

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GUADIANA

Evaluation of the Impacts of Climate Change in the Guadiana River Basin

RODRIGO MAIA ⁽¹⁾, BRUNO OLIVEIRA ⁽²⁾ e VANESSA RAMOS ⁽³⁾

⁽¹⁾ Professor associado, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, rmaia@fe.up.pt

⁽²⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, bandre@fe.up.pt

⁽³⁾ Mestre em Engenharia do Ambiente, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, vmr@fe.up.pt

Resumo

As alterações climáticas, no contexto da gestão de recursos hídricos, pelo seu carácter evolutivo relativamente lento e pela incerteza que ainda rodeia a matéria, são frequentemente desprezadas (ou excessivamente simplificadas) aquando da realização de estudos sobre as disponibilidades hídricas. O presente artigo constitui uma apresentação do trabalho desenvolvido no âmbito do projeto “Desenvolvimento de uma Metodologia para a Integração dos Efeitos das Alterações Climáticas na Gestão dos Recursos Hídricos para uma Bacia Hidrográfica Portuguesa”. Ao longo do projeto procurou-se fazer uma análise holística e em profundidade dos impactos que as alterações climáticas poderão vir a ter na bacia hidrográfica do rio Guadiana, tendo em consideração a provável evolução do clima, da hidrologia, das tendências populacionais e das necessidades hídricas agrícolas, urbanas e ecológicas (entre outras vertentes da gestão de recursos hídricos) dentro da área do território português, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Guadiana.

Palavras-chave: Alterações climáticas, modelos climáticos globais, gestão de recursos hídricos, rio Guadiana.

Abstract

Climate Change in the context of water resource management, due to its relatively slow evolutionary character and to the uncertainty that still surrounds the subject, is frequently neglected (or excessively simplified) when studies are being conducted regarding water availability. The present article is a presentation of the work developed in the context of the project “Development of a Methodology to Integrate Climate Change effects in Water Resources Management on a Portuguese River Basin”. Along the project’s execution, a holistic analysis was performed on the depths to which climate change may impact the Guadiana River’s hydrographic basin. This was performed whilst taking into consideration the likely evolution of climate, hydrology, the population’s evolutionary tendencies and the agricultural, urban and ecological water requirements (amongst other components of water resources’ management) in the area of the Portuguese territory contained within the Guadiana River.

Keywords: Climate change, global climate models, water resource management, Guadiana river.

1. Introdução

O presente trabalho insere-se no estudo desenvolvido no âmbito do projeto “Desenvolvimento de uma Metodologia para a Integração dos Efeitos das Alterações Climáticas na Gestão dos Recursos Hídricos para uma Bacia Hidrográfica Portuguesa”. A principal tarefa a desenvolver foi a avaliação do efeito das alterações climáticas sobre a gestão dos recursos hídricos na parte portuguesa da bacia hidrográfica do rio Guadiana. O impacto sobre os recursos hídricos foi analisado, tendo em consideração a evolução do clima, a hidrologia, as necessidades hídricas (de origem urbana, agrícola e ecológica) e a evaporação nos reservatórios, tendo em conta as suas prováveis evoluções ao longo dos anos. O objetivo do projeto foi o desenvolvimento/aplicação de um conjunto de metodologias que permitam a análise futura de disponibilidades hídricas e soluções estruturais (entre outros fatores) no contexto das alterações climáticas.

Para tal foi necessário realizar um balanço hídrico dentro do sistema de albufeiras das barragens com capacidade de armazenamento situadas no rio Guadiana e analisar a interação das componentes desse mesmo balanço hídrico. A avaliação das alterações climáticas, a aplicação dos modelos e análise de resultados foi dividida em múltiplas alternativas (i.e., formas alternativas de aplicação/combinção dos modelos) e períodos de estudo (divididos entre histórico e futuros). As diferentes alternativas (numeradas de 0 a 3) pretendem dar uma visão geral da alteração das condições na albufeira, com as alternativas 0 e 2 a servirem como base para avaliação dos períodos histórico e futuros. Por outro lado, as alternativas 1 e 3 tentam reduzir a incerteza em torno das alternativas 0 e 2, respetivamente, nomeadamente em termos do impacto das alterações climáticas na hidrologia e na gestão de recursos hídricos na albufeira, por via da incorporação no estudo de informação adicional (nomeadamente proveniente de registos paleoclimáticos).

Informações adicionais relativas ao trabalho desenvolvido podem ser consultadas no relatório do projeto referido (FEUP, 2013).

1.1. Alternativas

A definição das várias componentes do balanço hídrico a estudar foi feita de quatro formas alternativas, seguidamente resumidas.

1.1.1. Alternativa 0

Como o próprio nome indica, esta solução consiste em modelar as condições observadas num período histórico, nomeadamente através da utilização de séries de valores observados/históricos de afluências aos reservatórios e de consumos de água.

1.1.2. Alternativa 1

A alternativa 1 é construída a partir da alternativa 0, adicionando às séries observadas a informação referente às sequências presentes nos registos paleoclimáticos, i.e., as sequências/sucessões de tipos de anos hidrológicos (anos secos/anos húmidos) paleoclimáticas.

As séries de dados paleoclimáticos são constituídas por informação dendrocronológica (séries temporais de espessuras de anéis de árvores). Como tal, estas não são referentes a um período específico (i.e., não correspondem ao período histórico ou futuro), mas são, ao invés, séries que se estendem por períodos de tempo variáveis, que se estendem frequentemente até ao século XVIII (dependendo da altura em que os registos foram recolhidos).

1.1.3. Alternativa 2

A alternativa 2 é construída a partir da alternativa 0, corrigindo as séries observadas com base na tendência climática média futura para os períodos de estudo. Esta tendência média futura é dada por cenários climáticos que resumem os resultados dos Modelos de Circulação Global (GCM's, do inglês *General Circulation Models*).

1.1.4. Alternativa 3

A alternativa 3 é construída a partir das alternativas 1 e 2, utilizando as séries de afluências às albufeiras corrigidas da tendência climática futura, sobrepostas com a informação das sucessões de anos hidrológicos, obtida a partir dos registos paleoclimáticos.

1.2. Períodos de estudo

Para o referido projeto foram considerados três períodos de estudo, com definições diferentes das afluências e dos consumos, que se detalham a seguir:

- Período histórico: corresponde ao período entre os anos de 1961 e 1990, inclusive. Este foi definido com base nas séries históricas de dados, para a Alternativa 0, e nas séries históricas e na informação paleoclimática, para a Alternativa 1.
- Primeiro Período Futuro (Futuro 1): corresponde ao período entre os anos de 2011 e 2040, inclusive. Este foi definido com base nas séries históricas corrigidas da tendência climática futura, para a Alternativa 2, e nas séries históricas corrigidas e na informação paleoclimática, para a Alternativa 3.

