

IMPACTE DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NOS SISTEMAS DE REGADIO NO ALENTEJO

Editado por:

José Luis Teixeira

Coordenador do Projeto PTDC/AAC-AMB/113639/2009

João Rolim

Membro da equipa do Projeto PTDC/AAC-AMB/113639/2009

Lista de Autores:

Capítulo 2: J. Rolim, J.L. Teixeira, P. Mendes, C. Catita, J. Catalão

Capítulo 3: J. Rolim, J.L. Teixeira, J. Catalão, S. Shahidian

Capítulo 4: J. Rolim, C. Pedras

Capítulo 5: R. Fragoso, C. Noéme

Capítulo 6: M. Moreira, D. Rani, S. Mourato, R.C. Guimarães, R.P. Serralheiro, J. Corte Real

Capítulo 7: R.P. Serralheiro, P. Valverde, M. Carvalho

Publicação financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do projeto PTDC/AAC-AMB/113639/2009 - “Estudo do impacte das alterações climáticas nos sistemas de regadio e definição de medidas de adaptação”.

Ficha técnica

Título: Impacte das alterações climáticas nos sistemas de regadio no Alentejo

Publicação: ISAPress. Tapada da ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal

Edição: José Luís Teixeira e João Rolim

Capa: Luis Fonseca

Impressão: mb&f – gráfica manuel barbosa & filhos, lda

ISBN 978-972-8669-59-1

Índice

1. Introdução	1
2. Cenários de alteração climática.....	5
2.1. Modelos climáticos e dados de cenários de alteração climática.....	5
2.2. Caracterização dos cenários de alteração climática considerados.....	10
2.2.1. Dados das estações meteorológicas (normais climatológicas 1961-90)	10
2.2.2. Dados dos modelos RCM	11
2.2.3. Dados das séries climáticas perturbada	14
2.2.3.1. Correção dos desvios dos modelos climáticos. Anomalias climáticas	14
2.2.3.2. Séries climáticas perturbadas	20
2.3. Sistemas de informação desenvolvidos	23
2.3.1. Sistema de informação IScenarios	23
2.3.2. Sistema de informação GISClmReg	25
2.4. Conclusão.....	28
3. Impacte das alterações climáticas nas necessidades de rega das culturas.....	31
3.1. Dados de base.....	31
3.1.1. Dados das culturas.....	31
3.1.2. Dados do solo	32
3.1.3. Medidas de adaptação para avaliação dos impactes	33
3.2. <i>Software</i> utilizado	34
3.3. Metodologia para avaliação dos impactes	35
3.4. Resultados e Discussão	37
3.4.1. Necessidades de rega das culturas	37

3.4.2. Défice hídrico das culturas de sequeiro	43
3.4.3. Balanço hídrico ao nível da rotação de culturas	47
3.5. Conclusões	50
4. Impacte das alterações climáticas no projeto de rega	53
4.1. Canhão com enrolador.....	54
4.1.1. Características gerais dos enroladores	54
4.1.2. Aplicação informática Enrolador	56
4.1.3. Dimensionamento dos canhões de rega com enrolador	57
4.1.3.1. Probabilidades de não excedência das necessidades de rega	57
4.1.3.2. Dimensionamento dos canhões.....	57
4.1.3.2.1. Dados de base	58
4.1.3.2.2. Resultados e discussão.....	61
4.1.4. Conclusões	64
4.2. Microrrega	65
4.2.1. Descrição do modelo DSS MIRRIG	66
4.2.2. Metodologia.....	68
4.2.3. Caso de estudo.....	69
4.2.4. Resultados.....	73
4.2.5. Conclusões	78
5. Impacte económico das alterações climáticas no regadio e definição de medidas de adaptação	79
5.1. Políticas e medidas de adaptação: uma abordagem integrada	80
5.2. Determinação do valor económico da água	81
5.3. Metodologia.....	85
5.3.1. O modelo económico de programação matemática positiva	86
5.3.2. Cenários de avaliação dos efeitos económicos das alterações climáticas	90
5.4. Resultados.....	93

5.4.1. Valor económico da água	93
5.4.2. Uso dos recursos.....	95
5.4.3. Aproveitamento do regadio	97
5.4.4. Rendimento da produção agrícola.....	98
5.5. Conclusão.....	100
6. O impacte das projeções dos modelos de clima no armazenamento de água para rega	105
6.1. Dados	107
6.1.1. Descrição do sistema de reservatórios Alvito-Odivelas.....	107
6.1.2. Dados climáticos	108
6.1.3. Projeções dos modelos de clima para o período cenário 2071-2100 e correção do viés.....	109
6.2. Métodos.....	111
6.2.1. Método da correção do viés das projeções dos modelos de clima	111
6.2.2. Modelo hidrológico.....	112
6.2.3. Geração de séries sintéticas dos caudais afluentes aos reservatórios	113
6.2.4. Modelo de operação de sistemas de reservatórios.....	117
6.3. Resultados	122
6.4. Conclusões	129
7. Alterações climáticas e necessidades de rega na bacia do Guadiana	133
7.1. Metodologia	134
7.1.1. Espaço: unidades de análise na bacia do Guadiana.....	134
7.1.2. Informação Meteorológica	136
7.1.3. Cálculo das necessidades hídricas e das necessidades úteis de rega das culturas	136
7.1.4. Análises de tendências e significâncias.....	138
7.2. Resultados: Fase I - Análise de tendências e significâncias	138
7.2.1. Precipitação anual	138

7.2.2 Precipitações mensais	139
7.2.3. Temperatura média anual.....	139
7.2.4. Evapotranspiração de referência, ETo	140
7.2.5 Necessidades úteis de rega de algumas culturas	141
7.3. Resultados: Fase II – Simulação de cenários climáticos (CCS) e agrícolas de regadio futuros (CAS)	143
7.3.1. Cenários de alterações climáticas (CCS).....	143
7.3.2. Cenários Agrícolas (CAS)	145
7.3.3. Necessidades Hídricas e Necessidades Úteis de Rega das Culturas.....	145
7.3.4. Necessidades Globais de Água para Rega.....	148
7.4. Conclusões	149

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A evolução das emissões de gases com efeito de estufa conduzirá, muito provavelmente, à ultrapassagem da meta de 2°C para o aquecimento global, tornando necessário intensificar os esforços de adaptação, particularmente no caso do sector da agricultura que é muito dependente do clima.

As temperaturas mais elevadas e as alterações nas condições meteorológicas, com o aumento da intensidade e frequência de eventos extremos, afetam a disponibilidade e a distribuição da água, o escoamento nos rios e as reservas de água subterrânea, deteriorando a sua qualidade (UN-Water, 2010). Além disso, alguns estudos têm mostrado que os caudais dos rios sofrerão alterações consideráveis na região europeia, prevendo-se em cenários futuros a sua diminuição no Sul da Europa e o aumento no Norte (Arnell, 2004; Milly et al., 2005; Alcamo et al., 2007). Também se prevêem alterações acentuadas na sua variabilidade sazonal.

Na Europa, as alterações do clima irão modificar a distribuição da produção agrícola, deslocando o potencial agrícola para áreas de elevadas latitudes, enquanto nas regiões de baixas latitudes, mais suscetíveis à seca, a agricultura verá o seu potencial produtivo diminuir.

O aumento de riscos relacionados com a água, associado a mudanças na frequência e intensidade de eventos extremos, como secas, inundações, tempestades, deslizamentos de terra, colocam uma tensão adicional na gestão dos recursos hídricos e ampliam a incerteza sobre a distribuição de água com qualidade e quantidade adequadas (Falloon e Betts, 2009).

A crescente tensão provocada pela escassez da água no meio ambiente e a importância da água para o desenvolvimento acabam por tornar a gestão dos recursos hídricos gradualmente mais difícil (UN-Water, 2010). A avaliação da vulnerabilidade às alterações climáticas e a definição de medidas de adaptação depende de uma grande variedade de métodos e ferramentas que inclui tanto abordagens quantitativas como qualitativas e o envolvimento das partes interessadas no processo participativo, na avaliação económica e na análise de decisões (Moss et al., 2010).

No contexto das alterações climáticas é de esperar que se tornem mais frequentes a ocorrência de situações de escassez de água na região mediterrânica e que se

agudizem os seus efeitos sócio económicos. Deste modo a racionalização do consumo de água é claramente uma das medidas de adaptação necessárias, que passa também pelo estudo e análise dos efeitos económicos da adoção da política de preço da água preconizada no âmbito da Diretiva Quadro da Água.

De acordo com o relatório da UN-Water (2010), a água tem um papel essencial no processo das alterações climáticas. No entanto, as medidas de adaptação na gestão de recursos hídricos são sempre sub-representadas nos planos nacionais ou nas carteiras de investimento internacionais. Assim, torna-se imprescindível uma alteração nas políticas que devem passar a integrar os seguintes princípios: i) integração da adaptação no contexto do desenvolvimento; ii) melhoramento na gestão dos recursos hídricos; iii) melhoramento e divulgação de conhecimento e informações sobre alterações climáticas, investindo em investigação; iv) criação de resiliência dos ecossistemas. A aplicação desses princípios exigirá esforço conjunto e colaboração a nível local e global, intrasectorial e intersectorial.

A gestão dos recursos hídricos afeta quase todos os aspetos da economia e em particular a produção agrícola e segurança alimentar; abastecimento público e saneamento; energia e indústria; saúde e a sustentabilidade ambiental. É, pois, urgente a implantação de ações que minimizem os efeitos negativos face às mudanças climáticas (UN-Water, 2010).

Tendo em conta a importância que a agricultura tem ao nível da gestão dos recursos naturais e do território torna-se necessário prever quais são os impactes das alterações climáticas nas necessidades de água para rega e na evolução da área ocupada pelo regadio.

As alterações climáticas são uma das principais forças motrizes para a transformação da gestão de recursos hídricos, juntamente com demografia, economia, meio ambiente, forças sociais e tecnológicas. Se as soluções para os desafios criados forem concebidas em separado poderão tornar-se autodestrutivas. Os decisores enquanto enfrentam esses problemas devem pensar além dos seus próprios interesses e considerar as ramificações abrangentes das suas decisões e implicações delas decorrentes, no que diz respeito à disponibilidade hídrica e às forças que afetam esse cenário. Devem, em consequência, adotar uma abordagem equilibrada, integrada e coerente (UN-Water, 2010).

O delineamento de medidas de adaptação é sempre um desafio, frequentemente restringido por numerosos fatores. Entre estes fatores estão as limitações dos processos participativos com os intervenientes, os requisitos exaustivos dos dados de avaliação da capacidade de adaptação, os problemas relacionados com a seleção de métodos e critérios de avaliação adequados, as dificuldades na previsão

da procura da água disponível e, por fim, os desafios na previsão da capacidade de adaptação de todo o ciclo hidrológico futuro (Iglesias et al., 2011).

No contexto da incerteza provocada pelas alterações climáticas sobre a procura dos recursos hídricos na agricultura do futuro, desenvolveu-se o projeto de investigação “Estudo do impacte das alterações climáticas nos sistemas de regadio e definição de medidas de adaptação - PTDC/AAC-AMB/113639/2009” com o objetivo de identificar os principais impactes das alterações climáticas nos sistemas agrícolas de regadio no sul de Portugal e o desenvolvimento de medidas de adaptação.

O presente livro resulta essencialmente do trabalho desenvolvido no projeto e é constituído por sete capítulos.

No segundo capítulo relativo aos cenários de alteração climática descrevem-se os dados dos modelos regionais climáticos utilizados e os sistemas de informação desenvolvidos para sua manipulação.

No terceiro capítulo apresentam-se os casos de estudo considerados para a região do Alentejo, tendo em atenção diferentes condições edafoclimáticas, culturas e estratégias de adaptação às alterações climáticas. Este capítulo conclui-se com a apresentação dos valores das necessidades de rega das culturas para as diferentes culturas e rotações de culturas, para os diferentes cenários de alteração climática, projetando-se, assim, as alterações futuras na procura de água para a rega.

No quarto capítulo avaliam-se os impactes sobre o dimensionamento e a operação dos sistemas de rega, mais precisamente os sistemas de rega de canhão com enrolador e de microrrega, utilizando as projeções das necessidades de rega apresentadas no capítulo anterior. A avaliação incide sobre as alterações nos caudais de ponta, no dimensionamento dos equipamentos e, em alguns casos, nos custos de investimento e de exploração.

No quinto capítulo apresenta-se a avaliação económica dos impactes das alterações climáticas sobre os sistemas de regadio. O estudo é conduzido utilizando uma metodologia que permite avaliar a disposição dos agricultores para se adaptarem às novas condições agrícolas referentes a todos os cenários de alterações climáticas anteriormente referidos.

Por se considerar muito importante ter uma visão sobre o impacte das alterações climáticas na disponibilidade dos recursos hídricos e ter um estudo aplicado à Bacia do Guadiana, partindo de cenários das alterações climáticas diferentes, foram incluídos dois capítulos com o trabalho desenvolvido por investigadores que não pertencem ao projeto. No capítulo 6 apresenta-se uma análise do impacte das alterações climáticas no armazenamento de água para rega, num sistema de reservatórios localizado na região do Alentejo, e no Capítulo 7 apresenta-se uma

estimativa das necessidades de rega na parte portuguesa da bacia hidrográfica do Guadiana tendo em conta cinco cenários de alterações climáticas e três cenários de ocupação agrícola futura.

Referências bibliográficas

- Falloon P, Betts R (2009). Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation —The importance of an integrated approach, *Science of the Total Environment* 408 (2010) 5667–5687
- Iglesias et al. (2011). Re-thinking water policy priorities in the Mediterranean region in view of climate change, *Environmental Science & Policy*, 14(2011), p.744–757
- Montanarella L. (2007). Trends in land degradation in Europe. In: Sivakumar MVK, Ndegwa N, editors. *Climate and land degradation*. Germany: Springer-Heidelberg:83-104
- Moss et al. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, 08823, Vol. 463
- UN-Water Partners (2010). *Climate Change Adaptation: The Pivotal Role of Water*, Policy Brief.

Capítulo 2

CENÁRIOS DE ALTERAÇÃO CLIMÁTICA

João Rolim¹, José Luís Teixeira¹, Pedro Mendes², Cristina Catita^{2,3} e João Catalão^{2,3}

¹*Departamento de Ciências e Engenharia de Biosistemas (DCEB), Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa*

²*Departamento de engenharia Geográfica, Geofísica e energia (DEGGE), Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*

³*Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*

Introdução

Os estudos de avaliação dos impactes das alterações climáticas na agricultura são geralmente realizados através da utilização de dados climáticos relativos a cenários futuros de alteração climática em conjunto com modelos de simulação das culturas ou do balanço hídrico do solo, que permitem estimar para diferentes cenários de alteração climática as necessidades de rega das culturas. Os dados dos cenários de alteração climática são produzidos por modelos climáticos tendo por base os cenários de emissões de gases com efeito de estufa. Assim, neste tipo de estudos é necessário selecionar quais os cenários de emissões e os modelos climáticos a serem utilizados, bem como processar estas séries de dados para que possam servir como dados de entrada aos modelos de simulação das culturas. A utilização destes dados requer a utilização de sistemas de informação, que permitam a gestão de uma grande quantidade de informação. Assim, desenvolveram-se dois sistemas de informação i) o sistema IScenarios (Rolim, 2013) que permitiu gerar as séries climáticas perturbadas que serviram de entrada ao modelo de simulação do balanço hídrico; ii) GisClimReg (Mendes, 2013) que é uma aplicação GIS que permitiu realizar a análise espacial das principais variáveis agrometeorológicas, produzindo os respetivos mapas e disponibilizando-os ao público através de uma plataforma WEBGIS.

2.1. Modelos climáticos e dados de cenários de alteração climática

Os dados climáticas relativos aos diferentes cenários de alteração climática são produzidos por modelos climáticos, que utilizam cenários de emissões definidos

pelo IPCC (*Intergovernmental Panel for Climate Change*). Os modelos climáticos podem ser classificados em dois grandes grupos: modelos climáticos de circulação global (*General Circulation Models - GCM*) e modelos climáticos regionais (*Regional Climate Models - RCM*), dependendo do tamanho da área considerada para simulação e da resolução espacial utilizada.

Modelos climáticos de circulação global,

Os modelos climáticos de circulação global, GCM, são representações matemáticas do sistema climático que são desenvolvidos a partir de equações que representam os processos físicos que ocorrem na atmosfera e nos oceanos, e as suas interações com a litosfera, biosfera e criosfera. As equações são discretizadas no espaço e no tempo, através de uma grelha tridimensional que cobre todo o globo, com resoluções horizontais da ordem de cerca de 300 km e com vários níveis verticais. Para cada célula da grelha do modelo são calculados os valores das variáveis meteorológicas (e.g. temperatura, pressão, etc.), através da resolução de equações que descrevem a conservação da massa, da energia e do momento linear (Duarte Santos, 2006; Miranda et al., 2006). Os fenómenos físicos que se processam a escalas inferiores ao espaçamento das grelhas, tais como a formação de nuvens, têm que ser representados através de parametrizações. A fiabilidade de um modelo GCM depende em grande medida da adequada parametrização destes fenómenos. (Duarte Santos, 2006; Miranda et al., 2006).

Os modelos climáticos atualmente mais utilizados são os modelos de circulação geral acoplados atmosfera-oceano (AOGCM) e constituem presentemente a melhor forma de simular cenários de mudança climática. Os modelos climáticos, apesar de serem muito complexos, são obrigatoriamente incompletos, apresentando vários tipos de simplificações do sistema climático. (Duarte Santos, 2006; Miranda et al., 2006; IPCC, 2007a).

A baixa resolução espacial dos modelos GCM (tipicamente da ordem dos 300 km) permite observar tendências globais mas é demasiado grosseira para ser utilizada em estudos de impactes sectoriais das alterações climáticas, gerando dificuldades na utilização dos cenários climáticos futuros em estudos dos impactes das alterações climáticas. Estes estudos de impactes requerem informação de parâmetros meteorológicos com elevada resolução espaço-temporal, em particular no caso de sectores muito sensíveis aos efeitos climáticos locais, como é o caso dos recursos hídricos, agricultura, florestas, etc. (Cunha et al., 2006; Duarte Santos, 2006; Miranda et al., 2006).

Para resolver estes problemas foram desenvolvidas diversas técnicas que permitem produzir dados de cenários de alteração climática, a partir dos resultados dos modelos GCM, à escala necessária para realizar os estudos de

impacte nos diversos sectores. Estas metodologias são designadas por técnicas de regionalização e podem genericamente ser divididas em duas classes: regionalização dinâmica que se baseia na utilização de modelos regionais climáticos (RCM) e regionalização estatística (Duarte Santos, 2006; Miranda et al., 2006).

