dos declives da bacia hidrográfica da ribeira de Quarteira	23
Figura 3.7 - Uso de solos da área em estudo .....	26
Figura 3.8 - Tipos de solo da área em estudo.....	27
Figura 3.9 - Localização das estações meteorológicas e udométricas utilizadas para obtenção de dados .....	28
Figura 3.10 - Estações consideradas para precipitação e velocidade do vento.....	29
Figura 3.11 - Estações consideradas para humidade, radiação solar e temperatura ....	30
Figura 4.1 – Balanço hidrológico do ArcSWAT .....	42
Figura 4.2 – Correção de hidrograma observado que claramente apresenta anomalias .....	48
Figura 4.3 – Localização das estações hidrométricas na bacia hidrográfica da ribeira de Quarteira.....	49



Figura 4.4 – Representação das subbacias e respectivas estações hidrométricas que medem o caudal gerado nestas.....	50
Figura 4.5 – Hidrograma observado vs hidrograma simulado no SWAT-CUP4.....	52
Figura 4.6 – Excerto de análise de sensibilidade para a estação Ponte Ribeira do Rio Seco.....	54
Figura 4.7 – Hidrograma simulado vs hidrograma observado para a estação Ponte Ribeira do Rio Seco .....	56

# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1 Âmbito**

Os recursos hídricos encontram-se no topo das preocupações ambientais do século XXI. O meio hídrico, enquanto ecossistema, apresenta-se com uma elevada sensibilidade e requer a criação de medidas específicas que salvaguardem as suas características biofísicas. Para além disto o ciclo hidrológico reveste-se de uma elevada imprevisibilidade e, nesse sentido, as ações de planeamento e gestão de recursos hídricos devem encontrar soluções que permitam ultrapassar períodos em que haja escassez ou ausência de precipitação. De facto este fenómeno de escassez de precipitação, vulgarmente designado por seca, tem recentemente atingido de forma particularmente intensa a maior parte do território Português. Este fenómeno é intensificado pelo nível crescente da procura de água e pela crescente complexidade e vulnerabilidade dos sistemas que a gerem e a disponibilizam à população e às suas atividades. No âmbito da presente dissertação apresentam-se como ferramentas de apoio à decisão e gestão dos recursos hídricos os modelos hidrológicos. Pretende-se que o modelo desenvolvido possa ser utilizado futuramente para prever os impactes de determinadas atividades e ações no meio hídrico e deste modo auxiliar a tomada de decisão.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo da presente dissertação é o desenvolvimento e a calibração de um modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica da Ribeira de Quarteira no Algarve. Este modelo tem como propósito o estudo do impacte de dois cenários de alterações climáticas (ICTP-REGCM3 e CNRM-RM5.1).

## **1.3 Gestão de recursos hídricos no Algarve**

O abastecimento público de água na região do Algarve foi, até ao final da década de 90, realizado totalmente a partir de águas subterrâneas. Cada um dos 16 municípios

dimensionou de forma local e independente o seu sistema de abastecimento público dificultando bastante o controlo e gestão dos recursos hídricos (Stigter, 2011a). Nos dois últimos anos do século XX realizou-se a substituição dos sistemas de abastecimento público por águas subterrâneas para águas superficiais. Nessa altura a fase final da construção das grandes barragens atualmente existentes no Algarve, foi acompanhada pela construção de infraestruturas de abastecimento de água e o abastecimento passou a ter origem nas albufeiras do Beliche, Odeleite, Funcho e Bravura (Monteiro, 2006). Em 2004 e 2005 o Algarve foi assolado por uma seca severa e o nível baixo da água nas barragens inviabilizou a sua utilização para abastecimento público (em particular as barragens do Funcho e Arade). Perante este cenário e de modo a colmatarem-se as necessidades hídricas da população recorreu-se ao abastecimento por reservas das albufeiras (Odeleite), por reativação de algumas captações subterrâneas municipais e por exploração do maior e mais produtivo aquífero do Algarve – Querença Silves (Do Ó e Monteiro, 2005, Stigter *et al.*, 2008, 2009). Esta situação acabou por demonstrar as fragilidades de um modelo de gestão apoiado única e exclusivamente nos recursos hídricos superficiais.

Em 1997 implementou-se a Directiva Nitratos que tem como objetivo a redução da poluição das águas causada ou induzida por nitratos de origem agrícola e impedir a propagação da referida poluição (Directiva 91/676/CEE). No Algarve foram identificadas duas Zonas Vulneráveis (ZV) localizando-se ambas no Sotavento (bacia hidrográfica da Ria Formosa) – ZV de Faro e ZV de Luz-Tavira. Para cada uma das ZV foram definidos planos de intervenção com vista a eliminar ou minimizar tanto quanto possível os riscos de poluição difusa de origem agrícola que se baseiam na aplicação de um Código de Boas Práticas Agrícolas (MADRP, 1997). Deste modo pretende-se reduzir a lixiviação de nitratos para as águas subterrâneas tendo especial atenção às medidas referentes à elaboração dos planos de fertilização equilibrada (Stigter, 2011b). A implementação desta directiva revelou-se bastante importante pois permitiu caracterizar e analisar o estado qualitativo das massas de água. A preocupação, em termos de saúde humana, relativamente à presença de nitratos na água prende-se com a sua toxicidade que pode resultar em doenças (*e.g.* doença dos bebés azuis). Quando ocorrem situações de poluição de águas superficiais por nitratos podem

verificar-se casos de eutrofização levando à degradação de habitats e à perda de biodiversidade (Stigter, 2011b). A qualidade das massas de água é um dos parâmetros basilares numa boa gestão de recursos hídricos e por isso esta directiva reveste-se de especial importância.

No ano 2000 entrou em vigor a directiva 2000/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro, que é resumidamente designada por Directiva-Quadro da Água (DQA). O objetivo da DQA passa por alcançar em 2015 o bom estado de todas as águas de superfície e subterrâneas. De modo a cumprir este objetivo logrou-se caracterizar e avaliar a qualidade das águas realizando uma abordagem integrada de proteção das águas de superfície e subterrâneas (MAOTDR, 2006). Através da implementação desta directiva pretende-se promover uma utilização prudente e racional dos recursos naturais. Deste modo estes devem ser geridos considerando as inter-relações entre a água, o solo, a fauna e a flora (Vieira, 2003). Esta é claramente uma abordagem moderna da gestão da água que nos aponta no sentido de uma gestão integrada dos recursos hídricos e dos seus benefícios.

Uma gestão integrada de recursos hídricos, aplicada ao Algarve, pode consistir na utilização de águas superficiais e águas subterrâneas de modo a responder às necessidades hídricas desta região sem que se verifiquem desequilíbrios a nível ambiental. Deste modo as águas superficiais podem ser captadas durante os períodos de maior precipitação (permite-se a recarga dos aquíferos neste período) enquanto as águas subterrâneas podem ser captadas nos períodos de menor precipitação (Wanielist *et al.*, 1997 *apud* Monteiro, 2006).

#### **1.4 Disponibilidade vs necessidades hídricas**

A sobre-exploração dos recursos hídricos pode apresentar consequências graves para a deterioração de vários ecossistemas. A deterioração quantitativa e qualitativa dos recursos hídricos apresenta-se como um problema real que já afeta o presente e afetará certamente o futuro se não forem tomadas decisões de gestão que nos conduzam a uma utilização sustentada e sustentável destes recursos. As alterações climáticas podem agravar este problema devido à subida do nível do mar, diminuição

da precipitação e aumento da temperatura média (Giorgi, 2006; Santos e Miranda, 2006). Estas alterações redundam ainda numa diminuição da recarga dos aquíferos e um aumento do efeito de intrusão salina (Stigter *et al.*, 2009, 2010, *in press*). Segundo Cunha *et al.* (2003) os impactes das alterações climáticas fazem-se sentir tanto do lado da procura como do lado da oferta de água. Relativamente à oferta é de esperar uma alteração do regime de precipitações, o que conduz a variações do volume e da distribuição temporal da disponibilidade de água, quer superficial quer subterrânea. Do lado da procura de água são de prever aumentos no consumo para suprimir as necessidades hídricas da agricultura e principalmente das necessidades associadas ao turismo. Deve-se ainda considerar o impacte na qualidade da água sendo de prever uma diminuição desta (Vieira, 2003). As consequências das alterações climáticas variam de intensidade consoante a região geográfica. As regiões litorais podem ser especialmente afetadas devido à subida do nível médio das águas do mar previsto, que fará avançar a cunha salina (Cunha *et al.*, 2003).

O Algarve tem algumas características particulares relativamente à disponibilidade da água e à sua necessidade. No Verão as necessidades hídricas (rega e turismo) são bastantes superiores ao que ocorre no Inverno. Este facto aliado ao clima mediterrânico, característico desta região, faz coincidir os meses onde o consumo é maior com precipitações escassas ou nulas gerando assim um desequilíbrio sazonal entre consumo e recarga.

A distinção das origens entre recursos superficiais e subterrâneos é à data impossível de realizar com elevada precisão e exatidão. Isto deriva do facto de os circuitos de recolha e distribuição no Algarve serem na sua maioria autónomos e não estarem integrados. Este facto apresenta-se como uma limitação quer à quantificação dos volumes de água consumidos quer à aplicação de uma gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos conforme foi preconizado na DQA (Do Ó e Monteiro, 2006).

O volume de água consumido no Algarve é elevado (280 hm<sup>3</sup> dos quais 70% são para rega) e nem todas as captações existentes estão licenciadas. Aliado a isto verifica-se ainda que, no interior do Algarve, existe muita ocupação humana dispersa o que

dificulta a contabilização do consumo para o sector doméstico. De facto as bases de dados fornecidas pela ARH Algarve estão em atualização e apresentam várias lacunas pois diversas captações não apresentam o volume extraído (ARH Algarve, 2011a). De referir que estes valores são apresentados como estimativas pois não se conhece o volume de recarga e extração dos denominados “aquíferos indiferenciados”. Estes aquíferos não são contabilizados pois o estado atual de conhecimento não nos permite definir a sua geometria e estabelecer as suas fronteiras. Deste modo é provável que tanto os volumes extraídos quanto os volumes de recarga estejam atualmente subestimados (Do Ó e Monteiro, 2006). Todos estes fatores ilustram bem o grau de incerteza que rodeia a estimativa dos volumes de água consumidos a nível regional e consequentemente as dificuldades encontradas na definição de políticas de gestão de recursos hídricos.

Deve-se ainda considerar o impacte que as alterações climáticas poderão vir a causar num futuro próximo. O facto de o Algarve ser uma região litoral pode ser uma agravante pois, para além da diminuição de precipitação, aumento de temperatura, aumento das necessidades hídricas das culturas ainda terá de ser considerada a subida do nível do mar que poderá resultar num maior efeito de intrusão salina.

Todos os fatores acima referidos, aliados ao contexto algo incerto da precipitação podem redundar numa redução da oferta útil de água. Esta redução pode ainda ser reforçada por um aumento da procura, baseado no aumento combinado da população, da capitação dos consumos, da população servida pela rede pública e das áreas agrícolas em sistema de regadio (Do Ó e Monteiro, 2005).

De modo a suavizar ou suprimir estes problemas e realizar uma exploração sustentável dos recursos hídricos deve-se realizar uma gestão integrada de recursos hídricos.

## **1.5 Utilidade dos modelos hidrológicos**

A gestão de recursos hídricos é um campo de ação multi e interdisciplinar. Torna-se assim necessário recorrer a metodologias que possibilitem a análise de alternativas e auxiliem na tomada de decisões. Os modelos hidrológicos têm vindo a ser utilizados

para analisar diversos cenários e auxiliar a tomada de decisão quer em alturas de emergência ou simplesmente no apoio a uma boa gestão da água (Lehmann *et al.*, 2011). Os modelos hidrológicos podem ser usados para definir diretivas de modo a melhorar a exploração e distribuição de recursos hídricos. Os problemas de salinização e a identificação de situações de sobre-exploração dos recursos hídricos subterrâneos também podem ser modelados através destes *softwares* (Querner *et al.*, 1997). Como principais dificuldades na utilização dos modelos hidrológicos aponta-se o tempo necessário para que se desenvolva um modelo que produza bons resultados. Este é claramente um contra quando se pretende realizar um modelo que auxilie a decisão numa situação de emergência, como por exemplo, durante uma seca.

## **1.6 Organização da dissertação**

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

No capítulo 2 realiza-se a caracterização do modelo hidrológico que vai ser utilizado na dissertação (SWAT) bem como de alguns *softwares* que foram utilizados na construção do modelo (ArcSWAT), verificação de resultados (SWAT\_Check) e calibração e validação do modelo (SWAT-CUP4).

No capítulo 3 apresenta-se a zona em estudo. Neste capítulo realiza-se o enquadramento da Bacia Hidrográfica da Ribeira de Quarteira bem como a caracterização da mesma. É também contemplada a metodologia para a obtenção e tratamento dos dados introduzidos no modelo SWAT.

No capítulo 4 apresenta-se a aplicação do modelo SWAT passando por todas as etapas realizadas desde a preparação dos dados de entrada, análise dos dados de saída, parametrização inicial e final do modelo. Também se apresenta a calibração e validação em SWAT-CUP e os respetivos resultados.

No capítulo 5 apresentam-se os cenários de alterações climáticas e respetivos resultados e análise.

No capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões da presente dissertação.

## 2. MODELO SWAT

A hidrologia tem-se apoiado cada vez mais em ferramentas computacionais que permitem representar e manipular dados espacialmente distribuídos e entidades geográficas da paisagem por meio de informações georreferenciadas que descrevem as suas características e forma. Um modelo hidrológico espacial simula o fluxo de água e os seus condicionantes numa dada região utilizando a representação SIG desta. O emprego de equações que simulam os fenómenos hidrológicos em ambiente SIG permite trabalhar espacialmente, possibilitando a divisão de uma bacia hidrográfica em células e o cálculo de parâmetros hidrológicos para cada uma delas para posterior reintegração (Ferraz *et al.*, 1999). Querner *et al.* (1997) referem a importância e benefícios que se pode obter se forem utilizados modelos físicos pois estes tornam possível o seu uso e boa resposta no caso de serem mudadas as condições afectas ao sistema hidrológico em estudo.

O modelo que se pretende utilizar na presente dissertação é o SWAT. Este modelo é físico pois requer a introdução de uma série de dados reais. O SWAT (Soil and Water Assessment Tool) é um modelo matemático que tem vindo a ser desenvolvido e melhorado desde 1990, nos EUA, pelo USDA (United States Department of Agriculture). Este modelo foi desenvolvido com o objetivo de prever o impacto das intervenções humanas (*e.g.* uso e ocupação de solos e utilização de fertilizantes agrícolas) nos processos hidrológicos e químicos de bacias hidrográficas relativamente complexas (Bekiaris *et al.*, 2005). Este modelo foi escolhido para a presente dissertação devido às suas características, nomeadamente:

- pode ser utilizado para prever os impactos da intervenção humana;
- é capaz de realizar simulações em bacias hidrográficas de grandes dimensões e com usos e tipos de solos complexos enquanto produz resultados com uma discretização espacial bastante elevada;
- produz resultados para longos períodos de tempo (um ou mais anos) permitindo a identificação de padrões e médias sazonais registados independentemente da variação das condições climáticas.



Para além dos fatores acima referidos o facto de este modelo ser já bastante utilizado e referenciado é garantia de resultados consistentes. Por outro lado este modelo encontra-se disponível gratuitamente pelo que este foi um fator que também pesou na escolha.

A versatilidade do modelo SWAT é demonstrada pela grande variedade de aplicações em estudos de bacias hidrográficas verificando-se que as aplicações e potencialidades deste têm vindo a aumentar ao longo da última década. A maior parte destas aplicações têm sido desenvolvidas para responder a solicitações de várias agências governamentais, nomeadamente dos Estados Unidos e da União Europeia. Estas agências governamentais recorrem ao modelo SWAT para avaliar impactes das mudanças climáticas, efeitos do uso do solo em recursos hídricos e avaliam também a capacidade do modelo para aplicações futuras. O grande número de aplicações do modelo SWAT faz deste uma ferramenta bastante flexível e robusta que pode ser utilizada para simular várias situações em bacias hidrográficas (Gassman *et. al*, 2007).

Segundo Neitsch *et al.* (2011) o modelo SWAT caracteriza-se por:

- Ser um modelo físico. Para além de utilizar equações de regressão para descrever as relações entre os *inputs* e os *outputs* o SWAT requer informação específica acerca do tipo de solos, topografia, clima e uso de solos na bacia hidrográfica em análise. Apesar de requerer maior informação de base este facto produz melhores resultados;
- Permitir modelar longos períodos de tempo de forma contínua realizando prognósticos que de outro modo demorariam mais tempo;
- Ser computacionalmente eficiente.

O modelo SWAT foi concebido para utilizar dados simples de obter, destacando-se a informação geográfica e os dados climatéricos. A maior parte desta informação está disponível de modo gratuito em Portugal no Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) (Nunes, 2007).

Este modelo está concebido para ser aplicado a bacias hidrográficas, no entanto, a área de estudo é dividida em múltiplas sub-bacias de modo a refinarem-se os resultados da modelação espacial. As sub-bacias são posteriormente divididas em

*Hydrologic Response Units* (HRUs) que consistem em áreas homogêneas relativamente às características físicas e climatéricas. As HRUs representam partes das sub-bacias e não são identificadas espacialmente através da modelação do SWAT (Sangmanee *et al.*, 2011).

A informação climática requerida como dados de entrada para o funcionamento do modelo inclui a precipitação diária, a temperatura mínima e máxima, dados de radiação solar, humidade relativa e velocidade do vento (Gassman *et al.*, 2007). Segundo Nunes (2007) para aplicar o modelo SWAT a uma bacia hidrográfica é requerida a seguinte informação:

- Modelo Digital de Terreno (MDT);
- Cartografia descrevendo o uso e o tipo de solos;
- Parâmetros físicos para cada tipo de solo;
- Parâmetros biofísicos para a vegetação associada a cada tipo de uso de solo;
- Informação das práticas de agricultura associadas ao tipo de uso de solo;
- Dados meteorológicos diários.

Em alternativa à introdução dos dados meteorológicos o modelo SWAT pode gerar séries climáticas estocásticas através de um gerador de meteorologia (Sharpley e Williams, 1990 *apud* Nunes 2007). Caso os valores introduzidos no modelo sejam mensais o gerador de meteorologia transforma-os em valores diários para cada sub-bacia (Neitsch *et al.*, 2011).

Segundo Gassman *et al.* (2007) o modelo SWAT, em comparação com os modelos HSPF e DWSM produz resultados mais consistentes.

No Plano de Bacia Hidrográfica das Ribeiras do Algarve (RH 8) a caracterização hidrológica desenvolve-se a partir de um modelo hidrológico de bacia SWAT. Segundo os autores este modelo é uma das ferramentas mais adequadas para este tipo de análise tendo a particularidade de permitir, à partida, a possibilidade de simulação de

diferentes cenários de ocupação de solo e / ou de práticas agrícolas (ARH Algarve, 2011b).

Existem alguns *softwares* de pré e pós processamento do modelo SWAT. O MWSAT e o ArcSWAT são duas das versões de desenvolvimento do modelo. Na presente dissertação o modelo SWAT é desenvolvido através do ArcSWAT.

## **2.1 ArcSWAT**

O ArcSWAT é um *software* que funciona na interface do ArcGIS. Este *software* permite a construção, simulação, calibração, análise de sensibilidade e validação do modelo. De referir que algumas destas operações podem estar disponíveis ou não conforme a versão com que se está a trabalhar. A grande diferença entre o ArcSWAT e o MWSAT é que o segundo é *freeware* e *opensource*. Optou-se por usar o ArcSWAT devido à grande versatilidade que representa a manipulação dos dados em ArcGIS.

## **2.2 SWAT\_Check**

Este *software* lê os dados de saída do projeto SWAT e faz algumas verificações de maneira a identificar potenciais problemas deste. O objetivo é identificar os problemas do modelo o mais cedo possível de modo a não afetar a calibração e passos seguintes. A identificação de problemas é realizada comparando os dados de saída do SWAT com intervalos de dados típicos estabelecidos pelos programadores do modelo. De referir que uma mensagem de aviso não significa necessariamente que o modelo tenha problemas (SWAT, s.d.)

## **2.3 SWAT-CUP4**

O SWAT-CUP4 é um *software* de calibração de modelos SWAT. Este *software* realiza análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incerteza (Abbaspour, 2011). A análise de sensibilidade, calibração e validação podem ser realizadas na interface do ArcSWAT até à versão 2009.93.7b lançada em 09/08/2011. A partir desta

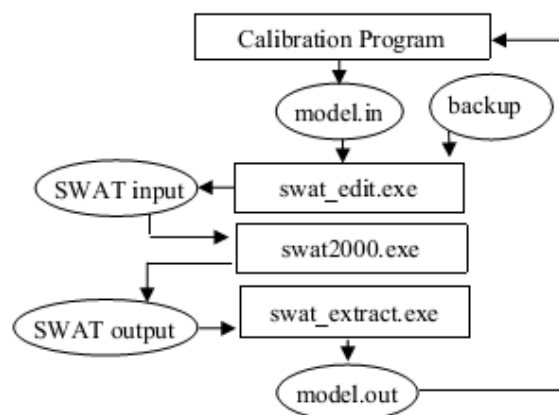
versão (ou caso sejam incluídas revisões mais recentes) estas operações deixam de poder ser realizadas na interface do ArcSWAT e passam a ser realizadas no SWAT-CUP4. Para a realização destes processos o SWAT-CUP4 apresenta 5 algoritmos:

- SUFI2;
- PSO;
- GLUE;
- ParaSol;
- MCMC.

Pode-se optar por qualquer um dos algoritmos acima apresentados dependendo do objetivo final. Na presente dissertação pretende-se utilizar o SUFI2 para realizar análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo.

Independentemente do algoritmo escolhido, o funcionamento deste *software* segue os passos apresentados no esquema 2.1.

O SWAT-CUP4 permite a calibração de caudal, sedimentos e nutrientes. Esta calibração deve ser realizada pela ordem supracitada. Na presente dissertação apenas se realizou calibração de caudal.



Esquema 2.1 – Funcionamento do SWAT-CUP4 (in Abbaspour *et al.*, 2007)

Na criação de um novo projeto o SWAT-CUP4 necessita que lhe seja fornecida a localização das pastas de dados de entrada e saída do modelo ArcSWAT (“TxtInOut”). A partir desta pasta, o *software* tem acesso a todos os dados obtidos através das simulações criando duas pastas distintas (ambas com os dados originais sendo uma o *backup* do modelo). É a partir deste ponto que o SWAT-CUP4 estabelece a ligação com o modelo ArcSWAT. A calibração passa a ser realizada em SWAT-CUP4 e no fim desta reúnem-se os novos valores de parametrização que irão então ser introduzidos no ArcSWAT. A calibração é feita em várias etapas:

- são definidos os parâmetros a utilizar na calibração e atribuídos os valores (mínimos e máximos) dos intervalos destes;
- corre-se o modelo;
- analisam-se os resultados consoante a função objetiva que se definiu;
- verificam-se os resultados da análise de sensibilidade;
- verificam-se os novos intervalos sugeridos e faz-se uma nova parametrização do modelo;
- corre-se novamente o modelo e repetem-se as operações até se obterem resultados satisfatórios.

Pelos passos acima descritos verifica-se que o SWAT-CUP4 funciona de modo iterativo.

A verificação da qualidade do modelo é realizada contrapondo o hidrograma observado (dado de entrada) ao hidrograma simulado (dado de saída). Para a avaliação dos resultados podem ser escolhidas as seguintes funções objetivas:

- $R^2$ ;
- $bR^2$ ;
- Nash – Sutcliffe;
- SSQR;
- MSE.

Na presente dissertação optou-se por utilizar a função objetiva  $bR^2$ .



### 3. CASO DE ESTUDO

#### 3.1 Enquadramento regional

A área de estudo da dissertação é a bacia hidrográfica da Ribeira de Quarteira. Esta localiza-se na região central do Algarve e intercepta os concelhos de Albufeira, São Brás de Alportel e Loulé. A bacia hidrográfica da Ribeira de Quarteira atravessa as três unidades geomorfológicas que constituem o Algarve (Serra, Barrocal e Litoral), no entanto, concentra-se mais na zona do Barrocal atravessando o litoral no seu extremo jusante. Na figura 3.1 apresenta-se o enquadramento regional da bacia hidrográfica em estudo.

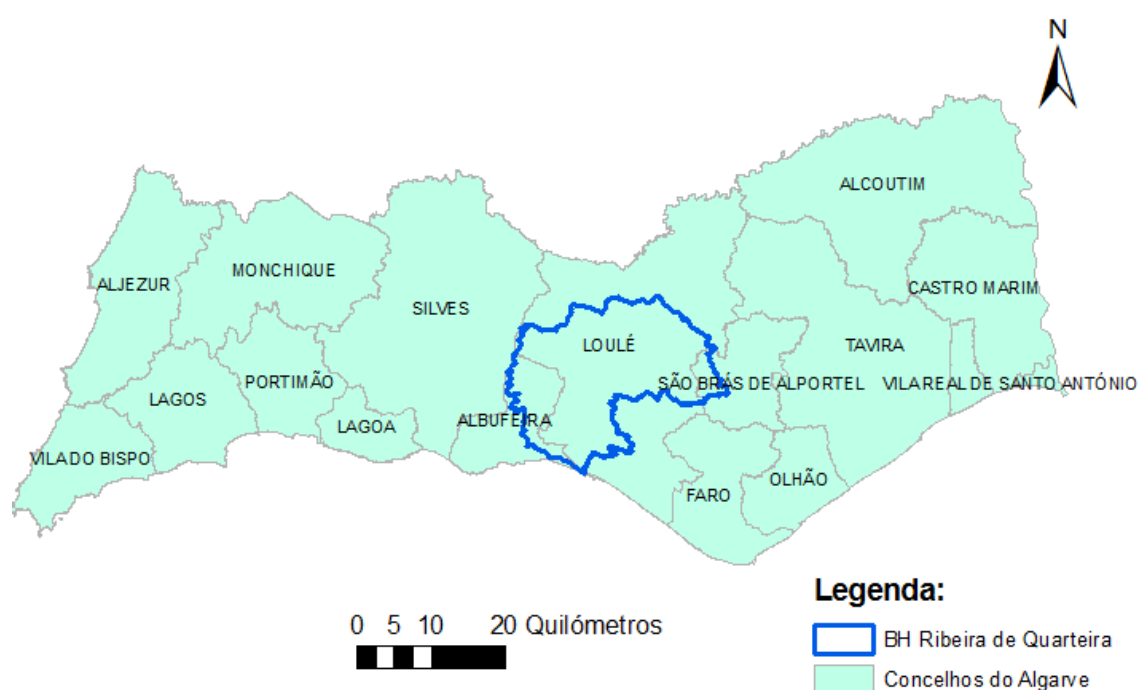


Figura 3.1 - Enquadramento regional da bacia hidrográfica da Ribeira de Quarteira

Esta bacia hidrográfica pertence à Região Hidrográfica oito (RH8) mais especificamente à sub-bacia Zona Central.

Nos próximos subcapítulos proceder-se-á à caracterização da Bacia Hidrográfica da Ribeira de Quarteira.



### **3.2 Caracterização regional**

O Algarve inclui uma grande variedade de aspetos geológicos, hidrogeológicos e geomorfológicos (figura 3.2). A Norte encontra-se a Serra Algarvia, com cerca de 3700 km<sup>2</sup>, constituída por rochas cristalinas (essencialmente xistos e grauvaques do Paleozóico) (Monteiro, 2006). Esta é uma região de relevo movimentado, com agricultura escassa, dada a pobreza do solo e a escassez de águas subterrâneas (Almeida, 1985). A escassez de águas subterrâneas deve-se ao facto de estas rochas serem permeáveis apenas onde há fraturas apresentando por isso aptidão aquífera relativamente modesta. Nesta zona predomina o escoamento de superfície o que se reflete numa densidade elevada de cursos de água. Nos restantes 1700 km<sup>2</sup> encontra-se o Barrocal e o Litoral Algarvio onde predominam as rochas sedimentares (Monteiro, 2006).