- Segundo Período Futuro (Futuro 2): corresponde ao período entre os anos de 2041 e 2070, inclusive. Este é definido da mesma forma que o Futuro 1, mas utilizando as tendências climáticas determinadas para o Futuro 2.

2. Zona de Estudo

Este trabalho incidiu sobre a parte portuguesa da bacia hidrográfica do rio Guadiana.

A bacia do rio Guadiana, com uma área total de 67 200 km², é partilhada entre Portugal e Espanha, sendo o quarto maior rio da Península Ibérica (ARH Alentejo, 2011). A parte portuguesa da bacia do rio Guadiana tem uma área aproximada de 11 600 km² e está incluída em duas regiões administrativas: Alentejo e Algarve (INAG, 2010). O Alentejo cobre a maior parte da área de estudo, sendo uma zona muito rural e uma das áreas menos densamente povoadas do país. A escassez de água foi uma das principais restrições ao desenvolvimento da região embora esta realidade se esteja a alterar (e seja expectável que assim continue) devido ao desenvolvimento do Empreendimento de Fins Múltiplos do Alqueva (EFMA). Na Figura 1, é possível observar a área da bacia hidrográfica analisada neste estudo.



Figura 1. Parte portuguesa da bacia hidrográfica do rio Guadiana.

A bacia hidrográfica do rio Guadiana tem um clima seco, Mediterrâneo-Continental, com épocas secas e húmidas relativamente bem definidas. Esta região semi-árida é frequentemente afetada pela ocorrência de secas (INAG, 2001).

2.1. Subdivisão espacial

A área a analisar foi dividida em seis zonas, que delimitam as várias subdivisões da zona de estudo com características distintas.

Estas subdivisões foram designadas como Unidades de Análise (UA1 a UA6 – Figura 2). A divisão da bacia em UA foi feita de forma a: (I) respeitar os limites dos aquíferos, (II) agrupar, em cada UA, origens e usos semelhantes de água e (III) ter em consideração outras singularidades e a sua respetiva relevância para as diferentes áreas da bacia hidrográfica do rio Guadiana, como sejam a EFMA (FEUP, 2011).

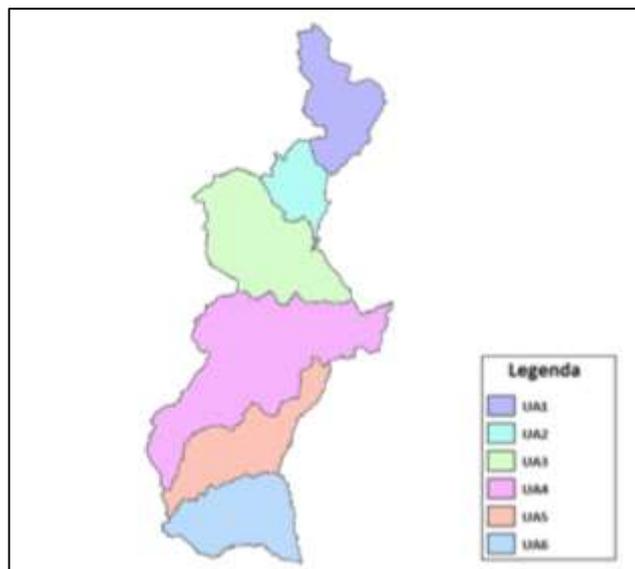


Figura 2. Unidades de Análise (FEUP, 2011).

As diferentes UA estão associadas a cada uma das diferentes albufeiras que formam o sistema do Guadiana em função da sua dependência da água dessas mesmas albufeiras.

Para além das zonas referidas, e, de forma a distribuir corretamente os consumos, foram também consideradas três outras zonas independentes, também abastecidas com água do Guadiana, designadas como Vigia (correspondente à albufeira da Vigia), Sotavento (correspondente ao Sotavento Algarvio) e Sado (correspondente à área da bacia do rio Sado que utiliza água transferida de Alqueva).

2.2. Principais origens da água

As necessidades hídricas na bacia do rio Guadiana são satisfeitas através de duas origens de água: (1) águas superficiais e (2) águas subterrâneas.

As principais albufeiras públicas (com uma capacidade útil acima de 10 hm³) são: Caia, Lucefecit, Vigia, Monte Novo, Alqueva, Pedrogão, Enxoé, Odeleite e Beliche (FEUP, 2009).

A Figura 3 apresenta um esquema das ligações entre albufeiras e constitui a base para a estrutura que foi mais tarde aplicada no modelo de gestão de recursos hídricos.

2.3. Principais consumidores de água

Os principais sectores utilizadores de água na parte portuguesa da bacia do rio Guadiana são a agricultura de sequeiro, a agricultura de regadio, tanto pública como privada, os consumos urbanos e a água utilizada no turismo e indústrias. Os sectores agrícola e urbano são os que têm maior relevância para a região, sendo portanto os que foram mais cuidadosamente analisados ao longo das diferentes tarefas do projeto.

Os chamados Aproveitamentos Hidroagrícolas (AH) estão associados à agricultura de regadio público, sendo portanto abastecidos por albufeiras públicas. O maior AH é o Empreendimento de Fins Múltiplos do Alqueva. Serralheiro *et al.* (2010) resume as principais colheitas e correspondente distribuição de áreas dentro de cada UA com base em dados do INE (INE, 2010).

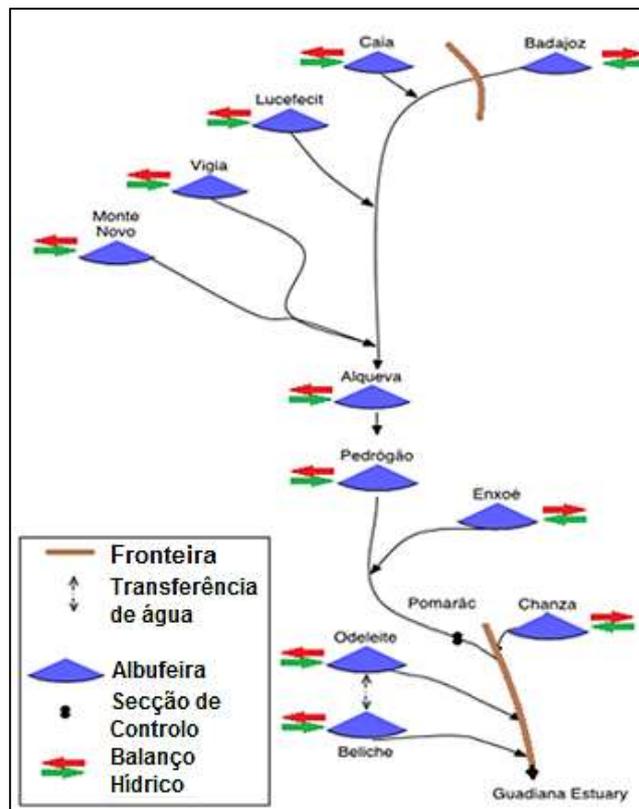


Figura 3. Esquema das interligações das albufeiras do rio Guadiana (FEUP, 2013).