Modelos regionais climáticos

Os modelos regionais climáticos, RCM (*Regional Climate Models*), simulam o clima para regiões limitadas da superfície terrestre apresentando uma resolução espacial que varia tipicamente entre os 25 e os 50 km. As condições de fronteira destes modelos são geradas pelos modelos GCM (Cunha et al., 2006; Duarte Santos, 2006; Miranda et al., 2006). Miranda et al. (2006) referem que a utilização de modelos regionais climáticos (RCM) é mais vantajosa do que a utilização de técnicas de regionalização estatísticas, sendo que atualmente estes modelos se estão a tornar a principal forma de realizar estudos de impacte das alterações climáticas. No entanto, estes modelos continuam a possuir importantes fontes de incerteza. A sua resolução espacial, de cerca de 50km, não permite representar explicitamente os processos de formação de nuvens, para além de outros processos de pequena escala, que continuam a ter que ser parametrizados. As parametrizações dos processos relacionados com a precipitação necessitam ainda de ser aperfeiçoados e podem constituir uma fonte de erros para os modelos regionais, tal como acontece para os modelos GCM. Adicionalmente, as incertezas de larga escala associadas aos modelos globais propagam-se aos modelos regionais, uma vez que as suas condições de fronteira são forçadas pelos resultados dos modelos GCM. Deste modo, erros sistemáticos propagam-se das maiores para as menores escalas. (Miranda et al., 2006).

Cenários de emissões

O relatório SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*) (Nakicenovic et al., 2000) define um conjunto de cenários de emissões de GEE (gases com efeito de estufa), que são utilizados pelos modelos de clima para produzir projeções para o clima futuro. Os cenários são padronizados de modo a garantir uma maior consistência na comparação entre resultados de diferentes modelos climáticos e cenários (Nakicenovic et al., 2000).

As quatro famílias de cenários SRES são (Nakicenovic et al., 2000; IPCC, 2007b):

A1 – A família de cenários A1 descreve um mundo futuro de rápido crescimento económico, em que a população mundial atinge um pico máximo em meados do século XXI e entra em declínio a partir daí, e em que se observa uma rápida

introdução de novas e mais eficientes tecnologias. Os principais temas subjacentes são a convergência entre regiões e um aumento das interações culturais e sociais, com uma redução substancial nas diferenças regionais de rendimento *per capita*.

A2 – A família de cenários A2 descreve um mundo muito heterogéneo. O tema subjacente é a autossuficiência e a preservação das identidades locais. Os padrões de fertilidade entre regiões convergem muito lentamente, o que resulta numa população em contínuo crescimento. O desenvolvimento económico é orientado principalmente ao nível regional e o crescimento económico *per capita* e as mudanças tecnológicas são mais fragmentadas e lentas do que para as outras famílias de cenários.

B1 – A família de cenários B1 descreve um mundo convergente, tal como na família de cenários A1, com a mesma população mundial, que atinge um pico em meados do século XXI e entra em declínio depois dessa data, mas com uma mudança rápida nas estruturas económicas em direção a uma economia de serviços e da informação, com reduções na intensidade de utilização de matérias-primas e a introdução de tecnologias limpas e eficientes ao nível dos recursos. A ênfase é dada em soluções globais para a sustentabilidade económica, social e ambiental, incluindo o aumento da equidade, mas sem iniciativas climáticas adicionais.

B2 – A família de cenários B2 descreve um mundo em que a ênfase é dada a soluções locais para a sustentabilidade económica, social e ambiental. É um mundo em que a população mundial aumenta continuamente, a uma taxa mais baixa do que A2, com níveis intermédios de desenvolvimento económico, e com uma evolução tecnológica mais lenta e desigual do que nas linhas de evolução B1 e A1. Este cenário também é orientado para a proteção ambiental e equidade social, tal como o B1, mas centra-se nos níveis local e regional.

A cenarização SRES pode ser esquematizada, de uma forma muito simplificada, com o recurso a duas variáveis mestras definidas por Aguiar (2006) como “tipo de governação” (regional vs. global) e “prevalência de valores” (economia vs. ambiente) conforme representado na Figura 2.1. Estes dois eixos permitem, assim, definir as quatro famílias de cenários A1, A2, B1 e B2.

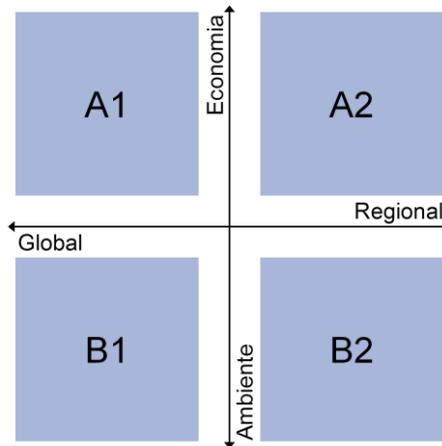


Figura 2.1 – Cenários SRES dominados pelo tipo de governação (eixo horizontal) e valores predominantes (eixo vertical) (fonte: Aguiar, 2006).

Incerteza dos dados dos cenários de alteração climática

A modelação do sistema climático e da sua evolução futura está sujeita a uma incerteza elevada devido à complexidade do sistema. Esta incerteza inclui as incertezas nos dados de base, as incertezas na descrição e no conhecimento dos processos de diferente natureza que intervêm no sistema, e das incertezas que resultam das aproximações necessárias para simular o sistema climático através de modelos matemáticos (Duarte Santos, 2006).

As incertezas intrínsecas ao estudo do clima dificultam a quantificação do efeito das emissões de GEE de origem antropogénica nas alterações climáticas observadas ao longo das últimas décadas e são responsáveis por grande parte da incerteza inerente aos cenários de alteração climática projetados para o futuro (Duarte Santos, 2006). As projeções dos cenários climáticos futuros produzidas pelos modelos de clima contêm, adicionalmente, incertezas decorrentes: das emissões globais futuras de GEE; da conversão dessas emissões em concentrações atmosféricas dos GEE e em forçamentos radiativos; da modelação da resposta dos sistemas climáticos aos forçamentos radiativos; e dos métodos de regionalização dos resultados do modelos GCM (Duarte Santos, 2006; Mourato, 2009). A incerteza relativa à evolução das emissões futuras de GEE é estimada através da utilização de uma gama de cenários de emissões construídos com base nos cenários socioeconómicos (cenários SRES – *Special Report on Emissions Scenarios*) apresentados em Nakicenovic et al., (2000), que permitem avaliar o efeito sobre o sistema climático de diferentes taxas de emissões de GEE (Duarte Santos, 2006).

2.2. Caracterização dos cenários de alteração climática considerados

Nesta secção realiza-se uma descrição dos dados meteorológicos observados nas estações de Évora e Beja(1961-90), dos dados produzidos pelos modelos RCM (2071-2100), das anomalias relativas aos diferentes cenários e modelos, e das séries climáticas perturbadas que foram construídas para cada um dos cenários. Como forma de identificar as principais tendências de alteração climática apresentam-se as médias sazonais das anomalias calculadas para as variáveis temperatura e precipitação. Uma vez que a ET_o é calculada com base nas séries de dados perturbados, mostra-se também a anomalia da ET_o para cada um dos cenários e modelos considerados.

2.2.1. Dados das estações meteorológicas (normais climatológicas 1961-90)

Consideraram-se os dados observados nas estações meteorológicas de Beja e de Évora pertencentes ao Instituto de Meteorologia (IM). Os dados têm um passo de tempo diário e referem-se ao período de 1961-90 que é o período de referência normalmente utilizado em estudos de alterações climáticas. A estação meteorológica de Beja tem como coordenadas geográficas a latitude: $38^{\circ} 01' N$, longitude: $07^{\circ} 52' W$ e altitude: 246m, sendo a altura do anemómetro acima do solo de 10 m. A estação de Évora situa-se à latitude: $38^{\circ} 34' N$, longitude: $07^{\circ} 54' W$ e altitude: 309 m, sendo a altura do anemómetro acima do solo de 22.9 m. No Quadro 2.1 apresentam-se para a estação de Beja e de Évora as médias anuais de cada uma das variáveis meteorológicas utilizadas.

Quadro 2.1 – Médias anuais das variáveis temperatura (T_{max} , T_{min}), humidade relativa (HR_{max} , HR_{min}), velocidade do vento (U_2), radiação solar (R_s), precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ET_o), relativas ao período de controlo, 1961-90, para as estações de Beja e Évora

Média anual 1961-1990								
Est.	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	HR_{max} (%)	HR_{min} (%)	U_2 ($m s^{-1}$)	R_s ($MJ m^{-2} d^{-1}$)	P ($mm\ mês^{-1}$)	ET_o ($mm d^{-1}$)
Beja	22.3	10.1	88	43	3.2	16.464	585.9	3.9
Évora	20.6	11.0	84	47	2.9	16.512	618.4	3.6

Os dados observados são utilizados para definir o cenário de referência com o qual se compararão os cenários de alteração climática e servem de base à construção das séries climáticas perturbadas. As variáveis meteorológicas consideradas foram as que são necessárias para a determinação da evapotranspiração de referência, pelo método FAO Penman-Monteith, e para a simulação do balanço hídrico do

solo de acordo com a metodologia dos K_c de base (Allen et al., 1998): radiação solar (R_s) [$MJm^{-2}dia^{-1}$], temperatura máxima do ar (T_{max}) [$^{\circ}C$], temperatura mínima do ar (T_{min}) [$^{\circ}C$], humidade relativa máxima (HR_{max}) [%], humidade relativa mínima (HR_{min}) [%], velocidade do vento a 2m acima do solo (U_2) [ms^{-1}] e precipitação [$mm.dia^{-1}$].

2.2.2. Dados dos modelos RCM

Seleção e recolha dos dados dos cenários climáticos

Consideraram-se os dados dos cenários de alteração climática produzidos por modelos regionais climáticos (RCM) tendo os dados sido obtidos através do arquivo de dados do projeto PRUDENCE (*Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects*). (Christensen, 2005).

O projeto PRUDENCE fornece, para a Europa, um conjunto de cenários de alteração climática de alta-resolução para o período de 2071-2100, assim como as respetivas simulações de controlo para o período 1961-90. São disponibilizados dados relativos a 18 variáveis meteorológicas, com os passos de tempo diários, mensais e sazonais, e com resoluções espaciais que variam entre os 12 km e os 50 km. Os cenários de futuras emissões de GEE disponíveis são os cenários SRES A2 e B2 (Nakicenovic et al., 2000).

Os modelos climáticos considerados foram o modelo HadRM3P (Jones et al., 2004) desenvolvido pelo *Hadley Centre* (HC) e os modelos HIRHAMh e HIRHAMhh (Bossing Christensen et al., 2007) do *Danish Meteorological Institute*(DMI). Para cada um dos modelos consideram-se todos os cenários SRES disponibilizados no projeto PRUDENCE (Christensen, 2005) e adotaram-se as séries de dados com um passo de tempo mensal. No quadro 2.2 mostram-se os modelos utilizados, a sua resolução espacial e as séries consideradas.

Quadro 2.2 - Características das séries fornecidas pelos modelos climáticos usados

Modelo	Resolução (km)	Cenário SRES	Série de controlo	Previsão Climática
HadRM3P	50	A2 e B2	1961-1990	2071-2100
HIRHAMh	25	A2	1961-1990	2071-2100
HIRHAMhh	12	A2	1961-1990	2071-2100

Na Figura 2.2apresenta-se a distribuição geográfica de cada uma das grelhas dos pontos de simulação dos modelos.

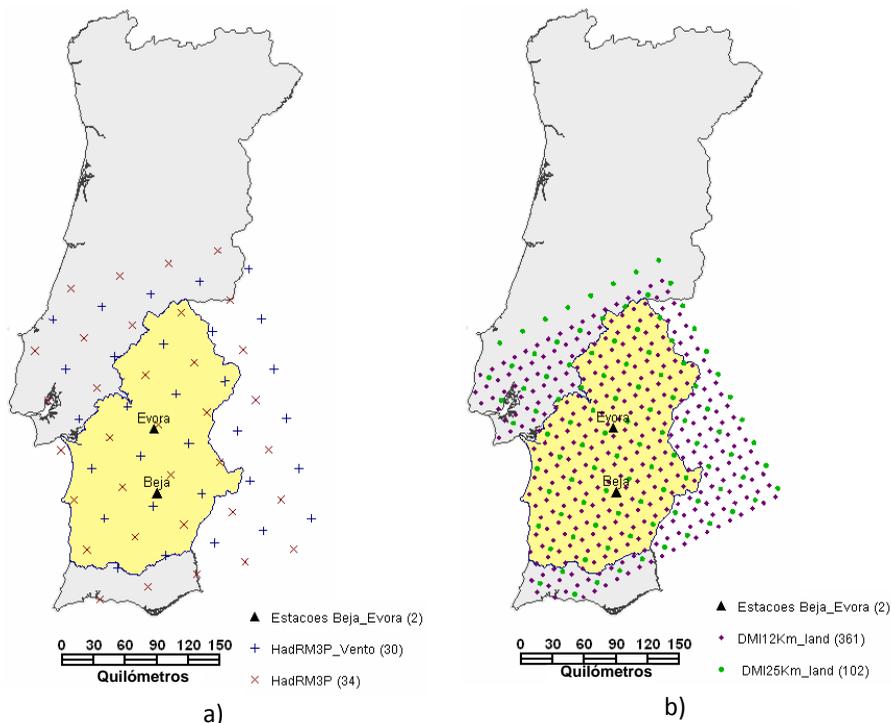


Figura 2.2 - Região do Alentejo com a localização das estações de Beja e Évora (▲) e dos pontos das grelhas: a) do modelo climático HadRM3P relativas ao vento (+) e a todas as outras variáveis (x); e b) dos modelos HIRHAMh (♦) e HIRHAMhh (•) (Rolim, 2013).

Caracterização dos dados dos modelos RCM

No Quadro 2.3 apresentam-se os valores das médias anuais dos dados produzidos pelos modelos RCM relativas às variáveis meteorológicas consideradas e efetua-se a sua comparação com os dados observados para as estações de Beja e Évora, relativos à normal climática de 1961-1990.

Comparando os dados fornecidos pelos modelos para o período de controlo e os dados observados no mesmo período salienta-se que:

- Para a radiação líquida (R_n) observa-se que os dados de controlo dos modelos HIRHAMh e HIRHAMhh apresentam valores semelhantes aos observados nas estações, enquanto o desvio do modelo HadRM3P subestima consideravelmente os valores de radiação.
- Relativamente à humidade relativa média verifica-se que os três modelos tendem a apresentar, para o período de controlo, uma diminuição de 2.8% a 9.5%.

- c) A velocidade média do vento apresenta para o período de controlo um desvio entre os modelos e os dados observados de 0.2 a 0.3 m/s para Évora e de 0.4 a 0.5 m/s para Beja.
- d) A ocorrência de diferenças consideráveis entre os valores de temperatura e precipitação das normais climatológicas (1961-90) e os valores da simulação de controlo dos modelos RCM, e que no caso da precipitação os erros apresentam um valor muito elevado.

É importante salientar que os valores das anomalias projetadas para os cenários futuros apontam para uma redução na precipitação inferior aos desvios entre os dados das simulações de controlo e os dados observados nas estações meteorológicas de Beja e Évora, o que ilustra o grau de incerteza associado aos resultados produzidos pelos modelos RCM e demonstra a necessidade de se utilizarem métodos de correção dos desvios dos dados dos modelos climáticos, tal como referido em Miranda et al. (2006), Cunha et al. (2006) e Mourato (2009).

Quadro 2.3 – Médias anuais dos dados climáticos produzidos pelos modelos RCM considerados, para o período de controlo (1961-90), e para os cenários de alteração climática A2 e B2 para o período de 2071-2100; e a sua comparação com os dados observados nas estações meteorológicas de Beja e Évora (Rolim, 2013)

Est.	Modelo	Cen.	R_n (MJm ⁻² dia ⁻¹)	HR _{med} (%)	HR _{max} (%)	HR _{min} (%)	T _{med} (°C)	T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	U ₂ (ms ⁻¹)	P (mm)
Beja	Est. Met.	Cont.	8.370	65.6	88.2	42.9	16.2	22.3	10.1	3.2	586
	HadRM3P	Cont.	7.340	60.2	n.d.	n.d.	17.4	24.2	11.2	2.7	261
	HIRHAMh	Cont.	8.557	58.5	76.0	40.9	18.2	23.7	13.4	2.8	404
	HIRHAMhh	Cont.	8.576	56.1	73.1	39.1	18.2	23.8	13.4	2.8	422
	HadRM3P	B2	7.450	56.1	n.d.	n.d.	20.2	27.2	13.9	2.7	195
	HadRM3P	A2	7.490	54.1	n.d.	n.d.	21.4	28.5	14.9	2.7	160
	HIRHAMh	A2	8.893	54.5	71.3	37.8	21.7	27.7	16.7	2.7	293
	HIRHAMhh	A2	8.922	52.6	68.8	36.3	21.8	27.7	16.7	2.7	303
Évora	Est. Met.	Cont.	8.371	65.6	83.7	47.5	15.8	20.6	11.0	2.9	618
	HadRM3P	Cont.	7.288	62.8	n.d.	n.d.	16.8	23.7	10.6	2.6	366
	HIRHAMh	Cont.	8.457	60.4	78.3	42.5	17.5	23.0	12.8	2.7	474
	HIRHAMhh	Cont.	8.546	57.6	74.9	40.3	17.6	23.2	12.8	2.7	430
	HadRM3P	B2	7.467	58.4	n.d.	n.d.	19.7	26.8	13.3	2.6	288
	HadRM3P	A2	7.506	56.2	n.d.	n.d.	20.9	28.2	14.4	2.6	238
	HIRHAMh	A2	8.799	55.8	72.7	38.9	21.1	27.0	16.1	2.7	344
	HIRHAMhh	A2	8.878	53.5	69.9	37.1	21.2	27.1	16.2	2.7	323

n.d. – não disponível.

2.2.3. Dados das séries climáticas perturbadas

O método escolhido para gerar as séries climáticas relativas aos cenários futuros foi a perturbação das séries “históricas”, de dados registados em estações meteorológicas, com as anomalias produzidas pelos modelos climáticos para cada um dos cenários socioeconómicos considerados, de acordo como método *Delta Change*. Assim, com base nos cenários de referência (1961-90) e nos diferentes cenários de alteração calcularam-se as anomalias para cada uma das variáveis consideradas.

2.2.3.1. Correção dos desvios dos modelos climáticos. Anomalias climáticas

Tem sido verificada por diversos autores (Miranda et al., 2006; Cunha et al., 2006; Graham et al., 2007; Lenderink et al., 2007; Mourato, 2009) a existência de desvios consideráveis entre as séries de dados produzidas pelos modelos RCM, ou GCM, para o período de controlo (e.g. 1961-1990) e os dados das séries observadas nas estações meteorológicas para o mesmo período. Assim, é necessário realizar a correção dos desvios dos modelos climáticos, em particular da variável precipitação que é de difícil modelação, tendo sido desenvolvidas diversas técnicas para correção dos dados dos modelos climáticos (Mourato, 2009).

Para o efeito utilizam-se coeficientes de correção que são aplicados às series de dados produzidas pelos modelos climáticos ou aos dados históricos observados, consoante a abordagem. Estes coeficientes são determinados através de relações estatísticas entre as séries observadas nas estações meteorológicas e as séries de dados produzidas pelos modelos climáticos, para um mesmo período, ou entre as séries relativas aos cenários futuros de alteração climática e o período de controlo simulado pelo modelo RCM (Mourato, 2009).

As equações de correção dos desvios através do método *Delta Change*, que foi o método utilizado neste trabalho, de acordo com a formulação descrita em Mourato (2009) são as seguintes.