A parte central é ocupada pelo Barrocal, região constituída essencialmente por rochas carbonatadas jurássicas. Estas rochas são mais permeáveis do que as rochas existentes na zona da Serra e por isso apresentam uma aptidão aquífera maior. Por este motivo há menor densidade de cursos de água e o escoamento subterrâneo assume maior importância (Monteiro, 2006). Esta é uma região de relevo relativamente suave, fortemente condicionado pela tectónica. As depressões cársticas, cobertas por terra rossa, são objeto de agricultura intensiva graças ao recurso cada vez mais generalizado da captação de águas subterrâneas (Almeida, 1985).

Para Sul, encontra-se o Algarve Litoral, região aplanada, de altitude relativamente baixa. Esta região é ocupada, em grande parte, por rochas terciárias, destacando-se as rochas carbonatadas miocénicas e os depósitos detríticos pliocénicos (Almeida, 1985). Estas formações apresentam boas aptidões aquíferas nalgumas regiões embora disponham de recursos muito mais limitados do que o Barrocal e em geral com qualidade mais fraca para abastecimento (CCDR, 2004). A ocupação humana é intensa pois é nessa região que se concentram as infraestruturas turísticas e a agricultura desenvolvida (Almeida, 1985). Esta região apresenta grandes consumos de água, que não cessam de aumentar. Segundo CCDR (2004) o facto de esta região ser sujeita a uma elevada procura pode produzir situações de intrusão salina.

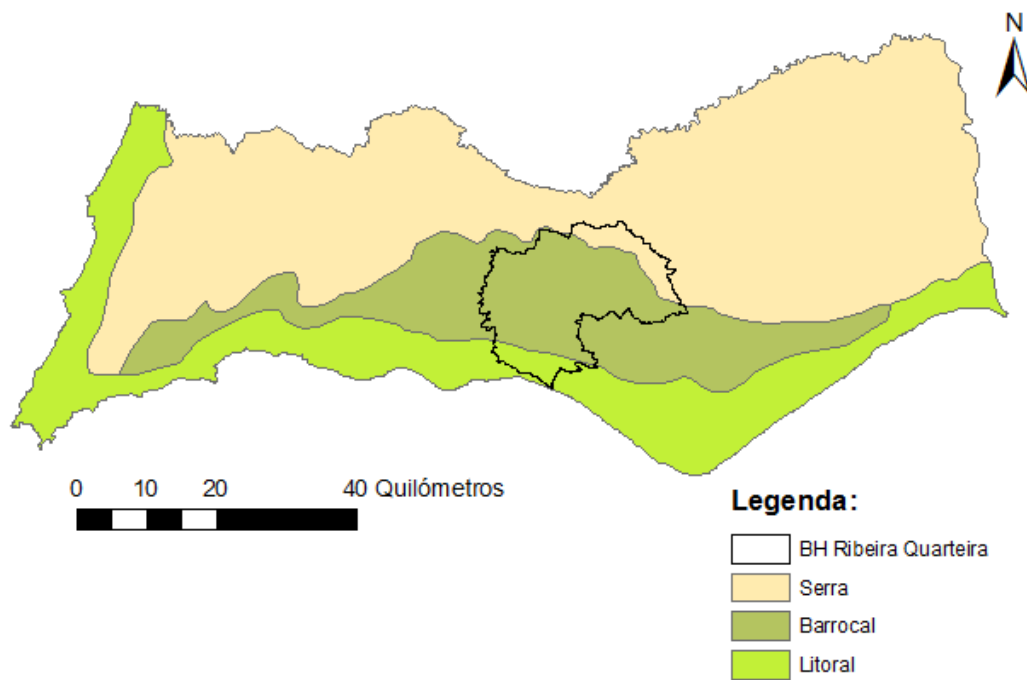


Figura 3.2 - Unidades geomorfológicas presentes no Algarve e respetivo enquadramento na Bacia Hidrográfica da Ribeira de Quarteira

A região do Algarve apresenta um clima tipicamente mediterrâneo com Verões secos e quentes e Invernos moderados.

Segundo ARH Algarve (2011c):

- A temperatura média do ar varia entre 10,7°C em Janeiro e 23,5°C em Agosto. A média da temperatura mínima regista-se no mês de Janeiro e é de 2,4°C enquanto a média da temperatura máxima regista-se no mês de Agosto com um valor de 36,5°C;
- A velocidade média anual do vento varia entre 4,9 km/h e 23,3 km/h apresentando um valor médio de 11,1 km/h. Este parâmetro varia conforme a localização da estação meteorológica verificando-se que nas zonas costeiras são registados valores mais elevados;
- A humidade relativa média mensal do ar ponderada varia entre 63,2% e 85,1% sendo mais baixa nos meses de Julho e Agosto e mais elevada nos meses de Janeiro e Fevereiro;

- A insolação média mensal varia em média 158,2 e 378,5 h variando entre um mínimo anual de 2737 h e um máximo de 3007,3 h.

### **3.3 Hidrogeologia**

A grande diversidade de litologias presentes no Algarve é responsável por interações muito diversificadas e complexas entre águas superficiais e subterrâneas. Apesar de o conhecimento da hidrogeologia superficial e subterrâneo ter evoluído de forma relativamente independente na região do Algarve, verifica-se que faz mais sentido realizar uma análise integrada destes dois tipos de recursos hídricos (Monteiro *et al.*, 2006). Apesar de esta análise integrada ser recomendada inclusivamente na DQA verifica-se que a sua realização é por vezes demasiado complexa.

#### **3.3.1 Recursos hídricos superficiais**

A ribeira de Quarteira representa o exutório de toda a precipitação que cai sobre a Bacia Hidrográfica da Ribeira de Quarteira. Esta recebe água afluyente de várias ribeiras que se encontram a montante. A ribeira do Algibre e a ribeira de Quarteira representam ambas o mesmo curso de água sendo no entanto as designações referentes a diferentes troços deste. A ribeira de Quarteira desagua na zona leste da praia da Falésia (junto à marina de Vilamoura).

A ribeira do Rio Seco e as ribeiras dos Moinhos confluem dando origem à ribeira da Menalva. Mais a Sul a ribeira da Menalva passa a designar-se ribeira do Algibre e finalmente a jusante da confluência com a ribeira de Alte a designação deste curso de água passa a ser ribeira de Quarteira (Monteiro *et al.*, 2006). A ribeira do Rio Seco e as ribeiras do Moinhos têm cabeceira ainda nas formações paleozóicas pouco permeáveis, onde a infiltração é relativamente baixa. Quando estes cursos de água atingem o limite com a formação carbonatada é provável que uma parte significativa do seu caudal se infiltre devido à capacidade de infiltração muito maior nas rochas carbonatadas do que nos xistos e grauvaques. É assim que surgem os pontos onde os cursos de água são influentes. As conexões hidráulicas (troços de influência e

efluência) entre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos são um dos pontos mais importantes quando se pretende aplicar determinados modelos de gestão.

A ribeira de Quarteira é influente na região de Lentiscais e Cabanita observando-se a ocorrência de exurgência na ribeira do rio Seco próximo de Machados. De salientar também a importância da alimentação da ribeira de Quarteira a partir de nascentes que recebe contribuições da Fonte Grande (Alte), Fonte de Salir e Fonte Benémola que são as principais nascentes do Algarve Central. A Fonte de Paderne também contribui para essa alimentação (MAOTDR, 2004).

Dada a grande importância das conexões hidráulicas entre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos no seguinte subcapítulo pretende-se identificar e caracterizar os recursos hídricos subterrâneos que fazem parte da bacia hidrográfica da ribeira de Quarteira.

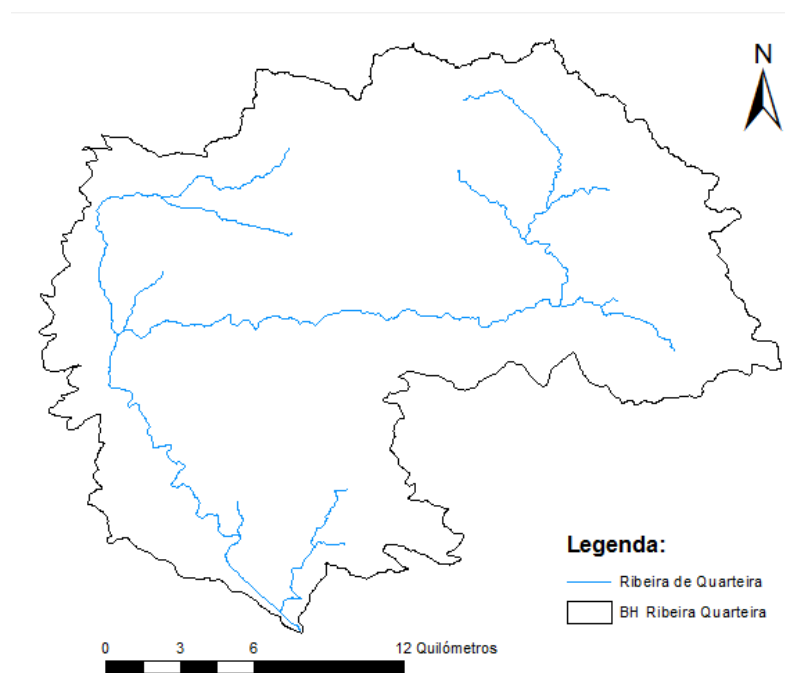


Figura 3.3 - Bacia hidrográfica da Ribeira de Quarteira e cursos de água que constituem a Ribeira de Quarteira

### 3.3.2 Recursos hídricos subterrâneos

A bacia hidrográfica da Ribeira de Quarteira intercepta três sistemas aquíferos: o aquífero Querença-Silves, o aquífero de Quarteira e o aquífero Albufeira-Ribeira de Quarteira. O aquífero Querença-Silves representa o maior e mais produtivo sistema aquífero da região do Algarve (ocupa uma área de 318 km<sup>2</sup>). Estende-se segundo uma faixa de direção E-W entre Estômbar e Querença, estando limitado a Norte pelos “Grés de Silves” e a Sul pelos calcários margosos e margas do Caloviano-Oxfordiano-Kimeridgiano, ambos com comportamento menos permeável (Andrade, 1989 *apud* Almeida *et al.*, 2000). Este aquífero é dividido em unidades com comportamento hidráulico próprio o que pode ser verificado nos sectores que alimentam a Fonte Grande (Alte), a Fonte do Salir e a Fonte Benémola.

O sistema aquífero de Albufeira-Ribeira de Quarteira, embora ocupe uma extensão reduzida (54,6 km<sup>2</sup>), insere-se numa zona de grande complexidade estratigráfica e estrutural. A recarga deste aquífero é feita a Norte, por infiltração direta no planalto do Escarpão cuja topografia favorece este processo. Existem vários pontos de descarga do sistema, sendo os mais conhecidos em Olhos de Água, encontrando-se uns na praia e outros no mar, com um caudal de várias dezenas de litros por segundo (Almeida *et al.*, 2000).

O aquífero de Quarteira trata-se de um sistema multiaquífero complexo, constituído por aquíferos, simples ou multicamadas, uns de tipo cársico, outros de tipo poroso ou misto, livres e confinados, por vezes com artesianismo repuxante. A sua área é de 81 km<sup>2</sup> e as principais áreas de recarga situam-se a Norte (Almeida *et al.*, 2000).

Na figura 3.4 estão representados a Bacia Hidrográfica da Ribeira de Quarteira e os respetivos sistemas aquíferos que a intercetam.

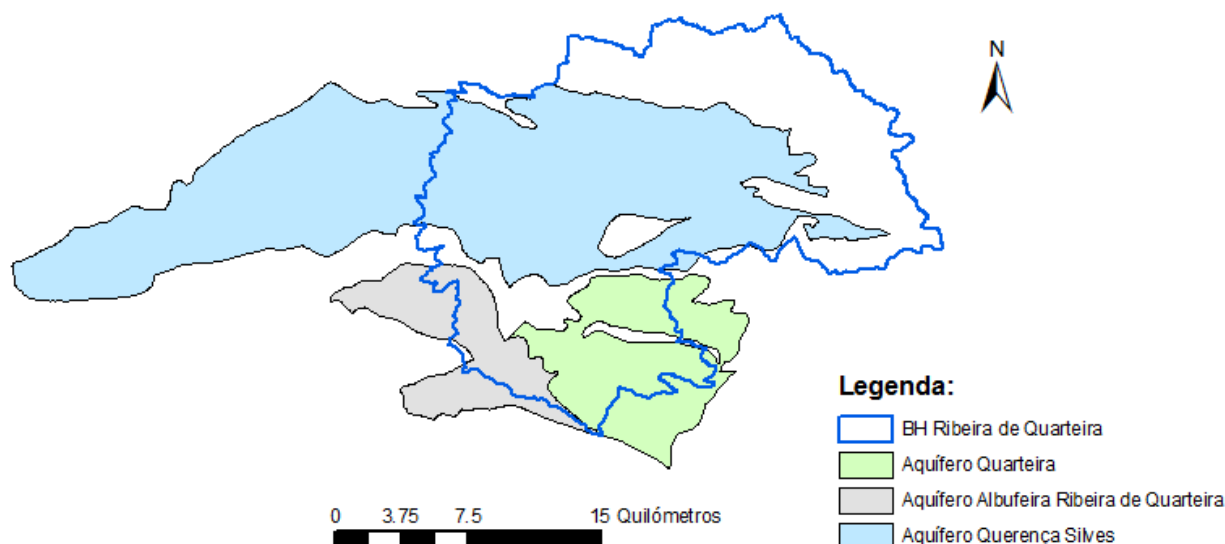


Figura 3.4 - Bacia Hidrográfica da Ribeira de Quarteira e respetivos sistemas aquíferos

### 3.3.3 Conexões hidráulicas

Realizando visitas ao campo no Barrocal, em diferentes períodos do ano hidrológico, verifica-se que, nesta área, as ribeiras alternam, sucessivamente, troços influentes e efluentes (Monteiro *et al.*, 2006). As condições estruturais e geológicas dos sistemas aquíferos definem estas conexões hidráulicas que podem ser estabelecidas entre recursos hídricos subterrâneos e superficiais e entre diferentes sistemas aquíferos. O volume escoado nestas entradas e saídas sucessivas ao longo das ribeiras não é, geralmente, alvo de monitorização, pois este pode ser incorporado nas estimativas totais de escoamento subterrâneo. A exceção a estes casos são as nascentes mais importantes, através das quais o volume de água é exportado para outro aquífero (Monteiro *et al.*, 2006).

A ribeira de Quarteira, no seu curso superior, apresenta troços influentes e efluentes e no seu curso inferior é influente, conhecendo-se sumidouros na região de Lentiscais e Cabanita. No entanto, alguns destes sumidouros só funcionam, episodicamente, quando a ribeira sai do seu leito (Almeida *et al.*, 2000). Um dos troços onde a Ribeira de Quarteira apresenta influência é a montante da Ponte do Barão apresentado efluência a Sul da mesma (Almeida *et al.*, 2000). As principais zonas de efluência já

foram descritas nos capítulos acima e são principalmente representados por nascentes. De referir que a identificação e caracterização destas conexões hidráulicas pode por vezes ser de grande complexidade.

### **3.4 Topografia**

A bacia hidrográfica da Ribeira de Quarteira caracteriza-se por apresentar algumas diferenças topográficas entre o Norte e o Sul. Na zona Nordeste a altitude é bastante mais elevada do que na zona Sul. Isto deve-se ao facto de esta bacia intercalar várias unidades geomorfológicas. Como já foi referido, na zona Norte do Algarve, encontra-se a Serra Algarvia que se caracteriza por ser uma região de relevo movimentado e com aptidão aquífera modesta. Nesta zona de Serra Algarvia a infiltração é muito reduzida e existe muito escoamento superficial (Almeida, 1985). A Bacia da Ribeira de Quarteira atravessa também o Barrocal e o Litoral. Estas duas unidades geomorfológicas caracterizam-se por apresentarem um relevo menos movimentado e maior aptidão aquífera. O escoamento subterrâneo assume maior importância pois estamos na presença de rochas sedimentares (Monteiro, 2006). O facto de, principalmente o Litoral, apresentar altitudes baixas e zonas aplanadas abundantes favorece a infiltração. Na figura 3.5 apresenta-se o Modelo Digital de Terreno (MDT) da Bacia Hidrográfica em estudo. Nesta figura pode-se observar as diferenças de altitude referidas entre a zona Nordeste e a zona Sul da Bacia.

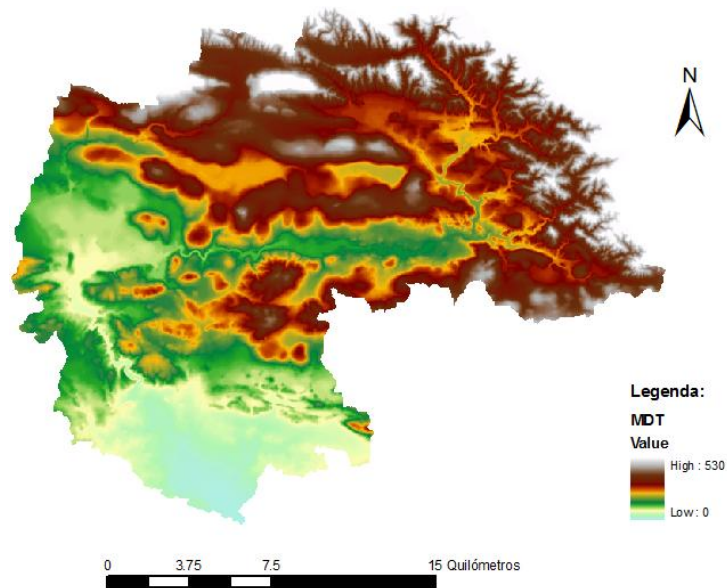


Figura 3.5 – Representação do Modelo Digital de Terreno da Bacia Hidrográfica da Ribeira de Quarteira (Unidades: metros)

Relativamente aos declives verifica-se que tal como acontece com a topografia, a Norte existe uma zona mais declivosa que contrasta com as zonas com declives mais suaves a Sul junto ao litoral. Nas zonas mais declivosas o escoamento superficial assume maior importância enquanto nas zonas menos declivosas a infiltração é mais frequente. Na figura 3.6 podem ser observadas estas diferenças.

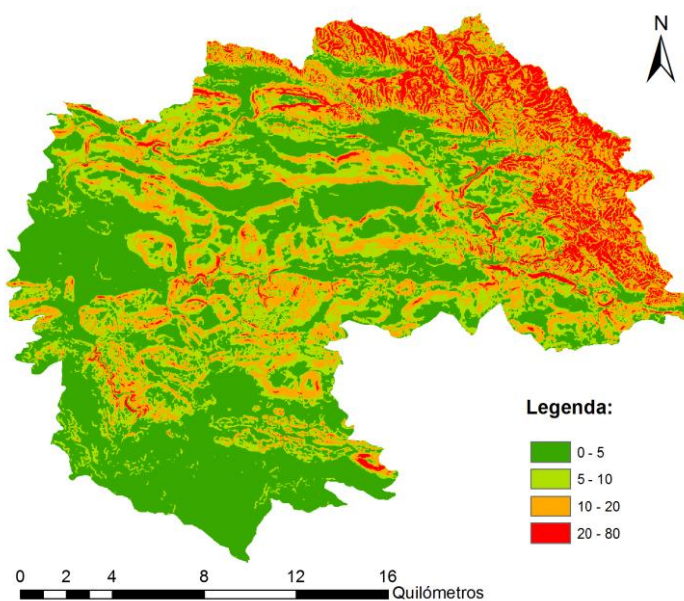


Figura 3.6 – Representação dos declives da Bacia Hidrográfica da Ribeira de Quarteira (Unidades:%)



No presente projeto SWAT é requerida a introdução de informação acerca das classes em que se pretende dividir o declive. Esta divisão de classes teve como base um estudo prévio do declive da bacia em estudo. Assim optou-se por introduzir quatro classes, sendo as primeiras três 0-5, 5-10 e 10-20. A quarta e última classe inclui todos os declives entre 20 e 9999 (valor máximo de declive considerado pelo ArcSWAT). No gráfico 3.1 apresenta-se um histograma com a representação de 4 classes de declive. A última classe de declive considerada no histograma tem um máximo fixado em 80 pois verificou-se que este seria o máximo de declive presente na Bacia Hidrográfica da Ribeira de Quarteira.

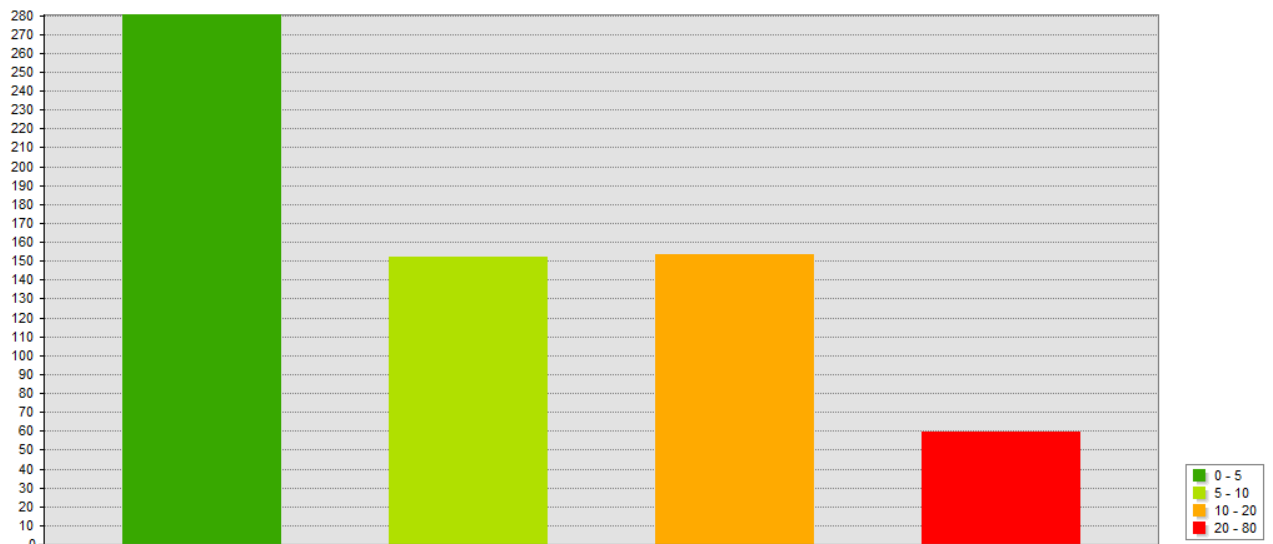


Gráfico 3.1 – Histograma com representação de 4 classes de declives (Unidades:°)

Pela análise do gráfico 3.1 verifica-se que, na Bacia da Ribeira de Quarteira, as classes de declive mais representativas são as que englobam os intervalos 0-5, 5-10 e 10-20 sendo de destacar o intervalo entre 0 e 5 graus. É assim possível verificar que a Bacia Hidrográfica da Ribeira de Quarteira é constituída maioritariamente por terrenos pouco declivosos.

### 3.5 Uso de solo

Os modelos hidrológicos como o SWAT necessitam da introdução de dados de uso e tipo de solo para que consigam ser simulados os processos que constam do ciclo hidrológico da maneira mais precisa e exata possível. O uso de solo da Bacia Hidrográfica da Ribeira de Quarteira teve como base a consulta de diversas fontes de informação. Em primeiro lugar recorreu-se à cartografia do Corine Land Cover 2006 (CLC 06) devido ao facto de esta cobrir a área em estudo e ter sido obtida num ano que fica contido no período de estudo. Esta cartografia é no entanto pouco específica para o que se pretende e teve de se recorrer a outras fontes de informação de modo a aumentar-se o grau de rigor na zona em estudo. Com este objetivo recorreu-se a cartografia feita pela ARH Algarve entre os anos 2005 e 2007 onde se representa o uso dos solos com elevada resolução na zona dos principais sistemas aquíferos do Algarve. No caso presente, esta fonte não cobriu toda a área em estudo, no entanto, permitiu a identificação de diversos usos de solo que não estavam representados no CLC 06. De modo a tirar dúvidas em relação a algumas partes da área em estudo recorreu-se ainda ao uso de ortofotomapas e ao reconhecimento da zona. Deste modo logrou-se obter uma cartografia de uso dos solos onde as categorias não eram a menos (tirando assim algum rigor ao modelo) e também não eram demasiadas (podendo deste modo tirar eficácia ao desempenho do modelo). Assim optou-se por reclassificar os polígonos apresentados na cartografia do CLC 06 tendo em alguns casos sido feitas algumas junções quando os usos dos solos são bastante parecidos. De modo a representar várias categorias de usos do solo no mesmo polígono recorreu-se à ferramenta *Sublanduses* do *ArcSwat*. O resultado obtido é apresentado na figura 3.7. De referir que foi necessário acrescentar algumas classes de uso dos solos às bases de dados do SWAT e ainda alterar algumas classes de modo a adequá-las ao que se pretende. A adição e edição de classes de uso de solos foram realizadas tendo em conta os parâmetros apresentados em Nunes (2007).

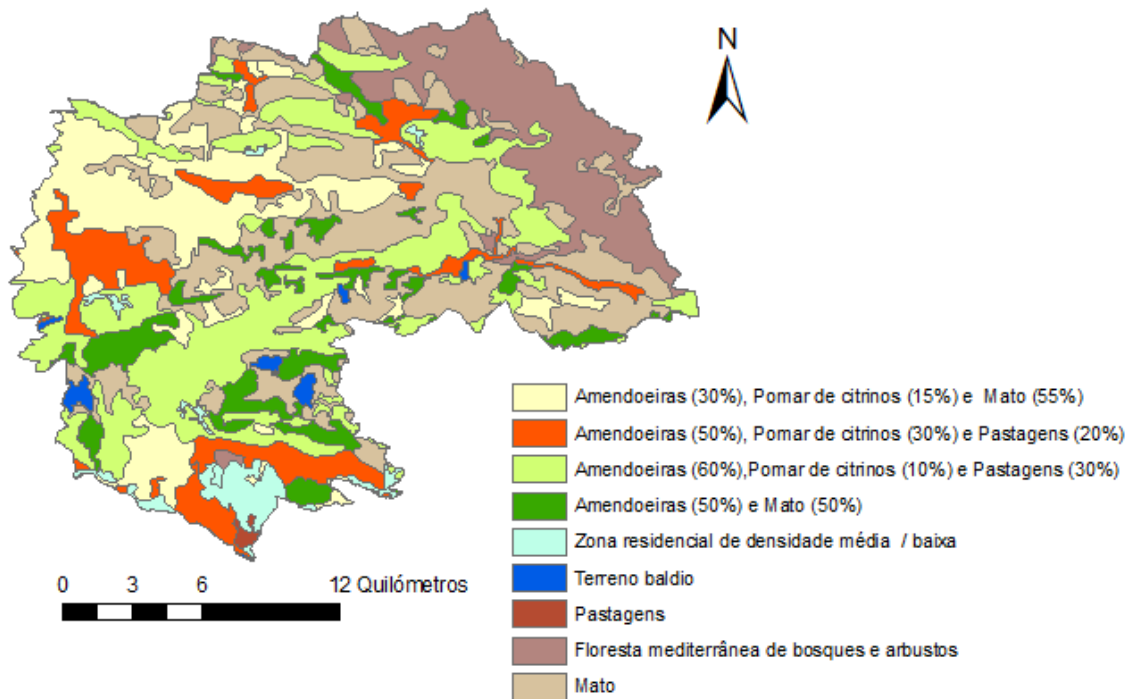


Figura 3.7 - Uso de solos da área em estudo

Na figura 3.8 apresenta-se uma imagem captada em Paderne junto à ribeira do Algibre (afluente a ribeira de Quarteira). Este tipo de paisagem é típico da zona do Barrocal.