Relativamente aos sistemas de abastecimento urbanos, foi necessário analisar os sistemas de abastecimento ligados à bacia do rio Guadiana. Isto foi feito através da análise do Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Água e Águas Residuais (INSAAR), que contém informação sobre os sistemas de abastecimento para os anos de 2002 a 2008 (INSAAR, 2012).

3. Outros Dados e Modelos Utilizados

O seguinte capítulo apresenta outros elementos que foram necessários ao estudo do impacto das alterações climáticas, nomeadamente dados meteorológicos (observados e modelados) e paleoclimáticos. Apresentam-se ainda os principais modelos utilizados como parte do projeto.

3.1. Dados meteorológicos

A construção das séries históricas dos dados meteorológicos (precipitação e temperatura) para utilização no projeto requereu diversos passos intermédios:

- Identificação das estações meteorológicas existentes com valores históricos e criação dos polígonos de Thiessen correspondentes;
- Definição das grelhas espaciais que delimitam a bacia. Estas utilizam células retangulares com resolução espacial de 0.5 e 0.125°, dependendo da aplicação;
- Intersecção dos polígonos de Thiessen com as duas grelhas;
- Ponderação dos valores dos vários postos e criação das séries históricas de precipitação e temperatura para cada célula;

3.2. Projeções climáticas

As bases de dados de projeções climáticas globais do CMIP3 (do inglês *Coupled Model Intercomparison Project phase 3*) são o resultado da aplicação de modelos climáticos globais, e foram obtidos da respetiva base de dados na internet (www.engr.scu.edu/~emaurer/global_data/).

As projeções climáticas do CMIP3 consistem dos dados de saída de 16 modelos do IPCC (do inglês *International Panel on Climate Change*), aplicados com 3 cenários futuros de emissões de gases de efeito estufa, totalizando 48 projeções diferentes. Estas projeções contêm dados mensais de precipitação e temperatura a uma escala de 0.5° para o período de 1950 a 2099.

A partir da base de dados do CMIP3, foram extraídos 48 projeções de alterações climáticas presentes na base de dados do CMIP3 para a bacia do Guadiana (Latitude 40.5°N a 37°N, Longitude 2°W a 8.5°W).

3.3. Dados paleoclimáticos

Os dados de anéis das árvores (dendrocronologias) permitem a reconstrução das sucessões anuais de anos secos e húmidos, para um dado local, através da observação das espessuras dos anéis das árvores para cada ano consecutivo. De forma a garantir a existência de uma boa relação entre a espessura dos anéis das árvores e a precipitação, ou o escoamento superficial (i.e., a disponibilidade de água) é importante que os dados disponíveis provenham de locais próximos, ou mesmo situados dentro da bacia do rio a estudar.

A avaliação da aplicabilidade das dendrocronologias é baseada na coerência espacial da precipitação medida nas estações meteorológicas disponíveis. Os dados disponíveis incluem um total de 114 estações.

Como exemplo das análises realizadas sobre a coerência espacial da precipitação, apresentam-se, nas Figuras 4 e 5, os mapas com os coeficientes de correlação espacial da precipitação relativamente a duas estações de referência (Ciudad Real e Badajoz). Nestes mapas estão representadas os locais onde existe informação dendrocronológica (a azul se tiverem menos de 200 anos de dados e a laranja no caso contrário).

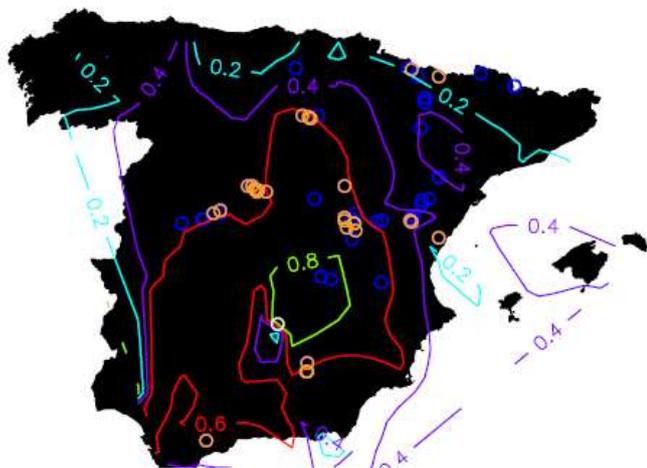


Figura 4. Coeficiente de correlação da precipitação para a estação meteorológica de Ciudad Real (assinalada por um círculo a branco).



Figura 5. Coeficiente de correlação da precipitação para a estação meteorológica de Badajoz (assinalada por um círculo a branco).

Com base nestas análises foram selecionados 18 locais com dados de dendrocronologias para posterior estudo.

3.4. Modelos utilizados

3.4.1. ISAREG

Os consumos agrícolas históricos foram determinados, para cada uma das UA, através da aplicação de uma metodologia similar à implementada no projeto SGPS (FEUP, 2011). Esta metodologia consistiu na utilização: (I) da informação climatérica do período histórico, (II) do conhecimento da distribuição espacial das colheitas na zona de estudo (Serralheiro *et al.*, 2010), (III) do comportamento das colheitas ao longo do ano e (IV) do modelo ISAREG (Teixeira e Pereira, 1992; Teixeira, 1994) para simulação das necessidades agrícolas.

O modelo ISAREG estima as necessidades hídricas para a agricultura com base na precipitação e temperatura (traduzida em evapotranspiração superficial com base no método de Hargreaves, 1982) e no comportamento das colheitas em termos das suas necessidades hídricas ao longo das suas várias fases de evolução.

3.4.2. Modelo hidrológico estocástico

O modelo hidrológico estocástico (semelhante ao criado por Prairie *et al.*, 2007) foi a ferramenta utilizada nas Alternativas 1 e 3 para combinar as séries de caudais históricos/corrigidos (das Alternativas 0 e 2) com a informação paleoclimatológica (sequências de tipos de anos hidrológicos).