Para a correção da variável precipitação diária utiliza-se a seguinte expressão:

$$P_{\text{cenário}} = P_{\text{obs}} \times \frac{\bar{P}_{\text{RCMcenário}}}{\bar{P}_{\text{RCMcontrolo}}} \quad (2.1)$$

onde:

$P_{\text{cenário}}$ – Precipitação diária corrigida relativa aos cenários de alteração climática [mm];

P_{obs} – Precipitação diária observada relativa ao período de controlo [mm];

$\bar{P}_{\text{RCMcenário}}$ – Precipitação média mensal simulada pelo modelo RCM relativa aos cenários de alteração climática [mm];

$\bar{P}_{RCMcontrol}$ – Precipitação média mensal simulada pelo modelo RCM para o período de controle [mm];

No caso da temperatura a série corrigida é obtida do seguinte modo:

$$T_{cenário} = T_{obs} + (\bar{T}_{RCMcenário} - \bar{T}_{RCMcontrol}) \quad (2.2)$$

onde:

$T_{cenário}$ – Temperatura diária corrigida relativa aos cenários de alteração climática [°C];

T_{obs} – Temperatura diária observada relativa ao período de controle [°C];

$\bar{T}_{RCMcenário}$ – Temperatura média mensal simulada pelo modelo RCM relativa aos cenários de alteração climática [°C];

$\bar{T}_{RCMcontrol}$ – Temperatura média mensal simulada pelo modelo RCM para o período de controle [°C];

Este método mantém a variância da temperatura e o coeficiente de variação da precipitação e não altera o número de dias de precipitação, mantendo a variabilidade atual (observada) do clima (Graham et al., 2007; Lenderink et al., 2007; Mourato, 2009). Os fatores mensais de correção dos desvios, utilizados neste método assumem a forma de fatores multiplicativos para a precipitação e de fatores aditivos para as demais variáveis meteorológicas. No caso da precipitação os fatores são multiplicativos para se manter o número de dias com chuva num dado ano.

Cálculo das anomalias climáticas

As anomalias são calculadas através da comparação das séries de cada um dos cenários (A2 e B2) com a série de referência (1961-90) do modelo RCM despectivo. Para a temperatura, velocidade do vento, humidade relativa e radiação solar, a anomalia é a diferença entre as duas séries, sendo posteriormente somada aos valores observados (equação 2.2). Quanto à precipitação, a anomalia é calculada como a percentagem de variação do cenário da alteração climática relativamente à referência, sendo posteriormente multiplicada pelos valores observados (equação 2.1). Em face da incerteza associada aos resultados dos modelos climáticos foram utilizados valores médios mensais para as anomalias pois dão uma melhor indicação do sinal da tendência de alteração climática.

Uma vez que as anomalias têm que perturbar dados climáticos observados com um passo de tempo diário, foi necessário após o cálculo das anomalias mensais produzir uma série de dados com um passo de tempo diário contendo essas anomalias, sendo que dentro do mesmo mês as anomalias são iguais.

A precipitação foi tratada de uma forma diferente das restantes variáveis meteorológicas. Uma vez que se pretende manter a estrutura do número de episódios de precipitação ocorridos num dado mês, utiliza-se uma anomalia calculada como uma percentagem de alteração, que será multiplicada pelos dados registados. Numa primeira tentativa de gerar as séries perturbadas com base nas anomalias calculadas para cada mês das séries produzidas pelos modelos climáticos, verificou-se que ocorriam valores de precipitação exageradamente elevados e irrealistas. Assim, efetuou-se o cálculo das anomalias para a precipitação de acordo com a metodologia descrita em Miranda et al. (2006), em que se determinam os fatores de correção da precipitação com base em médias de 30 anos para cada um dos meses. Este método de correção dos desvios permitiu que a percentagem de redução da precipitação nas séries perturbadas seja igual aos resultados de redução da precipitação obtidos quando se comparam os dados produzidos pelos modelos RCM para os cenários A2 e B2 com os cenários de referência despectivos.

Descrição das anomalias climáticas para cada cenário de alteração climática

Os valores das anomalias climáticas dos cenários de alteração climática (2071-2100) produzidos pelos modelos RCM relativamente à normal climática de 1961-90 são apresentados no Quadro 2.4, onde importa salientar os seguintes aspetos:

- a) A radiação líquida (R_n) aumenta em todos os cenários com os valores mais baixos a ocorrerem no cenário B2.
- b) A humidade relativa apresenta uma ligeira redução dos valores de HR_{max} e de HR_{min} com as anomalias a apresentarem valores negativos.
- c) Na temperatura média as anomalias variam entre $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $4.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. A anomalia da temperatura máxima varia entre $3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. A temperatura mínima apresenta um aumento de $2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Verificando-se assim que o aumento da T_{max} é superior ao da T_{min} .
- d) A velocidade média do vento (U_2) apresenta anomalias muito reduzidas.
- e) Na precipitação verifica-se que as anomalias variam entre -22% e -38% , com o modelo HadRM3P a apresentar valores de redução da precipitação superiores aos modelos HIRHAMh e HIRHAMhh.

Quadro 2.4 – Médias anuais das anomalias climáticas dos cenários de alteração climática (2071-2100), produzidos pelos modelos RCM, relativamente ao período de controlo (1961-90), para cada uma das variáveis meteorológicas consideradas (Rolim, 2013)

Est.	Modelo	Cen	R_n ($MJm^{-2}dia^{-1}$)	HR_{max} (%)	HR_{min} (%)	T_{med} ($^{\circ}C$)	T_{max} ($^{\circ}C$)	T_{min} ($^{\circ}C$)	U_2 (ms^{-1})	P (%)	P (mm)
Beja	HadRM3P	A2	0.150	-6.0	-6.0	4.0	4.3	3.8	-0.01	-38%	-99
	HadRM3P	B2	0.099	-4.3	-4.3	2.9	3.1	2.7	-0.02	-26%	-67
	HIRHAMh	A2	0.336	-4.7	-3.1	3.5	3.9	3.3	-0.05	-28%	-130
	HIRHAMhh	A2	0.346	-4.3	-2.8	3.5	3.9	3.3	-0.07	-28%	-120
Évora	HadRM3P	A2	0.219	-6.5	-6.5	4.1	4.5	3.7	0.00	-34%	-124
	HadRM3P	B2	0.172	-4.6	-4.6	2.9	3.2	2.7	-0.02	-22%	-79
	HIRHAMh	A2	0.342	-5.5	-3.6	3.6	4.0	3.4	-0.05	-27%	-130
	HIRHAMhh	A2	0.332	-5.0	-3.2	3.6	4.0	3.3	-0.07	-25%	-107

A temperatura e a precipitação têm sido as variáveis meteorológicas mais estudadas nos trabalhos sobre alterações climáticas. Os valores obtidos para as anomalias da temperatura e da precipitação são semelhantes aos resultados obtidos por Cunha et al. (2006), Miranda et al. (2006) e Mourato (2009). Estes autores referem ainda que os valores das anomalias da precipitação e da temperatura do ar são desiguais ao longo do ano, com menores aumentos de temperatura no Inverno e com as menores reduções de precipitação também no Inverno. Os maiores aumentos de temperatura registam-se no Verão juntamente com as maiores reduções percentuais da precipitação.

As médias sazonais das anomalias da precipitação e temperatura apresentam-se na Figura 2.3, para os diferentes cenários de alteração climática considerados. Por uma questão de simplificação da linguagem, no texto que se segue, o primeiro trimestre do ano (DJF) passa-se a designar de Inverno, o segundo trimestre (MAM) de Primavera, o terceiro trimestre (JJA) de Verão e o quarto trimestre (SON) de Outono.

Na Figura 2.3 observa-se que os resultados das anomalias tendem a agrupar-se em 3 conjuntos, o conjunto dos resultados do cenário B2 (HadRM3P) para Beja e Évora, que apresentam os menores aumentos de temperatura e os menores valores de redução da precipitação, o conjunto do cenário A2 dos modelo HIRHAMh e HIRHAMhh, que apresentam resultados intermédios e o conjunto do cenário A2 do modelo HadRM3P que apresenta o maior aumento de temperatura e a maior redução da precipitação.

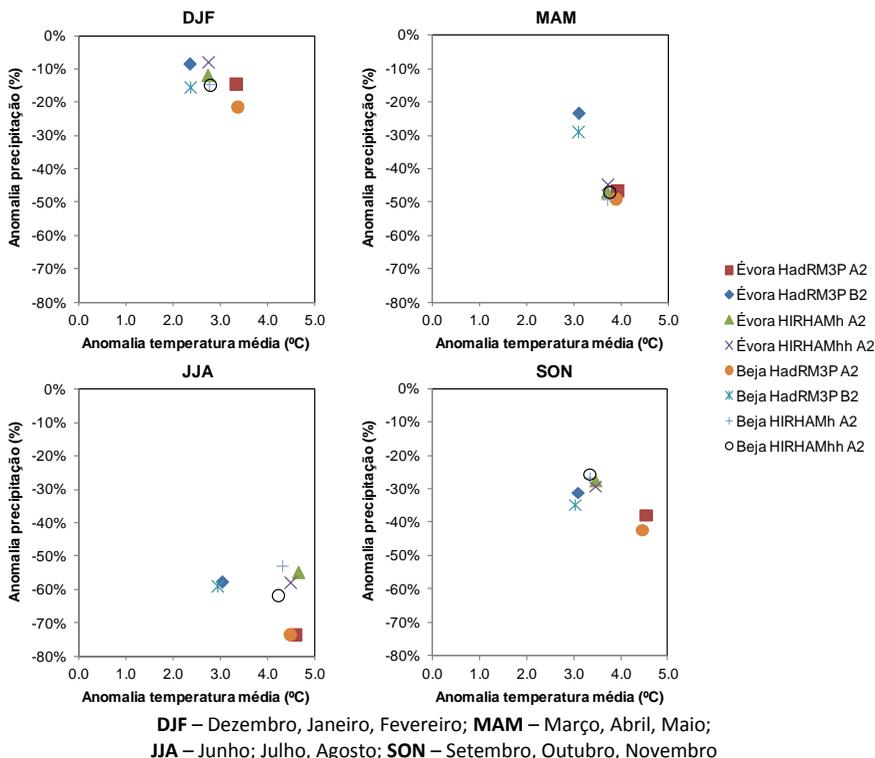


Figura 2.3 – Ciclo anual das anomalias da temperatura média e da precipitação, expressas como a diferença entre os valores dos cenários de alteração climática (2071-2100) e o período de controlo (1961-90), para as estações de Beja e Évora (Rolim, 2013).

O Inverno é a estação do ano para a qual se observam (Fig. 2.3) os menores aumentos da temperatura média e as menores redução da precipitação, sendo de salientar que é a estação que apresenta a maior proximidade entre os resultados dos modelos. Na Primavera o cenário B2 (HadRM3P) destaca-se por apresentar a menor redução da precipitação e da temperatura. No Verão o cenário B2 apresenta o menor aumento da temperatura média sendo o cenário A2 do modelo HadRM3P aquele que projeta um maior aumento da temperatura e uma maior redução da precipitação. No Outono o cenário A2 do modelo HadRM3P volta a destacar-se como o mais quente e seco.

Para a gestão da água na agricultura é muito importante perceber a variação simultânea da precipitação e da evapotranspiração de referência ET_0 (Fig. 2.4). Assim, apesar de ET_0 ter sido calculada com base nas séries climáticas perturbadas decidiu-se incluir nesta secção o ciclo anual das anomalias conjuntas da ET_0 e da precipitação. A Figura 2.4 mostra que o cenário B2 do modelo HadRM3P é o que

2.2.3.2. Séries climáticas perturbadas

Perturbação das séries históricas

As séries climáticas perturbadas são o produto final do sistema de informação IScenarios (vd. secção 2.3.1) e constituem os dados meteorológicos de entrada do modelo IrrigRotation (Rolim e Teixeira, 2008). Estas séries obtiveram-se através da perturbação das séries de dados observados (1961-90) registadas nas estações de Beja e Évora com os valores das anomalias climáticas mensais dos cenários de alteração climática. Foi feita a interpolação espacial das séries das anomalias para determinar os seus valores para as estações de Beja e Évora.

Após a obtenção das séries perturbadas realizou-se a validação dos dados e a correção de erros. Realizou-se a seguir o cálculo da ET_o , com o módulo de cálculo da evapotranspiração do programa IrrigRotation.

Os valores das médias anuais (2071-2100) para cada uma das variáveis meteorológicas das séries perturbadas são apresentados no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Médias anuais das séries perturbadas, relativas ao período de 2071-2100, das variáveis climáticas temperatura (T_{max} , T_{min}), humidade relativa (HR_{max} , HR_{min}), velocidade do vento (U_2), precipitação (P), evapotranspiração de referência (ET_o) e radiação líquida (R_n) (Rolim, 2013)

Est.	Modelo	Cen.	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	HR_{min} (%)	HR_{max} (%)	U_2 (ms^{-1})	P (mm)	ET_o ($mm\ dia^{-1}$)	R_n ($Mj\ m^{-2}dia^{-1}$)
Beja	HadRM3P	A2	26.6	13.9	82	37	3.2	385	4.6	8.529
	HadRM3P	B2	25.3	12.8	84	39	3.1	452	4.4	8.477
	HIRHAMh	A2	26.2	13.4	83	40	3.1	434	4.6	8.707
	HIRHAMhh	A2	26.2	13.4	83	40	3.1	429	4.6	8.717
Évora	HadRM3P	A2	25.0	14.7	77	41	2.9	435	4.3	8.599
	HadRM3P	B2	23.7	13.7	79	43	2.9	509	4.1	8.552
	HIRHAMh	A2	24.6	14.3	77	44	2.8	462	4.3	8.714
	HIRHAMhh	A2	24.5	14.3	78	44	2.8	472	4.2	8.705

As Figuras 2.5 e 2.6 mostram os valores médios mensais das séries perturbadas das temperaturas máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}). Da sua análise pode concluir-se que os cenários A2, relativos aos três modelos RCM considerados, apresentam resultados semelhantes entre si tanto para Tmax como para Tmin. É ainda notório que o aumento de temperatura dos cenários A2, relativamente a B2 é maior nos meses de Verão e que todos os cenários apresentam um claro aumento face ao período de controlo.

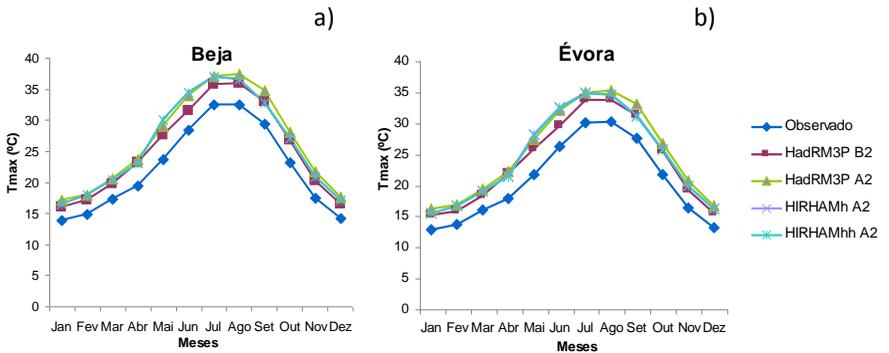


Figura 2.5 – Médias mensais da temperatura máxima das séries climáticas perturbadas produzidas para a) Beja e b) Évora.

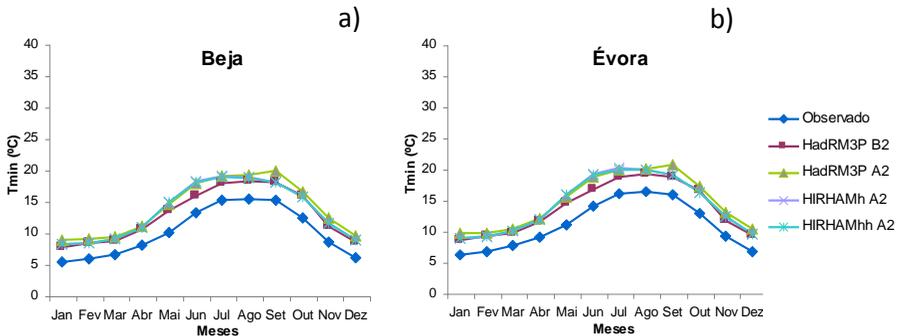
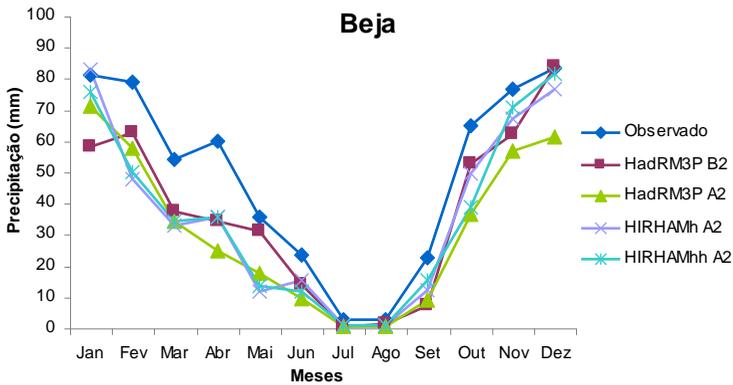


Figura 2.6 – Médias mensais da temperatura mínima das séries climáticas perturbadas produzidas para a) Beja e b) Évora (Rolim, 2013).

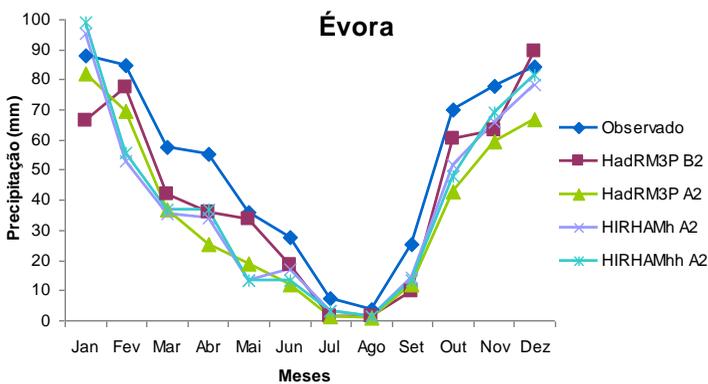
Séries perturbadas da Precipitação e da Evapotranspiração de referência.

A análise das séries da precipitação e da evapotranspiração de referência (ET_0) é particularmente pertinente em estudos no domínio da agricultura de regadio porque estas são as variáveis climáticas mais importantes no cálculo das necessidades de rega das culturas.

Relativamente à precipitação constata-se através da observação da Figura 2.7 que esta tende a apresentar apenas uma ligeira redução durante o Inverno, existindo inclusive cenários que apontam para um aumento da precipitação durante os meses de Dezembro e Janeiro, enquanto na Primavera a sua redução será muito significativa. No Verão a precipitação, já de si escassa para o período de controlo, apresenta valores residuais em Julho e Agosto. Verifica-se ainda que a estação seca se prolonga pelo mês de Setembro. No Outono verifica-se igualmente uma redução na precipitação embora ligeiramente menos acentuada que na Primavera.



a)



b)

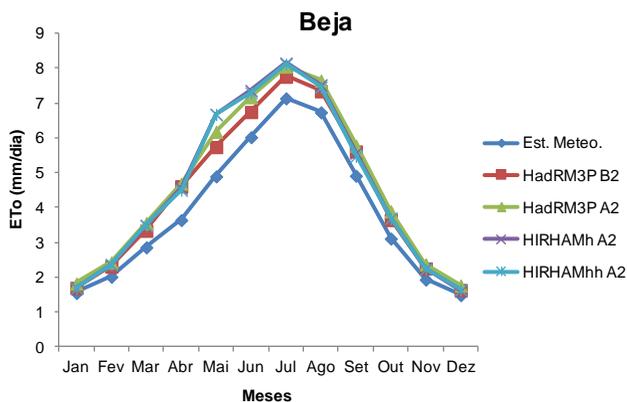
Figura 2.7 – Médias mensais da precipitação das séries climáticas perturbadas produzidas para a) Beja e b) Évora (Rolim, 2013).