Figura 3.8 – Uso de solo típico do Barrocal

### 3.6 Tipo de solo

A cartografia com o tipo de solos foi obtida através do Atlas do Ambiente criado pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA). A definição dos tipos de solo da bacia

hidrográfica da Ribeira de Quarteira exigiu a criação de novas categorias de tipo de solo na base de dados do *ArcSwat*. Isto deveu-se ao facto de o sistema de classificação de solos, presente nas bases de dados deste *software*, ser específico para representar bacias hidrográficas localizadas nos Estados Unidos da América. Os dados utilizados para representar o tipo de solos da zona em estudo apresentam o sistema de classificação *FAO* (Food and Agriculture Organization). Deste modo foi impossível estabelecer um paralelismo entre os dois sistemas de classificação e tornou-se necessária a criação das classes de tipo de solo presentes na área em estudo. Assim foi necessário aceder a diversas fontes de informação de modo a se obterem todos os parâmetros exigidos pelo *ArcSwat*. A fonte de informação de onde se retiraram mais valores de parâmetros foi a base de dados *FAO* acedida através do *HWSD viewer*. A condutividade hidráulica ( $K$ ), que é um dos parâmetros mais relevantes, foi calculada com recurso a um *software* (*SPAW*) tendo em conta as quantidades de areia, argila, rocha e matéria orgânica. Posteriormente estes valores foram comparados com os valores apresentados por Nunes (2007). A erodibilidade foi obtida através dos valores apresentados por Nunes (2007). Na figura 3.9 apresentam-se os tipos de solo da Bacia Hidrográfica da Ribeira de Quarteira.

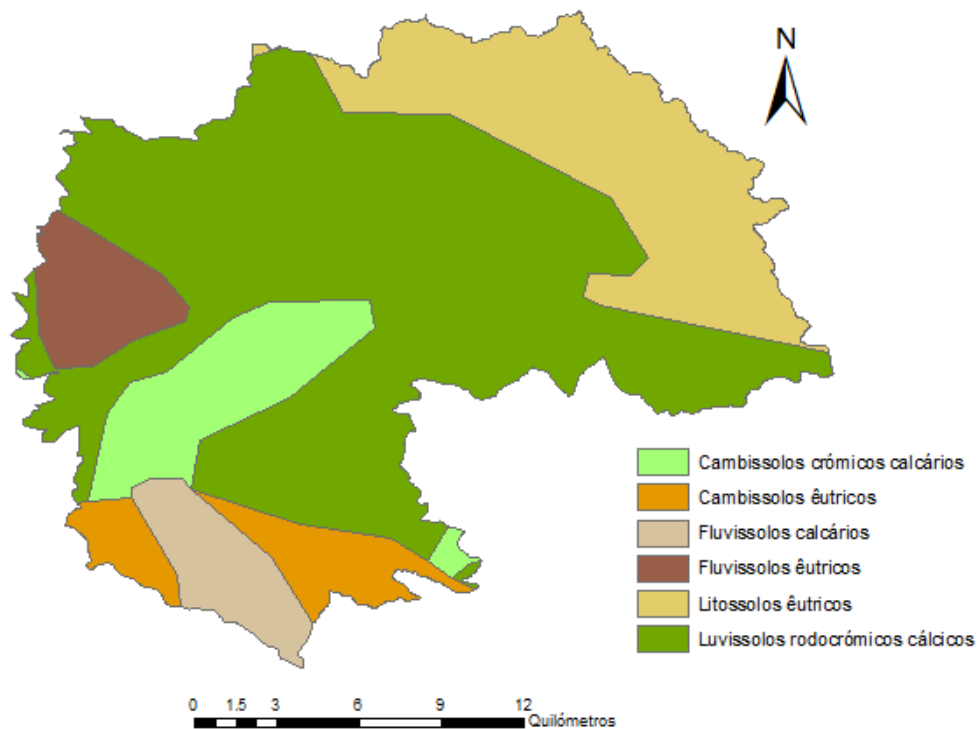


Figura 3.9 - Tipos de solo da área em estudo

### 3.7 Clima

O clima de uma bacia hidrográfica representa a energia e a água disponível das quais depende o balanço hídrico e estas determinam a importância relativa de cada uma das componentes do ciclo hidrológico (Neitsch *et al.*, 2005). Os dados climatológicos da bacia em estudo foram obtidos a partir da base de dados, disponibilizada na internet, do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH). Os parâmetros requeridos pelo SWAT são: humidade relativa, radiação solar, temperatura do ar (máxima e mínima), precipitação e velocidade do vento. As estações meteorológicas consideradas no estudo com dados disponíveis para o período de modelação são: Algoz, Barragem do Arade, Barranco Velho, Paderne, Salir, Santa Margarida e São Brás de Alportel.

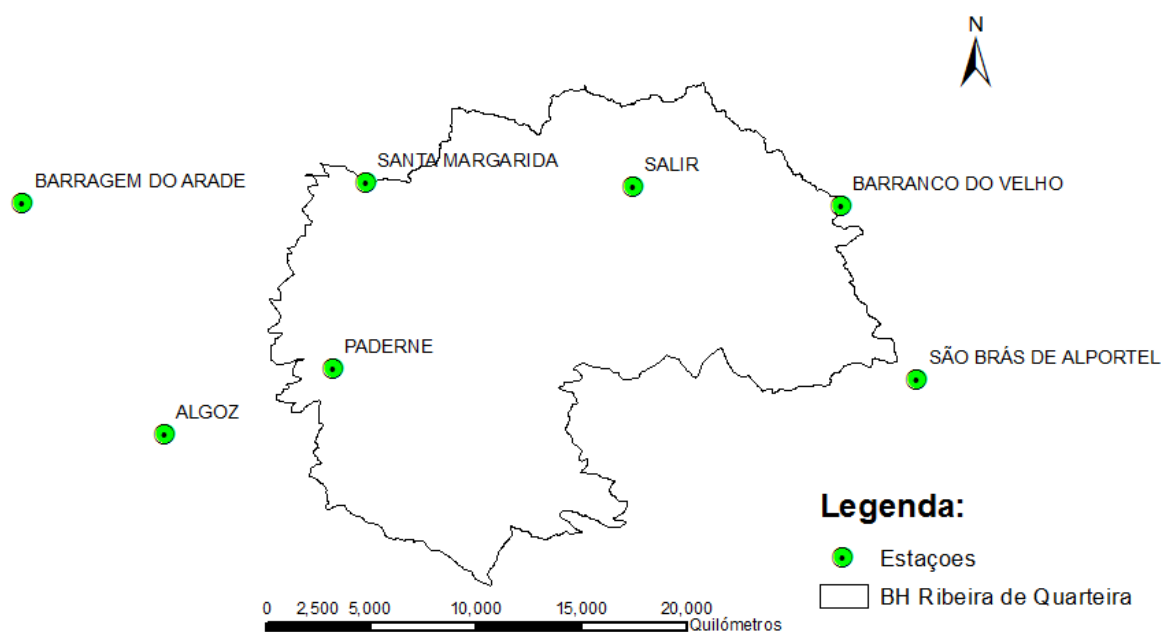


Figura 3.10 - Localização das estações meteorológicas e udométricas utilizadas para obtenção de dados

Nem todas as estações apresentam todos os parâmetros requeridos pelo SWAT. Na tabela 3.1 apresenta-se a lista dos parâmetros que é possível encontrar em cada estação.

Tabela 3.1 – Lista de parâmetros existentes em cada estação

Estações meteorológicas / udométricas	Parâmetros
Algoz	Humidade, radiação solar, temperatura do ar, precipitação e velocidade do vento
Barragem do Arade	Humidade, radiação solar, temperatura do ar, precipitação e velocidade do vento
Barranco do Velho	Precipitação e velocidade do vento
Paderne	Precipitação e velocidade do vento
Salir	Precipitação e velocidade do vento
Santa Margarida	Precipitação e velocidade do vento
São Brás de Alportel	Humidade, radiação solar, temperatura do ar, precipitação e velocidade do vento

Como se observa na figura 3.10 nem todas as estações se localizam dentro da Bacia. Após a introdução das estações no ArcSWAT verificou-se que este *software* realiza a exclusão de estações pelo método do vizinho mais próximo (polígonos de Thiessen). Nas figuras 3.11 e 3.12 apresentam-se as estações consideradas pelo ArcSWAT após a aplicação deste método de interpolação.

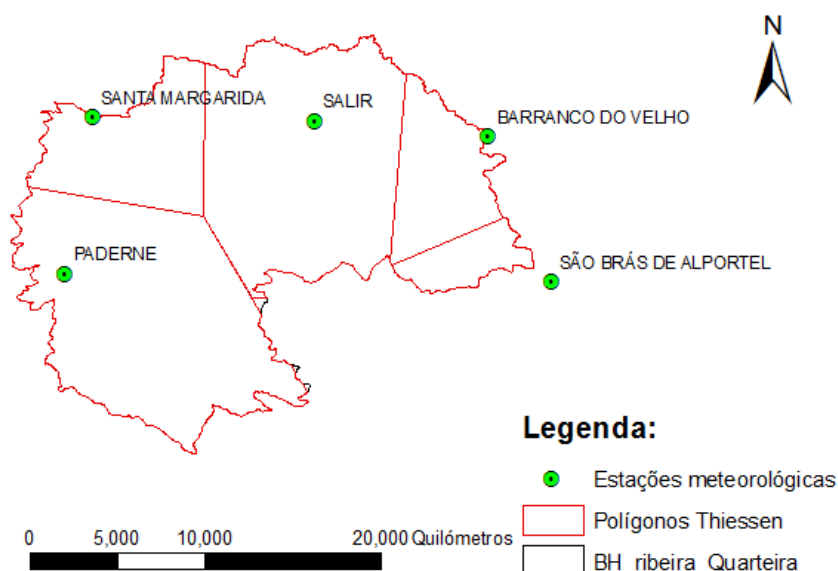


Figura 3.11 - Estações consideradas para precipitação e velocidade do vento

Figura 3.12 - Estações consideradas para humidade relativa, radiação solar e temperatura

Na figura 3.11, nomeadamente, no que diz respeito às estações consideradas para os dados de precipitação e velocidade do vento verifica-se que são excluídas as estações da Barragem do Arade e de Algoz. Na figura 3.12 verifica-se a exclusão da estação Barragem do Arade. Apesar de existir a possibilidade de se recolocar as estações na Bacia de modo a estas serem incluídas optou-se por não o fazer.

### **3.8 Tratamento de dados**

Os dados acima referidos não podem ser introduzidos diretamente no *ArcSWAT*. É assim necessário realizar tratamento de dados. Este tratamento consiste na deteção de séries temporais onde não existem dados, na alteração da periodicidade destes (os dados originais são horários e pretende-se obter diários) e na alteração das unidades de alguns dos parâmetros utilizados. Numa fase inicial este tratamento foi realizado através da aplicação de uma Macro Excel. Os dados obtidos da aplicação da Macro são sujeitos a análise para verificar a existência de valores em falta. Posteriormente procedeu-se ao preenchimento das séries de dados. Este processo foi realizado através da construção de gráficos onde se contrapôs as séries de dados de São Brás de Alportel e Barranco Velho (mais completas) com as restantes estações. Através de um processo de regressão linear obtêm-se a equação e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) que servem respetivamente para calcular valores em falta e verificar o nível de correlação existente entre as estações. De modo a se obterem equações de regressão com coeficientes de determinação mais elevados realizou-se a transformação dos dados diários em dados mensais.

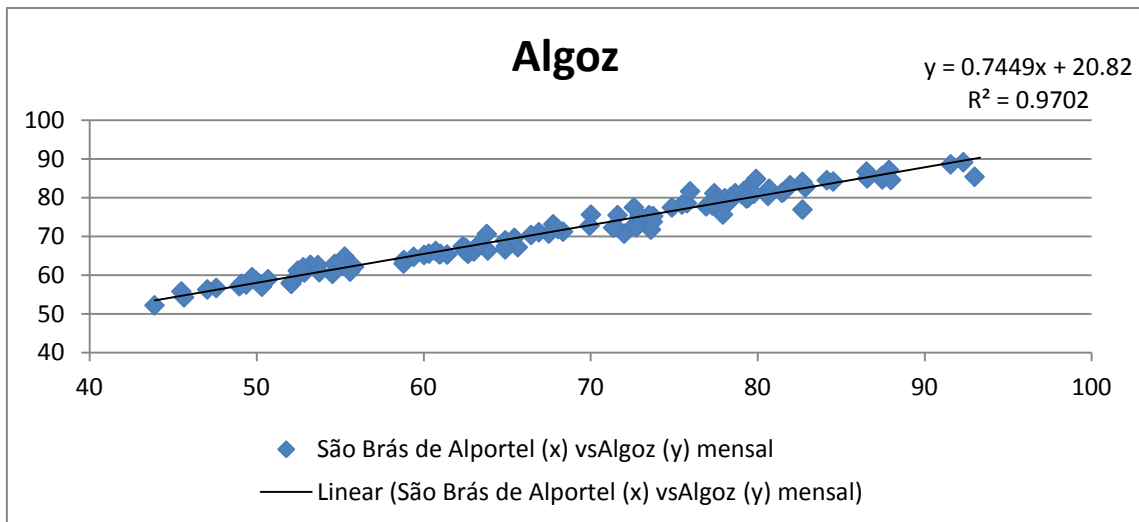


Gráfico 3.2 – Regressão linear entre a humidade relativa de Algoz (y) e São Brás de Alportel (x) (Unidade:%).

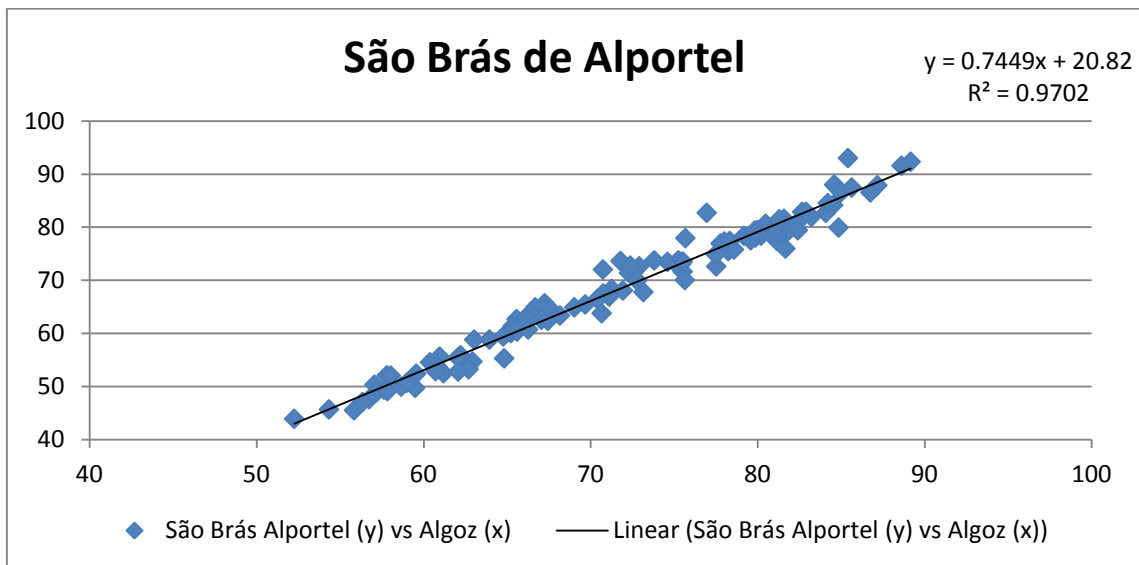


Gráfico 3.3 – Regressão linear entre a humidade relativa de São Brás de Alportel (y) e Algoz (x) (Unidade:%).

O exemplo acima (gráficos 3.2 e 3.3) representa a regressão linear entre Algoz e São Brás de Alportel para o parâmetro humidade relativa. Neste caso observa-se uma correlação elevada entre estas duas estações para a humidade ( $R^2 = 0.9702$ ). O gráfico 3.2 apresenta a equação utilizada para o preenchimento da série de dados de Algoz enquanto o gráfico 3.3 pode servir para preenchimento da série de dados de São Brás de Alportel.

Os parâmetros humidade relativa, precipitação, radiação solar e temperatura apresentaram no geral uma boa correlação em todas as estações.



O parâmetro velocidade do vento foi o parâmetro onde se registaram valores  $R^2$  mais baixos. Os gráficos 3.4 e 3.5 são representativos da velocidade do vento na estação de Paderne.

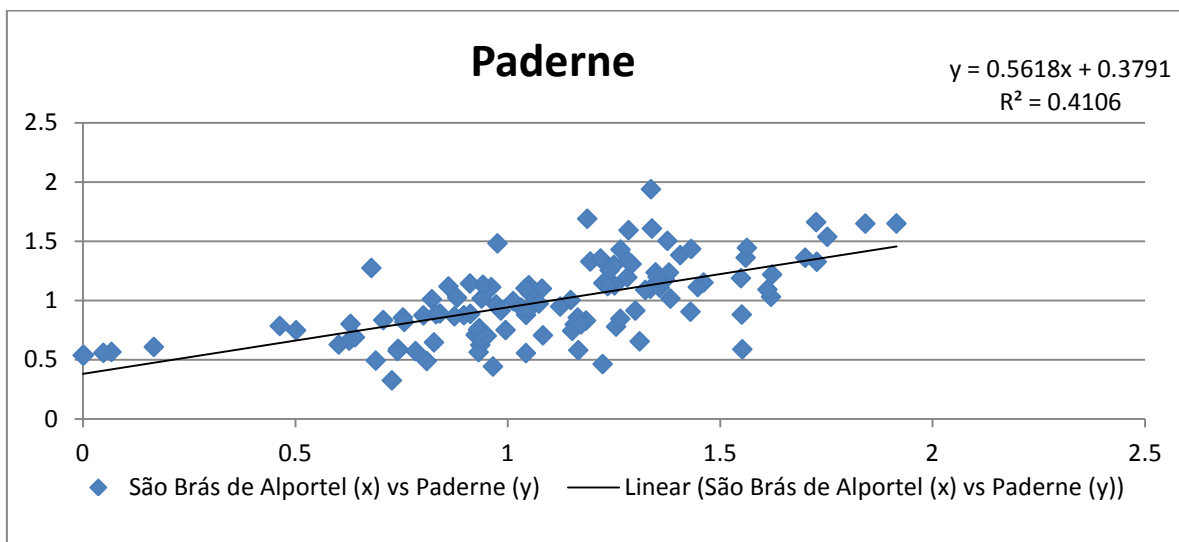


Gráfico 3.4 - Regressão linear entre a humidade relativa de Paderne (y) e São Brás de Alportel (x) (Unidade:%).

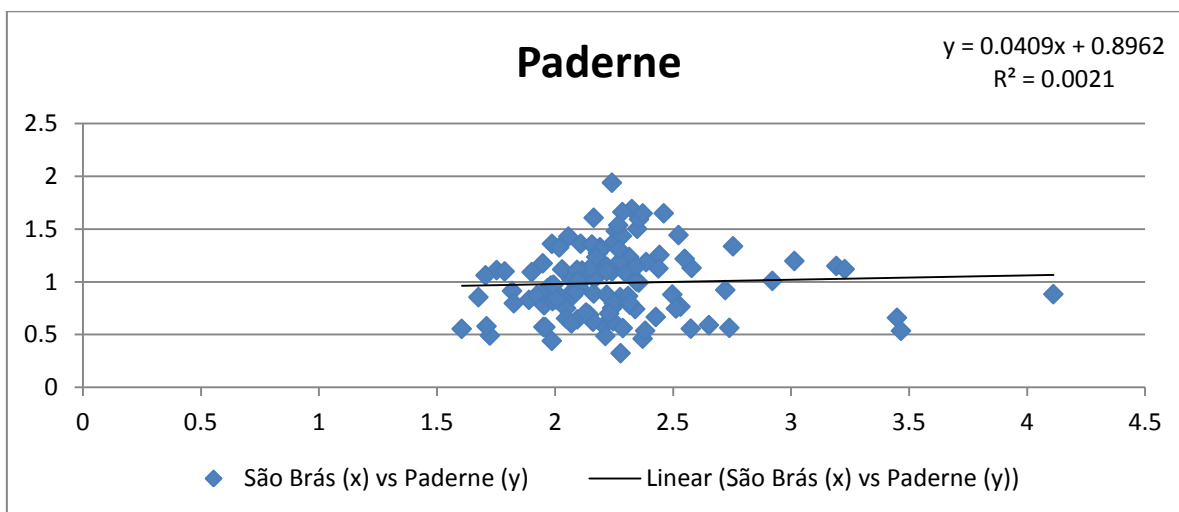


Gráfico 3.5 - Regressão linear entre a humidade relativa de Paderne (y) e Barranco do Velho (x) (Unidade:%).

Nos gráficos 3.4 e 3.5 realizou-se respetivamente a correlação entre a estação de Paderne e São Brás de Alportel e entre Paderne e Barranco do Velho. A regressão linear entre Paderne e São Brás de Alportel apresenta claramente melhores resultados do que a correlação entre Paderne e Barranco do Velho. Este foi o parâmetro mais difícil de controlar sendo aquele em que as correlações apresentaram piores resultados. Uma das explicações para o padrão difuso apresentado por algumas das

regressões realizadas pode ter a ver com o facto de existirem diferentes reações da velocidade do vento consoante a sua direcção. Deste modo é difícil estabelecer uma correlação entre as duas estações onde o coeficiente de determinação seja elevado. Apesar de se ter tentado fazer a correlação entre todas as estações verificou-se que os valores de  $R^2$  obtidos não registam melhorias significativas. Deste modo optou-se por assumir o erro apresentado na correlação e utilizar as equações obtidas por este método para realizar preenchimento de séries de dados. Uma possibilidade para lograr uma melhor correlação entre as estações seria realizar-se a separação dos dados por direcção do vento. Posteriormente realizar-se-iam as correlações respectivas. Este método, apesar de provavelmente dar melhores resultados, é demorado e pode mesmo não resultar pelo que se optou por não aplicá-lo.



## 4. APLICAÇÃO DO MODELO SWAT

A versão do modelo SWAT utilizada na presente dissertação é o ArcSWAT 2009.93.7b lançada em 09/08/2011. Apesar de existirem versões mais recentes esta foi a escolhida pois é a mais recente com compatibilidade com o ArcGIS 9.3. Existe, no entanto, a possibilidade de serem descarregadas revisões recentes do modelo, as quais incluem atualizações aos métodos de cálculo e modelação. Estas revisões, apesar de serem produzidas para as versões mais recentes do modelo, podem ser incluídas na versão utilizada com bons resultados e sem comprometer a compatibilidade da mesma. No presente caso, com a inclusão de uma nova revisão, logrou-se um grande aumento da velocidade de simulação do modelo. A nova revisão utilizada na modelação é a revisão 528 que pode ser descarregada da página oficial do ArcSWAT.

Os dados utilizados para parametrizar o modelo SWAT para a bacia hidrográfica da Ribeira de Quarteira foram descritos no capítulo anterior. Estes dados incluem:

- Topografia (subcapítulo 3.4 Topografia);
- Uso de solo (subcapítulo 3.5 Uso de solo);
- Tipo de solo (subcapítulo 3.6 Tipo de solo);
- Dados climáticos (subcapítulo 3.7 Clima).

Os dados referentes à topografia foram utilizados para realizar o delineamento da bacia hidrográfica e a extração da rede hidrográfica. De modo a aproximar o modelo da realidade introduziram-se, nesta fase, dados referentes às linhas de água de modo a forçar o modelo a localizar corretamente toda a rede hidrográfica. A delimitação automática da bacia hidrográfica deu origem à bacia hidrográfica da ribeira de Quarteira dividida em 18 sub-bacias cuja área média é cerca de 22,75 km<sup>2</sup>.

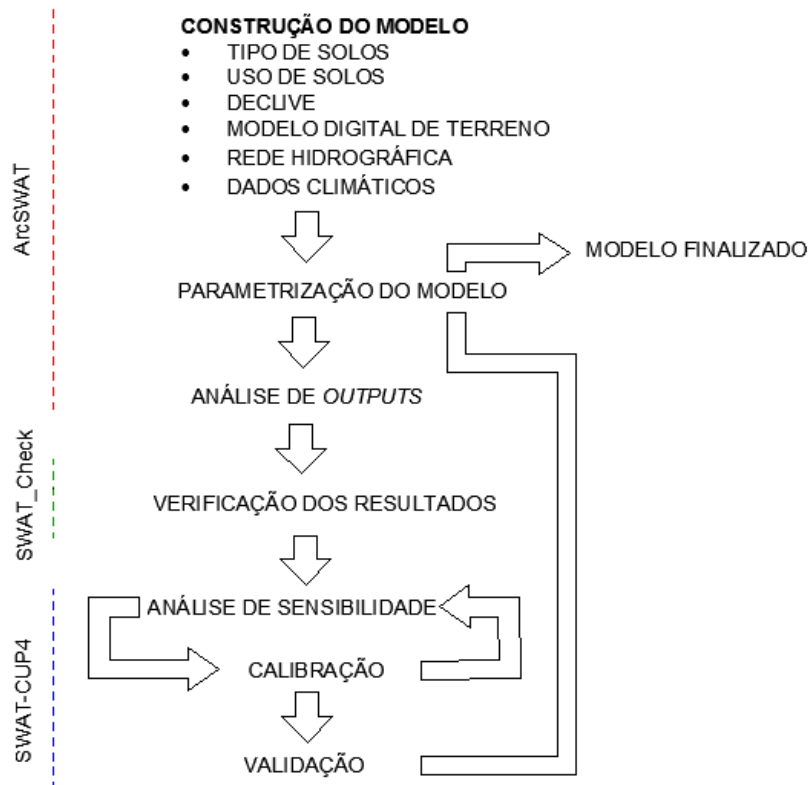
As sub-bacias foram então cruzadas com os dados de uso de solos, tipo de solos e declive e posteriormente foram divididas em HRUs (Hydrologic Response Units). As HRUs são áreas homogêneas dentro da bacia. Foram criadas 329 HRUs tendo sido definido um valor de *threshold* de 15%. Estes valores, quando definidos acima de 0 %, dão liberdade ao modelo para ignorar todos os usos de solo, tipos de solo e declives

que se encontrem presentes abaixo da percentagem definida. Optou-se por deixar este valor nos 15% de modo a serem eliminados declives, tipos de solo e usos de solo que têm áreas tão pequenas que apenas afetariam a eficácia na corrida do modelo e não trariam nenhuma melhoria. Cada HRU tem em média uma área de 1,25 km<sup>2</sup>.

Os dados climáticos foram obtidos, tal como descrito no subcapítulo 3.7, através da base de dados SNIRH. Estes dados estão temporalmente limitados entre 01 de Outubro de 1997 e 30 de Setembro de 2010. Apesar disto os dados utilizados para a calibração começam apenas a 01 de Abril de 2001 servindo os dados anteriores para fazer o aquecimento do modelo. Este procedimento pretende que o modelo comece a trabalhar antes dos anos de modelação para que os resultados durante esta sejam consistentes.

#### **4.1 Estratégia de calibração do modelo**

De um modo geral a calibração do modelo seguiu os passos apresentados no esquema 4.1. A construção do modelo foi feita em ArcSWAT. Neste mesmo *software* procede-se a uma parametrização inicial e posterior análise de resultados. No SWAT\_Check realiza-se mais uma verificação dos resultados e, feitas as correções necessárias, introduz-se o modelo no SWAT-CUP4. Neste *software* procede-se a uma análise iterativa do modelo que tem como base uma análise de sensibilidade e uma autocalibração do modelo. Quando se obtêm os resultados pretendidos realiza-se a validação do modelo em SWAT-CUP4. Utilizam-se então os valores dos parâmetros obtidos na melhor simulação realizada e introduzem-se estes de novo no ArcSWAT. Dá-se então por finalizado o modelo.



Esquema 4.1 – Estratégia de calibração do modelo SWAT

#### 4.1.1 Manipulação dos dados de entrada

A primeira estratégia utilizada para otimizar o modelo foi a calibração manual. Deste modo, após a primeira simulação, efetuou-se uma análise intensiva aos dados. Esta análise começou por incidir nos dados meteorológicos, nomeadamente a precipitação. Esta análise foi motivada pela baixa fiabilidade apresentada pelos dados que têm várias falhas, quer a nível de intervalos de tempo com ausência de dados quer a nível da presença de valores atípicos. De referir que, apesar de os dados meteorológicos poderem apresentar algumas variações típicas deste tipo de parâmetros, registaram-se valores que claramente se encontram fora da gama de valores esperados. Realizando tratamento estatístico dos dados detetaram-se alguns valores que seriam *outliers*. Nos gráficos 4.1, 4.2 e 4.3 encontra-se o exemplo da situação descrita. Neste caso verificou-se a existência de três valores anuais de precipitação que não se enquadravam na tendência apresentada pelos restantes valores da série. Estes valores foram então analisados de forma intensiva. Esta análise foi feita realizando o *ratio* entre a estação em causa (São Brás de Alportel) e todas as outras estações

meteorológicas. Verificou-se que no caso dos valores extremos o *ratio* não se mantinha como nos outros intervalos de tempo. Optou-se então por recalcular estes valores pelo método descrito no subcapítulo 3.8. Voltaram-se a introduzir os dados meteorológicos e correram-se novas simulações tendo-se obtido valores de precipitação mais próximos dos valores esperados.