Este modelo faz uma amostragem das sequências de tipos de anos hidrológicos obtidas através dos registos paleoclimáticos e, em função das sequências geradas, faz uma nova amostragem semi-aleatória dos caudais anuais dos registos históricos/corrigidos. Para a sua aplicação, as séries de caudais anuais são desagregadas em valores mensais.

3.4.3. Modelo hidrológico

O objetivo do desenvolvimento e aplicação de um modelo hidrológico à bacia do Guadiana foi a caracterização da resposta da bacia ao clima (à escala de 0.125° – escala dos dados).

Este tipo de modelo permite a transformação de séries de temperatura e precipitação na bacia em valores de escoamento superficial/volumes afluentes às albufeiras.

Os modelos hidrológicos executam um balanço hidrológico localizado em cada unidade espacial (célula) tendo em consideração a água que se precipita, que se infiltra, que é retida sobre a forma de neve, etc..

Os dois modelos hidrológicos utilizados para a simulação do escoamento superficial na bacia do Guadiana foram: o modelo de balanço hidrológico mensal Thornthwaite (Mather, 1979; McCabe e Markstrom, 2007), e o modelo Temez (Peláez, 1977).

Com base na comparação dos modelos, principalmente em termos da sua capacidade de simular o comportamento observado das albufeiras do sistema do Guadiana, o modelo Temez foi escolhido como sendo o mais apropriado para aplicação à bacia do rio Guadiana.

O modelo em questão foi (I) calibrado para cada uma das albufeiras ou postos de controlo para os quais existiam dados de caudal, em função das precipitações e temperaturas nas bacias de drenagem correspondentes, e (II) aplicado a cada uma destas bacias para obter os caudais drenados nos períodos de estudo.

De acordo com a formulação do método do Temez, este funciona com base em quatro parâmetros independentes que devem ser calibrados e aplicados em conjunto com os dados de precipitação e evapotranspiração potencial:

- Coeficiente de excedência;
- Capacidade máxima de armazenamento de água no solo (em mm/mês);
- Taxa máxima de infiltração (em mm/mês);
- Coeficiente de descarga de águas subterrâneas (em mm/dia).

3.4.4. Modelo de gestão de recursos hídricos

O modelo de gestão foi uma ferramenta construída no âmbito deste estudo de forma a realizar um balanço hídrico entre as afluências e os consumos ao longo da bacia.

A bacia é definida utilizando informação sobre as características das albufeiras e a interligação entre estas, desde a sua entrada em Portugal (vindo de Espanha) até à sua foz junto a Vila Real de Stº António.

O modelo considera, do lado das afluências:

- A água que drena exclusivamente para cada albufeira;
- As afluências de Espanha na secção junto a Badajoz;
- As transferências entre albufeiras;
- A água descarregada para jusante pelas albufeiras.

E, do lado dos consumos:

- A água necessária para consumo urbano;
- A água utilizada para satisfazer as necessidades agrícolas;
- As transferências entre albufeiras;
- Os caudais ecológicos;
- Descargas de cheias;
- A evaporação das albufeiras.

A atribuição dos caudais a cada um destes consumos é feita com base num sistema de prioridades. Assume-se, assim, por exemplo, que a água deverá ser sempre utilizada primeiro para consumo urbano (em paralelo com a evaporação nas albufeiras, uma vez que esta não pode ser evitada).

As transferências de água entre albufeiras são efetuadas quando existe uma ligação direta (por conduta) entre as albufeiras ou quando existe um acordo explícito entre os gestores das albufeiras para permitir a passagem de água, quando necessária, para satisfazer os consumos necessários.

O presente modelo permite uma grande flexibilidade na definição do sistema de albufeiras, utilizando um método não linear de resolução do sistema. Este método minimiza as falhas na satisfação dos consumos no sistema através do ajuste das transferências entre reservatórios, por ordem de prioridade dos consumos. Na Figura 6 apresenta-se o esquema representativo do sistema do Guadiana, que foi efetivamente implantado no modelo.

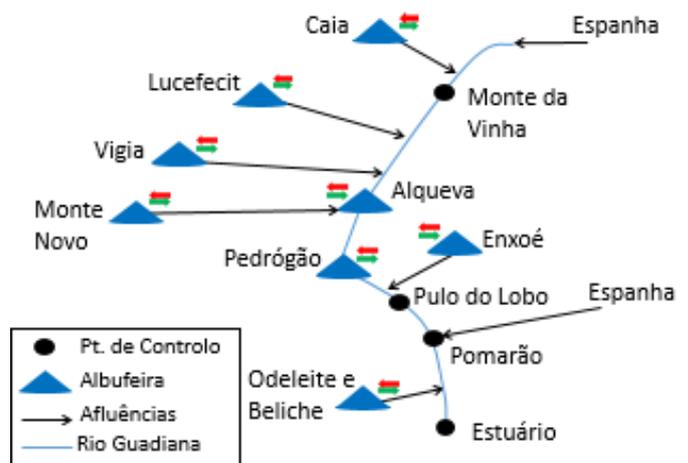


Figura 6. Estrutura do sistema do Guadiana.

4. Outros Componentes do Balanço Hídrico nas Albufeiras

De acordo com o referido no ponto 3.4.4, a concretização da modelação da gestão dos recursos hídricos na albufeira requereu ainda a definição específica de alguns dos componentes do balanço hídrico referidos, de acordo com o seguidamente descrito.

4.1. Caudais ecológicos

Embora algumas secções de referência já tenham valores de caudais/regimes ecológicos definidos, por uma questão de coerência, optou-se por definir séries de caudais ecológicos para cada albufeira através da aplicação de métodos apropriados.

Devido às limitações existentes em termos da disponibilidade de dados biológicos, os métodos hidrológicos foram considerados como a melhor opção.

Por uma questão de conformidade com as metodologias utilizadas em Espanha, e após a avaliação dos métodos sugeridos nos Planos Hidrológicos de Espanha (Confederación Hidrográfica del Guadiana, 2012), a definição dos caudais ecológicos foi feita com base no método do caudal base.

4.2. Afluências de Espanha

Relativamente à definição das afluências de Espanha, onde não existem valores reais observados disponíveis, foi definida uma relação para estimar o volume de água consumido em Espanha. Isto foi feito através do relacionamento dos caudais que afluem de Espanha na secção de Monte da Vinha (ou o que foi consumido em Espanha num dado mês, ou o quociente entre os dois), com o valor simulado do escoamento superficial (obtido a partir do modelo hidrológico TEMEZ) que afluiria de Espanha se não fosse feita a regularização de caudais.