Relativamente à ET_0 (Fig. 2.8), verifica-se que os maiores aumentos ocorrem durante a Primavera e o Verão e que no Outono e Inverno os cenários de alteração climática para além de apresentarem valores mais próximos dos observados também apresentam uma menor diferenciação entre si. Os cenários A2 dos diversos modelos apresentam valores muito semelhantes entre si, verificando-se uma diferença considerável entre os cenários A2 e B2 apenas para os meses de Primavera e Verão.

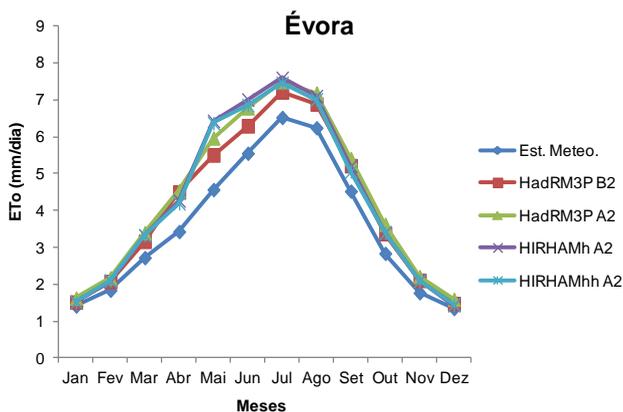
Estes dados indicam que, para os cenários de alteração climática, a precipitação se vai concentrar mais no Inverno e que a ET_0 tenderá a sofrer os maiores aumentos na Primavera e Verão o que irá agravar bastante o desencontro entre as necessidades e as disponibilidades hídricas, características do clima mediterrânico.

O aumento muito marcado da ET_0 associado com uma forte redução da precipitação, na Primavera, levantará problemas às culturas de sequeiro de

Outono-Inverno uma vez que é neste período que ocorre a fase da floração e produção do grão, o que poderá levar a fortes quebras na produção, caso não se recorra a regas de complemento ou de socorro e/ou a culturas com ciclos mais curtos que antecipem a colheita de modo evitar o período durante o qual estarão sujeitas a um stress hídrico mais intenso.



a)



b)

Figura 2.8 – Médias mensais da evapotranspiração de referência, calculada com base nos dados observados nas estações meteorológicas de a) Beja e b) Évora e nas séries climáticas perturbadas produzidas para cada uma dessas estações (Rolim, 2013).

2.3. Sistemas de informação desenvolvidos

2.3.1. Sistema de informação IScenários

A avaliação dos impactes das alterações climáticas nos sistemas agrícolas de regadio assenta na capacidade de disponibilizar aos modelos de simulação da rega cenários de alteração climática. As séries de dados climáticos relativos aos cenários de alteração climática são espacialmente distribuídos, contêm um grande

volume de dados e são disponibilizados num formato que os torna dificilmente acessíveis para estudos de impacte das alterações climáticas sobre o regadio. Assim, foi necessário desenvolver o sistema de informação IScenarios para possibilitar a compilação e a gestão dos dados climáticos produzidos pelos modelos RCM. Este sistema de informação calcula as anomalias climáticas para cada uma das variáveis e cenários considerados, produzindo as respectivas séries climáticas futuras.

O sistema de informação IScenarios (Rolim, 2013) consiste na combinação de aplicações informáticas, com SIG, base de dados e folhas de cálculo, sendo constituído pelos seguintes componentes:

- Um programa para a extração e formatação dos dados climáticos produzidos pelos modelos RCM de uma forma automatizada. Este programa foi desenvolvido em Visual Basic 2005 e permite ler os ficheiros de saída dos modelos climáticos, gerando um ficheiro de texto para cada uma das variáveis e cenários considerados. O programa organiza os dados climáticos numa matriz em que cada coluna corresponde a um dos pontos da grelha do modelo RCM e as linhas correspondem aos registos das variáveis climáticas.
- Um SIG, desenvolvido com objetivo de permitir a visualização e posterior seleção dos pontos das grelhas dos modelos climáticos, para uma dada região. O SIG foi desenvolvido em GeoMedia 6.0 e contém as grelhas dos modelos climáticos, os pontos das estações climáticas e um mapa da região em estudo.
- O programa Interpolador realiza a interpolação espacial de variáveis agrometeorológicas (Rolim et al., 2011). Inclui os seguintes métodos de interpolação espacial: o vizinho mais próximo (VMP); o inverso do quadrado da distância (IQD) e a colocação por mínimos quadrados (CMQ). O software Interpolador foi integrado no sistema de informação IScenarios para interpolar espacialmente as anomalias climáticas das malhas dos modelos RCM para a localização das estações meteorológicas, uma vez que a as grelhas dos modelos e as estações meteorológicas têm diferentes distribuições espaciais.
- Uma base de dados para gerar, para cada variável climática, um vetor com os valores diários das anomalias climáticas e seguidamente produzir a perturbação das séries “históricas” registadas nas estações meteorológicas, produzindo deste modo as séries climáticas futuras para cada um dos cenários de alteração climática considerados.
- Várias folhas de cálculo que executam alguns dos passos intermédios no cálculo das anomalias e na construção das séries climáticas futuras.

2.3.2. Sistema de informação GISclimReg

O desenvolvimento da aplicação GISclimReg teve como objetivo a criação de um sistema de informação que permitisse automatizar a utilização dos dados climáticos, organizá-los para uma leitura mais fácil e criar uma *framework* no *ArcGIS* (ESRI) que permitisse manipular e analisar esses dados. Para alcançar este objetivo criou-se uma base de dados contendo dados georreferenciados relativamente ao clima (dados climáticos observados em estações meteorológicas e cenários de alteração climática produzidos por modelos climáticos) e desenvolveu-se uma aplicação SIG, usando o *ArcGIS*, que permite de forma automatizada realizar a sua análise, a produção de mapas e a disponibilização dessa informação via *Web* (Mendes, 2013).

Foi então desenvolvida a aplicação GISclimReg em *Visual Basic for Applications* (VBA) com três objetivos específicos:

- 1) Permitir realizar a análise espacial dos dados dos cenários de alteração climática e a produção automática de mapas para as variáveis meteorológicas consideradas;
- 2) Ser uma plataforma de integração para modelos de simulação da rega permitindo a quantificação das necessidades de água das culturas a um nível regional;
- 3) Construção de uma página *web* para a disponibilização da informação produzida pela aplicação;

Para alcançar o objetivo de integrar modelos de simulação do balanço hídrico na aplicação GISclimReg foi necessário criar em primeiro lugar uma nova grelha de pontos com uma resolução espacial de 10 km contendo os dados relativos ao solo e ao clima, sendo necessário executar a interpolação espacial para uma grande quantidade de ficheiros de texto que contêm os dados meteorológicos (incluindo os *outputs* dos modelos RCM e os dados das estações meteorológicas). Para esta nova grelha, a aplicação GISclimReg corre o modelo simplificado de balanço hídrico, para cada ponto, calculando as necessidades hídricas das culturas e o *défice* hídrico para os diferentes cenários de alteração climática considerados, produzindo os mapas respetivos. Na implementação do SIG é considerada a região do Alentejo permitindo a avaliação dos impactes das alterações climáticas nas necessidades hídricas das culturas a um nível regional. Como produto final produziu-se um conjunto de mapas para as principais variáveis de interesse na análise dos impactes das alterações climáticas sobre as necessidades de rega das culturas (Mendes, 2013).

Base de dados do clima

O desenvolvimento da aplicação GisClimReg iniciou-se com a construção de uma base de dados SIG, relativa aos dados climáticos georreferenciados. Para este efeito, foi utilizado o ArcGIS da ESRI. Os dados climáticos compreendem tanto os dados climáticos observados em estações meteorológicas como cenários de alteração climática produzidos pelos modelos RCM. Os modelos RCM considerados foram: HadRM3P (cenários A2 e B2), com uma resolução espacial de 50 km, HIRHAMh (cenário A2) com uma resolução de 25 km e HIRHAMhh (cenário A2) com uma resolução espacial de 12km. Os dados dos modelos climáticos são relativos ao período 2071-2100, com um passo de tempo mensal. Os dados meteorológicos observados foram obtidos através da rede de estações meteorológicas SAGRA situada na região do Alentejo e pertencente ao Centro Operativo e de Tecnologia de Regadio (COTR, 2013).

Aplicação GISClimReg

Para realizar a gestão e análise da informação climática contida na base de dados SIG foi criada a aplicação GISClimReg. A aplicação GISClimReg foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação VBA incluída no software ArcGIS. Esta aplicação é capaz de realizar a análise espacial dos dados dos modelos RCM e de produzir automaticamente mapas *raster*, gerados através da interpolação espacial dos dados das grelhas dos modelos RCM. Esta aplicação disponibiliza informação armazenada na base de dados SIG, relativa aos dados dos diferentes modelos RCM, permitindo a análise de dados de acordo com os parâmetros selecionados pelo utilizador (e.g., variáveis climáticas, período de tempo, método de interpolação, operação estatística, fator de correção, etc). Com base nos parâmetros selecionados é produzido um ficheiro intermédio que é posteriormente interpolado através dos métodos do inverso do quadrado da distância (*inverse distance weighting* - IDW) ou kriging, sendo as superfícies interpoladas recortadas de acordo com os limites geográficos desejados, neste caso os limites da região do Alentejo definidos pela Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP) (Fig. 2.9) (Mendes, 2013).

Plataforma de modelos

Para permitir correr os modelos de simulação para a região do Alentejo foi criada uma grelha de pontos com uma resolução espacial de 10 km, sendo que a cada ponto dessa grelha se encontra associada uma estação meteorológica virtual. Esta grelha armazena a informação relativa ao clima e solos. Os ficheiros de dados meteorológicos, correspondentes às estações meteorológicas “virtuais”, incluem os cenários de alteração climática e os dados observados na rede de estações SAGRA (COTR, 2013) que foram interpolados para esta nova grelha utilizando o

software Interpolador (Rolim et al., 2011). Para associar a informação de solo a cada ponto da grelha (Fig. 2.9) extraiu-se o tipo de solo da carta de solos produzida pelo Instituto de Desenvolvimento Rural e Hidráulica do Ministério da Agricultura, Desenvolvimento Rural e Pescas (IDRHa, 1999).

Foi realizada a integração na aplicação GISclimReg de um modelo simplificado de simulação do balanço hídrico para estimar as necessidades de rega das culturas tendo por base os dados da grelha de 10km. Este modelo lê os ficheiros de dados do clima e do solo associados a cada ponto da grelha de 10 km e calcula a ET_0 e o défice hídrico, guardando os resultados num ficheiro de dados de saída que fica associado a cada ponto da grelha. Este modelo simplificado permitiu produzir mapas para a região do Alentejo de défice hídrico e de evapotranspiração de referência para cada um dos cenários de alteração climática considerados (Mendes, 2013).

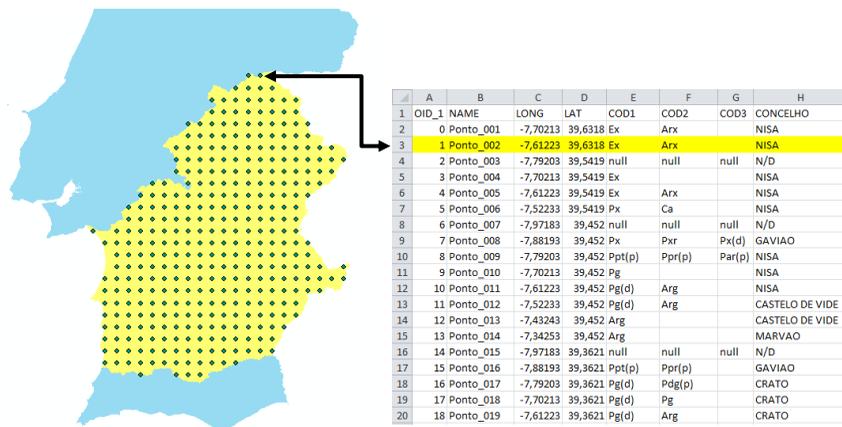


Figura 2.9 – Grelha de 10 km relativa à plataforma de modelos, em que se mostra os dados do solo (Mendes 2013).

WEBSIG

Decidiu-se usar a *web* para partilhar alguns dos mapas obtidos através das análises realizadas pela aplicação GISclimReg criando-se uma página para o efeito. Estes mapas mostram as principais variáveis climáticas para o estudo das alterações climáticas no regadio que foram analisadas neste projeto. As variáveis são: precipitação, temperatura média, temperatura mínima, temperatura máxima, evapotranspiração e *défice* hídrico.

A arquitetura da página é composta por uma base de dados que contém ficheiros KML, um script em *JavaScript*, um ficheiro em *Hyper Text Markup Language* (HTML) e um ficheiro *Cascade Style Sheet* (CSS). A Figura 2.10 mostra uma esquematização dessa arquitetura.

Na Figura 2.11 pode-se observar a página *web* final com o mapa da evapotranspiração anual para o modelo DMI12 carregado como exemplo. Os mapas presentes na *ComboBox* da página *Web* são os mapas produzidos pela aplicação GISClimReg (Mendes, 2013).

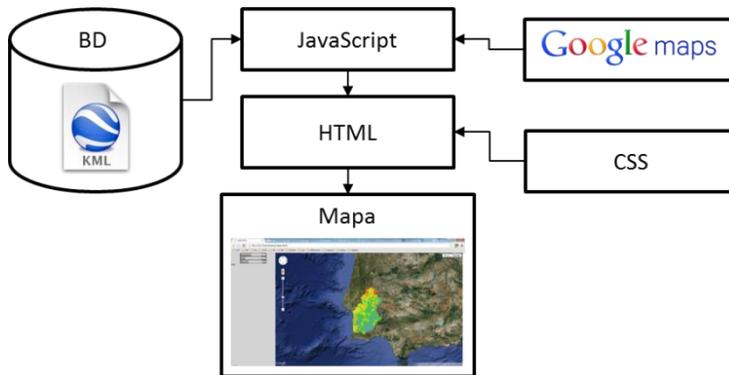


Figura 2.10 - Esquematização da arquitetura do sistema do *WebSIG* (Mendes, 2013).

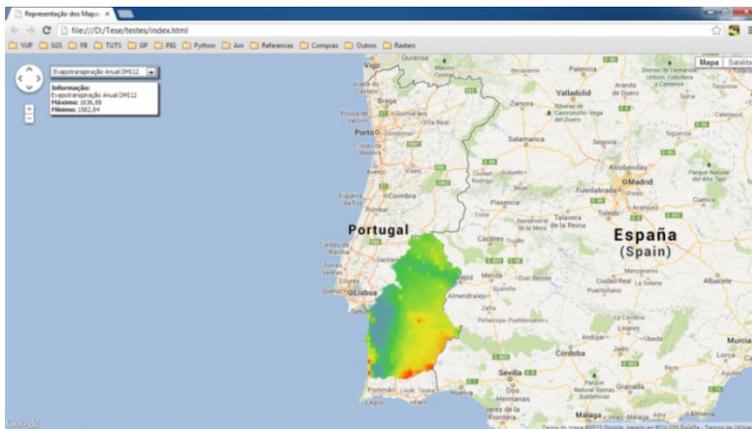


Figura 2.11 - Página Web com o mapa da Evapotranspiração Anual para o modelo DMI12 (Mendes, 2013).

2.4. Conclusão

A utilização de dados dos modelos RCM levou ao desenvolvimento de sistemas de informação que permitissem gerir o grande volume de dados existentes. Estes sistemas de informação possibilitaram a realização de um conjunto de operações que vão desde a obtenção dos ficheiros de saída dos modelos RCM até à geração

das séries climáticas futuras num formato facilmente utilizável pelo modelo de balanço hídrico. Para além disso a incerteza das projeções para os cenários de alteração climáticas obrigaram a considerar um conjunto de cenários representativos da gama de variações apresentadas pelos modelos climáticos, o que conduziu à realização de um elevado número de repetições das simulações a realizar. Todos estes factos fazem com que os estudos de impactes das alterações climáticas se tornem bastante demorados e requeiram o desenvolvimento de sistemas de informação que automatizem o maior número possível das operações a realizar.

Referências bibliográficas

- Aguiar, R., 2006. Cenários Socioeconómicos. In Alterações Climáticas em Portugal. Cenários Impactes e Medidas de Adaptação – Projeto SIAM II, F:D: Santos e P. Miranda (eds.), pp. 483-492. Gradiva; Lisboa.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, Italy, 300 pp.
- Bøssing Christensen, O., Drews, M., Christensen, J.H., Dethloff, K., Ketelsen, K., Hebestadt, I., Rinke, A., 2007. *The HIRHAM Regional Climate Model Version 5*. Technical report 06-17, Danish Meteorological Institute. 22 pp.
- Brandão, A.M.C.P., 2006. *Alterações climáticas na agricultura portuguesa: instrumentos de análise, impactes e medidas de adaptação*. Tese de Doutoramento em Engenharia Agronómica, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa. 221 pp.
- Christensen, J.H., 2005. Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects. Final report. DMI. 269 pp.
- COTR, 2013. SAGRA - Sistema Agrometeorológico para a Gestão da Rega no Alentejo. Disponível: <http://www.cotr.pt/sagra.asp>. Acesso: Maio 2009
- Cunha, L.V., Ribeiro, L., Oliveira, R.P., Nascimento, J., 2006. Recursos Hídricos. In *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários Impactes e Medidas de Adaptação – Projecto SIAM II*, F:D: Santos e P. Miranda (eds.), pp. 117-168. Gradiva; Lisboa.
- Duarte Santos, F., 2006. Problemática das alterações climáticas no início do século XXI. In *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários Impactes e Medidas de Adaptação – Projecto SIAM II*, F:D: Santos e P. Miranda (eds.), pp. 17-43. Gradiva, Lisboa.
- Graham, L.P., Andréasson, J., Carlsson, B., 2007. Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods – a case study on the Lule River basin. *Climatic Change*, 81:293–307.
- IDRHa, 1999. Cartas de Solos e de Capacidade de Uso do Solo. Disponível: <http://www.dgadr.pt/cartografia/cartas-solos-cap-uso-analogico>. Acesso: Maio 2013.
- IPCC, 2007a: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- IPCC, 2007b: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jones, R.G., Noguer, M., Hassell, D.C., Hudson, D., Wilson, S.S., Jenkins, G.J., Mitchell, J.F.B., 2004. *Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS*. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 40 pp.
- Lenderink, G., Buishand, A., van Deursen, W., 2007. *Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach*. *Hydrol. EarthSyst. Sci.*, 11(3): 1145-1159.
- Mendes, P., 2013. Desenvolvimento de uma aplicação SIG no apoio à gestão da rega: O caso de estudo do Alentejo (Portugal). Dissertação de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica – Tecnologias e Aplicações, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. 126 pp.
- Miranda, P.M.A., Valente, M.A., Tomé, A.R., Trigo, R., Coelho, M.F.E.S., Aguiar, A., Azevedo, E.B., 2006. O clima de Portugal nos séculos XX e XXI. In *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários Impactes e Medidas de Adaptação – Projecto SIAM II*, F:D: Santos e P. Miranda (eds.), pp. 45-113. Gradiva, Lisboa.
- Mourato, S.J.M., 2009. Modelação do impacte das alterações climáticas e do uso do solo nas bacias hidrográficas do Alentejo. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade de Évora. 307 pp.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Gruñbler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere EL, Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Raihi, K., Roehrl, A., Rogner, H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., Dadi, Z., 2000. *IPCC Special report on emissions scenarios*. Cambridge University Press, Netherlands.
- Rolim, J. e Teixeira, J., 2008. IrrigRotation, a time continuous soil water balance model. *WSEAS TRANSACTIONS on ENVIRONMENT and DEVELOPMENT*, 4(7): 577-587.
- Rolim, J., Catalão, J., Teixeira, J.L., 2011. The influence of different methods of interpolating spatial meteorological data on calculated irrigation requirements. *Applied Engineering in Agriculture*, 27(6): 979-989.
- Rolim, J., 2013. Metodologias para a avaliação dos impactes das mudanças climáticas na agricultura de regadio e nos sistemas de rega. Tese de Doutoramento em Engenharia dos Biosistemas, Instituto Superior de Agronomia, UTL. 322 pp.