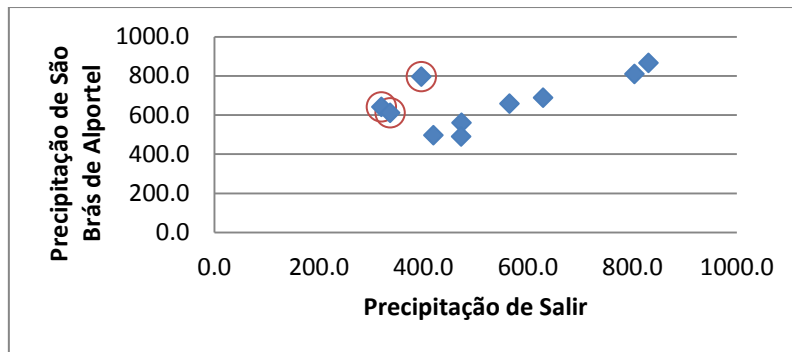


Gráfico 4.1 – Precipitação de São Brás de Alportel vs precipitação de Salir (a vermelho estão assinalados os *outliers*) (Unidades: mm)

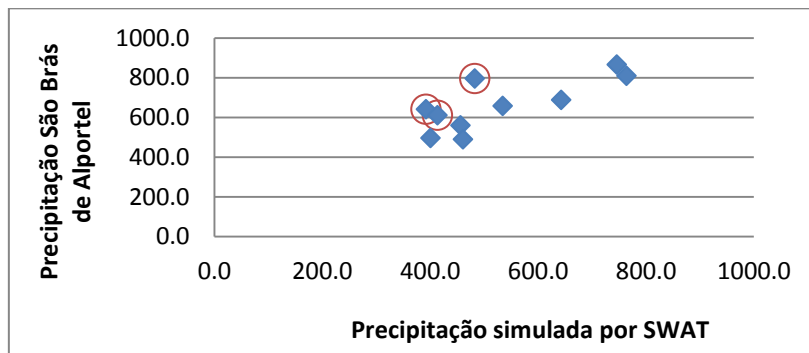


Gráfico 4.2 – Precipitação de São Brás de Alportel vs precipitação simulada (SWAT) (a vermelho estão assinalados os *outliers*) (Unidades: mm)

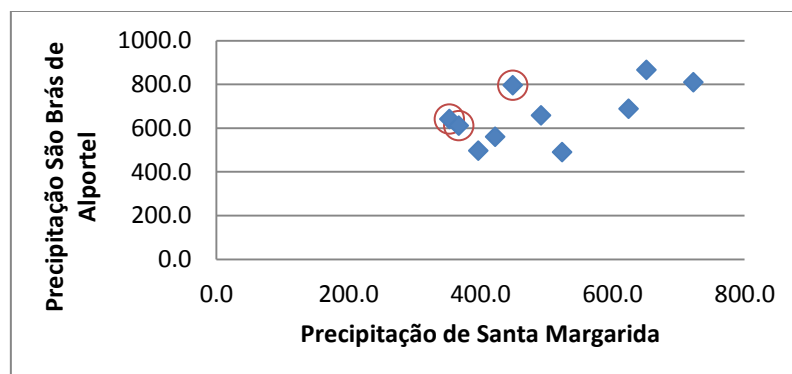


Gráfico 4.3 – Precipitação de São Brás de Alportel vs precipitação de Santa Margarida (a vermelho estão assinalados os *outliers*) (Unidades: mm)

Após a manipulação dos dados meteorológicos realizou-se uma análise estatística na qual se verificou que os dados estão a seguir uma tendência lógica (mantêm a sua correlação ao longo do intervalo analisado). No gráfico 4.4 pode-se verificar esta premissa.

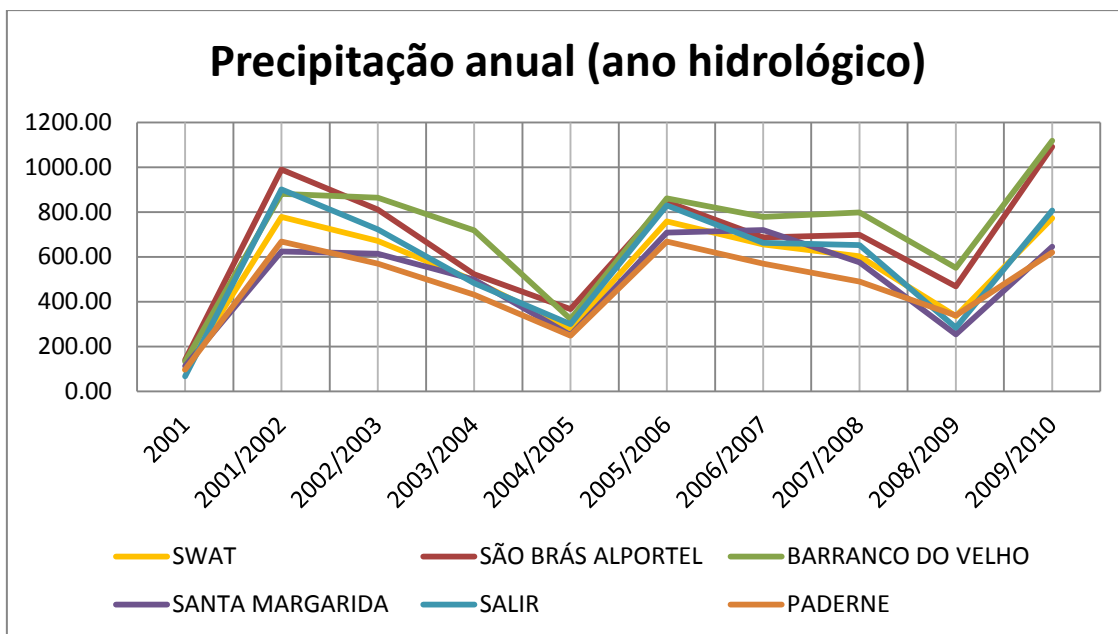


Gráfico 4.4 – Precipitação anual (ano hidrológico) para os anos em estudo

Pela análise do gráfico 4.4 verifica-se também o registo da seca que assolou o país em 2004/2005 durante a qual os valores de precipitação registados em todas as estações foram muito baixos.

#### 4.1.2 Parametrização inicial do modelo

De modo a poupar-se tempo na calibração do modelo deve-se, inicialmente, fazer uma parametrização com valores que julguemos estarem próximos daquilo que é típico para as bacias em estudo. Significa isto que se devem atribuir valores que caracterizem e diferenciem os sectores da bacia consoante as suas particularidades. Esta parametrização é crucial pois deve-se atentar ao facto de o ArcSWAT ser um *software*



que tem como origem os Estados Unidos da América logo os valores por defeito estão adaptados à realidade deste país.

Tal como descrito no capítulo 2 existe um *software* designado por SWAT-Check cuja função é realizar vários diagnósticos ao modelo para detetar potenciais problemas que este possa ter. Após se terem introduzido as pastas dos dados de entrada e saída (*TxtInOut*) no *software* analisaram-se as mensagens obtidas. Verificou-se assim que os valores de infiltração profunda estariam demasiado baixos. Para realizar a correção deste fator manipulou-se o parâmetro *RCHRG\_DP* (*Deep aquifer percolation fraction*) que representa a fração de percolação que efetivamente passa para infiltração profunda. Este parâmetro foi diferenciado tendo em conta o tipo de solos utilizado. Na figura 3.9 podem ser observados os diversos tipos de solo, a sua localização e distribuição pela bacia. Na tabela 4.1 apresentam-se os valores utilizados para o parâmetro *RCHRG\_DP*.

Tabela 4.1 – Parâmetro *RCHRG\_DP* para os tipos de solos

<b>Tipo de solo</b>	<b>RCHRG_DP</b>
Fluvisolos êutricos (Je)	0,5
Fluvisolos calcáricos (Jc)	0,5
Litossolos êutricos (Ie)	0,1
Cambissolos êutricos (Be)	0,5
Cambissolos crómicos (Bc)	0,5
Luvissolos rodo-crómicos (Lcr)	0,9

Estes valores são dados em fração o que significa que, por exemplo, para o caso dos cambissolos êutricos 50% da água que percola representa infiltração profunda. A parametrização destes dados tem como base o conhecimento da zona de estudo.

Na zona dos litossolos êutricos a rocha predominante é o xisto. É do conhecimento geral que este tipo de rocha é pouco porosa e pouco permeável tendo uma aptidão aquífera relativamente baixa. Deste modo optou-se por fixar o *RCHRG\_DP* em 0,1 o que significa que apenas 10% da água que precipita representa infiltração profunda.

O tipo de solo designado por luvissolos rodo-crómicos apresenta um tipo de rocha calcária cuja aptidão aquífera é muito elevada. Este tipo de rocha apresenta-se como o

maior desafio à calibração do modelo SWAT pois tem características bastante particulares. Este tipo de rocha pode apresentar porosidade dupla (fraturado e poroso) e por isso a infiltração representa uma componente muito importante no balanço hidrológico desta zona. Optou-se assim por atribuir 0,9 ao parâmetro *RCHRG\_DP*.

À área de bacia restante optou-se por atribuir um valor de *RCHRG\_DP* de 0,5 pois considerou-se que esta zona terá características entre as zonas acima descritas.

A parametrização restante apresenta-se na tabela 4.2. Esta parametrização foi dividida segundo as diferentes geologias da bacia em estudo. Deste modo diferenciaram-se as zonas de xistos, das zonas com elevada aptidão aquífera (imediatamente a Sul dos xistos constituídas maioritariamente por calcários) e das zonas das rochas sedimentares (restante bacia hidrográfica designada por Litoral).

Tabela 4.2 – Parametrização inicial do modelo SWAT (Rocha *et al.*, 2012)

Parâmetros que representam a relação água superficial/aquífero	Parâmetro	Geologia		
		Xistos	Aquífero	Rochas sedimentares
Índice representativo da resposta de caudal em mudanças na recarga	Alpha_BF	0.3	0.3	0.3
Condutividade Hidráulica nos cursos de água tributários (mm.h <sup>-1</sup> )	CH_K1	0.5	300	300
Condutividade Hidráulica no curso de água principal (mm.h <sup>-1</sup> )	CH_K2	0	300	300
Altura de água necessária no aquífero superficial para o escoamento de base (mm)	GWQMN	50	300	300
<b>Parâmetros que representam a relação aquífero superficial/zona não saturada</b>				
Coeficiente representando a água que transita do aquífero superficial para a zona não saturada	GW_REVAP	0.2	0.05	0.05
Altura de água necessária no aquífero superficial para a água transitar para a zona não saturada (mm)	REVAP_MN	1	1	1
<b>Outros parâmetros</b>				
Tempo de atraso para a recarga no aquífero	GW_DELAY	1	1	1
Coeficiente de escoamento superficial	SURLAG	4	4	4
Fator de compensação de evaporação no solo	ESCO	0.9	<i>default</i>	<i>default</i>

Após a introdução destes valores no ArcSWAT o modelo está preparado para a simulação e posterior calibração.

#### 4.1.3 Simulação e análise do modelo em ArcSWAT

A primeira simulação é realizada no ArcSWAT. Após a verificação de que todos os *outputs* estão a ser criados de maneira correta procede-se à verificação do balanço hidrológico. O balanço hidrológico realiza-se aplicando equações que tentam acompanhar a lógica de cálculo de um balanço hidrológico típico incluindo as variáveis e parâmetros do SWAT. É possível que alguma pequena componente considerada pelo *software* não seja considerada nas equações abaixo utilizadas, no entanto, realizando-se uma soma de todas as componentes obtêm-se valores muito próximos dos valores de precipitação pelo que os erros cometidos e componentes do balanço omitidas serão mínimos.

Na figura 4.1 apresentam-se as componentes do balanço hidrológico consideradas no ArcSWAT e as suas respetivas relações.

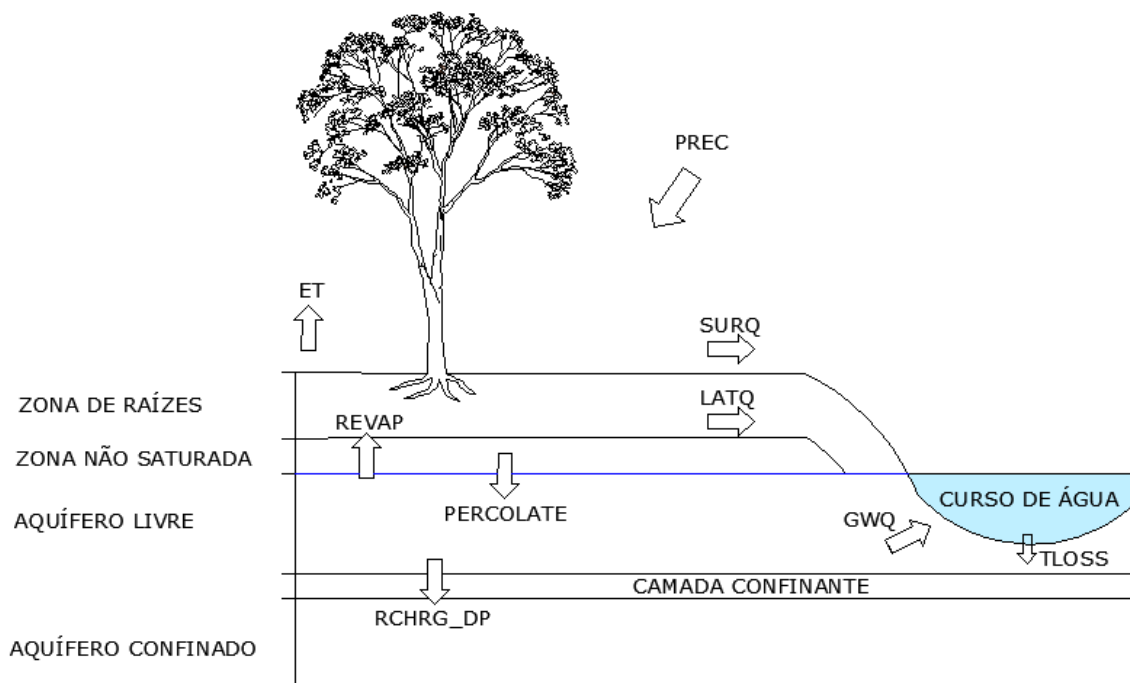


Figura 4.1 – Balanço hidrológico do ArcSWAT

A componente da precipitação é o único dado de entrada de água considerado na bacia em estudo. Isto significa que todas as outras componentes do balanço hídrico estão dependentes, quantitativamente, da precipitação. Para valores idênticos da precipitação estas componentes podem diferenciar bastante, consoante a zona da bacia que considerarmos, devido a alterações a nível de tipo e uso de solo. As seguintes equações ajudam a compreender o modo como o ArcSWAT relaciona as componentes do balanço hídrico.

$$\text{PREC} = \Delta\text{SW} + \text{SURQ} + \text{LATQ} + \text{ET} + \text{PERCOLATE} \quad \text{Equação 1}$$

$$\text{WATER YIELD} = \text{SURQ} + \text{LATQ} + \text{GW Q} \quad \text{Equação 2}$$

$$\text{STREAMFLOW} = \text{WATER YIELD} \quad \text{Equação 3}$$

$$\text{RECHARGE} = \text{PERCOLATE} - \text{GW Q} \quad \text{Equação 4}$$

Na tabela 4.3 apresentam-se alguns resultados da aplicação destas equações. Esta tabela pode ser utilizada para analisar de modo geral a resposta do modelo aos dados climatológicos de entrada.

Tabela 4.3 – Análise aos parâmetros *SW*, *RECHARGE* e *STREAM FLOW*

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
<b>Δ SW</b>	-2.6	1.7	-5.1	-27.9	32.2	-4.5	-17.6	-24.3	51.1	-127.0
<b>RECHARGE</b>	272.9	258.8	204.0	83.9	110.6	277.8	97.8	146.1	133.7	214.3
<b>STREAM FLOW</b>	265.4	196.7	163.5	60.5	103.3	190.4	73.2	133.0	139.2	165.9

Analisando o conteúdo da tabela 4.3 verifica-se que a água presente (SW) no solo diminui quase sempre de um ano para o outro enquanto a recarga (RECHARGE) se apresenta sempre positiva. Verifica-se também que tanto a recarga como a água disponível no solo apresentam valores mais baixos nos anos em que houve menos disponibilidade de água (menos precipitação). Este facto entra em concordância com o que se observou no gráfico 4.4 podendo assim concluir-se que o modelo está a responder corretamente aos dados climatológicos de entrada.

Na tabela 4.4 é apresentada uma análise das componentes do balanço hidrológico em percentagem de precipitação.

Tabela 4.4 - Análise aos parâmetros *SW*, *ET*, *RECHARGE* e *STREAM FLOW* em percentagem de precipitação

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
<b>Δ SW</b>	0%	0%	-1%	-7%	7%	-1%	-4%	-5%	9%	-27%
<b>ET</b>	34%	40%	44%	71%	45%	39%	66%	52%	39%	48%
<b>RECHARGE</b>	34%	34%	32%	21%	24%	36%	22%	27%	25%	45%
<b>STREAM FLOW</b>	33%	26%	25%	15%	23%	25%	16%	25%	26%	35%

Destacam-se os anos de 2004 e 2007 por ter havido uma percentagem de evapotranspiração muito elevada comparativamente aos outros componentes. No ano de 2004 esta elevada percentagem é justificada pelos valores muito baixos de precipitação aliados a temperaturas altas. De referir que foi neste ano que se registaram as temperaturas mais altas do período em análise (máximas e mínimas) sendo este um dos anos em que houve seca na bacia hidrográfica em estudo. No ano 2007 a evapotranspiração também assume uma grande importância no balanço hidrológico. Os valores de precipitação relativamente baixos (tabela 4.13) e as temperaturas mais elevadas justificam o grande peso da evapotranspiração no balanço hidrológico deste ano.

No gráfico 4.5 podem-se observar as diferenças entre a evapotranspiração real (ET) e a evapotranspiração potencial (PET).

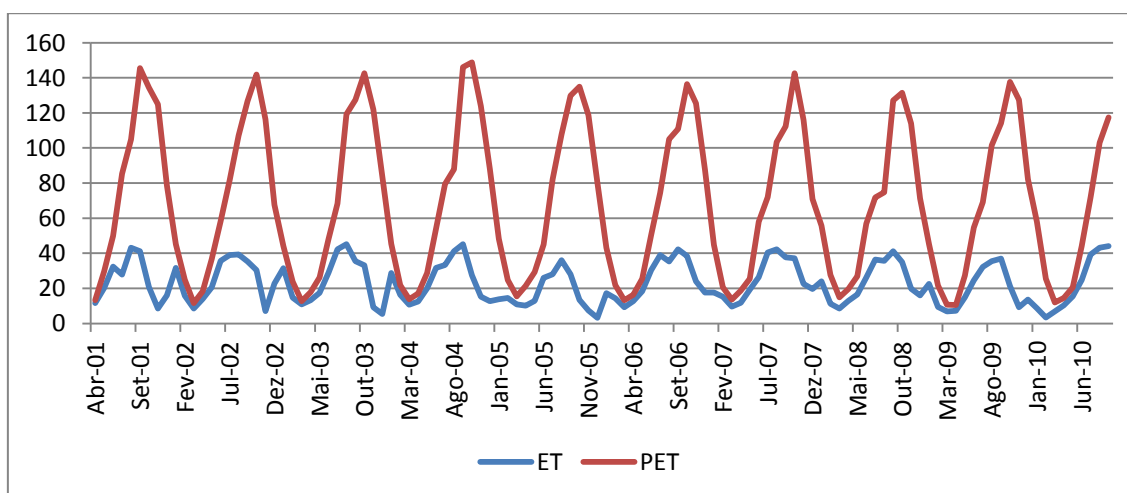


Gráfico 4.5 – Evapotranspiração real vs evapotranspiração potencial

Durante os meses de Inverno os valores obtidos são bastante próximos devido à grande disponibilidade de água e à reduzida energia solar. Durante os últimos meses do Verão ocorre precisamente o contrário e os valores registados diferem bastante. A água disponível para evapotranspirar começa a ser muito pouca e os valores de ET diminuem bastante ao contrário dos valores de PET que devido à elevada energia solar sobem bastante. Com as primeiras chuvas de Outono e o abaixamento de temperatura estes valores voltam a aproximar-se.

O facto de, a evapotranspiração real e a evapotranspiração potencial, se encontrarem sempre dentro da mesma ordem de grandeza para as mesmas alturas do ano significa que é a disponibilidade da água que determina o peso desta componente no balanço hidrológico.

#### **4.1.4 Introdução do modelo em SWAT-CUP4**

Após a construção e parametrização do modelo em ArcSWAT procedeu-se à sua calibração em SWAT-CUP4. Tal como foi descrito no subcapítulo 2.3 após a introdução de uma nova revisão em ArcSWAT torna-se necessário realizar análise de sensibilidade e autocalibração no SWAT-CUP4. No próximo subcapítulo procede-se à descrição do processo.

## **4.2 SWAT-CUP4**

O *software* SWAT-CUP4 foi utilizado na presente dissertação com o objetivo de se realizar análise de sensibilidade e autocalibração. A análise de sensibilidade é bastante útil pois indica quais os parâmetros que influenciam mais os resultados do modelo e orientam o utilizador nesse sentido.

#### 4.2.1 Preparação dos parâmetros e dados de entrada

Na tabela 4.5 apresentam-se os parâmetros utilizados para calibrar o modelo neste *software*.

Tabela 4.5 – Parâmetros utilizados para calibração no SWAT-CUP4 e a sua definição

Parâmetro	Definição
SURLAG	Coeficiente de escorrência superficial
CH_K(2)	Condutividade hidráulica efetiva no curso de água
GW_DELAY	Tempo de atraso para a recarga do aquífero
GW_QMN	Valor limite de água no aquífero livre para que haja ocorrência de caudal de base
ALPHA_BF	Constante de recessão do caudal de base
GW_REVAP	Coeficiente de efluência do aquífero superficial
SOL_K	Condutividade hidráulica da primeira camada do solo
CN2	<i>Curve number</i> para a condição II de humidade
SOL_AWC	Água presente no solo
ESCO	Fator de compensação da evaporação no solo
EPCO	Fator de compensação da captação de água pelas plantas

O SWAT-CUP4 permite a introdução de mais parâmetros, no entanto, incluíram-se apenas estes 11 parâmetros por se considerar os mais representativos. A avaliação da qualidade do modelo é realizada com recurso à comparação entre um ou mais hidrogramas observados (dados de entrada) e um ou mais hidrogramas simulados (dados de saída). O hidrograma simulado é dependente de todos os dados de entrada do modelo e pode ser alterado através da manipulação dos parâmetros acima descritos. Os dados de caudal foram retirados da base de dados SNIRH e são diários ( $m^3/s$ ). Foram utilizadas três estações embora nem todas tenham dados completos: Ponte da Ribeira do Rio Seco, Querença e Ponte Rodoviária. Na tabela 4.6 são apresentadas as datas para as quais as estações têm dados disponíveis.

Tabela 4.6 – Intervalo de dados de caudal para as 3 estações utilizadas na calibração

Estação	Data início	Data fim
Ponte Rodoviária	01 Abril de 2001	30 Setembro de 2010
Querença	01 Abril de 2001	30 Setembro de 2010*
Ponte Ribeira do Rio Seco	05 Janeiro de 2005	30 Setembro de 2006

\*A série de dados de caudal de Querença inclui dados obtidos por regressão linear

A estação hidrométrica de Ponte Rodoviária é a única que apresenta uma série de dados completa para o período de simulação.

A estação hidrométrica de Querença apresenta uma série de dados incompleta e com vários dados em falta. Procedeu-se à comparação entre os dados de Querença e Ponte Rodoviária e verificou-se que no geral coincidem (os dados apresentam o mesmo padrão). Optou-se assim por preencher os dados em falta realizando uma regressão linear entre as estações referidas ( $R^2 = 0.6$ ).

Ponte Ribeira do Rio Seco é a estação hidrométrica, considerada para a calibração, com menos dados. Optou-se no entanto por manter esta estação de modo a cobrir uma zona cuja geologia é diferente das outras estações.

Estes dados são utilizados para calibração e validação do modelo pelo que tiveram de ser divididos. Para calibração utilizou-se o intervalo de dados entre 01 de Abril de 2001 e 30 de Setembro de 2007. Para validação consideraram-se os restantes dados até 30 de Setembro de 2010. Deste modo a estação Ponte Ribeira do Rio Seco só pode ser utilizada para calibração devido ao reduzido intervalo de dados que apresenta.

Realizou-se uma análise intensiva aos dados de caudal utilizados para a calibração de modo a se detetarem possíveis falhas (do material, de registo, etc.) que viriam a hipotecar a hipótese de se obterem bons resultados. Esta análise abordou os hidrogramas procurando verificar se estes faziam sentido em termos de resposta a eventos de precipitação. É normal que, consoante a altura do ano e condições de solo, os hidrogramas possam registar diferenças entre si. No entanto procurou-se colmatar apenas situações que fossem claramente atípicas. Na figura 4.2 é apresentado um hidrograma que representa claramente um caso que se encaixa no que foi acima descrito.



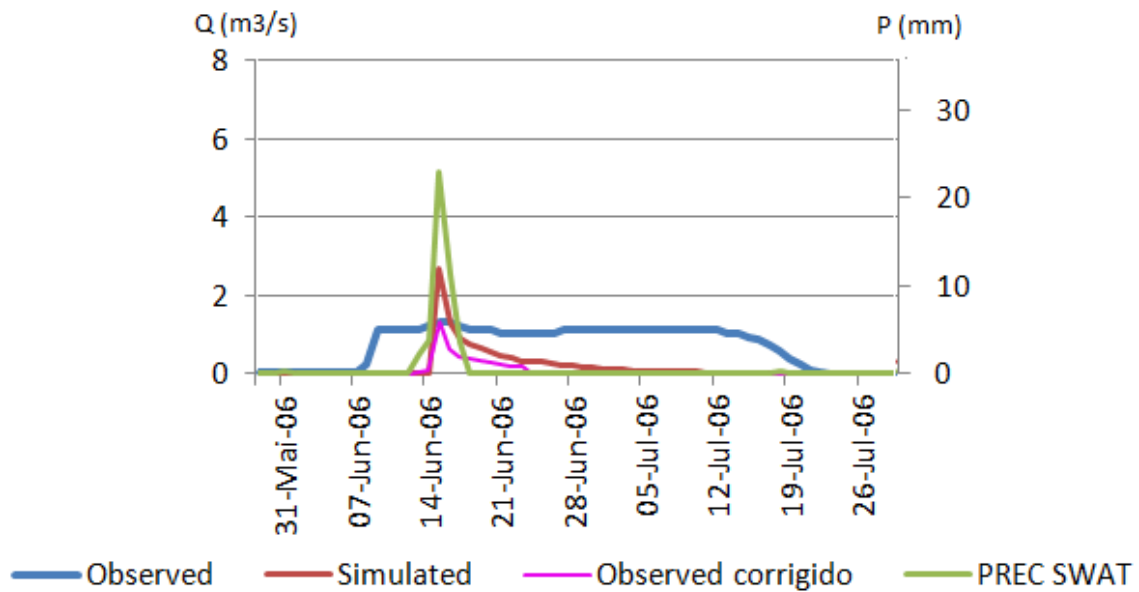


Figura 4.2 – Correção de hidrograma observado que claramente apresenta anomalias

Pela análise da figura 4.2 verifica-se que o hidrograma observado apresenta valores que não acompanham o padrão típico que se verifica quando ocorre um evento de precipitação. De facto, quando ocorre um evento de precipitação é normal que haja um registo de aumento de caudal num curto espaço de tempo que depois vai decaindo mais ou menos rápido consoante o caudal de base. O caso acima apresentado parece representar uma avaria ou encravamento no sensor de nível. Procedeu-se então a uma correção dos valores tendo em conta a velocidade de decaimento do caudal, típica desta estação hidrométrica. Deste modo logrou-se obter melhores resultados na simulação do modelo.