De modo a definir esta relação, foi selecionado um período de 20 anos com valores de registos históricos das afluências de Espanha e considerados os valores associados ao escoamento superficial (modelado), temperatura e precipitação (estas últimas foram incluídas por serem variáveis cuja definição se espera ser mais fiável para o período a analisar). Especificamente, os dados utilizados para esta análise foram os seguintes:

- Valores observados de afluências à secção de Monte da Vinha no rio Guadiana (secção à entrada de Espanha);
- Valores simulados do escoamento superficial, tal como modelados pelo modelo Temez;
- Valores observados de precipitação e temperatura, em termos médios, para toda a bacia do Guadiana a montante de Monte da Vinha.

O período de sobreposição destes dados estende-se de Outubro de 1979 até Dezembro de 1999, para um total de 20 anos e 3 meses, ou seja, 243 valores registados.

Como parâmetro a ser relacionado com as variáveis referidas anteriormente (precipitação, temperatura e escoamento), foi selecionado o rácio entre a diferença entre o escoamento simulado e observado e o valor simulado.

Foram estudadas diversas funções alternativas entre as variáveis (logarítmica, potência, hiperbólica, linear, quadrática, etc.) e a que produziu os melhores resultados corresponde à soma de relações quadráticas aplicadas a cada variável (melhor relação número de parâmetros/qualidade).

Como se pode observar na Figura 7, o ajuste obtido através da relação referida entre valores observados e simulados é de boa qualidade.

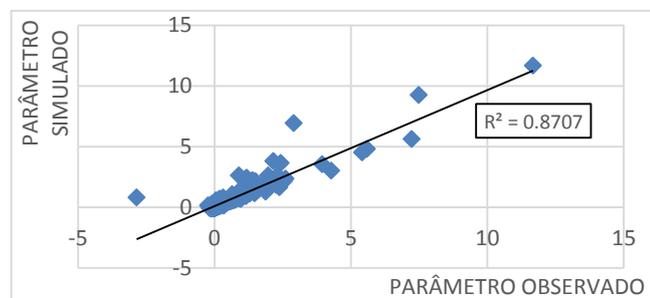


Figura 7. Comparação das afluências de Espanha observadas versus simuladas.

Esta relação foi considerada estática no tempo, tendo-se assumido que a sua forma é idêntica para o período histórico e para os períodos futuros.

4.3. Evaporação nas albufeiras

A evaporação nas albufeiras é de difícil determinação sem a execução de uma campanha de medições que permita obter uma relação clara entre as variáveis climáticas e a evapotranspiração.

A solução alternativa que se adotou consiste em aproveitar os únicos dados disponíveis para esta análise, nomeadamente, as evaporações médias estimadas para períodos de seca e em fazer um ajuste linear entre a evaporação superficial (determinada pelo método de Hargreaves) e a evaporação média que se registou.

Este ajuste forneceu resultados razoáveis e, como tal, foi considerada como uma aproximação apropriada para simular a evaporação nos reservatórios. Na Figura 8 é apresentado o caso da albufeira do Caia.

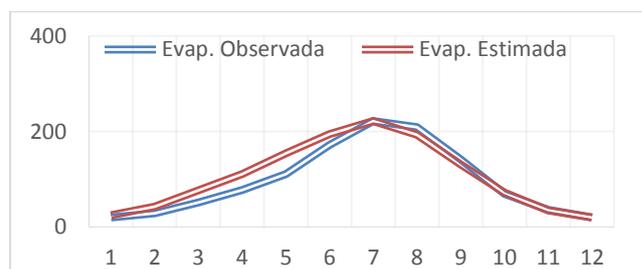


Figura 8. Comparação da evaporação (em Caia) observada versus simulada (através do ajuste linear à evaporação superficial).

Esta relação foi considerada estática no tempo, tendo-se assumido que a sua forma é idêntica para o período histórico e para os períodos futuros.

5. Reconstrução Paleoclimática

Os dados paleoclimáticos utilizados no projeto foram as séries de espessuras de anéis de árvores (dendrocronologias).

A partir destes é feita uma reconstrução das séries de caudais no período paleoclimático (séries estas que são as que são efetivamente utilizadas para a amostragem dos tipos de anos hidrológicos).

A reconstrução paleoclimática é feita com base na premissa de que existe uma coincidência temporal entre o nível de desenvolvimento das árvores e o nível de humidade/disponibilidade de água num determinado ano.

De forma a aproveitar esta informação, as séries dendrocronológicas são recolhidas através de métodos próprios, específicos para cada tipo de árvore, e normalizados de forma a compensar eventuais condições locais de cada árvore e pela natural diminuição da espessura dos anéis das árvores que ocorre ao longo dos anos. Para efeitos de aplicação, foram recolhidas informações relativas a 114 séries dendrocronológicas. Na Figura 9 é possível observar um exemplo de uma série dendrocronológica já corrigida (no âmbito do trabalho).

Estas séries foram depois utilizadas para aplicação do método K-NN (*K-Nearest Neighbour*, Gangopadhyay *et al.*, 2009) para ponderar os valores dos caudais no período histórico, onde este se sobreponha com os registos dendrocronológicos.

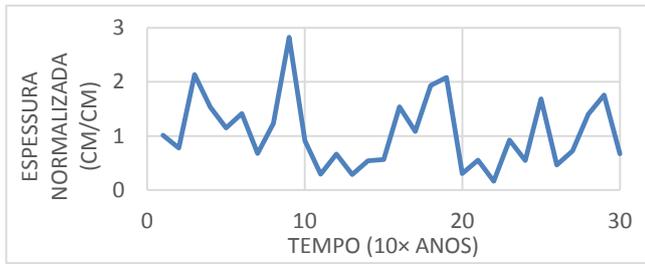


Figura 9. Exemplo de série dendrocronológica.

O método de K-NN concretiza a reconstrução das séries de caudais paleoclimáticos através da média ponderada dos valores observados, para cada ano do período a reconstruir. Esta ponderação é feita em função da semelhança, medida nas séries paleoclimáticas, entre o ano a reconstruir e os anos do período histórico que se sobrepõem com os registos paleoclimáticos.

6. Cenários Climáticos

Os cenários de evolução climática que foram utilizados neste projeto tiveram como base a informação fornecida pelo CMIP3. Estes cenários delimitam a gama da provável evolução climática futura, com base nas condições esperadas.

Para cada período futuro (Futuro 1 - Figura 10 e Futuro 2 - Figura 11) o estudo foi feito através da análise das distribuições de probabilidades de alteração dos valores de precipitação e temperatura de cada cenário.

A gama de valores que se considerou representativa dos cenários foi a correspondente à delimitada pelos percentis 25, 50 e 75% definidos com base na variabilidade global das projeções.