Capítulo 3

IMPACTE DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NAS NECESSIDADES DE REGA DAS CULTURAS

João Rolim¹, José Luís Teixeira¹, João Catalão² e Shakib Shahidian³

¹*Departamento de Ciências e Engenharia de Biosistemas (DCEB), Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa*

²*Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*

³*Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas (ICAAM), Universidade de Évora*

Introdução

Conhecidos os valores diários das variáveis meteorológicas evapotranspiração de referência (ET_0) e precipitação (P) para a série de controlo e para as séries referentes aos vários cenários das alterações climáticas, pode-se estimar as necessidades de rega relativas a cada um dos cenários referidos através da simulação do balanço hídrico dos solos. Para o efeito, é ainda necessário conhecer os parâmetros hidrológicos dos solos e os parâmetros das culturas. Para a realização do balanço hídrico foi desenvolvido uma ferramenta informática que permite fazer o balanço hídrico sequencial de uma cultura ou de uma rotação de culturas.

3.1. Dados de base

3.1.1. Dados das culturas

Neste estudo analisaram-se culturas em rotações, sequências de culturas e culturas produzidas em monocultura. Consideraram-se duas rotações de culturas, girassol-trigo-cevada (G-T-C) e beterraba sacarina-milho-tomate-trigo (B-M-T-T), e a sequência de culturas trigo-milho (T-M), esta última apenas para os cenários futuros de alteração climática. Quanto às culturas produzidas como monocultura consideraram-se as culturas do melão, arroz, vinha e olival. As duas rotações de culturas foram consideradas porque a rotação G-T-C é uma rotação tradicionalmente praticada na região do Alentejo e porque a rotação B-M-T-T é uma rotação de regadio tecnicamente muito interessante, embora na situação atual existam limitações severas à produção de beterraba. Todas as culturas anuais

foram regadas visando o conforto hídrico, com exceção das culturas do trigo e da cevada nas duas rotações de culturas (G-T-C e B-M-T-T) que foram cultivadas em condições de sequeiro. A vinha e o olival foram regados impondo um défice hídrico controlado. No caso da cultura do arroz só se consideraram as necessidades de rega líquidas não se tendo incorporado o volume de água necessário para encher os canteiros na fase inicial.

Quadro 3.1 – Parâmetros culturais do milho, trigo, beterraba sacarina, tomate, girassol e cevada que foram utilizados para calcular as necessidades de rega das culturas

	Cultura									
	Milho	Trigo	Beter- raba	Tomate	Girassol	Cevada	Melão	Arroz	Vinha	Olival
Diaplantação	10	1	5	1	20	15	1	1	1	1
Mêsplantação	4	11	11	5	4	12	5	5	4	3
L_{ini} (dias)	30	30	45	30	25	20	25	30	30	30
L_{dev} (dias)	40	140	75	40	35	50	35	30	60	90
L_{mid} (dias)	50	40	80	45	45	60	40	60	40	60
L_{late} (dias)	30	30	30	30	25	30	20	30	80	90
k_{cbini}	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	1	0.15	0.55
k_{cbmid}	1.15	1.1	1.15	1.1	1.1	1.1	1	1.15	0.65	0.65
k_{cbend}	0.15	0.15	0.5	0.7	0.25	0.15	0.7	0.45	0.4	0.65
fracção p	0.55	0.55	0.55	0.4	0.45	0.55	0.4	0.15	0.45	0.65
Alt. max. (m)	2	1	0.5	0.6	2	1	0.4	1	1,5	2
Prof. Rad. (m)	1	1.8	0.7	0.7	0.8	1.5	0.8	0.5	2	2

Fases de desenvolvimento das culturas: L_{ini} - período inicial; L_{dev} - período de crescimento rápido; L_{mid} - período intermédio; L_{late} - período final. Coeficientes culturais basais: k_{cbini} - período inicial; k_{cbmid} - período intermédio; k_{cbend} - no fim do período final; Alt. max. - altura máxima da cultura; Prof. rad - Profundidade do sistema radicular.

3.1.2. Dados do solo

Foram utilizados os solos mais representativos para a área de influência de cada estação meteorológica. Para Beja consideraram-se os solos Barros Pretos calcários muito Descarboxatados de dioritos ou gabros (Bpc) e para Évora seleccionaram-se os solos Mediterrâneos Pardos Normais de quartzodioritos (Pmg)(Cardoso, 1965). As principais características destes solos são apresentadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Principais características dos solos Barros Pretos (Bpc) e Mediterrâneos Pardos (Pmg)(Cardoso, 1965)

Solo	Horizonte	Prof. Superior (m)	Prof. Inferior (m)	θ_{CC} ($g\ g^{-1}$)	θ_{CE} ($g\ g^{-1}$)	Densid.aparente ($g\ cm^{-3}$)
Barros Pretos (Bpc)	Ap	0	0.3	0.356	0.165	1.21
	B	0.3	0.65	0.386	0.188	1.23
	Bcca	0.65	0.9	0.457	0.237	1.11
	CcaC	0.9	1.2	0.397	0.182	1.08
Mediterrâneos Pardos(Pmg)	Ap	0	0.3	0.1375	0.030	1.50
	B	0.3	0.6	0.2365	0.1038	1.28

θ_{CC} – teor de água no solo à capacidade de campo; θ_{CE} – teor de água no solo ao coeficiente de emurhecimento.

3.1.3. Medidas de adaptação para avaliação dos impactes

O aumento das temperaturas encurtará o ciclo de crescimento das culturas, o que implicará uma redução da sua produtividade. Assim, foram utilizadas três medidas de adaptação que permitem ter em consideração as potenciais atitudes de adaptação dos agricultores relativamente à escolha das variedades das culturas.

A primeira medida de adaptação consiste na manutenção das variedades culturais atuais (VCA), o que corresponde à não realização de qualquer esforço de adaptação assumindo as perdas de produtividade devido ao encurtamento do ciclo das culturas.

A segunda medida de adaptação inclui a adoção de novas variedades culturais (NVC) com ciclos de crescimento da cultura mais longos, na agricultura de regadio, para manter as durações atuais das fases de crescimento das culturas de modo a tirar partido de toda a estação de crescimento, mantendo desta forma a produção das culturas.

A terceira medida de adaptação visa a intensificação da produção (IP) tirando partido do encurtamento do ciclo das culturas, o que poderá permitir a realização de uma sequência de duas culturas no mesmo ano aumentando, assim, o volume total da produção.

As medidas de adaptação têm objetivos diferentes: a medida VCA visa a poupança de água na agricultura, a medida NVC tem como objetivo a manutenção das produtividades das culturas e com a medida IP pretende-se maximizar a produção por unidade de área.

No quadro 3.1 estão listadas as durações dos estádios de desenvolvimento das culturas utilizados na simulação da medida de adaptação NVC. Para as medidas de

adaptação VCA e IP o encurtamento do ciclo de desenvolvimento das culturas, devido ao aumento da temperatura do ar, é considerado ajustando o comprimento das fases de desenvolvimento das culturas em função do número de graus de crescimento dia (GDD – *Growing degree days*).

As rotações de culturas também foram avaliadas numa perspetiva de adaptação às alterações climáticas, na medida em que esta técnica cultural aumenta a sustentabilidade dos sistemas culturais. Esta medida pode ser muito interessante num contexto de alterações climáticas porque o aumento da heterogeneidade dos sistemas agrícolas permite distribuir os riscos de quebra de produção entre as várias culturas.

Não foram tidos em conta os efeitos do aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera sobre a evapotranspiração cultural (ET_c) porque atualmente ainda não existe o conhecimento suficiente sobre os efeitos de maiores concentrações de CO₂ na ET_c de culturas instaladas no campo (Döll, 2002; Easterling et al., 2007; Turrall e Faurés, 2011). Algumas evidências obtidas a partir de experiências FACE (Free Air CO₂Enrichment) (Hunsaker et al., 2000) indicam que concentrações mais elevadas de CO₂ têm um efeito reduzido nos valores da ET_c das culturas no “campo”, ao contrário do ensaios em ambiente fechado (câmaras de crescimento).

Os parâmetros das culturas utilizados na simulação das necessidades de rega das culturas foram os que se apresentaram no Quadro 3.1.

3.2. Software utilizado

Para calcular as necessidades de rega das culturas para cada um dos cenários climáticos e medidas de adaptação consideradas utilizou-se o programa IrrigRotation (Rolim e Teixeira, 2008). O programa IrrigRotation é uma ferramenta informática que simula o balanço hídrico do solo continuamente no tempo, com um passo de tempo diário, e calcula a ET_c de acordo com o método dos coeficientes culturais de base (Allen et al., 1998). A simulação do balanço hídrico do solo de modo contínuo, ao longo de toda uma série temporal, permite calcular as necessidades de rega das culturas quando estão integradas: numa rotação cultural, numa sequência de culturas ou em monocultura. As necessidades de rega das culturas são calculadas em função três camadas diferentes:

- a) Na camada superficial ocorre simultaneamente evaporação do solo e transpiração das plantas.
- b) A segunda camada corresponde á porção do solo que é ocupada pelas raízes e de onde a água armazenada no solo só é retirada através da transpiração das plantas. A espessura desta camada aumenta ao longo do ciclo da cultura com o crescimento da raiz.

- c) A camada inferior situa-se entre a profundidade da raiz $Z_r(t)$ no dia t e a profundidade máxima da raiz (Rolim e Teixeira, 2008).

3.3. Metodologia para avaliação dos impactes

A metodologia utilizada iniciou-se com a definição de um conjunto de simulações que combinam vários cenários climáticos para dois casos de estudo considerados com várias medidas de adaptação. Foram geradas um conjunto de quatro séries climáticas perturbadas relativas aos 4 cenários de alteração climática e estimaram-se as necessidades de rega das culturas para cada um dos cenários climático através da simulação do balanço hídrico do solo. Os impactes das alterações climáticas foram determinados comparando os resultados do período de referência (1961-1990) com os resultados obtidos para os cenários de alteração climática (2071-2100).

Foram considerados os casos de estudo de Beja (*CE Beja*) em que se utilizaram os dados da estação meteorológica de Beja e os solos Barros Pretos (Bpc) e o caso de estudo de Évora (*CE Évora*) com a estação meteorológica de Évora e os solos Mediterrâneos Pardos (Pmg). Combinando estes dois casos de estudo com os diferentes cenários climáticos, culturas e medidas de adaptação (NVC, VCA e IP), foi definido um conjunto de 70 simulações. Uma simulação corresponde ao cálculo diário das necessidades de rega das culturas para uma série de dados meteorológicos de 30 anos. Esta simulação consiste num caso de estudo (estação e solo) \times 1 cultura (rotação) \times 1 cenário climático \times 1 medida de adaptação. Na Fig. 3.1 mostra-se uma representação esquemática dos dados e das diversas etapas realizadas na determinação dos impactes das alterações climáticas sobre as necessidades de rega das culturas.

As necessidades de rega das culturas foram estimadas para cada uma das 70 simulações consideradas (Fig. 3.1) através da realização do balanço hídrico do solo com o modelo IrrigRotation, de acordo com a seguinte expressão geral:

$$\Delta R = (P - ET_c + Rg - Es + Ac - Dr)\Delta t \quad (3.1)$$

onde: ΔR – variação do volume de água armazenado no solo [mm]; Δt – intervalo de tempo [dia]; P - precipitação [mm dia⁻¹]; Rg - rega [mm dia⁻¹]; Ac – ascensão capilar [mm dia⁻¹]; ET_c – evapotranspiração cultural [mm dia⁻¹]; Es – escoamento superficial [mm dia⁻¹]; e Dr – drenagem e percolação profunda [mm dia⁻¹].

Foram avaliadas duas estratégias de rega diferentes:

- a) A primeira inclui a não existência de restrições hídricas às culturas de regadio. Neste caso, a rega é iniciada quando a reserva de água no solo atinge o limiar da reserva facilmente utilizável, abaixo do qual ocorre stress hídrico, sendo

aplicada uma dotação de rega que permite ao solo ser reabastecido à capacidade de campo.

b) A segunda consiste em não regar as culturas de sequeiro (trigo e cevada). Da realização destas simulações obtiveram-se as necessidades de rega anuais (NR) e o défice hídrico (DH) para as culturas de sequeiro (trigo e cevada).

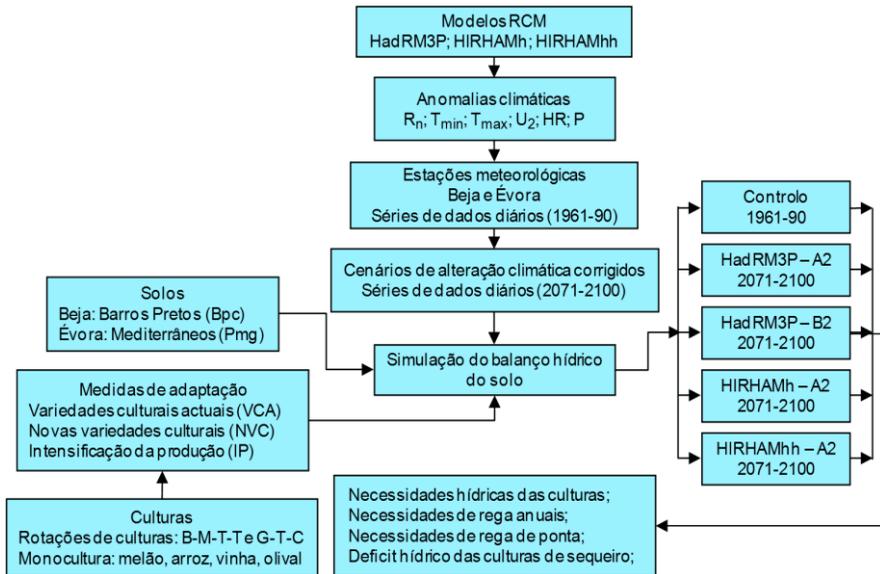


Figura 3.1 – Representação esquemática do conjunto de simulações realizadas.

As necessidades de rega (NR) são definidas como a quantidade total de água, expressa em altura de água [mm], aplicada à cultura ao longo de toda a campanha de rega para satisfazer plenamente as necessidades hídricas das culturas. O défice hídrico (DH) corresponde à diferença entre a soma da ET_c em condições padrão e a soma da ET_c ajustada em função do valor da reserva de água no solo, ao longo de toda o ciclo de desenvolvimento da cultura, de acordo com a seguinte expressão:

$$WD = \sum ET_c - \sum ET_{c,ajustada} \quad (3.2)$$

O valor da $ET_{c,ajustada}$ é calculado quando as condições de água no solo são limitantes, isto é, quando o défice de água no solo é superior ao valor da água facilmente extraível (Readily Available Water - RAW). A $ET_{c,ajustada}$ é calculada multiplicando o coeficiente de stress hídrico (K_s) pelo coeficiente cultural basal (K_{cb}), o que permite considerar os efeitos do stress hídrico na evapotranspiração cultural (Allen et al., 1998).

Os impactes das alterações climáticas na gestão da água no regadio foram avaliados através da análise da média anual e da média sazonal das necessidades de rega (NR) e défice hídrico (DH) das culturas de sequeiro.

3.4. Resultados e Discussão

3.4.1. Necessidades de rega das culturas

As necessidades de rega anuais (NR) de cada cultura foram calculadas com o programa IrrigRotation.

Os resultados obtidos para os cenários de alteração climática para a medida de adaptação novas variedades culturais (NVC) apontam para um aumento dos valores das NR para todas as simulações (Quadro 3.3). No entanto, não se observa um aumento da variabilidade das NR uma vez que os valores do coeficiente de variação (CV) se mantêm praticamente inalterados.

A beterraba sacarina (cultura de Outono/Inverno) apresentou os maiores aumentos das NR variando a percentagem de aumento entre 48 e 66% para o *CE Beja* e entre 43 e 62% (Fig. 3.2a) para o *CE Évora* (Fig. 3.3a). O aumento, em percentagem, dos valores das NR para as culturas de Primavera/Verão (milho, tomate, girassol, melão e arroz) oscilou entre 10 a 36% para o *CE Beja* (Fig. 3.2a) e entre 13 a 30% para o *CE Évora* (Fig. 3.3a) sendo estes aumentos muito menores do que os obtidos para a beterraba sacarina.

O aumento nas NR das culturas de Primavera-Verão é explicado principalmente pelo aumento das necessidades hídricas das culturas, uma vez que a região do Alentejo tem um clima mediterrânico, com pouca precipitação durante o verão. Os maiores aumentos das NR para a cultura da beterraba sacarina são consequência dos efeitos cumulativos das maiores necessidades hídricas das culturas e dos valores mais baixos de precipitação durante o período de desenvolvimento das culturas, uma vez que a precipitação tem um papel importante nas culturas de Outono-Inverno.

As culturas permanentes, vinha e olival, obtiveram valores intermédios de aumentos das NR que se situam entre 37 e 57% para *CE Beja* (Fig. 3.2a) e entre 27 e 43 % para o *CE Évora* (Fig. 3.3a).

A medida de adaptação variedades culturais atuais (VCA) apresentou uma manutenção ou uma ligeira redução das necessidades de rega para todas as culturas anuais (Fig. 3.2b, 3.3b). No caso das culturas permanentes (vinha e olival), observou-se um aumento considerável das NR especialmente para o *CE Beja* onde os aumentos para estas duas culturas variaram entre 4 e 20%. Em relação à variabilidade das NR, os valores do coeficiente de variação (CV) permaneceram

praticamente constantes para a maioria das culturas (exceto para a beterraba sacarina, que apresentou um ligeiro aumento).