Na figura 4.3 apresenta-se a localização das 3 estações hidrométricas com dados.

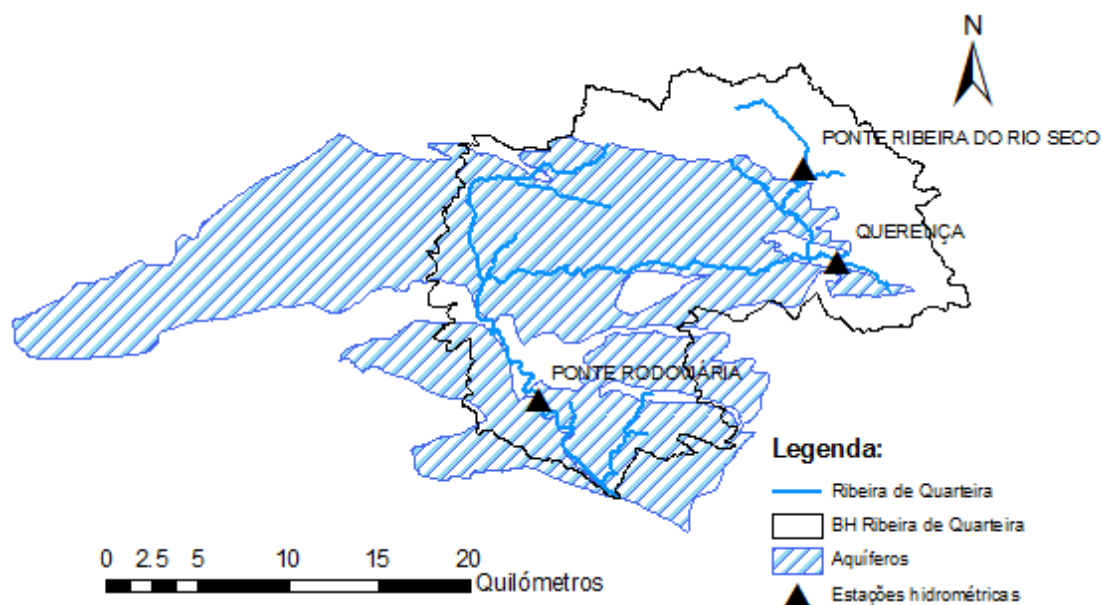


Figura 4.3 – Localização das estações hidrométricas na bacia hidrográfica da Ribeira de Quarteira

A estação hidrométrica mais a Norte é a estação de Ponte Ribeira do Rio Seco. Esta estação representa o exutório de uma subbacia localizada totalmente numa zona de xistos. Espera-se que nesta estação o tempo de resposta do escoamento superficial a um evento de precipitação seja muito reduzido. Imediatamente a Sul encontra-se a estação hidrométrica de Querença. A subbacia cujo caudal é medido nesta estação é constituída por xistos e margas sendo de esperar um comportamento parecido ao registado na estação de Ponte Ribeira do Rio Seco. A estação de Ponte Rodoviária é potencialmente a estação mais difícil de calibrar. Em primeiro lugar tem a montante grande parte da bacia hidrográfica com toda a heterogeneidade e complexidade de tipos e usos de solo que isso representa. Deste modo passa a estar dependente, não só da sua própria parametrização, mas também da parametrização das outras duas estações a montante. De referir ainda que esta estação está localizada sobre uma geologia cársica cuja simulação é muito complexa.

Na figura 4.4 encontram-se identificadas as subbacias, a Ribeira de Quarteira e as respetivas estações hidrométricas

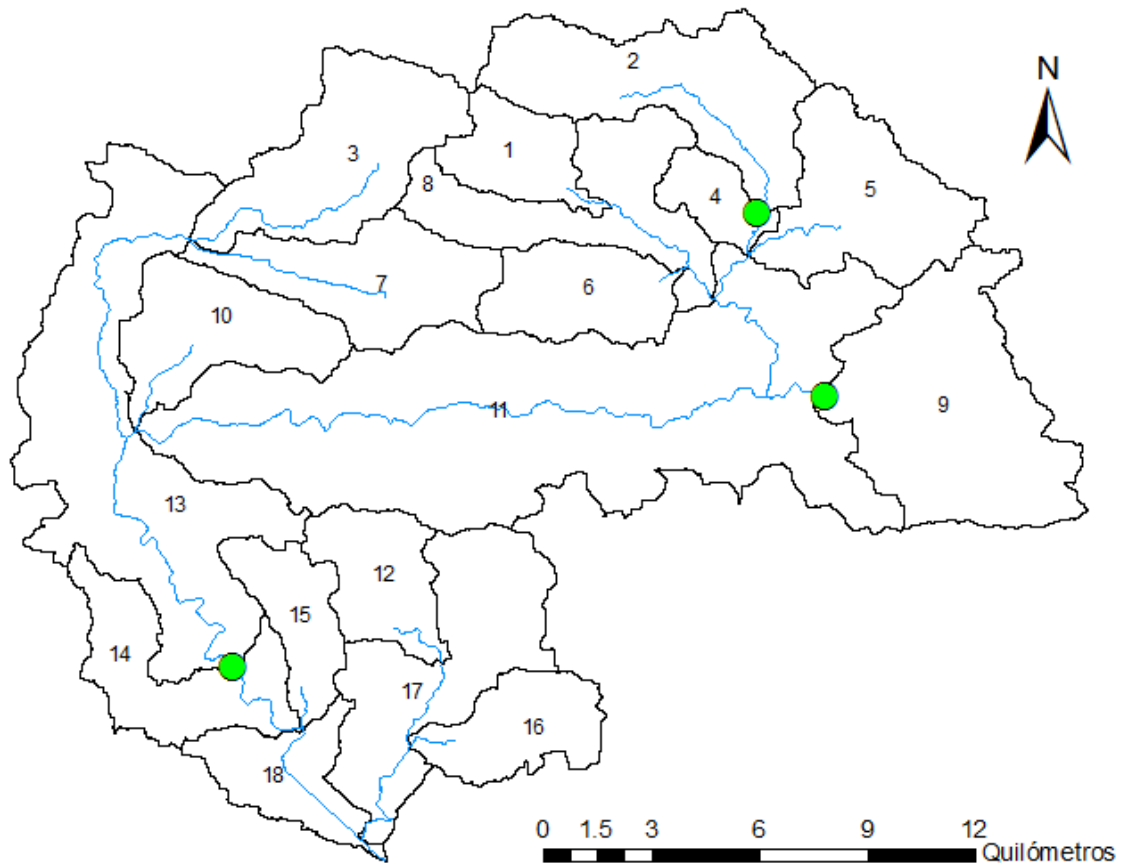


Figura 4.4 – Representação das subbacias e respetivas estações hidrométricas que medem o caudal gerado nestas

Pela análise da figura 4.4 verifica-se que a jusante da estação Ponte Rodoviária não há mais registos de caudal. Dado que o exutório da Ribeira de Quarteira é a Marina de Vilamoura / praia da Falésia verifica-se que existe uma zona onde será sentida a ação das marés. Devido ao facto de o Litoral apresentar um relevo suave infere-se que esta ação pode ser sentida inclusive a vários quilómetros do exutório. Verifica-se assim que não faria sentido haver uma estação hidrométrica mais a Sul pois seria impossível dissociar a componente do hidrograma que seria influenciada pelas escorrências superficiais da componente influenciada pelas marés. Neste sentido não se pode incluir as subbacias 12, 14, 15, 16, 17 e 18 na calibração do modelo em SWAT-CUP4 pois não existem dados de caudal para estas. Deste modo o exutório da Bacia da Ribeira de Quarteira, para efeitos de calibração na presente dissertação, localiza-se na Ponte Rodoviária tendo-se optado por não retirar as restantes subbacias por uma questão estética.

Na tabela 4.7 encontram-se definidas as subbacias incluídas na calibração de cada estação hidrométrica.

Tabela 4.7 – Subbacias consideradas na calibração de cada estação hidrométrica

<b>Estação hidrométrica</b>	<b>Subbacia(s)</b>
Ponte Ribeira do Rio Seco	2
Querença	9
Ponte Rodoviária	1, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11 e 13

A subbacia 5 não foi incluída em nenhuma das estações pois não gera caudal para a Ponte Ribeira do Rio Seco nem para a estação de Querença. No entanto também não apresenta as mesmas características geológicas das subbacias que são consideradas para a calibração na estação Ponte Rodoviária. De modo a simplificar a calibração optou-se por não incluir esta subbacia em nenhuma das estações e posteriormente atribuir-lhe a mesma parametrização da subbacia 2 pois estas são geologicamente bastante semelhantes.

#### **4.2.2 Calibração do modelo**

Para a calibração inicial do modelo foram construídos três projetos SWAT-CUP4 (um por estação hidrométrica). Deste modo torna-se mais fácil parametrizar o modelo pois, para além da análise de sensibilidade ser mais simples, são necessárias menos corridas para que esta esteja disponível. Isto ocorre porque, para se ter acesso à análise de sensibilidade, é necessário realizar  $n+2$  simulações (em que  $n$  representa o número de parâmetros). A estratégia de calibração no SWAT-CUP4 foi baseada em várias simulações de 20 corridas cada (utilizando a opção “Parallel processing”). Entre cada iteração analisaram-se os parâmetros mais sensíveis, observaram-se os hidrogramas (figura 4.5) e ponderou-se a deslocação dos intervalos consoante o que foi proposto pelo *software* (“New\_pars.txt”). Após a reformulação dos valores dos parâmetros volta-se a fazer nova iteração. Este processo é repetido até se obterem os resultados pretendidos.

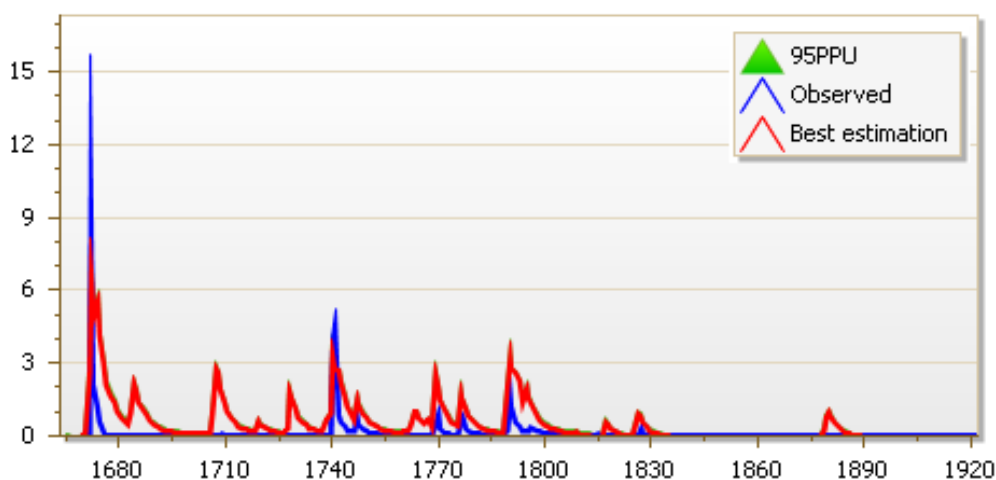


Figura 4.5 – Hidrograma observado vs hidrograma simulado no SWAT-CUP4

Para utilizadores experientes a análise do hidrograma é uma análise poderosa que permite perceber que parâmetros devem ser alterados e de que forma. A presente dissertação representa o primeiro contacto com este *software* e com este modelo pelo que se recorreu mais vezes à análise de sensibilidade para melhorar os resultados. Existem no entanto algumas dicas que podem ser seguidas de modo a se ter uma ideia do que os hidrogramas nos indicam. Pela análise da figura 4.5 pode-se verificar que no primeiro evento de precipitação apresentado o escoamento superficial é baixo (o primeiro pico de caudal simulado é bastante mais baixo que o observado) mas o caudal de base é elevado (o decaimento do pico de caudal simulado é mais lento que o decaimento real). Esta situação ocorre principalmente nos últimos meses de Verão e com as primeiras chuvas pois os solos encontram-se muito secos e a infiltração é muito rápida. Este é um dos maiores problemas registados na calibração do modelo. Para corrigir o caudal de base pode-se diminuir o CN2 e aumentar o SOL\_AWC e o ESCO. Pode-se também aumentar o GWQMN e o GW\_REVAP. Estas parametrizações do modelo foram testadas até se atingirem os melhores resultados. Os intervalos de valores utilizados na primeira iteração são apresentados na tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Parametrização inicial para calibração em SWAT-CUP4

Operação	Parâmetros	Mínimo	Máximo
r	CN2	-0.2	0.2
v	ALPHA_BF	0.0	1.0
v	GW_DELAY	30.0	450
v	GWQMN	0.0	2.0
v	GW_REVAP	0.0	0.2
v	ESCO	0.2	1.0
v	EPCO	0.3	0.9
v	CH_K2	5.0	130.0
r	SOL_AWC	-0.2	0.4
r	SOL_K	-0.8	0.8
v	SURLAG	1.0	8

**LEGENDA:** *r* – multiplicar por 1 +; *v* – substituir; *a* – adicionar

Esta parametrização foi utilizada nos modelos das estações de Ponte Rodoviária e de Ponte de Ribeira do Rio Seco. Para parametrizar a estação de Querença utilizou-se a parametrização final da estação de Ponte de Ribeira do Rio Seco pois estas apresentam algumas semelhanças em termos geológicos. Os intervalos considerados são relativamente grandes para que, de modo iterativo, se encontrem os melhores valores para cada um dos parâmetros considerados.

Devido ao facto de todos os dados de entrada estarem sujeitos a erros de medição e leitura verifica-se que os modelos podem apenas lograr serem aproximações da realidade. De referir também que a introdução de dados é realizada de modo limitado e a natureza comporta-se de modo contínuo e por isso não existe nenhum modelo inverso de hidrologia que tenha uma solução única. Isto significa que para as mesmas condições existem várias combinações de parâmetros que levam a resultados igualmente bons (Abbaspour *et al.*, 2007).

A avaliação da qualidade do modelo é realizada através de uma função estatística designada por função objectiva. Na presente dissertação a função objetiva utilizada foi o  $bR^2$ . Esta função determina a semelhança entre o hidrograma simulado e o

hidrograma observado. O  $bR^2$  é basicamente o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) multiplicado pelo coeficiente de regressão linear ( $b$ ) (Abbaspour, 2011). Numa simulação perfeita, em que o hidrograma simulado ficasse totalmente sobreposto ao hidrograma observado, o valor de  $bR^2$  seria 1. Este valor é claramente teórico e praticamente impossível de obter no modelo da presente dissertação.

Na figura 4.6 é apresentado um excerto de uma análise de sensibilidade realizada para o modelo da Ponte Ribeira do Rio Seco.

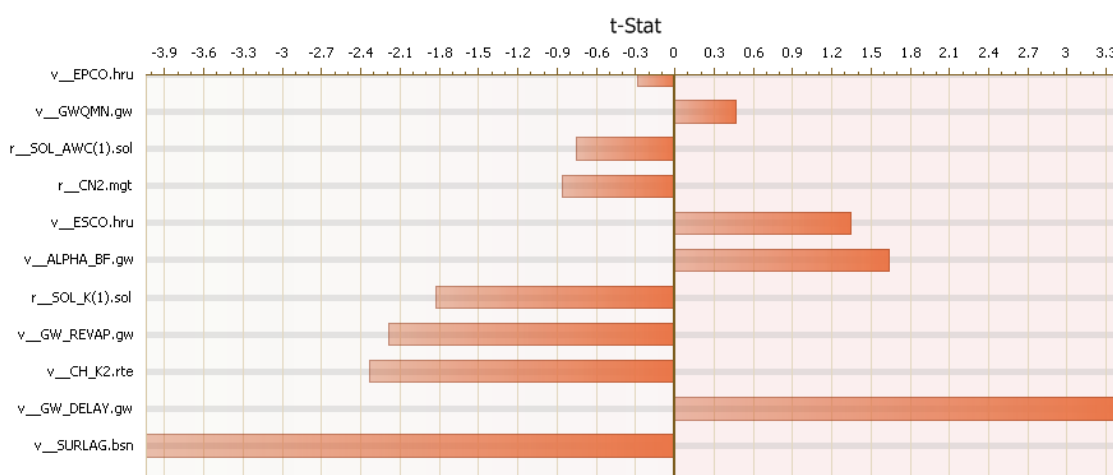


Figura 4.6 – Excerto de análise de sensibilidade para a estação Ponte Ribeira do Rio Seco

A partir da análise da figura 4.6, o utilizador, seria conduzido a alterar a parametrização de SURLAG e de GW\_DELAY pois são os parâmetros que têm mais influência nos resultados do modelo. Verificam-se então os intervalos que o SWAT-CUP4 estabeleceu, considerando para isso a melhor simulação (“New\_pars”). É a partir destes intervalos que se volta a parametrizar o modelo. Procede-se deste modo, iterativamente, até se obterem os resultados pretendidos. Na tabela 4.9 apresenta-se a parametrização final do modelo para as 3 estações hidrométricas consideradas.

Tabela 4.9 – Parametrização final do modelo realizada em SWAT-CUP4

Operação	Parâmetro	Ponte Ribeira do Rio Seco		Querença		Ponte Rodoviária	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
r	CN2	-0.362	0.022	-3.984	-3.851	0.326	0.360
v	ALPHA_BF	0.099	0.272	0.020	0.022	0.485	0.614
v	GW_DELAY	0.000	41.175	0.065	0.316	3.347	4.826
v	GWQMN	0.000	2.000	1.534	4.652	1.000	3.200
v	GW_REVAP	0.000	0.200	5.793	8.211	1.198	1.627
v	ESCO	0.200	1.000	0.000	7.000	0.073	0.437
v	EPCO	0.300	0.900	0.012	0.040	0.609	0.623
v	CH_K2	1.272	58.551	15.238	26.812	219.773	223.127
r	SOL_AWC	0.100	0.700	14.955	16.471	2.661	3.014
r	SOL_K	-1.531	0.023	3.393	4.385	2.016	6.479
v	SURLAG	1.000	8.000	4.000	6.830	0.594	2.420

**LEGENDA:** *r* – multiplicar por 1+p; *v* – substituir; *a* – adicionar

Analisando a tabela 4.9 verifica-se que apesar de a parametrização da estação de Querença ter sido realizada a partir dos resultados obtidos para a estação de Ponte Ribeira do Rio Seco estas apresentam alguns parâmetros com valores bastante distintos. Este é um exemplo da não singularidade do modelo. Apesar destas estações se localizarem em zonas com características geológicas idênticas a análise de sensibilidade, auto calibração e posterior parametrização conduziram a valores diferentes. A não singularidade do modelo pode ser a resposta para esta ocorrência. De referir também que o modelo da estação de Querença foi objeto de uma parametrização mais intensiva e por isso pode-se observar que os seus intervalos, em valor absoluto, são mais pequenos.

Dependendo dos resultados obtidos ao longo das iterações optou-se por parametrizar mais ou menos vezes os modelos. Este fator reflete-se diretamente no valor absoluto dos intervalos dos parâmetros. Quanto mais intensiva for a parametrização, mais iterações são realizadas e mais pequenos são os intervalos dos parâmetros.

Posteriormente à parametrização dos modelos em separado realizou-se a parametrização de apenas um modelo para as 3 estações hidrométricas consideradas. Na tabela 4.10 apresentam-se os resultados obtidos.



Tabela 4.10 – Resumo estatístico dos resultados do modelo (calibração)

Estação	bR <sup>2</sup>
Ponte Ribeira do Rio Seco	0.6325
Querença	0.2610
Ponte Rodoviária	0.3915

Através da análise da tabela 4.10 verificou-se que o hidrograma simulado correspondente a Ponte Ribeira do Rio Seco é o que mais se aproxima do hidrograma real. Segue-se o hidrograma de Ponte Rodoviária e o de Querença. Os resultados obtidos para Ponte Ribeira do Rio Seco são bastante bons sendo no entanto a estação com menos dados. Os resultados das outras duas estações podem refletir algumas falhas na parametrização mas também podem representar alguns problemas relativamente aos dados de entrada. A correção destes problemas representa muito tempo e requer experiência na análise dos dados de saída do SWAT-CUP4. Considerou-se assim que os resultados obtidos são aceitáveis para uma primeira experiência neste *software*. De referir que o presente modelo pode ainda ser melhorado substancialmente, num futuro projeto, pois não foram incluídas operações de monitorização da bacia sendo este um dos pontos onde ainda existe muita margem de progressão.

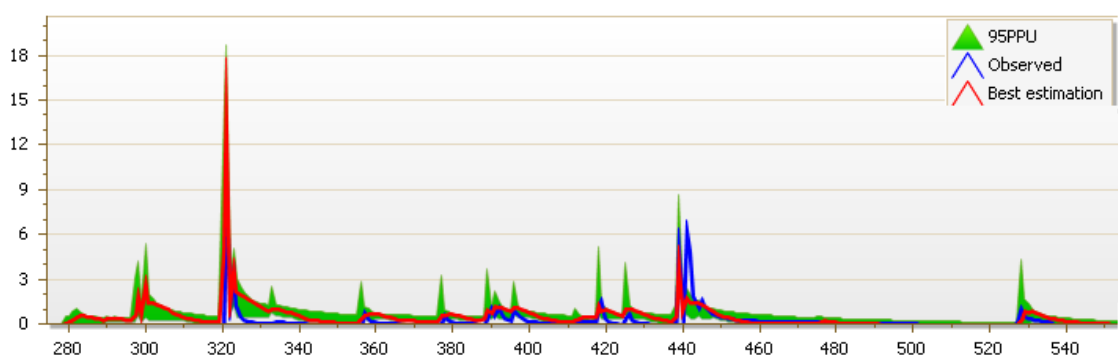


Figura 4.7 – Hidrograma simulado vs hidrograma observado para a estação Ponte Ribeira do Rio Seco

Na figura 4.7 pode-se observar um dos dados de saída do SWAT-CUP4 nomeadamente o hidrograma simulado (a vermelho) e o hidrograma observado (a azul) para a estação da Ponte Ribeira do Rio Seco. Como se pode verificar a sobreposição entre ambos hidrogramas é relativamente boa. Regista-se no entanto a simulação de dois picos de

caudal no início, contrariando o padrão dos dados observados. Uma das falhas do presente modelo é precisamente não conseguir simular corretamente os primeiros eventos de precipitação que ocorrem imediatamente após o Verão. Nesta altura os terrenos estão mais secos e a componente infiltração tem uma grande importância no balanço hídrico verificando-se que a escorrência superficial é muito pouca ou até nenhuma. Atualmente o modelo construído não é capaz de simular este aspeto e por isso regista escorrência superficial nesta altura, contrariando os dados observados. Este facto pode ser observado e verificado nos gráficos 4.6, 4.7 e 4.8. Estes gráficos apresentam os hidrogramas obtidos pela calibração do modelo no SWATCUP e contrapõem-nos aos hidrogramas observados nos períodos acima referidos.

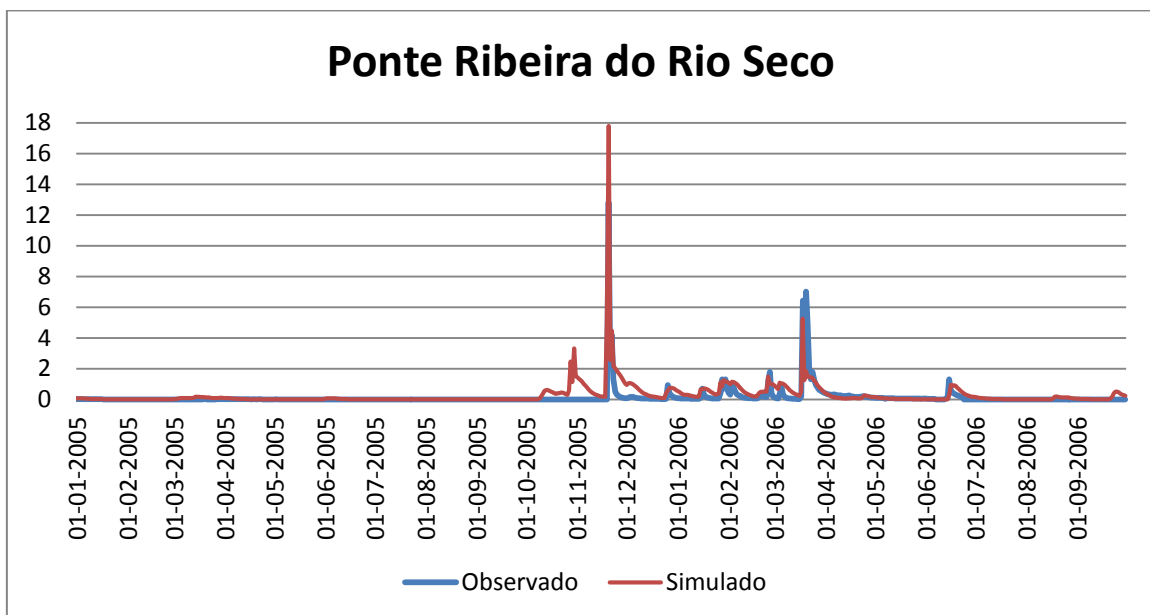


Gráfico 4.6 – Hidrograma observado vs hidrograma simulado para Ponte Ribeira do Rio Seco (calibração)

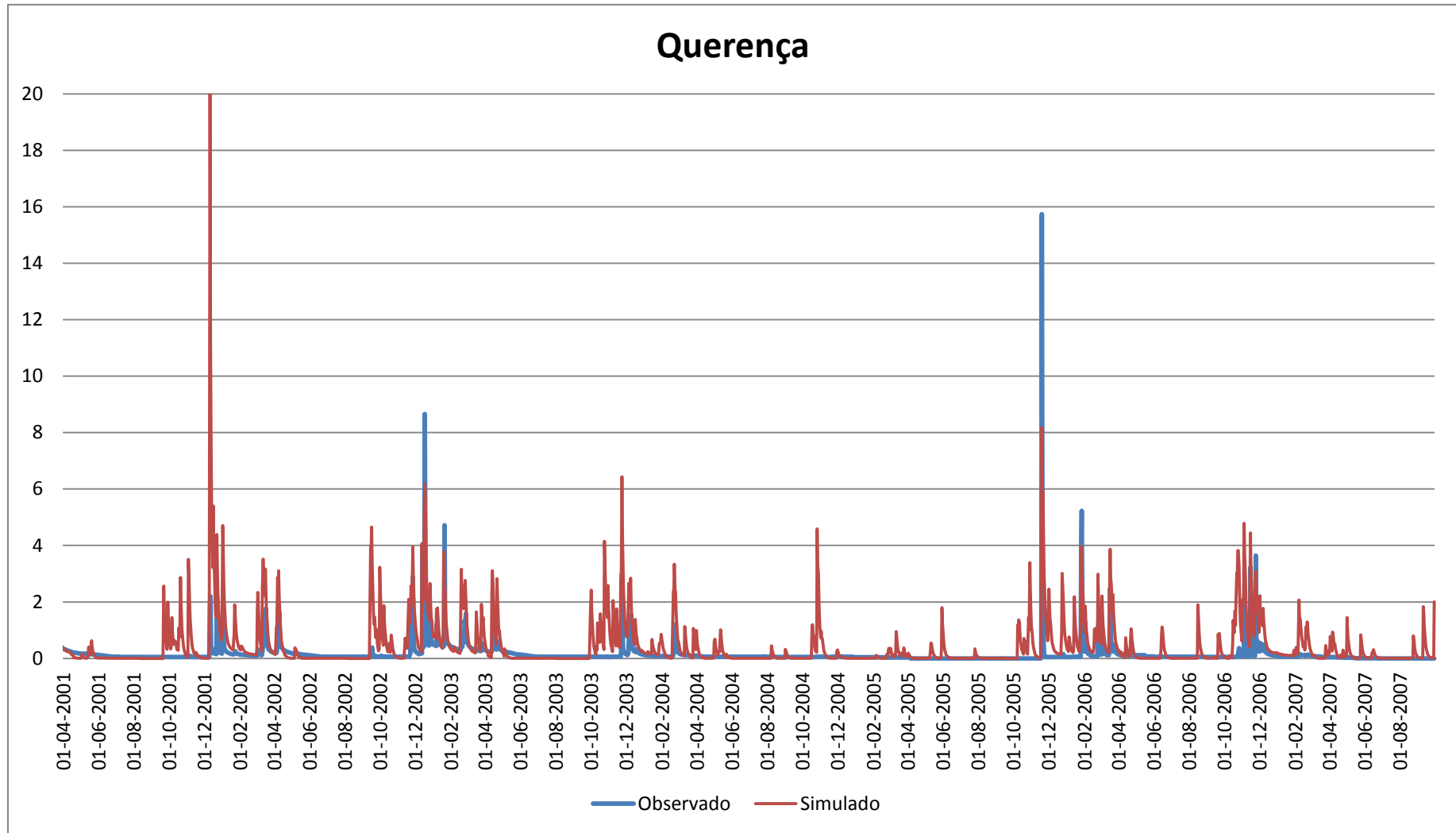


Gráfico 4.7 – Hidrograma observado vs hidrograma simulado para Querença (calibração)