Os cenários efetivamente considerados para avaliação do efeito das alterações climáticas foram selecionados de forma a serem os que estão mais próximos destes percentis em termos de temperatura e de precipitação.

Nas Figuras 10 e 11, respetivamente para os períodos Futuro 1 e Futuro 2, pode observar-se a distribuição de resultados (dada pelas projeções) (i) em termos da modificação da temperatura, (ii) em termos da modificação da precipitação e (iii) a representação dos pares precipitação-temperatura (gráfico à esquerda, em baixo e ao cima à direita, respetivamente).

As linhas transversais correspondem aos percentis 25, 50 e 75% da temperatura e precipitação. A intersecção destas linhas delimita a gama de variação dos cenários que pretendemos analisar (representada pelos pontos 1 a 5).

A escolha dos cenários representativos do futuro foi feita através da consideração, para cada ponto de 1 a 5, do conjunto de cinco cenários do CMIP3 que mais se aproxima de cada um dos pontos desejados. No final obtêm-se 5 cenários, cada um correspondente (para cada um dos pontos 1 a 5) à média de 5 projeções. Esta abordagem foi escolhida (por comparação com a seleção de um só cenário do CMIP3 por ponto) de forma a evitar eventuais particularidades dos modelos que pudessem reduzir a fiabilidade das simulações realizadas.

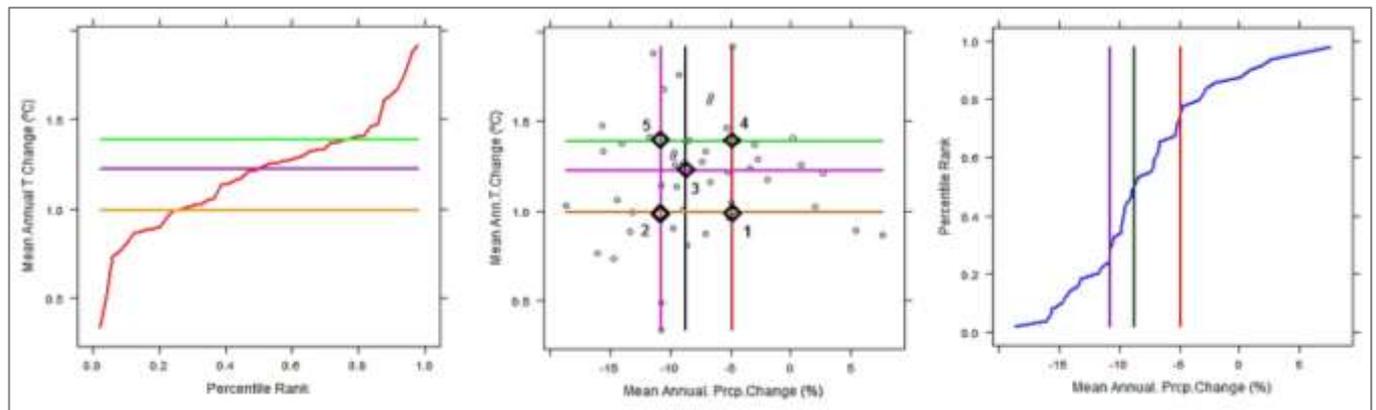


Figura 10. Cenários de alterações climáticas com base nos valores do período futuro 1 (2011-2040).

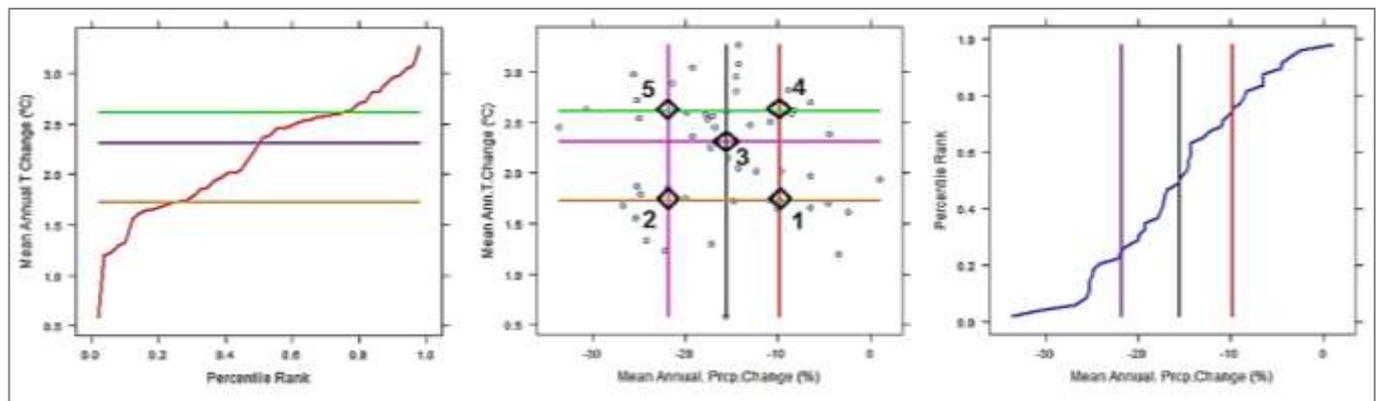


Figura 11. Cenários de alterações climáticas com base nos valores do período futuro 2 (2041-2070).

Como exemplo, é possível que um determinado modelo, apesar de fazer boas previsões em termos globais, produza resultados piores em determinados meses do ano (e.g. com meses secos recorrentemente mais secos do que o que acontece na realidade) ou em determinados locais ou formações geológicas. O ponto 3 (dado pela interseção dos percentis 50% de P e T) corresponde à tendência média climática observada entre todos os modelos, enquanto os cenários 1, 2, 4 e 5 representam a combinação dos cenários considerados como extremos da variação da precipitação e temperatura.

7. Construção das Alternativas para Modelação Climática

As alternativas apresentadas de seguida representam as diferentes formas de modelar o clima, hidrologia e consumos, ou seja, as componentes do balanço hídrico necessárias à modelação da gestão dos recursos hídricos no sistema do Guadiana.

A aplicação de cada uma destas alternativas com o modelo de gestão dos recursos hídricos permite obter uma gama de resultados que poderá fornecer informação sobre a evolução futura das condições de disponibilidade hídrica.

7.1. Alternativa 0

O desenvolvimento da Alternativa 0 é relativamente simples, aproveitando os valores observados dos consumos e aflúncias, se existirem registos históricos destes, e modelando as restantes componentes (e.g. aflúncias em determinadas secções do rio e consumos agrícolas).

A definição dos consumos urbanos foi feita através da definição de uma série de (12) valores médios mensais anuais, obtidos a partir dos registos de consumos médios diários.