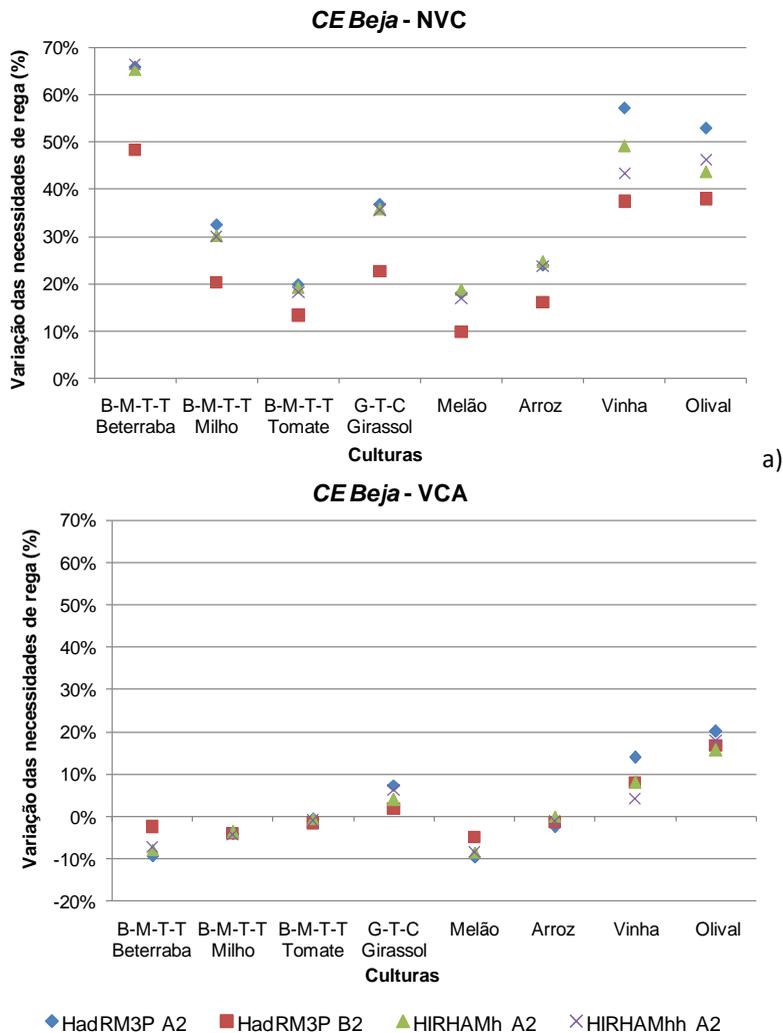


Figura 3.2 – Aumento médio das necessidades de rega para os cenários de alteração climática (2071-2100), relativamente ao período de referência, para *CE Beja* para a medida a) novas variedades culturais (NVC) e para b) as variedades culturais atuais (VCA).

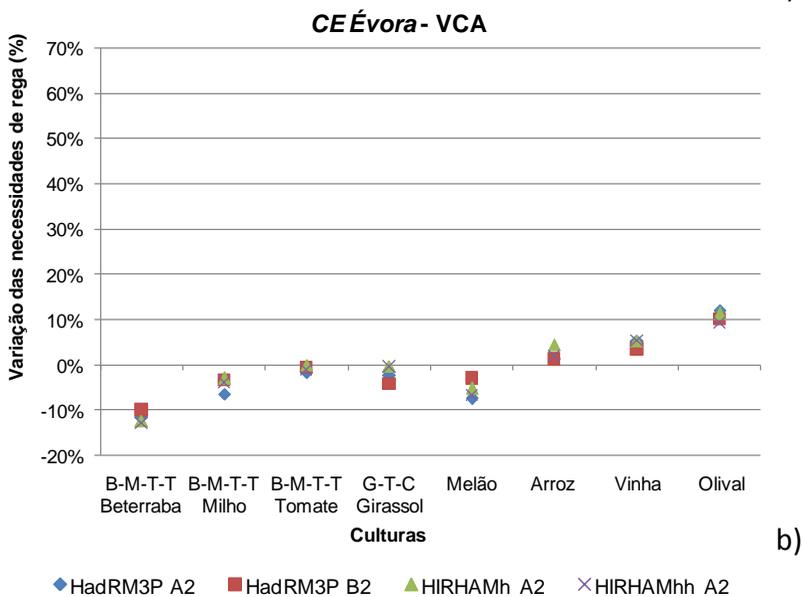
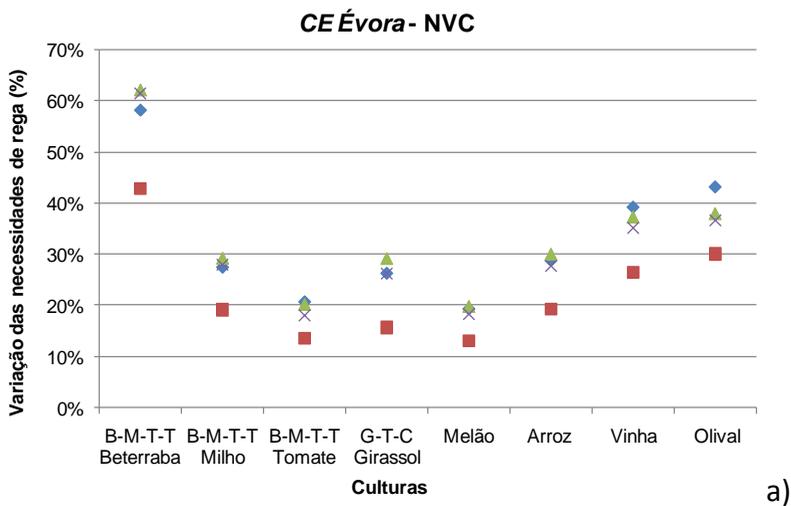


Figura 3.3 – Aumento médio das necessidades de rega para os cenários de alteração climática (2071-2100), relativamente ao período de referência, para *CE Évora* para a medida a) novas variedades culturais (NVC) e para b) as variedades culturais atuais (VCA).

Quadro3.3 – Necessidades de rega anuais (NR) para o período de controlo (1961-1990) e para os diferentes cenários de alteração climática (2071-2100) considerando as medidas de adaptação novas variedades culturais (NVC) e variedades culturais atuais (VCA)

			Controlo	HADRM3P A2		HADRMP B2		HIRAMh A2		HIRAMhh A2	
			NR (mm)	NR (mm)		NR (mm)		NR (mm)		NR(mm)	
Caso de Estudo Beja				NVC	VCA	NVC	VCA	NVC	VCA	NVC	VCA
B-M-T-T	Beteraba	Méd	461	765	418	684	450	763	425	767	428
	sacarina	CV	0.23	0.16	0.27	0.19	0.24	0.20	0.27	0.20	0.30
B-M-T-T	Milho	Méd	736	975	706	885	706	958	709	956	703.5
		CV	0.10	0.13	0.15	0.15	0.17	0.11	0.15	0.11	0.15
B-M-T-T	Tomate	Méd	778	933	772	882	765	928	773	920	771
		CV	0.08	0.06	0.08	0.07	0.09	0.08	0.11	0.08	0.1
G-T-C	Girassol	Méd	741	1013	795	909	754	1007	771	1005	787
		CV	0.12	0.10	0.13	0.13	0.16	0.13	0.17	0.14	0.17
Monocult	Melão	Méd	611	721	552	671	580	726	559	715	559
		CV	0,08	0,08	0,1	0,09	0,12	0,08	0,13	0,08	0,13
Monocult	Arroz	Méd	1054	1306	1027	1224	1038	1314	1054	1303	1041
		CV	0,08	0,06	0,08	0,08	0,1	0,09	0,11	0,09	0,11
Monocult	Vinha	Méd	122	191	139	167	131	182	132	175	127
		CV	0,35	0,27	0,33	0,28	0,38	0,22	0,35	0,26	0,39
Monocult	Olival	Méd	222	339	266	306	259	319	257	324	261
		CV	0,2	0,14	0,17	0,18	0,21	0,18	0,21	0,19	0,21
Caso de Estudo Évora				NVC	VCA	NVC	VCA	NVC	VCA	NVC	VCA
B-M-T-T	Beterraba	Méd	400	634	355	572	361	650	351	646	349
	sacarina	CV	0.16	0.16	0.23	0.24	0.29	0.20	0.26	0.19	0.30
B-M-T-T	Milho	Méd	685	873	641	817	662	885	665	877	659
		CV	0.12	0.09	0.12	0.13	0.16	0.08	0.11	0.08	0.11
B-M-T-T	Tomate	Méd	699	845	688	795	695	840	700	826	692
		CV	0.08	0.07	0.07	0.08	0.1	0.07	0.09	0.07	0.09
G-T-C	Girassol	Méd	653	825	639	755	625	843	651	825	650
		CV	0.11	0.08	0.12	0.13	0.15	0.11	0.15	0.11	0.14
Monocult	Melão	Méd	554	661	513	627	538	663	525	656	517
		CV	0,09	0,08	0,09	0,09	0,11	0,08	0,13	0,07	0,12
Monocult	Arroz	Méd	938	1209	952	1120	951	1220	980	1199	957
		CV	0,1	0,07	0,09	0,09	0,12	0,1	0,12	0,09	0,12
Monocult	Vinha	Méd	150	209	158	190	156	206	158	203	158
		CV	0,15	0,09	0,12	0,1	0,16	0,11	0,14	0,11	0,13
Monocult	Olival	Méd	266	381	298	346	293	367	296	363	290
		CV	0,12	0,09	0,1	0,12	0,13	0,12	0,13	0,12	0,12

^[a]Méd. – valores médios das NR; CV – coeficiente de variação dos valores das NR.

A cultura da beterraba sacarina (medida de adaptação VCA) resultou nas maiores reduções nos valores das NR (Fig. 3.2b, 3.3b), em contraste com os resultados que foram obtidos para esta cultura para a medida de adaptação NVC (Fig. 3.2a, 3.3a), com o encurtamento do ciclo da cultura a reduzir a exposição da cultura ao período de maior stress hídrico. Para as culturas de primavera-verão, os valores das NR aumentaram entre -4 e 7% para o *CE Beja* e entre -6 e 0% para o *CE Évora*.

Quando se aumenta a permanência da cultura no terreno de forma a permitir manter o nível de intersecção da radiação que se verifica atualmente (medida de adaptação NVC) as NR aumentam substancialmente para os dois casos de estudo e para todos os cenários das alterações climáticas, podendo variar entre 10 e 66% para *CE Beja* e entre 13 e 62% para *CE Évora*.

Para a medida de adaptação intensificação da produção (IP), verifica-se um forte aumento das necessidades de rega. Para o período de controlo as NR do milho variaram entre 697 e 743 mm. Verifica-se que, para o cenário B2 na sequência de culturas trigo-milho (T-M) as NR variam entre 1006 e 1066 e para o cenário A2 entre 1040 e 1111 mm. Relembra-se que no caso da sequência de culturas T-M a cultura do trigo é regada visando o conforto hídrico. Os aumentos médios para esta medida de adaptação variaram entre 43 e 52%, tendo os valores de aumento sendo ligeiramente superiores para o *CE Évora* (Fig. 3.4).

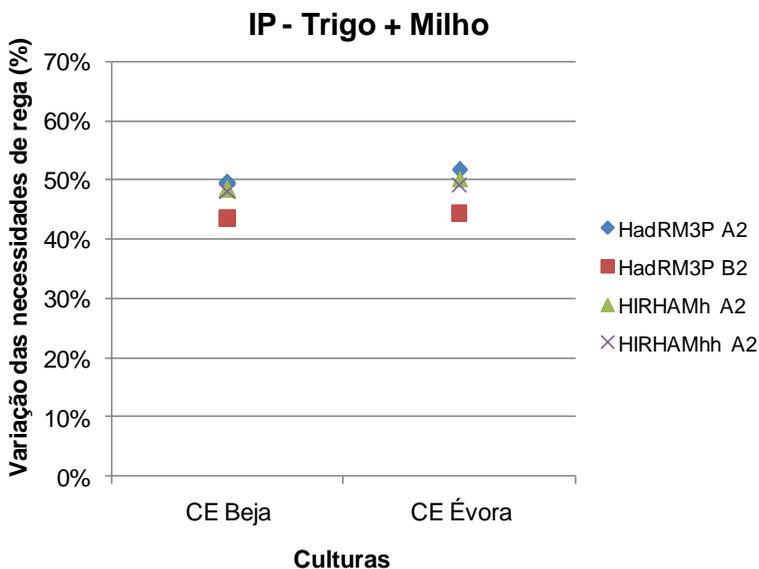


Figura 3.4 - Aumento médio das necessidades de rega para os cenários de alteração climática (2071-2100), relativamente ao período de referência, para a) *CE Beja* e b) *CE Évora* para a medida de adaptação intensificação da produção (IP).

Quando se olha para os resultados tendo em atenção apenas os cenários das alterações climáticas conclui-se que, de um modo geral, todas as simulações com o cenário B2 conduziram a aumentos menores do que as realizadas com os dados do cenário A2, o que era de esperar já que o cenário B2 corresponde a um cenário de desenvolvimento socioeconómico com um menor nível de emissões de CO₂.

Comparando agora os resultados obtidos para os dois casos de estudo, verifica-se que de um modo geral as estimativas dos aumentos das NR tanto para o *CE Beja* (Fig. 3.2) como para o *CE Évora* (Fig. 3.3) foram semelhantes. No entanto, a cultura do girassol apresentou para a medida de adaptação NVC, um valor de aumento das NR maior para o *CE Beja* (entre 23 e 37%) do que para o *CE Évora* (16 a 29%). Esta diferença é realçada na medida VCA onde o aumento das NR para o *CE Beja* (entre 2 e 7%) foi consideravelmente maior do que o aumento das NR para o *CE Évora* (-4 a 0%). O mesmo se verifica com a vinha e o olival que apresentam valores de aumento das NR consideravelmente maiores para o *CE Beja* do que para o *CE Évora*. Esta diferença ocorreu porque a cultura do girassol no *CE Beja* foi cultivada em barros pretos (Bpc), que apresentam um elevado valor para a reserva utilizável (RU), depois de duas culturas de sequeiro que esgotam a reserva de água no solo até ao nível do coeficiente de emurchecimento. No caso da vinha e do olival como são culturas permanentes que são regadas com défice hídrico o valor da reserva de água no solo também apresentará valores mais baixos do que no caso das outras culturas em que a rega é efetuada visando o conforto hídrico. Para as futuras condições de maior secura, a precipitação não será suficiente para repor a reserva de água no solo nos barros pretos à capacidade de campo. Assim, os valores das NR aumentarão mais para o *CE Beja* para compensar o maior défice de água no solo.

Em conclusão realçam-se os seguintes aspetos:

- a) Os aumentos das NR para a medida de adaptação NVC estão em linha com os resultados alcançados com outros estudos realizados para a bacia do Mediterrâneo por Rodriguez Díaz et al. (2007) e Daccache et al. (2010). Estes estudos seguiram a abordagem em que não se ajusta a fenologia das culturas em função dos graus de crescimento dia (GDD), o que corresponde à utilização de novas variedades com ciclos de crescimento mais longos, a fim de minimizar as perdas de produção devido ao encurtamento do ciclo da cultura.
- b) Os resultados das simulações para a medida de adaptação VCA indicam que os valores das NR tendem a manter-se estáveis ou a apresentar uma ligeira redução com o encurtamento do período de crescimento da cultura a compensar a redução da precipitação e o aumento da ET_o. Estes resultados estão de acordo com os resultados alcançados por Lovelli et al. (2010) para a Itália, e Todorović et al. (2012) para os países da ex-Jugoslávia. Estes estudos

utilizaram a abordagem dos graus de crescimento dia (GDD) para ajustar o ciclo das culturas tendo obtido como resultados uma ligeira redução ou a manutenção dos valores atuais das NR.

- c) A manutenção ou a diminuição dos valores das NR para a medida de adaptação VCA poderá sugerir numa primeira análise que, para os cenários futuros de alteração climática, a procura de água para rega não irá aumentar fortemente. No entanto deve ter-se em atenção que a medida de adaptação VCA poderá levar à intensificação da produção pois o encurtamento do ciclo das culturas poderá permitir a realização de mais do que uma cultura por ano, como no caso da sequência de culturas T-M. Se isso acontecer, o aumento das NR será muito elevado. Assim, no caso da intensificação da produção o aumento da procura de água para rega aumenta de uma forma muito expressiva o que poderá resultar numa elevada pressão sobre os recursos hídricos.
- d) Os resultados obtidos para as três medidas de adaptação indicam que os impactes das alterações climáticas nas necessidades de rega são muito dependentes das medidas de adaptação adotadas pelos agricultores. Este resultado confirma as conclusões obtidas por Mo et al. (2013).

3.4.2. Défice hídrico das culturas de sequeiro

Os valores do défice hídrico (DH) das culturas de sequeiro (trigo e cevada) foram calculados com o modelo IrrigRotation. Os valores de DH para o *CE Beja* e para a medida de adaptação NVC aumentou nos cenários de mudanças climáticas para aproximadamente o dobro de seus valores atuais (15-20% para 31-46%), como é visível no Quadro 3.4.

Além disso, observou-se uma redução do coeficiente de variação (CV), o que indica uma redução da variabilidade interanual. O aumento do DH combinado com a redução do CV indica um aumento da severidade e frequência dos anos secos.

Para a medida de adaptação VCA e considerando a cultura de trigo os valores de DH para os cenários de alteração climática foram semelhantes aos obtidos para o período de referência (19-20% *CE Beja*; 38-40% *CE Évora*) tendo variado entre 19 e 26% para o *CE Beja* e entre 39 e 45% para o *CE Évora*. Os valores de DH para a cultura da cevada e para o *CE Beja* aumentaram consideravelmente passando de 15%, no período de referência, para valores entre 26 e 32% quando se consideram os cenários de alteração climática.

Relativamente aos cenários de alteração climática, foram observados valores muito mais elevados de DH para o *CE Évora* do que para o *CE Beja* em ambas as medidas de adaptação. Estes resultados são explicados pelos valores mais baixos

da reserva utilizável (RU) dos solos mediterrâneos pardos de Évora (em contraste com os elevados valores da RU para os barros pretos em Beja) que já hoje são inapropriados para a produção de cereais de sequeiro.

Quadro 3.4 – Médias dos défices hídricos anuais (DH) das culturas de sequeiro, obtidos pelo programa IrrigRotation para o período de controlo (1961-1990) e para os diferentes cenários de alteração climática (2071-2100) considerando as seguintes medidas de adaptação: novas variedades culturais (NVC) e variedades culturais atuais (VCA).