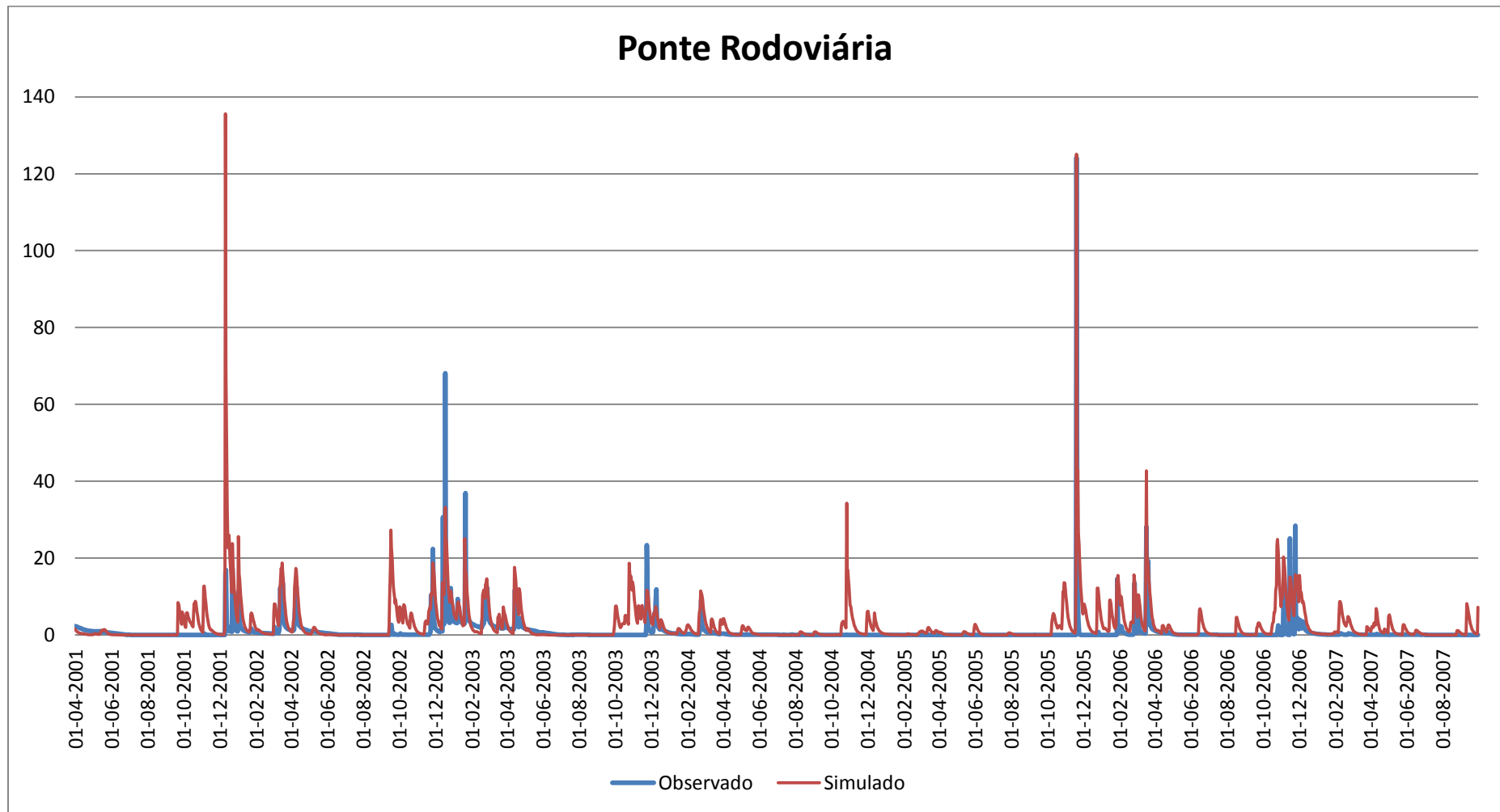


Gráfico 4.8 – Hidrograma observado vs hidrograma simulado para Ponte Rodoviária (calibração)

### 4.2.3 Validação do modelo

A validação do modelo tem como objetivo verificar a aplicabilidade do mesmo para períodos que não tenham sido utilizados na calibração. Tal como referido no subcapítulo 4.2.1 o período de validação é mais pequeno que o período de calibração tendo sido utilizada para o efeito a série de dados de caudal entre 1 de Outubro de 2007 e 30 de Setembro de 2010. Para este período apenas existem dados disponíveis para as estações hidrométricas de Ponte Rodoviária e Querença. Assim a estação hidrométrica de Ponte Ribeira do Rio Seco apenas foi utilizada no processo de calibração. Na tabela 4.11 apresentam-se os resultados obtidos:

Tabela 4.11 - Resumo estatístico dos resultados do modelo (validação)

Estação	$bR^2$
Querença	0.4313
Ponte Rodoviária	0.5241

Os hidrogramas resultantes das simulações correspondentes à validação do modelo apresentam-se nos gráficos 4.9 e 4.10.

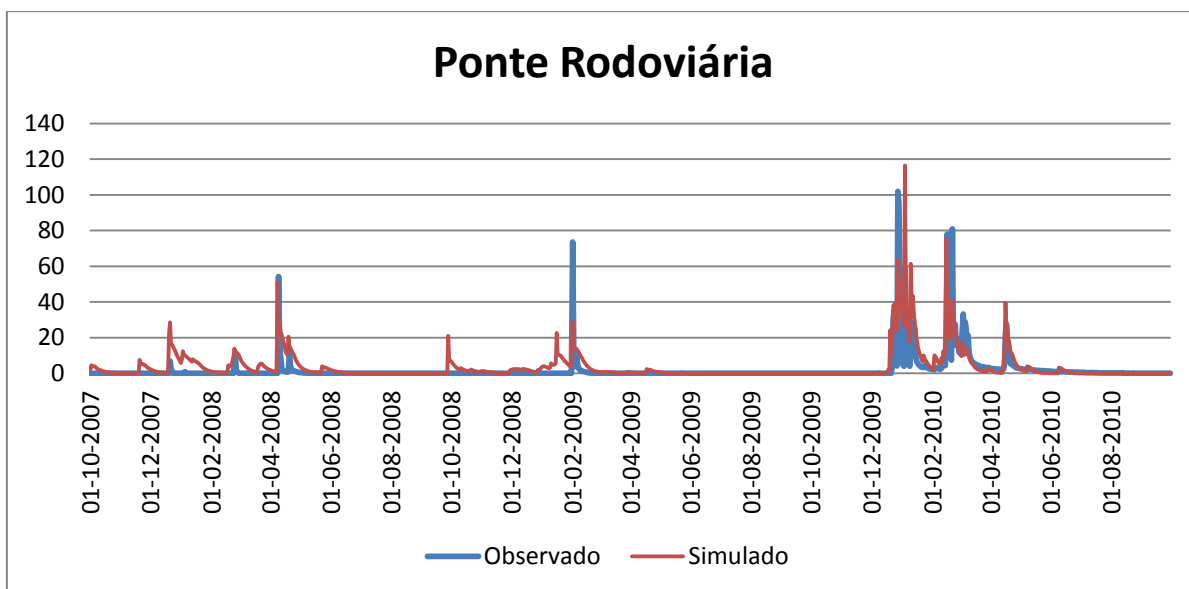


Gráfico 4.9 – Hidrograma observado vs hidrograma simulado para Ponte Rodoviária (validação)

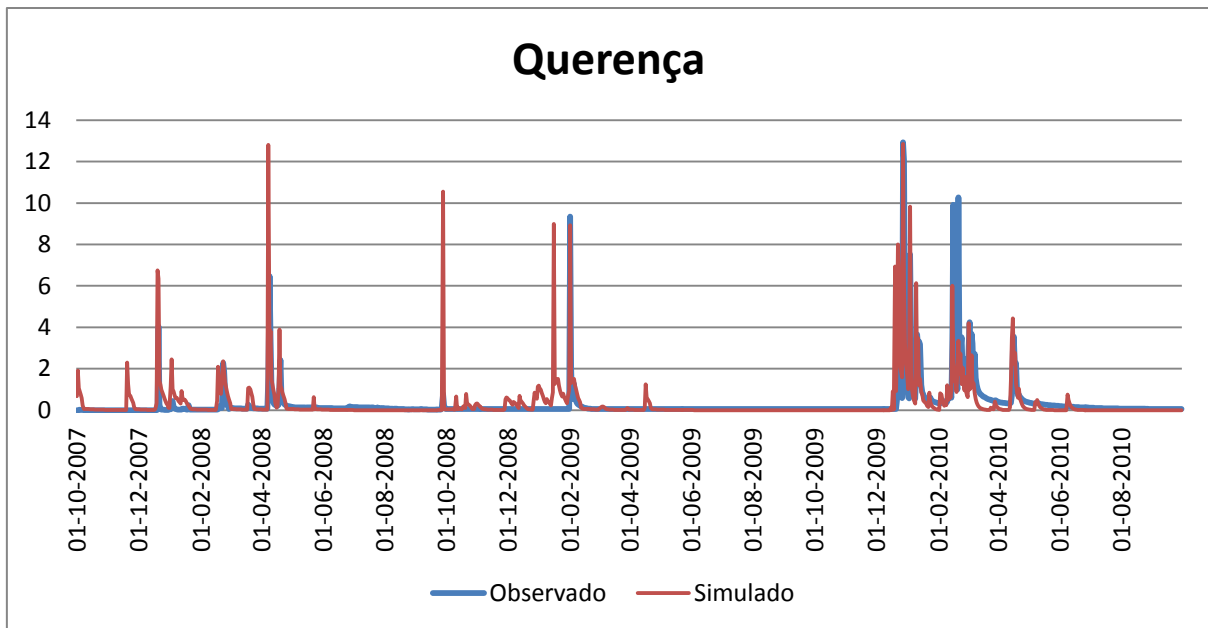


Gráfico 4.10 - Hidrograma observado vs hidrograma simulado para Querença (validação)

Como se pode verificar pelos hidrogramas acima apresentados (gráficos 4.9 e 4.10) e pelo resumo estatístico (tabela 4.11) os resultados são bastante satisfatórios. Os resultados obtidos na validação são inclusive melhores do que os resultados obtidos na calibração. Isto pode dever-se ao facto de o período ser mais curto e não se registarem períodos de seca na série de dados considerada. Pela observação dos hidrogramas consegue-se verificar que o modelo continua a simular com relativa fiabilidade os períodos onde se regista precipitação. No ano 2008, após o Verão, o modelo continua a simular precipitação contrariando os dados observados que, provavelmente devido aos solos muito secos, apresentam valores relativamente mais baixos de caudal. Esta dificuldade na simulação de caudal após períodos secos já tinha sido verificada na calibração.

Dado que a validação apresentou resultados satisfatórios, cumprindo a ordem de trabalhos exposta no esquema 4.1, realizou-se nova parametrização do modelo no ArcSWAT utilizando os valores dos parâmetros registados na melhor simulação do SWAT-CUP (*Best\_Par*). Na tabela 4.12 apresentam-se os valores utilizados na nova parametrização do ArcSWAT.

Tabela 4.12 – Parâmetros registados na melhor simulação SWAT-CUP (Best\_Par)

Operação	Parâmetro	Ponte Ribeira do Rio Seco	Querença	Ponte Rodoviária
r	CN2.mgt	-0.22	-3.91	0.33
v	ALPHA_BF.gw	0.14	0.02	0.61
v	GW_DELAY.gw	1.03	0.31	3.93
v	GWQMN.gw	1.77	1.79	2.10
v	GW_REVAP.gw	0.04	7.15	1.56
v	ESCO.hru	0.40	0.79	0.14
v	EPCO.hru	0.78	0.03	0.62
v	CH_K2.rte	15.53	24.37	221.86
r	SOL_AWC(1).sol	0.18	15.06	2.68
r	SOL_K(1).sol	-0.54	4.33	3.21
v	SURLAG.bsn	4.00		

LEGENDA: r – multiplicar por 1+p; v – substituir; a – adicionar

Estes parâmetros foram aplicados às subbacias correspondentes a cada estação hidrométrica (tabela 4.7). As subbacias que não correspondem a nenhuma estação não foram parametrizadas tendo ficado os valores que estavam por defeito (subbacias 12, 14, 15, 16, 17 e 18). Apesar de se terem obtido 3 valores diferentes de SURLAG (um por estação hidrométrica) verificou-se que apenas se pode utilizar um valor em toda a bacia. Como os valores obtidos se encontravam entre 6 e 2 optou-se por manter o valor de SURLAG por defeito (4.00).

Na tabela 4.13 encontra-se um resumo dos resultados obtidos para todos os parâmetros após a correspondente calibração e validação deste modelo.

Tabela 4.13 – Resultados da simulação do modelo em ArcSWAT

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
<b>PREC</b>	811.8	758.7	646.6	394.2	453.1	763.6	454.6	532.3	543.2	478.7
<b>SURQ</b>	146.1	79.3	56.5	21.8	59.7	72.4	31.2	61.9	77.8	57.9
<b>LATQ</b>	34.4	31.9	28.8	14.3	15.2	33.2	15.4	21.4	15.6	27.8
<b>GWQ</b>	84.9	85.5	78.2	24.5	28.4	84.8	26.6	49.7	45.8	80.2
<b>PERCOLATE</b>	357.8	344.3	282.2	108.3	139.0	362.6	124.5	195.8	179.5	294.6
<b>TILEQ</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>SW</b>	167.8	169.5	164.4	136.4	168.6	164.1	146.5	122.2	173.2	46.3
<b>ET</b>	277.4	301.0	286.2	278.0	206.0	300.6	300.7	278.2	214.2	231.0
<b>PET</b>	848.1	835.1	836.2	862.2	827.3	810.9	817.3	770.9	820.0	720.0
<b>WATER YIELD</b>	263.3	194.8	161.8	59.9	102.2	188.3	72.5	131.5	137.9	164.3

LEGENDA: **PREC** – PRECIPITAÇÃO; **SURQ** – ESCOAMENTO SUPERFICIAL; **LATQ** – ESCOAMENTO SUBSUPERFICIAL; **GWQ** – CAUDAL SUBTERRÂNEO EFLUENTE; **PERCOLATE** – INFILTRAÇÃO PARA O AQUÍFERO SUPERFICIAL; **TILEQ** – CAUDAL DE CANAIS DE DRENAGEM; **SW** – ÁGUA ARMazenada NO SOLO; **ET** – EVAPOTRANSPIRAÇÃO; **PET** – EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL; **WATER YIELD** – RESULTADO DAS COMPONENTES GWQ+SURQ+LATQ

## 5. CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

A aplicação do modelo finalizado teve por base a média das previsões de alterações climáticas para dois períodos no futuro. Os períodos considerados são 2020 a 2050 e 2069 a 2099 e estas previsões foram realizadas com recurso a dois modelos climáticos: ICTP –REGCM3 e CNRM-RM5.1. A aplicação deste modelos climáticos tem como resultado dados de precipitação e de temperatura. Estes dados são utilizados no modelo SWAT de modo a se realizarem algumas previsões futuras relativas a alterações climáticas. Estes dados têm como origem o projeto CLIMWAT (Stigter *et al.*, *in press*) e estas previsões têm obviamente um nível de incerteza associado que nos permite apenas estabelecer possíveis tendências das alterações climáticas.

### 5.1 ICTP-REGCM3

Nos gráficos 5.1 e 5.2 apresentam-se as previsões de alterações médias de temperatura para o modelo climático ICTP-REGCM3 para os períodos acima referidos.

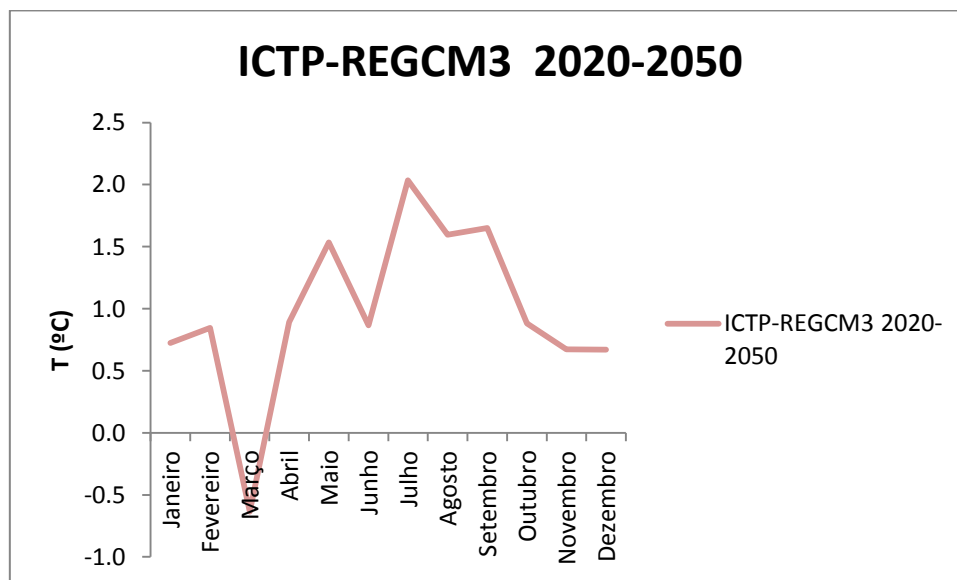


Gráfico 5.1 – Média de previsões de alterações na temperatura pelo método ICTP – REGCM para o período de 2020 – 2050



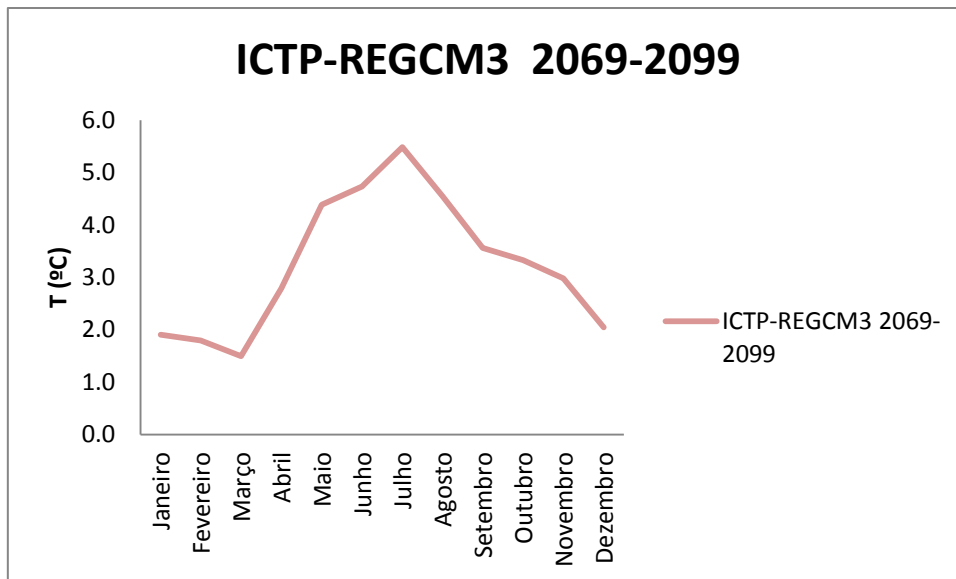


Gráfico 5.2 – Média de previsões de alterações na temperatura pelo método ICTP – REGCM para o período de 2069 – 2099

De um modo geral prevê-se que a temperatura sofra aumentos e a precipitação diminua aumentando a severidade no período mais longínquo. A exceção é o mês de Março para o período 2020-2050 que se prevê mais frio.

Nos gráficos 5.3 e 5.4 apresentam-se as previsões de alteração de precipitação para os dois períodos considerados.

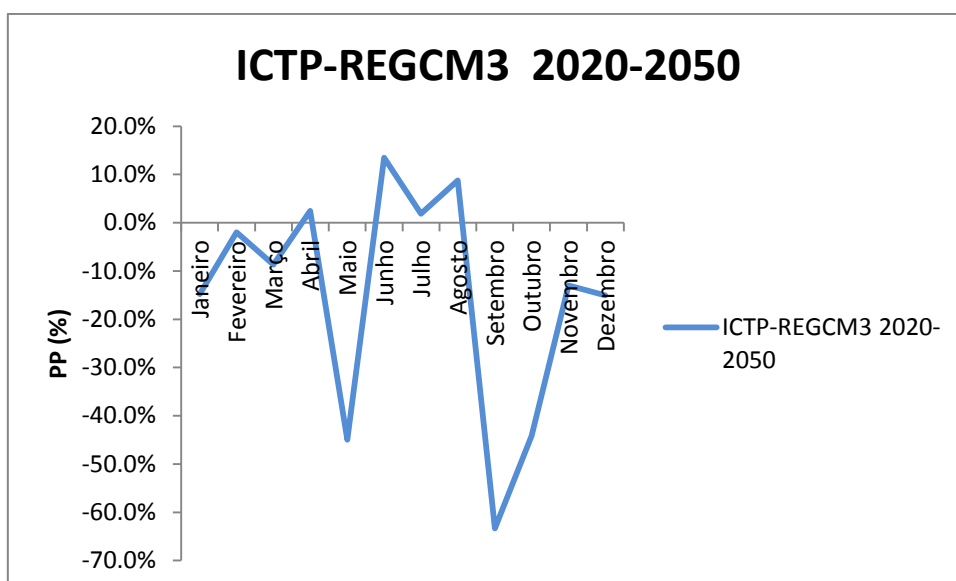


Gráfico 5.3 – Média de previsões de alterações na precipitação pelo método ICTP – REGCM para o período de 2020 - 2050

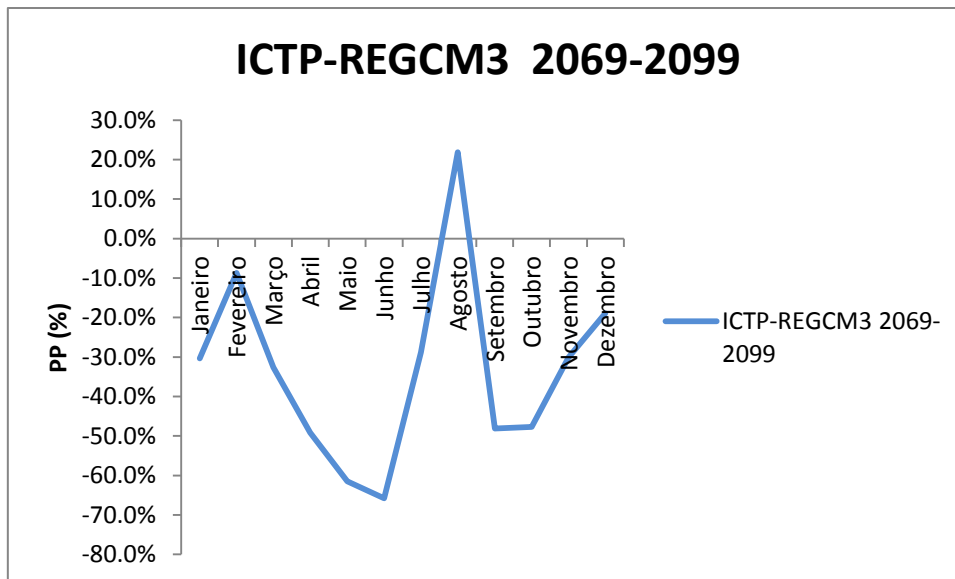


Gráfico 5.4 – Média de previsões de alterações na precipitação pelo método ICTP – REGCM para o período de 2069 - 2099

Para o período 2020-2050 (gráfico 5.3) verifica-se que nos meses de Verão se prevê mais precipitação enquanto se prevê uma diminuição nos restantes meses. O mês de Abril apresenta-se neste período como uma exceção prevendo-se mais precipitação e os meses de Setembro e Outubro são os meses deste período onde se espera que haja a maior diminuição de precipitação.

No período 2069-2099 (gráfico 5.4) prevê-se uma diminuição de precipitação mais severa relativamente ao período acima analisado. O único mês onde se prevê aumento de precipitação é Agosto. A maior quebra de precipitação (cerca de 60%) será provavelmente registada nos meses de Primavera.

Com base nestas previsões manipularam-se os dados meteorológicos de entrada do modelo. Deste modo logrou-se a obtenção de dois grupos de dados representativos dos períodos acima apresentados.

A análise dos resultados dos cenários é realizada por comparação com os resultados obtidos para o período de dados utilizado na calibração e validação do modelo SWAT. Os parâmetros avaliados foram a evapotranspiração (ET) real, a recarga profunda do aquífero e o caudal.

No gráfico 5.5 apresenta-se a evolução da evapotranspiração real para os três períodos considerados.

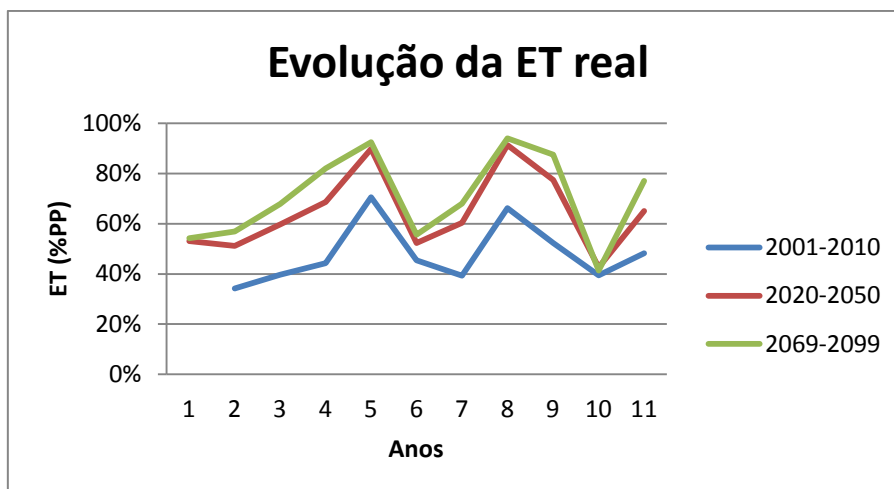


Gráfico 5.5 – Evolução da evapotranspiração real para o modelo climático ICTP-REGCM3

Pela análise do gráfico 5.5 verifica-se que as previsões apontam para um aumento da ET real com a avançar dos anos. Isto é justificável dado que a temperatura, segundo o modelo climático presente, irá sofrer um aumento significativo. A ET real será relativamente mais alta entre 2069 e 2099 no entanto o aumento mais severo dá-se comparando o período atual com o período 2020-2050.

No gráfico 5.6 apresenta-se a evolução da recarga profunda para os três períodos considerados.