A razão para se terem aproximado os consumos urbanos médios diários por valores médios mensais justifica-se pela grande irregularidade no registo de dados dentro do período histórico, tanto na recolha dos dados como nos valores propriamente ditos. Adicionalmente, é preciso ter em consideração que os consumos urbanos futuros têm, obrigatoriamente, de utilizar séries médias e desta forma é possível ter uma melhor ideia, em termos relativos, dos impactos das alterações climáticas.

Relativamente aos consumos agrícolas, estes foram modelados com o modelo ISAREG, utilizando os valores observados de precipitação e temperatura e os registos históricos de distribuição de área agrícola das diferentes culturas. As restantes componentes a modelar seguem o que já foi apresentado anteriormente, nomeadamente:

- As aflúncias às albufeiras, na falta de registos, foram simuladas por aplicação do modelo Temez às séries históricas de precipitação e temperatura;
- Os caudais ecológicos para este período foram determinados a partir da análise referida no ponto 4.1, utilizando as séries históricas de dados para estimar o valor do caudal ecológico a descarregar em cada mês.

Uma vez que esta alternativa se baseia apenas em valores observados, o estudo da mesma corresponde, na prática, a uma simulação singular da gestão dos recursos hídrico na bacia.

7.2. Alternativa 1

A alternativa 1 segue a mesma abordagem que a Alternativa 0, agora de forma repetida. De facto, a utilização do modelo estocástico leva a que existam 100 séries de aflúncias, a considerar, geradas pelo modelo, e não apenas uma série de caudais afluentes por albufeira.

O modelo estocástico permite que as séries geradas tenham a informação, em termos de magnitudes, das séries históricas, ao mesmo tempo que têm informação das sequências de tipos de anos hidrológicos (anos secos/anos húmidos) dos registos paleoclimáticos.

Os consumos foram modelados em paralelo com as aflúncias, de forma a garantir a coerência temporal entre a ocorrência das aflúncias e dos consumos respetivos. Esta abordagem consiste em selecionar (para um determinado mês) os consumos que têm origem nas mesmas condições climáticas que produziram os valores de aflúncias modelados.

7.3. Alternativa 2

A Alternativa 2 pretende ser uma abordagem à modelação da disponibilidade de recursos hídricos para um período futuro.

Do lado das aflúncias, esta alternativa considera uma solução baseada nas séries históricas, corrigidas da tendência climática futura.

Esta correção é feita através da soma, ou multiplicação, de um fator de alteração climática às séries históricas. Este fator de alteração climática corresponde à diferença (no caso da temperatura) ou razão (no caso da precipitação) entre as temperaturas e precipitações dadas pelos modelos climáticos, em termos médios, dentro dos períodos a modelar.

As séries de precipitação e temperatura corrigidas da tendência climática futura são depois aplicadas no modelo Temez para construir as séries climáticas futuras.

Relativamente aos consumos:

- Os consumos urbanos foram estimados para 3 cenários distintos através de uma gama de variação futura dos consumos em relação ao período histórico, estimada em função da provável evolução da população (representada por um cenário inferior, um médio e um superior);
- Os consumos agrícolas foram novamente estimados com base no modelo ISAREG aplicado às séries futuras do clima. Adicionalmente, em função de 3 cenários distintos, foram estimadas as prováveis evoluções da distribuição das áreas agrícolas para os períodos futuros;
- Dado, neste momento, ser difícil a compreensão da evolução das necessidades ecológicas perante os cenários de alterações climáticas, os caudais ecológicos foram considerados como constantes do período histórico para os períodos futuros.

A realização da modelação dos recursos hídricos para esta alternativa exige a realização de 2 (períodos futuros) vezes 5 (cenários climáticos obtidos dos GCM's) vezes 3 (cenários de consumos urbanos) vezes 3 (cenários de consumos agrícolas) simulações.

7.4. Alternativa 3

A Alternativa 3 adota simplesmente uma combinação das abordagens das Alternativas 1 e 2, utilizando as séries climáticas futuras sobrepostas da informação paleoclimática. Neste caso, o modelo estocástico é aplicado da mesma forma que na Alternativa 1, sendo que as séries correspondentes ao cenário 3 foram utilizadas, com a informação paleoclimática, para gerar as 100 séries necessárias à aplicação do modelo de gestão. A geração dos consumos correspondentes segue as mesmas orientações estabelecidas para a Alternativa 1. A modelação desta alternativa exige portanto realização de 2 (períodos futuros) vezes 100 (séries de aflúncias geradas) vezes 3 (cenários de consumos urbanos) vezes 3 (cenários de consumos agrícolas) simulações.

8. Resultados

De seguida apresentam-se alguns resultados, em termos médios, relativos a algumas das variáveis mais relevantes para a gestão de recursos hídricos:

- **Precipitação e Temperatura:** das duas variáveis climáticas, a precipitação é a que sofre o maior impacto das alterações climáticas em termos percentuais (8.8 e 16.3% por comparação com 7.6 e 15.0% da temperatura). No entanto, nenhuma destas alterações pode ser abertamente menosprezada uma vez que a precipitação (Quadro 1) tem um maior impacto nas disponibilidades hídricas e a temperatura (Quadro 2) tem um maior impacto nas necessidades hídricas;

Quadro 1. Precipitação média anual na bacia (mm/ano).

Cenários	Histórico	Futuro 1	Futuro 2
1		542.9	519.8
2		516.0	439.2
3	576.0	525.4	481.9
4		550.4	524.3
5		514.4	450.1

Quadro 2. Temperatura média anual na bacia (°C).

Cenários	Histórico	Futuro 1	Futuro 2
1		16.11	16.91
2		16.14	16.87
3	15.19	16.35	17.47
4		16.44	17.75
5		16.47	17.77

- **Disponibilidades hídricas:** apesar de se observarem alterações das variáveis climáticas, em termos percentuais, relativamente pouco significativas, esta alteração climatérica traduz-se numa redução de 25 e 39% (Quadro 3) em termos médios, do caudal gerado para toda a bacia, para os Futuros 1 e 2, respetivamente.

Quadro 3. Escoamento superficial total em termos médios mensais na bacia (hm³/mês).

Cenários	Histórico	Futuro 1	Futuro 2
1		4457.5	3875.4
2		3886.2	2296.1
3	5379.2	4020.9	3304.1
4		4770.2	4376.7
5		3837.7	2689.4

- **Necessidades hídricas:** os aumentos verificados nos volume de água necessária para as diversas tipologias de consumos devem-se particularmente à agricultura, um facto normal tendo em conta que a parte portuguesa da bacia do rio Guadiana se situa numa zona de Portugal em que o setor primário tem uma grande proeminência. O aumento verificado nas necessidades hídricas agrícolas (790 e 850%, em termos médios, para os Futuros 1 e 2, respetivamente) ficou a dever-se em parte à alteração climática mas principalmente ao aumento projetado (com base nos respetivos cenários) das áreas agrícolas dedicadas à irrigação. No entanto, devido à maior escassez de recursos hídricos, verificou-se uma diminuição do consumo da água na bacia (Quadro 4).