			Controlo	HADRM3P		HADRM3P		HIRAMh		HIRAMhh	
				A2	B2	A2	A2	A2	A2	A2	A2
			1961-90	2071-2100	20171-2100	20171-2100	20171-2100	20171-2100	20171-2100	20171-2100	20171-2100
			DH (%)	DH	DH	DH	DH	DH	DH	DH	DH
Caso de Estudo Beja				NVC	VCA	NVC	VCA	NVC	VCA	NVC	VCA
B-M-T-T	Trigo	Méd	19%	38%	19%	31%	18%	38%	21%	38%	21%
		CV	0.40	0.20	0.47	0.28	0.47	0.30	0.45	0.30	0.45
G-T-C	Trigo	Méd	20%	43%	25%	35%	22%	43%	26%	43%	25%
		CV	0.37	0.20	0.45	0.27	0.49	0.18	0.42	0.18	0.38
G-T-C	Cevada	Méd	15%	46%	32%	37%	26%	40%	28%	40%	28%
		CV	1.23	0.39	0.67	0.51	0.78	0.51	0.73	0.51	0.69
Caso de Estudo Évora											
B-M-T-T	Trigo	Méd	38%	56%	40%	49%	39%	57%	43%	56%	42%
		CV	0.25	0.12	0.22	0.18	0.24	0.20	0.29	0.20	0.3
G-T-C	Trigo	Méd	40%	57%	42%	50%	40%	59%	45%	59%	44%
		CV	0.26	0.11	0.18	0.19	0.24	0.08	0.16	0.08	0.18
G-T-C	Cevada	Méd	23%	46%	31%	41%	31%	44%	30%	42%	29%
		CV	0.34	0.23	0.51	0.26	0.43	0.34	0.53	0.34	0.52

Para os quatro cenários de alteração climática considerados é possível antecipar uma considerável redução da produção nas culturas de sequeiro. Esta redução dever-se-á por um lado aos valores mais elevados de DH para a medida de adaptação NVC e por outro ao encurtamento do ciclo de crescimento das culturas para a medida de adaptação VCA (mesmo considerando que os valores atuais de DH são mantidos inalterados para esta medida de adaptação). Assim, no futuro, antecipa-se que se tornará mais difícil produzir cereais de sequeiro na região do Alentejo, devido a condições cada vez mais desfavoráveis.

Os aumentos médios dos valores de DH para os diferentes cenários de alteração climática são apresentados nas Figuras 3.5 e 3.6, onde se pode observar a gama de valores para os aumentos do DH em cada cultura.

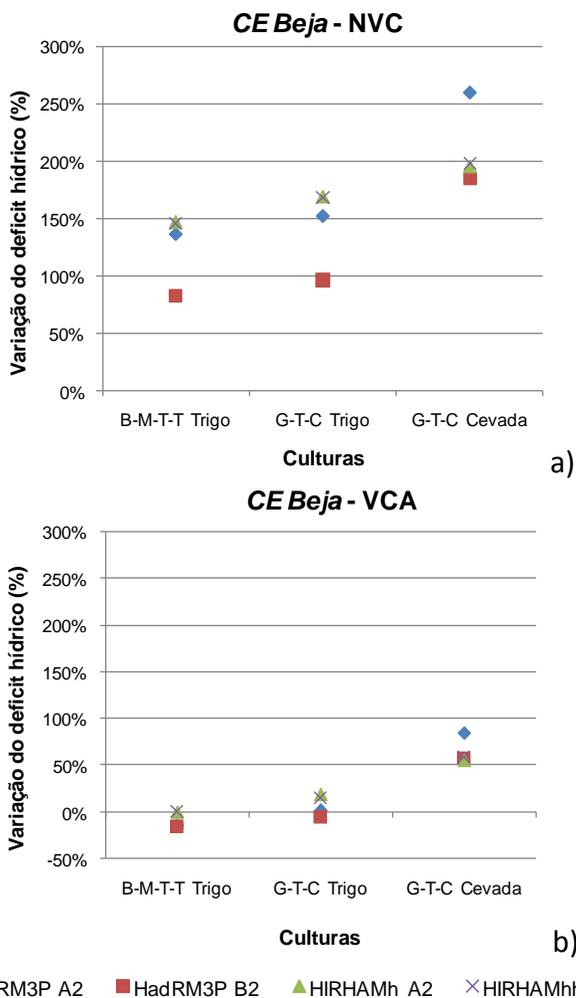


Figura 3.5 – Aumento médio do dífice hídrico para os cenários de alteração climática (2071-2100), relativamente ao período de referência para *CE Beja* considerando as medidas a) novas variedades culturais (NVC) e b) variedades culturais atuais (VCA).

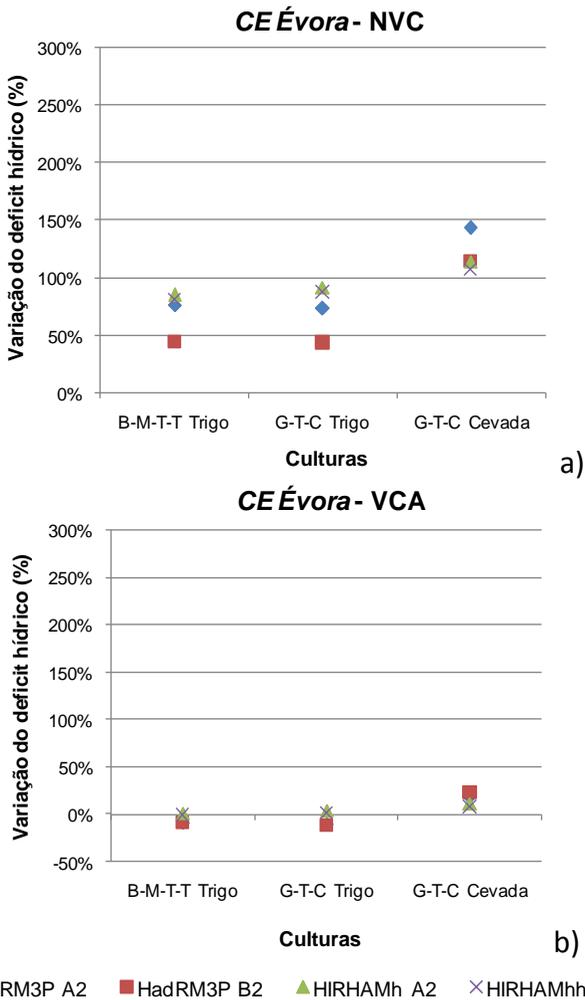


Figura 3.6 – Aumento médio do défice hídrico para os cenários de alteração climática (2071-2100), relativamente ao período de referência para *CE Évora* considerando as medidas a) novas variedades culturais (NVC) e b) variedades culturais atuais (VCA).

As duas medidas de adaptação (VCA e NVC) apresentaram resultados muito diferentes o que realça a incerteza na avaliação dos impactes das mudanças climáticas sobre as necessidades de rega das culturas e sobre os valores de défice hídrico.

Para a medida da adaptação VCA, a gama dos resultados que é apresentado para cada cultura (Fig. 3.5b e 3.6b) é muito menor do que para a medida para adaptação NVC (Fig. 3.5a e 3.6a). Este resultado justifica-se porque na medida de

adaptação VCA os ciclos das culturas são ajustados em função dos graus de crescimento dia (GDD). Assim, quando a temperatura do ar aumenta o ciclo da cultura é encurtado compensando o aumento das necessidades hídricas das culturas.

Os maiores aumentos de DH ocorreram no *CE Beja*, em que os solos são os barros pretos, para ambas as medidas de adaptação, especialmente para a cultura da cevada (Fig. 3.5). Em relação aos solos mediterrâneos pardos em Évora, um menor aumento percentual reflete o facto de as culturas atualmente já se encontrarem submetidas a elevados valores de DH pelo que, em percentagem, o aumento do DH será menor.

3.4.3. Balanço hídrico ao nível da rotação de culturas

Após a avaliação das necessidades de rega e do défice hídrico das culturas analisou-se o balanço hídrico ao nível da rotação de culturas com o objetivo de avaliar o modo como a rotação de culturas pode contribuir para a gestão da água no solo e da sua adequação como medida de adaptação. Esta análise incide sobre a cultura do trigo comparando-se os resultados obtidos para esta cultura inserida na rotação de regadio B-M-T-T (Fig. 3.7) com os resultados alcançados para o trigo produzido em regime de monocultura (Fig. 3.8), para o período de controlo e para o cenário A2 do modelo HadRM3P. Para permitir esta comparação realizaram-se mais duas simulações para a monocultura do trigo (*CE Beja*) para cada um dos cenários referidos (Rolim, 2013).

Relativamente ao défice hídrico constata-se que, quando se considera o trigo em monocultura, o seu valor aumenta de 19% (134 mm) para a rotação B-M-T-T relativa ao período de controlo para 30% (211 mm) para a monocultura do trigo. Para o cenário A2 do modelo HadRM3P verifica-se que o défice hídrico é de 38% (317 mm) para B-M-T-T e de 58% (476 mm) para a monocultura. Verifica-se, assim que o valor do défice hídrico do trigo na rotação (38%) para o cenário A2 (HadRM3P) é apenas ligeiramente superior ao do trigo monocultura para o período de controlo (30%) o que demonstra a utilidade da utilização das rotações de cultura como uma medida de adaptação para minimizar os impactes negativos das alterações climáticas.

Na Figura 3.7 apresentam-se as curvas da reserva de água no solo simuladas pelo modelo IrrigRotation para a rotação B-M-T-T, para o caso de estudo de Beja (solo Bpc) e para o período de controlo e cenário A2 do modelo HadRM3P. Da observação desta figura constata-se que a rotação de culturas permite a acumulação de água no solo ao longo da rotação. Deste modo, na altura da sementeira do trigo o solo apresenta-se muito próximo da capacidade campo o que permite que, na grande maioria dos anos, a cultura se desenvolva durante

uma parte significativa do seu ciclo em conforto hídrico, tanto para período de controlo como para o cenário A2.

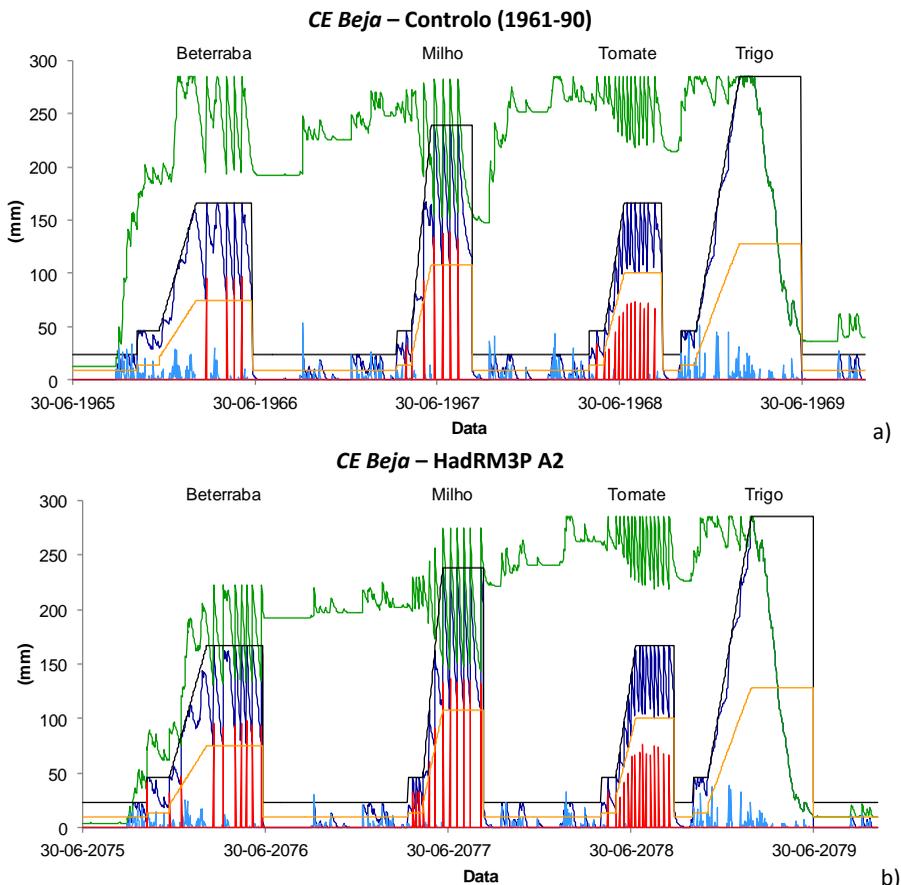


Figura 3.7 – Curvas simuladas do conteúdo de água no solo, para a região de Beja, considerando o solo Bpc e a rotação B-M-T-T, onde (—) é a água disponível na zona radicular, (—) é a água disponível no solo para a raiz mais profunda da rotação (Z_{rmax_rot}). A linha (—) representa RU e (—) o limite da reserva facilmente utilizável (LRFU). Os picos correspondem a episódios de (—) precipitação e de (—) rega, a) para o período de controlo (1961-90) e b) e para o cenário A2 (2071-2100) do modelo HadRM3P (Rolim, 2013).

Na Figura 3.8, representa-se a cultura do trigo produzida em monocultura, para o CE Beja para o período de controlo e para o cenário de alteração climática A2 do modelo HadRM3P.

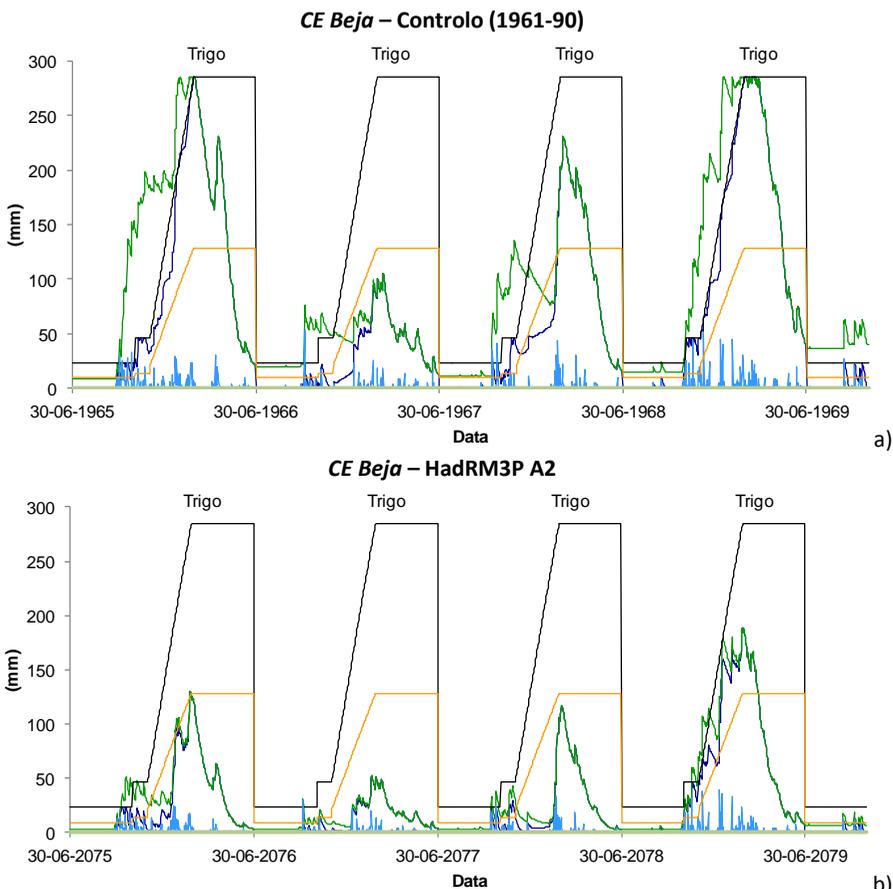


Figura 3.8 – Curvas simuladas do conteúdo de água no solo, para a região de Beja e considerando o solo Bpc e a cultura do trigo em monocultura, onde (—) é a água disponível na zona radicular, (—) é a água disponível no solo para a raiz mais profunda da rotação (Zrmax_rot). A linha (—) representa RU e (—) o limite da reserva facilmente utilizável (LRFU). Os picos correspondem a episódios de (—) precipitação e de (—) rega, a) para o período de controlo (1961-90) e b) e para o cenário A2 (2071-2100) do modelo HadRM3P (Rolim, 2013).

Na monocultura do trigo verifica-se, para o período de controlo, a ocorrência de diversos anos em que a cultura está sujeita a valores muito elevados de DH, de que é exemplo a campanha de 1966-67 representada na Figura 3.8a, onde se constata uma elevada quebra de produção para esse ano. Verifica-se assim que, mesmo para as condições atuais, a produção do trigo de sequeiro em monocultura

apresenta um risco importante de quebras de produção, mesmo no caso de se considerarem os melhores solos da região do Alentejo (*CE Beja*).

Para o cenário A2 (Fig. 3.8b) a figura mostra que esta situação se agrava de uma forma muito acentuada verificando-se que na maioria dos anos a linha da reserva de água no solo se situa quase sempre abaixo do limite da reserva facilmente utilizável, indicando uma situação de grande carência hídrica, com uma elevada probabilidade de perda da cultura. Assim para os cenários de alteração climática verifica-se que a produção da cultura do trigo em monocultura em regime de sequeiro se torna impraticável.

Os resultados mostram que, para os solos com um elevado valor da reserva utilizável, como no caso dos barros preto (Bpc) em Beja, as rotações de culturas conseguem reduzir o DH das culturas de sequeiro, cultivadas após uma cultura de regadio. Para solos com um baixo valor da reserva utilizável e uma menor profundidade, como é o caso dos solos do *CE Évora*, não foi observado o efeito benéfico das rotações de culturas na redução do défice hídrico das culturas de sequeiro, pelas razões já anteriormente referidas.

3.5. Conclusões

Os resultados obtidos para os quatro cenários de alteração climática considerados mostram um substancial aumento das necessidades de rega para a medida de adaptação novas variedades culturais (NVC). Para a medida de adaptação variedades culturais atuais (VCA) as necessidades de rega mantiveram-se inalteradas ou sofreram uma ligeira redução. Verifica-se um forte aumento das necessidades de rega para a medida de adaptação intensificação da produção (IP). Os resultados obtidos mostram que os impactes das alterações climáticas nas necessidades de rega das culturas apresentam um considerável nível de incerteza que resulta dos diferentes modelos climáticos e cenários considerados. Verifica-se, também, que os resultados são muito dependentes das medidas de adaptação consideradas.

Os valores do DH estimados para as culturas de sequeiro (trigo e cevada), para a medida de adaptação NCV, aumentaram para os quatro cenários de alteração climática considerados. Este aumento nos valores de défice hídrico resulta do efeito combinado de uma redução da precipitação e de um aumento da ET_c durante o ciclo da cultura que implicará uma importante redução na produção das culturas.

Os valores obtidos para o défice hídrico, relativos à medida de VCA, permaneceram sensivelmente inalterados quando se compara o cenário de referência com os cenários de alteração climática considerados. Apesar dos

valores de déficit hídrico não aumentarem, o encurtamento do ciclo de crescimento da cultura levará a uma redução da produção. Assim, a produção de cereais de sequeiro na região do Alentejo, enfrentará no futuro um agravamento das condições devido às alterações climáticas.

As rotações de culturas mostraram a capacidade de gerir a água armazenada no solo, especialmente no caso dos solos com uma elevada reserva utilizável contribuindo para a redução das necessidades de rega das culturas de regadio e do déficit hídrico das culturas de sequeiro.

Os resultados obtidos com este estudo permitem antecipar que, para manter os atuais níveis de produção, haverá um aumento da procura de água para rega. Alguns estudos realizados para Portugal (Cunha et al., 2002; Miranda et al., 2002; Mourato, 2009) indicam que os recursos hídricos se tornarão menos disponíveis no sul do país para os cenários futuros de alteração climática.

Assim, o aumento das NR poderá conduzir a uma redução das áreas regadas, a mudanças no padrão de culturas (para ajustar a procura de água às disponibilidades em recursos hídricos para a rega), e a uma redução na produção das culturas (devido ao stress hídrico ou ao encurtamento do ciclo das culturas).