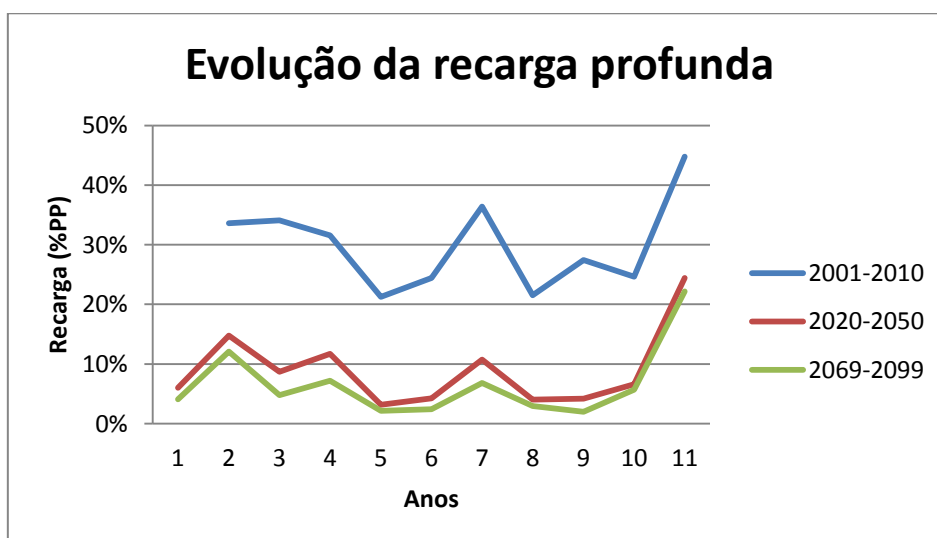


Gráfico 5.6 - Evolução da recarga profunda para o modelo climático ICTP-REGCM3

Pela análise do gráfico 5.6 verifica-se que as previsões apontam para uma redução da recarga profunda. Isto deve-se ao aumento da temperatura, previsto pelo modelo climático presente. Dado que, no balanço hidrológico, a ET real aumenta bastante é natural que a recarga profunda diminua a nível percentual. Tal como verificado na análise à ET real a diminuição mais severa dá-se quando se compara o período atual de modelação ao período de 2020 – 2050.

Nos gráficos 5.7 e 5.8 apresentam-se diagramas de caixa para a ET real em mm/ano e em percentagem de precipitação.

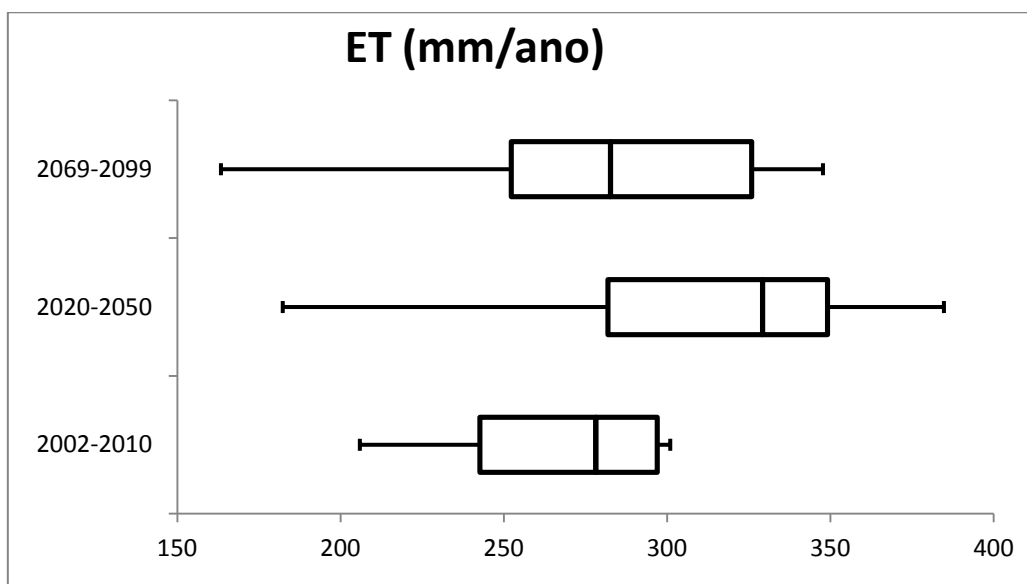


Gráfico 5.7 – Diagrama de caixa referente à evapotranspiração real (mm/ano)

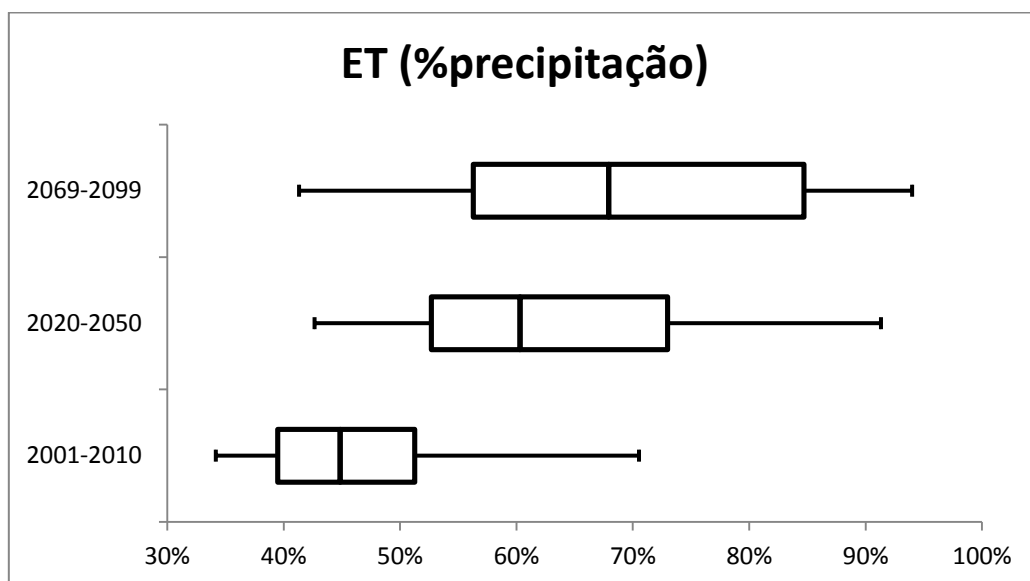


Gráfico 5.8 – Diagrama de caixa referente à evapotranspiração real (%precipitação)

Pela análise do gráfico 5.7 verifica-se que a evapotranspiração aumenta em valor absoluto para o período 2020 – 2050. Verifica-se também uma intensificação dos extremos (o mínimo é mais baixo e o máximo é mais alto comparativamente ao período anterior). No período 2069 - 2099 ocorre uma diminuição do valor absoluto da ET relativamente ao período de 2020 - 2050. Isto deve-se ao facto de a precipitação diminuir com o avançar dos anos e assim a água disponível é também em menor quantidade. Regista-se no entanto um aumento de evapotranspiração comparativamente ao período atual de dados sendo de sublinhar que no período de 2069 - 2099 se regista o valor mínimo mais baixo de sempre.

No gráfico 5.8 consegue-se verificar o peso que a componente ET real assume no balanço hidrológico da bacia hidrográfica da Ribeira de Quarteira ao longo dos anos simulados. Deste modo é possível perceber que a ET assumirá um peso cada vez maior no balanço hidrológico devido ao aumento de temperatura previsto.

Nos gráficos 5.9 e 5.10 apresentam-se diagramas de caixa referentes à recarga profunda no aquífero.

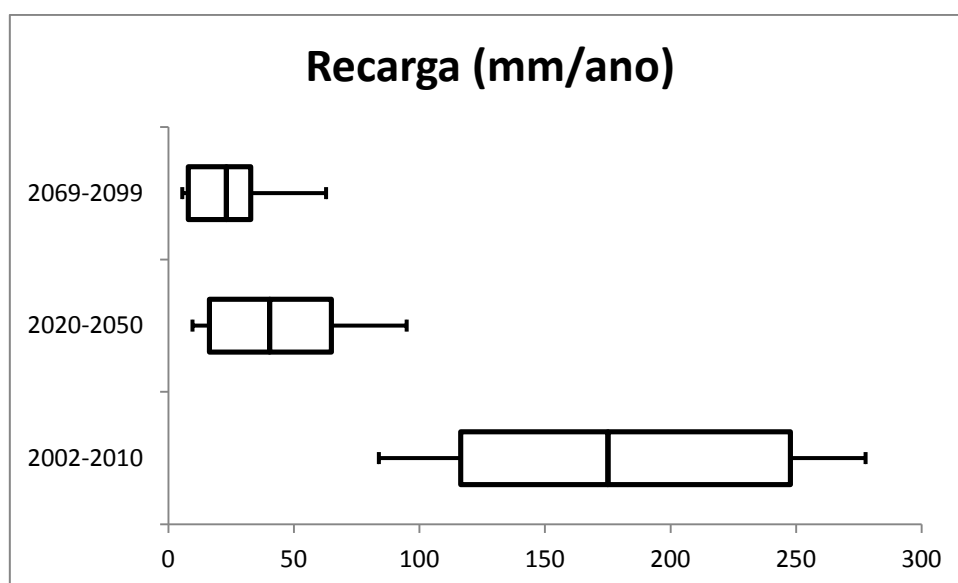


Gráfico 5.9 – Diagrama de caixa referente à recarga profunda (mm/ano)

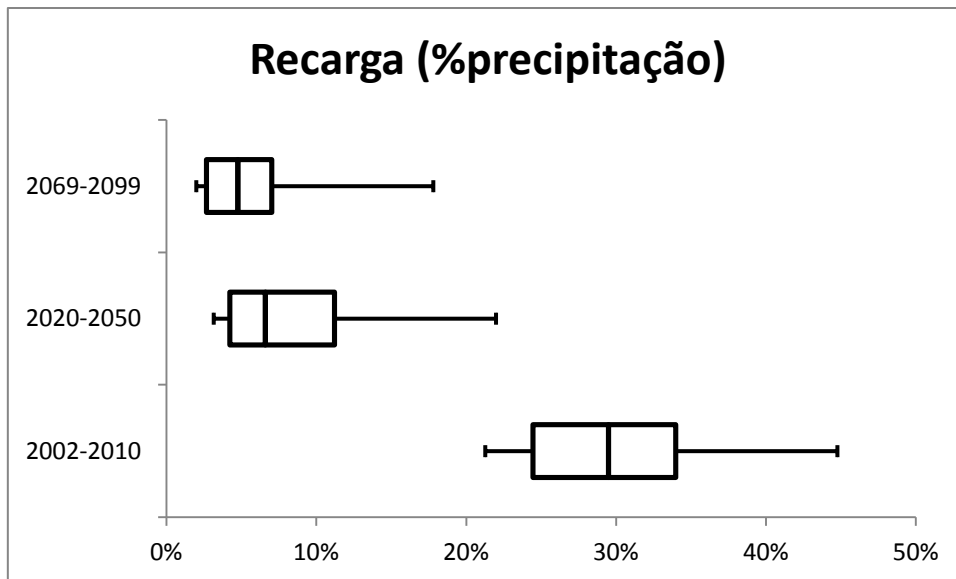


Gráfico 5.10 – Diagrama de caixa referente à recarga profunda (%precipitação)

A análise dos gráficos 5.9 e 5.10 mostra que as previsões apontam para uma redução da recarga, tanto em valor absoluto como em percentagem de precipitação. Esta redução da recarga profunda do aquífero deve-se ao aumento de temperatura e diminuição de precipitação previsto.

Com o aumento da ET real é natural que a recarga decresça pois ambos parâmetros fazem parte do balanço hidrológico. Deste modo com o aumento da temperatura, principal potenciador da ET, a diminuição da recarga profunda surge como uma consequência das alterações climáticas previstas.

Outro parâmetro em análise, como resposta às alterações climáticas previstas pelo modelo climático ICTP-REGCM3, é o caudal instantâneo ( $m^3/s$ ). Na tabela 5.1 apresenta-se um resumo estatístico do caudal para os três períodos considerados.

Tabela 5.1 – Resumo estatístico do caudal instantâneo (ICTP-REGCM3)

	<b>2002-2010</b>	<b>2020-2050</b>	<b>2069-2099</b>
MIN	0.001	0.000	0.000
P10	0.008	0.004	0.002
Q1	0.039	0.024	0.012
MED	1.254	0.697	0.379
Q3	6.115	3.883	2.949
P90	17.561	11.291	8.843
MAX	289.995	163.109	122.082

*Legenda: MIN-Mínimo; P10-Percentil 10; Q1-Primeiro quartil; MED-Mediana; Q3-Terceiro quartil; P90-Percentil 90; MAX-Máximo*

Pela análise da tabela 5.1 verifica-se que existe uma tendência clara de diminuição do caudal. Este facto é facilmente justificado pela redução de precipitação prevista.

De modo a se verificarem os eventos extremos de precipitação fixou-se o valor obtido no percentil 90 (P90) para o período 2002-2010 e contaram-se quantos eventos ultrapassaram este valor em cada período de simulação. Os resultados são apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Picos de caudal (Q) (ICTP-REGCM3)

<b>Períodos</b>	<b>Eventos extremos de Q</b>
2002-2010	321
2020-2050	216
2069-2099	141

Pela análise da tabela 5.2 verifica-se uma tendência clara para ocorrerem menos eventos extremos de caudal segundo as previsões do modelo climatológico ICTP-REGCM3.

## 5.2 CNRM-RM5.1

Nos gráficos 5.11 e 5.12 apresentam-se as previsões de alteração de temperatura pelo modelo climático CNRM-RM5.1 para os períodos acima referidos.

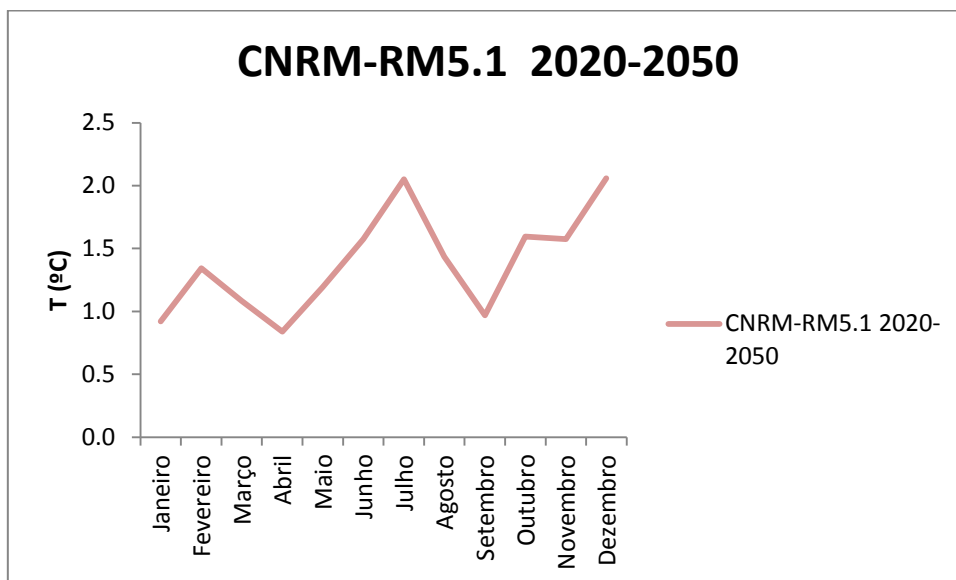


Gráfico 5.11 – Médias de previsões de alterações na temperatura pelo método CNRM-RM5.1 para o período de 2020 – 2050

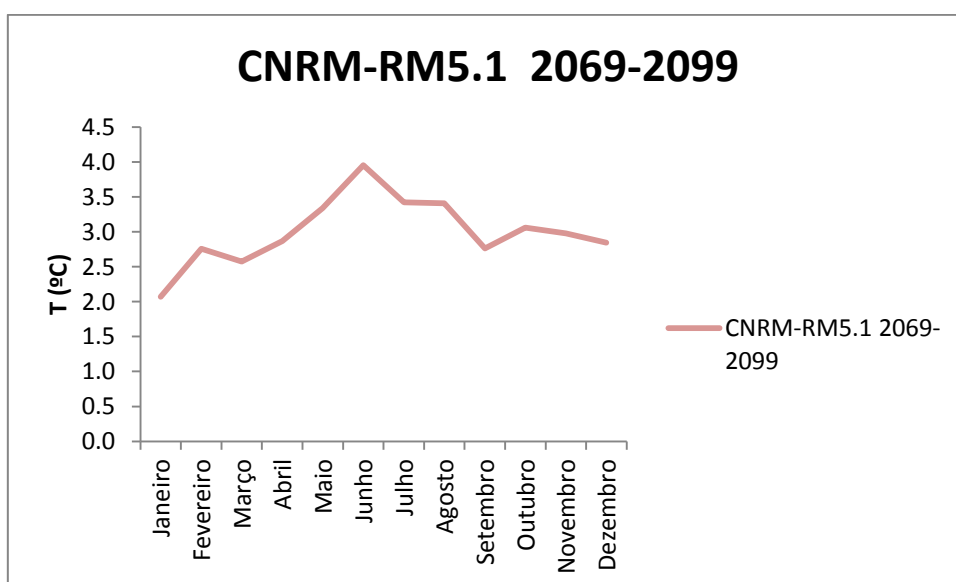


Gráfico 5.12 - Médias de previsões de alterações na temperatura pelo método CNRM-RM5.1 para o período de 2069 – 2099



Pelas previsões do modelo climático CNRM-RM5.1 espera-se que a temperatura sofra aumentos nos próximos anos sendo de notar um aumento da severidade desta no período mais longínquo considerado. Em ambos períodos é nos meses de Verão que se registam os maiores aumentos. A exceção é registada no período 2020-2050, no mês de Dezembro, onde a temperatura sofrerá um aumento idêntico ao máximo registado no Verão para o mesmo período.

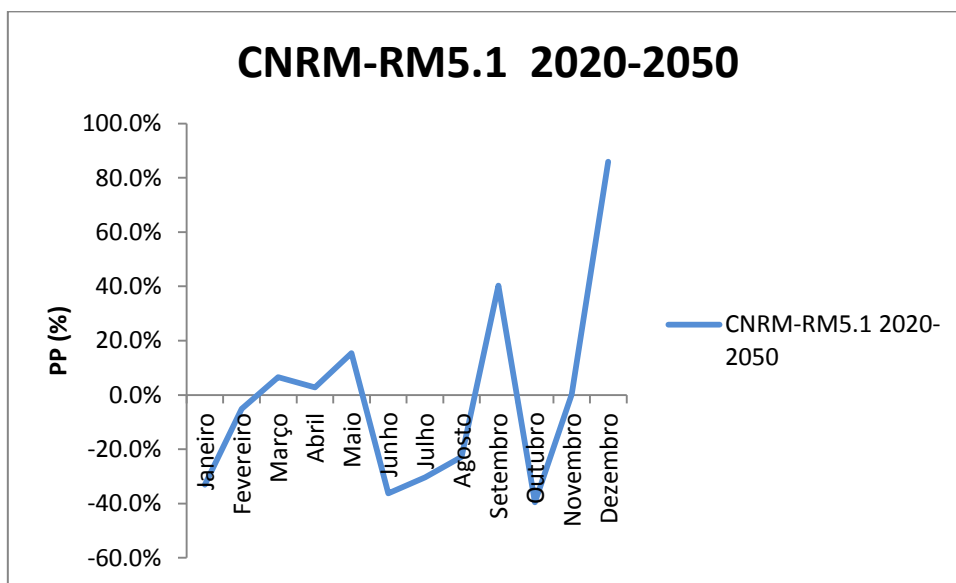


Gráfico 5.13 - Médias de previsões de alterações na precipitação pelo método CNRM-RM5.1 para o período de 2020 - 2050

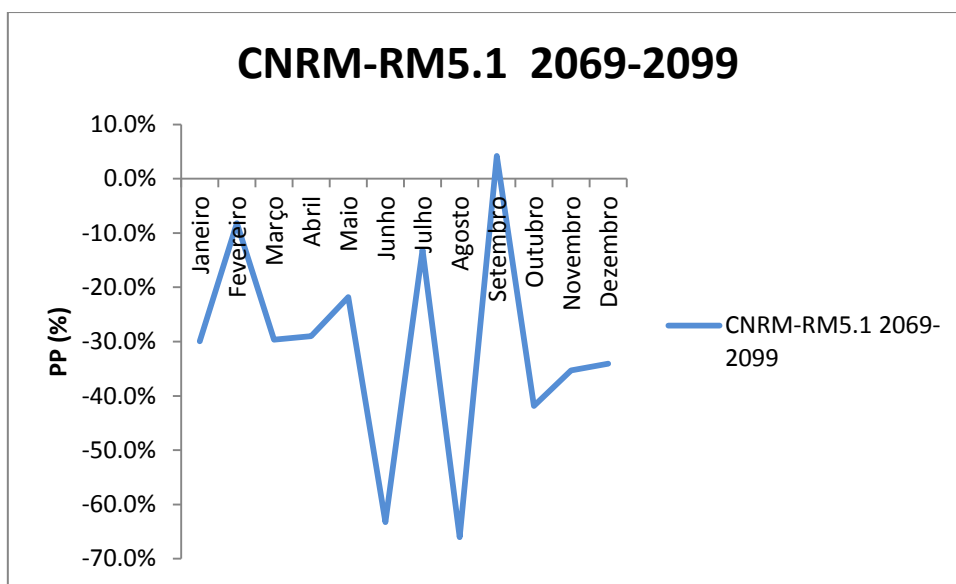


Gráfico 5.14 - Médias de previsões de alterações na precipitação pelo método CNRM-RM5.1 para o período de 2069 - 2099

Nos gráficos 5.13 e 5.14 apresentam-se as previsões de alteração de precipitação para os períodos acima referidos.

Verifica-se que, para o período 2020-2050 (gráfico 5.13), se prevê diminuição de precipitação nos meses de Janeiro, Junho, Julho, Agosto e Outubro. Nos restantes meses prevê-se que a precipitação aumente de modo significativo sendo de realçar o grande aumento previsto para Dezembro (cerca de 80%).

No período 2069-2099 (gráfico 5.14) prevê-se uma diminuição geral da precipitação. A exceção ocorre no mês de Setembro onde se regista uma previsão de ligeiro aumento. O mês onde se espera que a precipitação seja mais baixa é o mês de Agosto.

No gráfico 5.15 apresenta-se a evolução da evapotranspiração, após a utilização de dados de entrada provenientes do presente modelo, no SWAT.

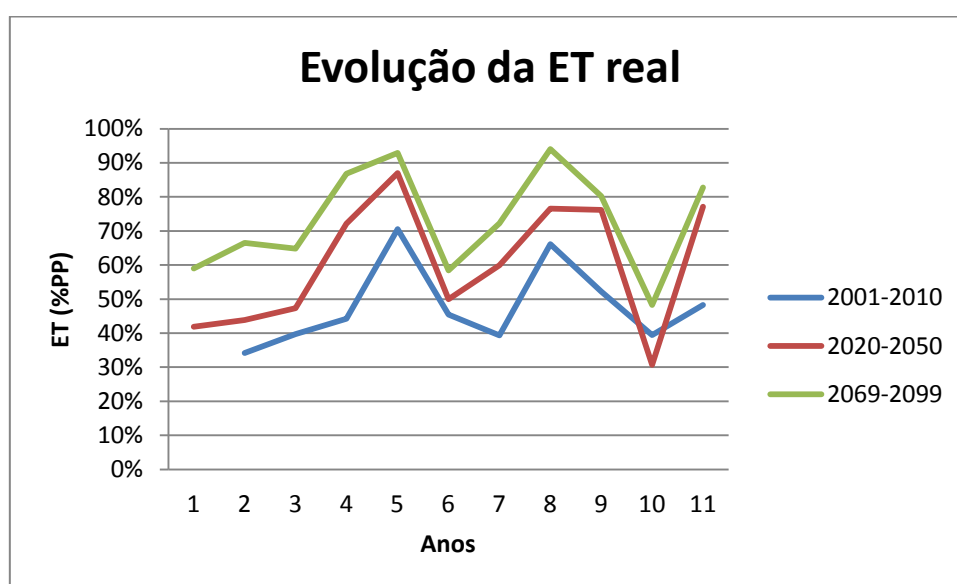


Gráfico 5.15 - Evolução da evapotranspiração real para o modelo climático CNRM-RM5.1

Analisando o gráfico 5.15 verifica-se que de um modo geral se prevê o aumento do peso da ET real no balanço hidrológico nos próximos anos, aumentando a severidade no cenário mais longínquo considerado. Isto ocorre devido ao aumento de temperatura previsto. Tal como já tinha ocorrido no outro modelo climático considerado (gráfico 5.5), no ano 10, o valor percentual da ET aproxima-se em todos os cenários. É, no entanto, neste ano que se verifica uma exceção ao ocorrido nos

restantes anos, com a ET a ter um menor peso no balanço hidrológico em 2020-2050 quando comparada com períodos atuais. Isto pode dever-se ao facto de haver um aumento relativamente grande da precipitação no período 2020-2050 o que faz com que a ET (%PP) tenha uma diminuição também significativa neste período. Possivelmente a perda de peso por parte da ET no balanço hidrológico é, neste ano, atribuída a um caudal bem mais elevado.

No gráfico 5.16 apresenta-se a evolução da recarga profunda (%PP) para os períodos considerados.

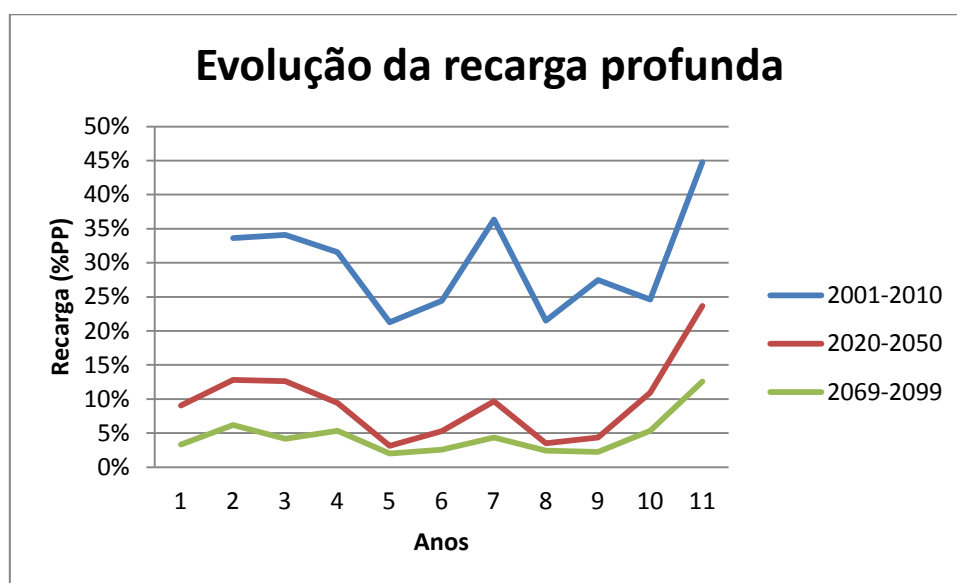


Gráfico 5.16 - Evolução da recarga profunda para o modelo climático CNRM-RM5.1

Analisando o gráfico 5.16 verifica-se que existe uma tendência de diminuição de recarga com o avançar dos anos. Isto deve-se à ocorrência de temperaturas mais elevadas, que potenciam o aumento de ET real e consequentemente aumentam o seu peso no balanço hidrológico. De referir os valores muito baixos de recarga registados para o período 2069-2099. Para o presente modelo climático de previsão este período apresenta valores de recarga mais baixos do que o modelo ICTP-REGCM3 para o mesmo período (gráfico 5.6). Isto deve-se às condições relativamente mais severas registadas no presente modelo (valores de precipitação mais baixos e temperaturas mais elevadas).

Nos gráficos 5.17 e 5.18 apresentam-se diagramas de caixa para a ET real em mm/ano e em percentagem de precipitação.