Quadro 4. Volume total de água consumida em termos médios mensais nas albufeiras para os cenários intermédios de consumos urbanos e agrícolas (hm³/mês).

Cenários	Histórico	Futuro 1	Futuro 2
1		346.3	298.8
2		315.9	219.1
3	397.7	320.8	271.1
4		361.8	318.1
5		317.0	238.7

- **Escassez hidrológica:** foi observado um aumento muito significativo na ocorrência de eventos de escassez na bacia, atingindo incrementos de 14 e 23% relativamente ao valor histórico para os Futuros 1 e 2, respetivamente (Quadro 5). Este facto deveu-se maioritariamente ao aumento dos consumos (por comparação com a diminuição das disponibilidades hídricas), uma vez que este aumento se concentra principalmente nos meses quentes, onde as disponibilidades hídricas são mais baixas. Por sua vez, a diminuição das disponibilidades ocorreu de forma proporcional ao longo do ano (com maiores diminuições absolutas nos meses húmidos que nos meses quentes).

Quadro 5. Percentagem de meses por período de estudo em que não ocorrem falhas no fornecimento de consumos urbanos e/ou agrícolas, dadas pela modelação da gestão dos recursos hídricos (número de meses com falhas/número de meses total).

Cenários	Histórico	Futuro 1	Futuro 2
1		84%	80%
2		82%	70%
3	95%	82%	77%
4		85%	81%
5		81%	72%

Note-se que as alterações projetadas para futuro em cada uma destas variáveis poderá afetar de forma mais severa algumas zonas da bacia do rio Guadiana do que outras (seja devido ao seu clima próprio ou à sua vulnerabilidade a situações de escassez).

9. Conclusões

A inclusão da questão das alterações climáticas é crucial no planeamento da gestão de recursos hídricos, principalmente tendo em consideração as condições climáticas que se esperam vir a observar para a bacia do rio Guadiana.

Com a aplicação da metodologia desenvolvida, foram geradas dados meteorológicos corrigidos da tendência climática projetada. Estes são representativos dos possíveis cenários futuros de alterações climáticas, refletindo as tendências projetadas pelos cenários climáticos, assim como informação de observações históricas.

Estes dados podem ser muito úteis para modelar os impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos, nomeadamente os impactos sobre as disponibilidades hídricas e as necessidades agrícolas.

Com base nos resultados obtidos neste estudo para as simulações climáticas médias anuais, prevê-se que a região se torne mais quente e mais seca no século XXI.

A construção de séries de escoamento corrigidas das tendências climáticas indica, para os dois períodos futuros, que deverá ocorrer uma redução dos volumes de água anuais gerados nas várias zonas da bacia do rio Guadiana. Estas reduções poderão atingir 50% dos volumes anuais (no Futuro 2, ver Quadro 3). Em termos mensais existe uma redução mais forte dos caudais gerados nos meses de inverno e primavera. É ainda possível observar que a geração de escoamento, e, por inferência, os volumes que afluem a uma determinada secção, são mais sensíveis às alterações climáticas, em termos relativos, do que a precipitação e a temperatura (que apresentam variações percentuais mais baixas).

O modelo de gestão de recursos hídricos construído mostrou ser capaz de simular as diferentes componentes do sistema, incluindo todos os potenciais cenários de operação e restrições, assim como as várias alternativas de modelação climática incluídas no projeto.

Por último, e como se pôde observar, a relação entre as variáveis climatéricas e hidrológicas não é linear, dando mostras da importância que a modelação da interação destas componentes tem para a gestão de recursos hídricos.

Referências

- ARH Alentejo (2011). *Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas integradas nas Regiões Hidrográficas RH6 e RH7*.
- Confederación Hidrográfica del Guadiana (2012). *Plan Hidrológico 2009*. Obtido de <http://planhidrologico2009.chguadiana.es/?url=61>
- FEUP (2009). *Sistema de Previsão e Gestão de Situações de Seca – 1º Relatório de Progresso*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- FEUP. (2011) *Sistema de Previsão e Gestão de Secas (SPGS) - Relatório Final*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- FEUP. (2013) *Development of a Methodology to Integrate Climate Change Effects in Water Resources Management on a Portuguese River Basin*. Fundação para a Ciência e Tecnologia.
- Gangopadhyay, S., Harding, B. L., Rajagopalan, B., Lukas, J. J., e Fulp, T. J. (2009). *A nonparametric approach for paleohydrologic reconstruction of annual streamflow ensembles*. Water Resources Research, Vol. 45, W06417.
- Hargreaves, G. H., e Samani, Z. A. (1982). *Estimating potential evapotranspiration*. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 225-230.
- INAG (2001). *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Guadiana - Relatório Final*.
- INAG (2010). *Estratégia Nacional de Adaptação aos impactos das Alterações Climáticas Relacionadas com os Recursos Hídricos*. Lisboa.
- INE (2010). *Anuário Estatístico da Região Alentejo*. Lisboa.
- INSAAR (2012). INSAAR. Obtido de <http://insaar.apambiente.pt/>
- Mather, J. R. (1979). *Use of the climatic water budget to estimate streamflow*. Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, 1-52.
- McCabe, G. J., e Markstrom, S. L. (2007). *A monthly water-balance model driven by a graphical user interface*. US Geological Survey Open-File report 2007.
- Meehl, G. A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B. e Mitchell, J. F. (2007) *The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research*. (88).
- Peláez, J. R. (1977). *Modelo matemático de transformación precipitación-aportación*. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica.
- Prairie, J., Rajagopalan, B., Lall, U., e Fulp, T. (2007). *A stochastic nonparametric technique for space-time disaggregation of streamflows*. Water Resources Research, 43.
- Serralheiro, R., Carvalho, M., Corte-Real, J. e Toureiro, C. (2010). *1ª Fase do Sistema de Previsão e Gestão de Secas (SPGS) - Relatórios 1 a 4*. Évora: ICAAM, Universidade de Évora.
- Teixeira, J. L. (1994). *ISAREG – Manual do Utilizador*. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa: Lisboa.
- Teixeira, J. L. e Pereira, L. S. (1992). *ISAREG, an irrigation scheduling model*. ICID Bulletin, 29-48.