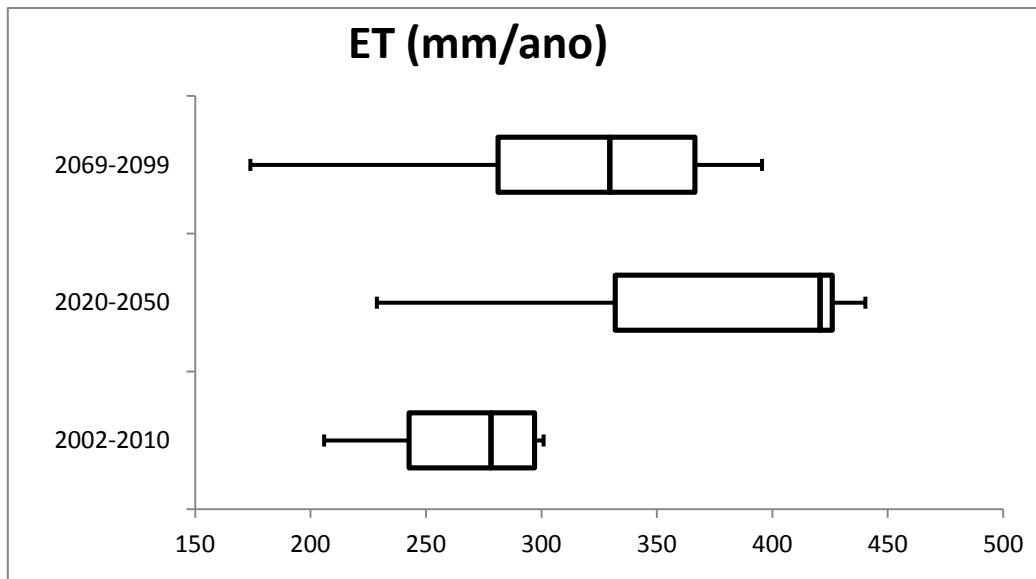


Gráfico 5.17 - Diagrama de caixa referente à evapotranspiração real (mm/ano)

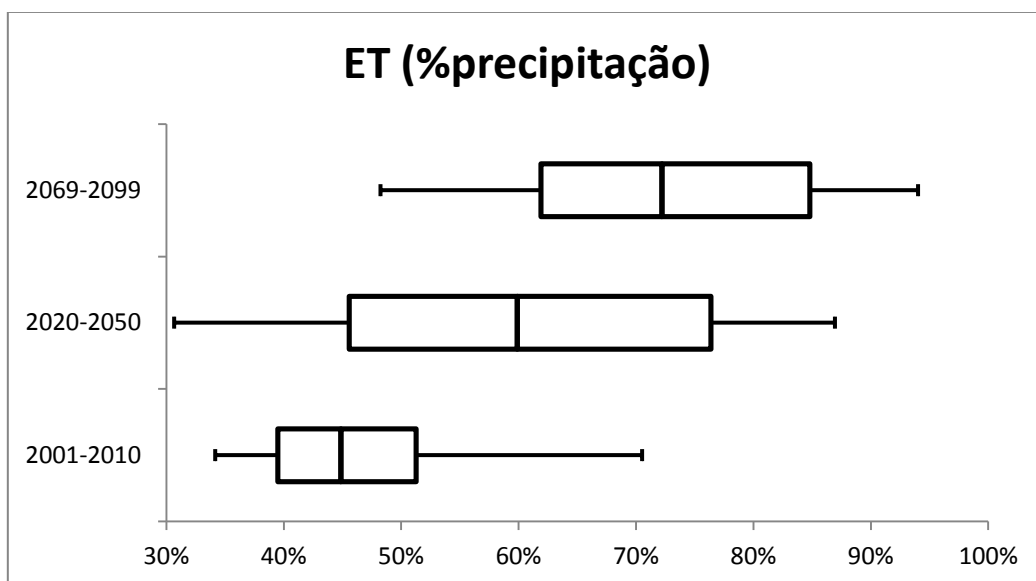


Gráfico 5.18 - Diagrama de caixa referente à evapotranspiração real (%precipitação)

Analisando o gráfico 5.17 verifica-se que, segundo as previsões do modelo climático CNRM-RM5.1, a ET real sofrerá, no período 2020-2050, um aumento significativo em valor absoluto. No período 2069-2099, apesar do aumento de temperatura, a escassez relativa de precipitação origina uma redução de ET real (mm/ano) comparativamente com o período imediatamente anterior. No entanto pode-se verificar claramente que a tendência aponta para um aumento de ET real em valor absoluto nos próximos anos.

No gráfico 5.18 apresentam-se os diagramas de caixa para os valores relativos de ET real (%precipitação). Deste modo pode-se verificar o peso que a ET real representa no balanço hidrológico para os períodos considerados. Para o período 2020-2050 verifica-se uma grande amplitude entre o valor mínimo e o valor máximo. De facto, comparando este período com o período atual, verifica-se que o valor mínimo se apresenta mais baixo e o valor máximo se apresenta mais elevado. No período 2069-2099 já não se verifica uma amplitude de valores extremos tão elevada como se regista no período imediatamente anterior. No entanto verifica-se a demarcação de uma tendência de predominância da ET real no balanço hidrológico. Neste período, devido às temperaturas elevadas a ET real será também bastante elevada.

Nos gráficos 5.19 e 5.20 apresentam-se diagramas de caixa referentes à recarga profunda no aquífero.

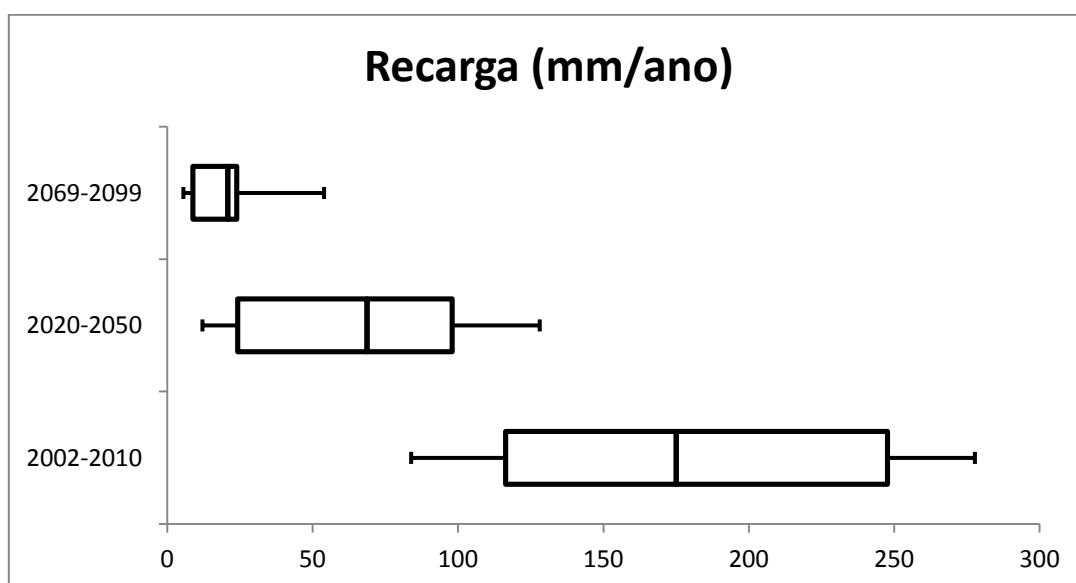


Gráfico 5.19 - Diagrama de caixa referente à recarga profunda (mm/ano)

Pela análise do gráfico 5.19 pode-se verificar que se prevê uma redução bastante grande do valor da recarga profunda ao longo dos períodos considerados. Esta redução é justificável dado o grande aumento de temperatura que se prevê e a longo prazo (2069-2099) a escassez de precipitação também intensifica esta diminuição de recarga. No período 2020-2050 a diminuição de recarga é suavizada pelo facto de se prever aumento de precipitação em alguns meses. No entanto é a temperatura mais elevada que, potenciando o aumento da ET, consegue potenciar a diminuição de recarga. No

período 2069-2099 as temperaturas elevadas são complementadas por diminuição de precipitação. Neste período a redução de recarga é mais severa e são registadas os valores mais baixos de sempre.

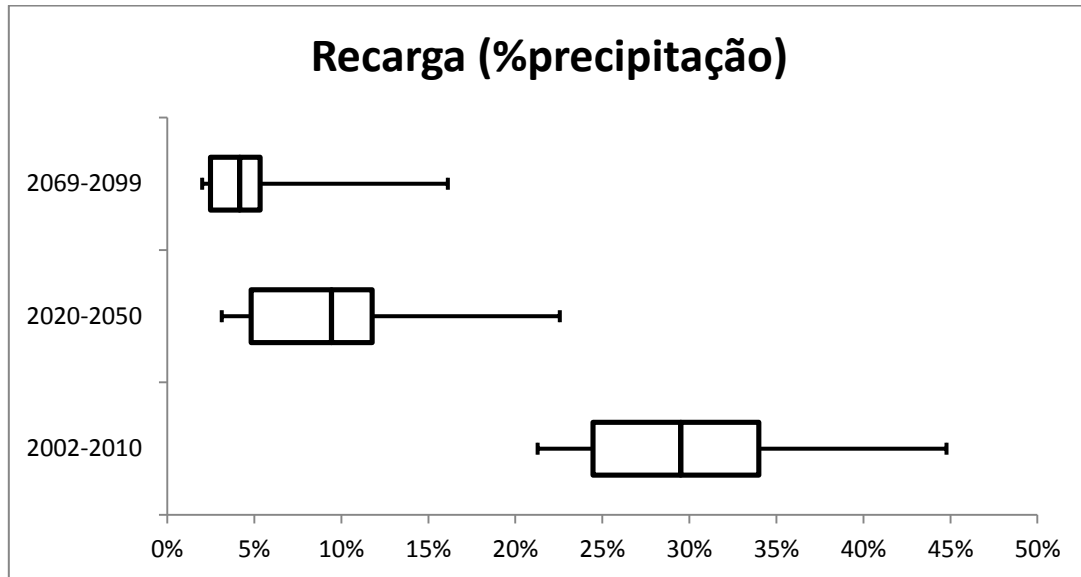


Gráfico 5.20 – Diagrama de caixa referente à recarga profunda (%precipitação)

Analisando o gráfico 5.20 verifica-se que o peso da recarga profunda no balanço hidrológico irá baixar ao longo dos períodos considerados. Tal como foi acima discutido, em 2069-2099 a severidade da diminuição de recarga aumenta e isto deve-se principalmente às temperaturas elevadas mas também à escassez de precipitação que se prevê.

Outro parâmetro em análise, como resposta às alterações climáticas previstas pelo modelo climático CNRM-RM5.1, é o caudal instantâneo ( $m^3/s$ ). Na tabela 5.3 apresenta-se um resumo estatístico do caudal para os três períodos considerados.

Tabela 5.3 - Resumo estatístico do caudal instantâneo (CNRM-RM5.1)

	<b>2002-2010</b>	<b>2020-2050</b>	<b>2069-2099</b>
MIN	0.001	0.001	0.000
P10	0.008	0.007	0.003
Q1	0.039	0.036	0.015
MED	1.254	1.041	0.557
Q3	6.115	5.299	3.227
P90	17.561	14.859	9.363
MAX	289.995	454.991	94.563

*Legenda: MIN-Mínimo; P10-Percentil 10; Q1-Primeiro quartil; MED-Mediana; Q3-Terceiro quartil; P90-Percentil 90; MAX-Máximo*

Analisando a tabela 5.3 verifica-se que no período 2020-2050 se registou no geral um caudal instantâneo ligeiramente mais baixo do que no período atual. A exceção é o máximo onde se registou um valor bastante mais elevado. Isto deve-se ao facto de se preverem eventos de precipitação mais severos para este período durante os meses de Novembro e Dezembro. Para o período 2069-2099 observa-se claramente uma diminuição geral do caudal. Isto deve-se ao facto de se prever uma grande diminuição de precipitação neste período.

De modo a verificarem-se os eventos extremos de precipitação fixou-se o valor de P90 da atualidade e contaram-se os eventos cujo caudal instantâneo ultrapassa este valor. Os resultados são apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Picos de caudal (Q) (CNRM-RM5.1)

<b>Períodos</b>	<b>Eventos extremos de Q</b>
2002-2010	321
2020-2050	312
2069-2099	141

Verifica-se, pela análise da tabela 5.4, que tendencialmente os eventos extremos de caudal irão baixar com o passar dos anos. De realçar no entanto que, no período de 2020-2050, o número de eventos extremos de caudal é bastante próximo do que se regista atualmente e os valores máximos de Q associados a estes eventos podem ser bastante superiores ao registado atualmente (tabela 5.3). Isto deve ser tido em conta pois apesar de se preverem menos eventos estes podem ocorrer com mais severidade.

No período 2069-2099 prevê-se claramente a ocorrência de menos eventos extremos de caudal e com menos severidade.





## 6. CONCLUSÃO

Os objetivos da presente dissertação passaram pela calibração e validação de um modelo SWAT para a bacia hidrográfica da Ribeira de Quarteira. Também se tinha estabelecido como objetivo a realização de cenários, que funcionam como teste da qualidade do modelo e podem tornar este num elemento de previsão de alterações climáticas ou a outro nível qualquer. Posto isto verifica-se que estes objetivos foram plenamente cumpridos. A construção do modelo acabou por se revelar uma tarefa morosa tendo em conta as dificuldades encontradas na obtenção dos melhores dados para introdução no modelo. As dificuldades prenderam-se não só com a escassa quantidade mas também com a falta de qualidade de alguns dados. De referir que o modelo construído é um modelo SWAT relativamente simples pois não se incluem operações de monitorização e mesmo os dados relativos ao tipo e uso de solos podem ser introduzidos de forma mais detalhada. Pretende-se mostrar com isto que o presente modelo tem ainda bastante margem de progressão e melhoria.

A calibração do presente modelo foi realizada manualmente e com recurso ao SWAT-CUP. Numa primeira fase analisam-se todos os dados de saída tendo como objetivo a verificação do bom funcionamento do modelo e a deteção de anomalias com os dados de entrada. Para a calibração com SWAT-CUP utilizaram-se três estações hidrométricas (Ponte Ribeira do Rio Seco, Querença e Ponte Rodoviária). Para a validação só foi possível a utilização de duas estações hidrométricas (Querença e Ponte Rodoviária) devido à escassez de dados de caudal para o período pretendido. Os resultados obtidos foram satisfatórios tendo em conta as dificuldades sentidas na obtenção de dados, a fraca qualidade destes e a pouca experiência do utilizador. Para a estação Ponte Rodoviária obteve-se um  $bR^2=0.3915$ , para Querença  $bR^2=0.2610$  e para Ponte Ribeira do Rio Seco  $bR^2=0.6325$ . O principal problema do modelo é não reagir corretamente aos primeiros eventos de precipitação que ocorrem após os períodos mais secos (nomeadamente o Verão). Nestas fases o modelo simula mais caudal do que aquele que é registado na realidade. Corrigindo este problema os resultados podem melhorar substancialmente.

A validação do modelo também foi realizada em SWAT-CUP. Foram utilizadas as estações de Ponte Rodoviária e de Querença. Para a estação de Ponte Rodoviária obteve-se um  $bR^2 = 0.5241$  e para a estação de Querença obteve-se um  $bR^2 = 0.4313$ . Os resultados melhoraram bastante comparativamente aos resultados obtidos na calibração. Estas melhorias podem ser devidas ao facto de se utilizarem menos anos para validação do que para a calibração. Deste modo a quantidade de picos de caudal simulado, que surgem em épocas secas, contrariando os dados observados, é menor diminuindo também assim a discrepância entre os dados simulados e observados.

Apesar dos resultados obtidos não atingirem valores estatísticos ( $bR^2$ ) muito elevados podem-se considerar razoáveis dado que, para além das dificuldades já referidas, está-se a tentar realizar simulação de solos cársicos cuja imprevisibilidade torna a tarefa mais difícil ainda. Esta imprevisibilidade deve-se ao facto de este tipo de solos ter como característica a porosidade dupla. Este fator pode potenciar a infiltração de grandes quantidades de água (rio influente) e de certo modo baralhar as simulações do modelo que dificilmente conseguem acompanhar esta realidade.

Posteriormente à calibração e validação do modelo construíram-se dois cenários climáticos. Estes cenários são baseados em previsões dos modelos climáticos ICTP-REGCM3 e CNRM-RM5.1 que foram realizadas no âmbito do projeto CLIMWAT. Ambos cenários são utilizados para edição dos dados de entrada precipitação e temperatura para os períodos 2020-2050 e 2069-2099.

O modelo ICTP-REGCM3 prevê uma diminuição generalizada da precipitação e um aumento da temperatura. A severidade aumenta com o passar dos anos sendo o período 2069-2099 aquele onde se registam as condições mais extremas. O resultado da aplicação deste modelo prevê uma diminuição clara da recarga profunda e um grande aumento da evapotranspiração real. Prevê-se também uma diminuição significativa do caudal e dos eventos extremos de caudal. No período 2069-2099 as condições tornam-se mais extremas do que no cenário de 2020-2050 pelo que se verifica que existe uma tendência clara para que as condições se tornem gradualmente mais severas.

O modelo CNRM-RM5.1 prevê um aumento de temperatura generalizado e um aumento significativo de precipitação em alguns dos meses para o período 2020-2050. Para o período 2069-2099 este modelo prevê um aumento ainda maior de temperatura e uma diminuição quase generalizada da precipitação (a exceção ocorre no mês de Setembro). No período 2020-2050 regista-se a intensificação de eventos extremos principalmente a nível de caudal e de evapotranspiração real. Isto significa que neste período se prevê que possam ocorrer mais secas e cheias que são consideradas catástrofes naturais e traduzem-se normalmente em danos muito grandes a nível pessoal e material. A nível de recarga verifica-se uma diminuição importante (tanto a nível relativo como absoluto). No período 2069-2099 prevê-se que haja uma diminuição de evapotranspiração real (em valor absoluto) comparativamente ao período imediatamente anterior (devido à diminuição de precipitação) e uma diminuição severa de recarga e caudal. Neste período confirma-se a tendência que já havia sido prevista pelo modelo ICTP-REGCM3.

Analisando os resultados obtidos pela aplicação de ambos cenários pode-se concluir que estes apontam para um futuro onde a água disponível poderá vir a escassear e as temperaturas poderão aumentar de forma significativa. Isto aponta claramente para um problema com o qual teremos de vir a lidar – a escassez de água disponível. Deste modo atividades como a agricultura ou o golfe terão mais necessidades hídricas e a escassez de água obrigará a um maior controlo na utilização deste recurso. Um dos modelos prevê, no período 2020-2050, um intensificar dos eventos extremos (cheias e secas) prevendo-se posteriormente uma intensificação dos períodos mais secos. Existe assim uma necessidade urgente de controlar os fluxos de água e armazená-la durante os períodos de precipitação abundante para conseguir compensar os períodos em que a escassez se faça sentir. Urge então a necessidade de uma gestão integrada de água que consiga complementar a utilização de águas superficiais (barragens) com as águas subterrâneas de modo a que os períodos de abundância de precipitação e os períodos de escassez não se apresentem demasiado danosos. Neste sentido e referindo especificamente a zona do Algarve, onde esta dissertação se debruçou, sublinha-se a riqueza hidrogeológica da região. Estes recursos deverão ser aproveitados em proveito

próprio da região de modo a manter o equilíbrio e diminuir os danos que as alterações climáticas poderão vir a causar.

## BIBLIOGRAFIA

Abbaspour, K. C.; Vejdani, M.; and Haghighat S. (2007). SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT. In Oxley, L. and Kulasiri, D. (eds) MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Dezembro 2007, pp. 1596-1602.

Abbaspour, K. C. (2011). SWAT-CUP4, SWAT Calibration and Uncertainty Programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland. 103 pp.

Almeida C. (1985) Hidrogeologia do Algarve Central - Dissertação para obtenção do grau de doutorado em Geologia. Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Lisboa.

Almeida, C.; Mendonça, J.L.; Jesus, M.R.; Gomes, A.J. (2000) Sistemas Aquíferos de Portugal Continental, Relatório. INAG, Instituto da Água. Lisboa.

Andrade, G. (1989). Contribuição para o Estudo da Unidade Hidrogeológica Tôr-Silves. Dissertação para a Obtenção do Grau de Mestre em Geologia Económica e Aplicada. Departamento de Geologia da FCUL.

ARH Algarve (2011a). Plano de gestão das bacias hidrográficas que integram a região hidrográfica das ribeiras do Algarve (RH8). Volume I – Relatório. Parte 2 – Caracterização e diagnóstico. Tomo 5 – Caracterização de pressões significativas. Faro.

ARH Algarve (2011b). Plano de gestão das bacias hidrográficas que integram a região hidrográfica das ribeiras do Algarve (RH8). Volume I – Relatório. Parte 2 – Caracterização e diagnóstico. Tomo 2 – Caracterização das massas de água superficiais e subterrâneas. Faro.

ARH Algarve (2011c). Plano de gestão das bacias hidrográficas que integram a região hidrográfica das ribeiras do Algarve (RH8), Volume I – Relatório. Parte 2 – Caracterização e diagnóstico. Tomo 1 – Caracterização territorial e fisiográfica. Faro.

Bekiaris, I. G.; Panagopoulos, I. N.; Mimikou, M. A. (2005). Application of the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model in the Ronnea catchment of Sweden. Global NEST Journal 7, 252-257.

CCDR Algarve (2004). Plano Regional de Ordenamento do Território. Anexo H – Recursos Hídricos, Planeamento e Gestão do Recurso Água. Volume II – Caracterização e Diagnóstico.

Cunha, L. V.; Oliveira, R.; Nunes, V. B. (2003). Impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos de Portugal. SIAM. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.

Do Ó, A.; Monteiro, J. P. (2005). Diagnóstico do Risco de Secas do Algarve – Uma Abordagem Geográfica. X Colóquio Ibérico de Geografia. 22 – 24 Setembro 2005. Évora.

Do Ó, A.; Monteiro, J. P. (2006). Estimação da Procura Real de Água no Algarve por Sectores. 5º Congresso Ibérico sobre Gestão e Planeamento da Água. Fundação Nova Cultura da Água. Faro, Dezembro de 2006, pp 140-141, mais documento electrónico em CD-ROM, 10pp.

Ferraz, F.; Milde, L.; Mortatti, J. (1999). Modelos Hidrológicos Acoplados a Sistemas de Informações Geográficas: um Estudo de Caso. Revista de Ciências e Tecnologia. 14. pp 45 – 56.

Gassman, W. P.; Reyes, M. R.; Green, C. H.; Arnold, J. G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications and Future Research Directions. Center for Agricultural and Rural Development Iowa State University Ames. Iowa.

Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. Geophysical Research Letters 33, L08707.

Lehmann, A.; Schulin, R.; Srinivasan, R.; Vejdani, M.; Abbaspour, K.; Rouholahnejad, E. (2011) A parallelization framework for calibration of hydrological models. Environmental Modelling & Software 31 (2012). pp 28-36.

MADRP (1997). Código de boas práticas agrícolas para a protecção da água contra a poluição com nitratos de origem agrícola. Ministério da Agricultura, Desenvolvimento Rural e Pescas. Lisboa.

MAOTDR. (2004). PROT Algarve, Volume II, Caracterização e Diagnóstico, Anexo H – Recursos Hídricos, Planeamento e Gestão do Recurso Água. Lisboa.

MAOTDR. (2006). Implementação da Directiva Quadro da Água. Instituto da Água. Lisboa

Monteiro, J. P. (2006). Mudanças no Uso, Gestão e Conhecimento da Água na Segunda Metade do Século XX – O Caso do Algarve. 5º Congresso Ibérico de Gestão e Planeamento da Água. FNCA. 4 – 8 Dezembro 2006. Universidade do Algarve. Faro.

Monteiro, J. P.; Guerreiro, P.; Martins, J.; Silva, J.M.; Reis, E. (2006). A Ribeira do Algibre e os Aquíferos do Algarve Central Relações Entre Águas Superficiais e Subterrâneas. Conferência Nacional sobre Protecção do Território Através da Engenharia Natural, à Escala duma Bacia Hidrográfica (PROJECO). Comissão de Coordenação e Desenvolvimento regional do Algarve - Faro. Organ. CCDR-Algarve e CEHIDRO – Instituto Superior Técnico 7pp.

Neitsch, S. L; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R.; Williams, J. R. (2005). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation version 2005. Grassland, Soil and Water Research Laboratory. Agricultural Research Service. Texas.

Neitsch, S. L; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R.; Williams, J. R. (2011). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406. Texas A&M University System. College Station. Texas.

Nunes, J. P. (2007). Vulnerability of Mediterranean watersheds to climate change: the desertification context. Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia do Ambiente. Universidade Nova. Lisboa.

Querner, E.; Morábito, J.; Manzanera, M.; Pazos, J.; Ciancaglini, N.; Menenti, M. (1997). The use of hydrological models in the irrigated areas of Mendoza, Argentina. *Agricultural Water Management* 35. pp 11-28.

Rocha J., Nunes J.P., Roebeling P.C., Fidélis T., Alves H., Fonseca S. (2012) Using SWAT to estimate DIN water pollution abatement cost functions in Central Portugal. *Journal of Environmental Quality* (impact factor: 2.32). 02/2013; 41(1): pp 1-9.

Sangmanee, C.; Chinvanno, S.; Tanakitmethavut, J; Bunsomboonsakul, S.; Thitiwate, J. (2011). Impact of climate change on hydrological regime of Khlong Krabi Yai watershed, Krabi Province, Thailand. *Proceedings of SWAT-SEA II Conference, Soil and Water Assessment Tool-Southeast Asia*. 6 – 7 January 2011. Ho Chi Minh City. Vietnam.

Santos, F.D.; Miranda, P. (2006). Alterações Climáticas em Portugal - Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação. Projecto SIAM II. Gradiva.

Sharpley, A. N.; Williams, J. R. (1990). EPIC – Erosion Productivity Impact Calculator, 1. model documentation. USDA Agricultural Research Service, Washington DC.

Stigter, T. Y.; Monteiro, J. P.; Nunes, L. M.; Vieira, J.; Cunha, M. C.; Ribeiro, L.; Lucas, H. (2008). Strategies for integrating alternative groundwater sources into the water supply system of the Algarve, Portugal. *Water Asset Management International* 4.1: pp 19-24

Stigter, T. Y.; Monteiro, J. P.; Nunes, L. M.; Vieira, J.; Cunha, M. C.; Ribeiro, L.; Nascimento, J.; Lucas, H. (2009). Screening of sustainable groundwater sources for integration into a regional drought-prone water supply system. *Hydrology and Earth System Sciences* 13: pp 1-15.

Stigter, T. Y.; Ribeiro, L.; Oliveira, R.; Samper, J.; Fakir, Y. Monteiro, J. P.; Nunes, J. P.; Pisani, B.; Tavares, P.; Fonseca, L. (2010). Estudo do impacto das alterações climáticas nos recursos hídricos subterrâneos em zonas costeiras de Portugal, Espanha e Marrocos. 10º Congresso da água. 21 – 24 Março 2010. Alvor.

Stigter, T. Y. (2011a). Importância da gestão de recursos hídricos para o estado qualitativo e quantitativo dos aquíferos costeiros e ecossistemas dependentes - Casos de estudo no Algarve. Comunicação oral. Seminário Professor José Pinto Peixoto. Ciclo da água: do Oceano à nossa Mesa. Universidade do Algarve. 16 Novembro 2011. Faro.

Stigter, T. Y. (2011,b). Água subterrânea e zonas sensíveis em termos de nutrientes: necessidades, conhecimentos e medidas. In: Lambán, L. J., Carceller, T., Valverde, M., Fernández-Jáuregui, C. (Eds) *Las aguas subterráneas: desafíos de la gestión para el siglo XXI*, AIH-GP, Zaragoza, Spain.

Stigter, T.Y., Nunes, J.P., Pisani, B., Fakir, Y., Hugman, R., Li, Y., Tomé, S., Ribeiro, L., Samper, J., Oliveira, R., Monteiro, J.P., Silva, A., Tavares, P.C.F., Shapouri, M., Cancela da Fonseca, L., El Himer, H. In press. Comparative assessment of climate change and its



impacts on three coastal aquifers in the Mediterranean. *Regional Environmental Change*, doi: 10.1007/s10113-012-0377-3.

SWAT (s.d.). Soil and Water Assessment Tools, Software, SWAT Check consultado em <<http://swat.tamu.edu/software/swat-check/>> aceso a 04 de Março de 2013.

Vieira, J. M. (2003). Gestão da água em Portugal. Os desafios do Plano Nacional da Água. *Revista Engenharia Civil* 16. pp 5-12.

Wanielist, M.; Kerster, R.; Eaglin, R. (1997). – *Hydrology – Water Quantity and Quality Control*. John Wiley and Sons. Second Edition.