Em todos os casos, para os cenários de alteração climática, assistir-se-á a uma redução na produtividade da água (kg/m^3) devido ao aumento das necessidades de rega mesmo considerando que as produções das culturas se mantenham inalteradas.

Referências bibliográficas

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, Italy, 300 pp.
- Cardoso, J.V.J.C., 1965. *Os solos de Portugal. Sua classificação, caracterização e génese, 1- A Sul do rio Tejo*. Secretaria de estado da agricultura, direcção geral dos serviços agrícolas, Lisboa. 310 pp.
- Daccache, A., Weatherhead, K., Lamaddalena, N., 2010. Climate change and the performance of pressurized irrigation water distribution networks under Mediterranean conditions: Impacts and adaptations. *Outlook on Agriculture* **39**(4): 277–283.
- Döll, P., 2002. Impact of climate change and variability on irrigation requirements: A global perspective. *Climatic Change* **54**: 269–293.
- Easterling, W.E., Aggarwal, P.K., Batima, P., Brander, K.M., Erda, L., Howden, S.M., Kirilenko, A., Morton, J., Soussana, J-F., Schmidhuber, J., Tubiello, F.N., 2007. *Food, fibre and forest products. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation*

- and Vulnerability*. Contribution of working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, ed.) Cambridge University Press, Cambridge, UK, 273-313.
- Hunsaker, D.J., Kimball, B.A., Pinter, Jr P.J., Wall, G.W., LaMorte, R.L., Adamsen, F.J., Leavitt, S.W., Thompson, T.L., Matthias, A.D, Brooks, T.J., 2000. CO₂ enrichment and soil nitrogen effects on wheat evapotranspiration and water use efficiency. *Agricultural and forest meteorology* **104**: 85-105.
- Lovelli, S., Perniola, M., DiTommaso, T., Ventrella, D., Moriondo, M., Amato, M., 2010. Effects of rising atmospheric CO₂ on crop evapotranspiration in a Mediterranean area. *Agricultural Water Management* **97**: 1287–1292.
- Mo, X., Guo, R., Liu, S., Lin, Z., Hu, S., 2013. Impacts of climate change on crop evapotranspiration with ensemble GCM projections in the north china plain. *ClimaticChange* **120**: 299-312.
- Rodriguez Díaz, J.A., Weatherhead, E.K., Knox, J.W., Camacho, E., 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Reg. Environ. Chang.* **7**: 149-159.
- Rolim, J., Teixeira, J., 2008. IrrigRotation, a time continuous soil water balance model. *WSEAS transactions on environment and development* **7(4)**, 577-587.
- Rolim, J., Catalão, J. & Teixeira, J.L., 2011. The influence of different methods of interpolating spatial meteorological data on calculated irrigation requirements. *Applied Engineering in Agriculture* **27(6)**: 979-989.
- Rolim, J., 2013. Metodologias para a avaliação dos impactes das mudanças climáticas na agricultura de regadio e nos sistemas de rega. Tese de Doutoramento em Engenharia dos Biosistemas, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa. 322 pp.
- Todorović, M., Tanasijević, L., Pizzigalli, C., Lionello, P. & Pereira, L.S., 2012. Climate change and its impact on agricultural water requirements in the countries of former Yugoslavia. In: M. Morell (ed.). BALWOIS 2012 Proceedings, International Conference on water, climate and environment, 28 May – 2 June 2012, Ohrid, Republic of Macedonia.
- Turrall, H. & Faurés, J.B.J-M., 2011. *Climate change, water and food security*. FAO Water Reports 36, FAO, Rome, Italy. 174 pp.

Capítulo 4

IMPACTE DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NO PROJETO DE REGA

João Rolim¹ e Celestina Pedras²

¹*Departamento de Ciências e Engenharia de Biosistemas (DCEB), Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa*

²*Faculdade de Engenharia de Recursos Naturais, Universidade do Algarve*

Introdução

Para a avaliação dos impactes das alterações climáticas nos sistemas de rega consideraram-se os sistemas de rega de canhão com enrolador e os sistemas de microrrega. Estes dois tipos de sistemas correspondem a duas situações bem diferenciadas quanto aos sistemas de rega pressurizados, o que permitirá obter um intervalo de valores relativos aos impactes das alterações climáticas sobre o dimensionamento e operação dos sistemas de rega.

Os sistemas de microrrega, que correspondem à situação mais vantajosa, caracterizam-se por uma elevada eficiência na aplicação da água de rega às culturas e pelos menores consumos de energia. Num contexto de alterações climáticas uma das medidas de adaptação a adotar será o aumento da eficiência dos sistemas de rega, como forma de diminuir os consumos de água para a rega.

Em oposição os sistemas de rega de canhão com enrolador representam a situação mais adversa pois estes sistemas costumam apresentar os piores indicadores de desempenho (baixas eficiências) e elevados consumos de energia. No entanto os canhões com enrolador poderão constituir uma ferramenta de adaptação às alterações climáticas muito interessante uma vez que devido à sua mobilidade são especialmente indicados para regas de complemento e/ou socorro.

A avaliação dos impactes sobre os sistemas de rega foi realizada com o recurso aos modelos de projeto e avaliação dos sistemas de rega Enrolador (Rolim, 2013), para a rega com canhão com enrolador, e Mirrig (Pedras e tal., 2009), para a microrrega. Estes modelos utilizam como dados de entrada as necessidades de rega anuais e relativas ao período de ponta, calculadas com o modelo de simulação do balanço hídrico IrrigRotation (vd. capítulo 3), para cada um dos cenários climáticos. Com base nos valores das necessidades de rega, das

características das parcelas, dos solos e das culturas estes modelos dimensionam os sistemas de rega, selecionando das suas bases de dados os equipamentos que mais se aproximam dos critérios de dimensionamento.

Os resultados dos modelos permitem caracterizar os impactes das alterações climáticas sobre os sistemas de rega, produzindo como resultados os caudais de projeto, os diâmetros das condutas, a pressão à entrada dos sistemas, etc.

O projeto de rega é realizado em função das necessidades de rega anuais (NR) e das necessidades de rega para o período de ponta (NRp), que são os critérios de base de um projeto de rega (Teixeira, 1989). As NR correspondem ao somatório das várias dotações de rega aplicadas à cultura ao longo de toda a campanha de rega (Raposo, 1996). As NRp são as necessidades de rega que ocorrem no período de maiores exigências hídricas das culturas, o qual corresponde à fase mais crítica da campanha de rega (Raposo, 1996; James, 1998). É com base nas NRp que se define o caudal de projeto utilizado no dimensionamento dos sistemas de rega (Raposo, 1996; James, 1998).

As necessidades de rega anuais (NR) influenciam o tempo anual de operação do sistema e os correspondentes custos de exploração. As necessidades de rega para o período de ponta (NRp) determinam os diâmetros das tubagens e capacidade dos sistemas de bombagem. Os valores das NR e das NRp variam de ano para ano em função da variabilidade climática, sendo necessário associar-lhes uma determinada probabilidade de não excedência. Assim, é necessário realizar uma análise frequencial, relativa a uma série de anos, sendo recomendado um mínimo de 30 anos (Teixeira, 1989; Raposo, 1996; James, 1998).

Na aplicação que se apresenta, apenas se considerou a medida de adaptação novas variedades culturais (NVC) descrita no capítulo 2, uma vez que esta medida considera ciclos de desenvolvimento das culturas mais longos, que contêm os meses de Julho e Agosto. Estes meses correspondem ao período do ano com as maiores necessidades hídricas das culturas, em que a radiação solar atinge os valores máximos. Obtêm-se assim as condições de projeto mais desfavoráveis.

4.1. Canhão com enrolador

4.1.1. Características gerais dos enroladores

Os sistemas de rega com enrolador consistem na utilização de um aspersor de grande dimensão, designado por canhão (Fig. 4.1), que aplica a dotação de rega à medida que se desloca ao longo da parcela. Os canhões são aspersores rotativos de grande tamanho que trabalham normalmente a pressões entre 400 e 1000 kPa (4 – 10 bar), com caudais de 20 a 170 m³/h e podem regar bandas com mais de 100 m de largura e 500 m de comprimento (Tarjuelo, 2005). Possuem geralmente

uma pluviometria elevada que pode variar entre 5 e 35 mm/h (Granier, 2003; Pereira, 2004; Tarjuelo, 2005; Tiercelin e Granier, 2006).

Os canhões são normalmente montados num carro ou patim com rodas que se desloca ao longo da parcela enquanto rega, ao ser puxado pelo próprio tubo flexível de polietileno pelo qual recebe água (Fig. 4.1). O tubo flexível é enrolado num tambor que é acionado pelo fluxo de água fornecido ao canhão, através de um mecanismo de turbina ou de fole hidráulico (Pereira, 2004; Tarjuelo, 2005).



Figura 4.1 – Canhão puxado por enrolador.

Um sistema de rega com enrolador é constituído pelas seguintes componentes principais: estação de bombagem, conduta principal, tubo flexível de polietileno, enrolador e o canhão. Na Figura 4.2 apresenta-se uma disposição típica destes sistemas de rega (Tarjuelo, 2005).

Os canhões permitem regar uma grande diversidade de culturas, apesar de o sistema não ser recomendado em culturas mais frágeis. Estes sistemas apresentam problemas em solos de textura fina, ou com deficiente estrutura e em geral em solos com baixas taxas de infiltração. As culturas mais indicadas são as culturas altas ou muito densas que proporcionam uma elevada cobertura do solo, sendo especialmente indicados para regas de complemento ou de socorro. (Raposo, 1996; Tarjuelo, 2005).

O principal inconveniente dos enroladores é a sua elevada pressão de trabalho, 400 a 1000 kPa, que origina elevados custos de funcionamento e o grande tamanho das gotas produzidas, que pode provocar erosão do solo e danificar as plantas (Raposo, 1996; Tarjuelo, 2005). O seu desempenho é muito afetado pelo vento que provoca uma distribuição irregular da água (Granier et al., 2003; Tiercelin e Granier, 2006). As suas desvantagens são compensadas pelo seu baixo

custo de investimento por unidade de área regada (ha) e pela escassa necessidade de mão-de-obra (Tarjuelo, 2005; Tiercelin e Granier, 2006).

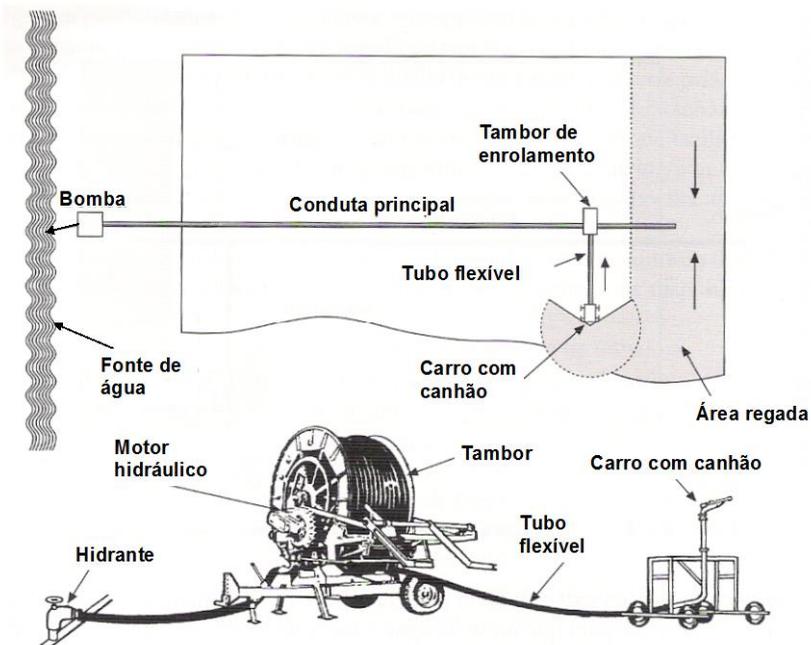


Figura 4.2 - Esquema típico de um sistema de rega com enrolador (Tarjuelo, 2005).

Na região do Alentejo, os cenários de alteração climática apontam para uma redução da precipitação associada com o aumento da temperatura (vd. 2.2). Em consequência as culturas de Outono-Inverno de sequeiro, tais como o trigo, necessitarão de regas de complemento ou de socorro em anos mais secos. A utilização de canhões de rega poderá constituir uma importante ferramenta de adaptação, permitindo com um investimento relativamente baixo reduzir os anos em que as culturas de sequeiro falham devido ao défice hídrico, regularizando as produções e diminuindo o risco climático (Rolim, 2013).

4.1.2. Aplicação informática Enrolador

O modelo Enrolador (Rolim, 2013) foi implementado com o objetivo de realizar o dimensionamento de sistemas de rega com enrolador, sendo o dimensionamento realizado de acordo com a metodologia proposta por CEMAGREF (1992) e Tarjuelo (2005). A aplicação informática Enrolador foi desenvolvida em *Visual Basic 2005*, sendo composta por uma interface gráfica e por três módulos de cálculo: dimensionamento, simulação da pluviometria e avaliação de desempenho.

A aplicação Enrolador seleciona automaticamente o conjunto canhão, tubo flexível e enrolador, e opcionalmente a conduta principal, que mais se aproxima dos critérios de projeto. Como resultado do dimensionamento é gerado um ficheiro contendo o sistema selecionado e os seus parâmetros de funcionamento. Esta aplicação realiza ainda a simulação do funcionamento dos equipamentos dimensionados, simulando o perfil pluviométrico do canhão, e efetua a avaliação do desempenho tanto para os sistemas de rega em projeto como para sistemas em operação com base em dados das avaliações de campo (Rolim, 2013).

4.1.3. Dimensionamento dos canhões de rega com enrolador

4.1.3.1. Probabilidades de não excedência das necessidades de rega

São apresentados no Quadro 4.1 os valores das necessidades de rega para o período de ponta (NRp) e das necessidades de rega anuais (NR), para as probabilidades de não excedência de 75%, 80% e 90%, que correspondem aos valores normalmente adoptados no projeto de rega (Rolim, 2013).

Da análise do Quadro 4.1 verifica-se que ambos os parâmetros, NR e NRp, aumentam para todos os cenários de alterações climáticas, com o cenário A2 a apresentar valores mais elevados do que cenário B2 (HadRM3P). Os valores do Quadro 4.1 mostram que os impactes das alterações climáticas são consideravelmente maiores sobre os volumes de NR do que sobre as NRp.

4.1.3.2. Dimensionamento dos canhões

O modelo Enrolador foi utilizado para dimensionar os sistemas de rega com canhão para cada uma das simulações representadas na Figura 3.1 da secção 3.3. Estas simulações correspondem às diferentes combinações de cenário climático, rotação cultural e caso de estudo. Com base nos valores das necessidades de rega para o período de ponta (NRp), calculadas para cada uma dessas simulações através do modelo IrrigRotation (vd. Secção 3.2) dimensionaram-se os equipamentos de canhão com enrolador (Rolim, 2013).

Quadro 4.1 – Valores das necessidades de rega anuais (NR) e das necessidades de rega para o período de ponta (NRp) para as probabilidades de não excedência de 75%, 80%, 90%, para o período de controlo e para os cenários de alteração climática (Rolim, 2013)

Rotação	Modelo	Cenário	NRp (mm/d)			NR (mm)		
			Prob. não excedência			Prob. não excedência		
			75%	80%	90%	75%	80%	90%
<i>CE Beja</i>								
B-M-T-T	Est. Met.	Controlo	9.2	9.3	9.3	752	774	795
B-M-T-T	HadRM3P	A2	10.4	10.6	11.7	907	937	1001
B-M-T-T	HadRM3P	B2	10.0	10.4	11.0	908	924	957
B-M-T-T	HIRHAMh	A2	11.0	11.2	11.9	947	957	1027
B-M-T-T	HIRHAMhh	A2	10.9	11.1	11.3	944	948	1003
G-T-C	Est. Met.	Controlo	8.8	8.9	8.9	793	818	828
G-T-C	HadRM3P	A2	9.9	10.1	11.2	1078	1106	1125
G-T-C	HadRM3P	B2	9.5	10.0	10.5	986	993	1045
G-T-C	HIRHAMh	A2	10.5	10.7	11.4	1148	1175	1263
G-T-C	HIRHAMhh	A2	10.4	10.6	10.8	1165	1171	1214
<i>CE Évora</i>								
B-M-T-T	Est. Met.	Controlo	8.6	8.8	9.0	687	699	729
B-M-T-T	HadRM3P	A2	10.3	10.5	11.1	837	848	912
B-M-T-T	HadRM3P	B2	9.8	9.9	10.6	798	824	849
B-M-T-T	HIRHAMh	A2	10.6	10.6	11.3	877	884	891
B-M-T-T	HIRHAMhh	A2	10.3	10.4	11.0	860	877	883
G-T-C	Est. Met.	Controlo	8.2	8.4	8.6	685	715	729
G-T-C	HadRM3P	A2	9.9	10.0	10.6	859	895	898
G-T-C	HadRM3P	B2	9.3	9.4	10.1	842	863	898
G-T-C	HIRHAMh	A2	10.1	10.2	10.8	935	986	1011
G-T-C	HIRHAMhh	A2	9.8	9.9	10.6	900	958	964

4.1.3.2.1. Dados de base

Os dados de base utilizados no dimensionamento dos sistemas de rega de canhão para os diferentes cenários climáticos dizem respeito a dados da parcela, do solo, da cultura, da velocidade do vento, dados da rega e dos equipamentos.

Dados da parcela

Considerou-se uma parcela hipotética com 12 ha, que é igual para todas as simulações. A Figura 4.3 apresenta uma representação esquemática da parcela, que possui um comprimento de 400m, uma largura de 300 m, um declive de 2 % segundo o maior comprimento e um declive nulo segundo o menor comprimento.

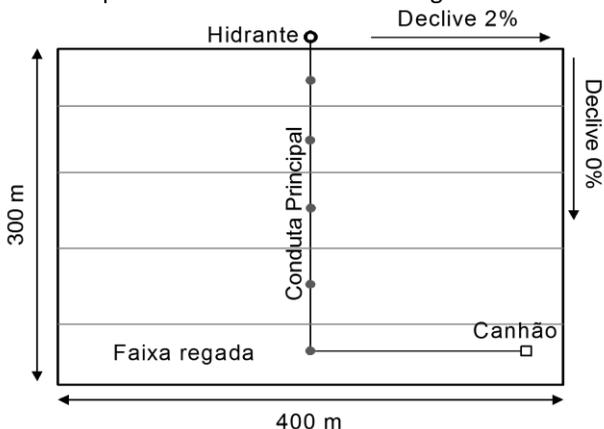


Figura 4.3 - Representação esquemática da parcela hipotética utilizada no dimensionamento dos sistemas de rega de canhão (Rolim, 2013).

Dados do solo

Os solos considerados, neste estudo, foram a família de solos Barros Pretos (Bpc) e os solos Mediterrâneos Pardos (Pmg), cujos parâmetros se apresentam no Quadro 4.2 (Cardoso, 1965).

O modelo Enrolador não permite dimensionar sistemas de rega cuja pluviometria (mm/h) seja superior à taxa de infiltração do solo coberto. Assim, para o solo Bpc, alterou-se a classe de textura de Argiloso para Franco, pois a taxa de infiltração deste último permite o dimensionamento do sistema de rega com canhão. Optou-se por realizar esta alteração apenas para se poderem comparar os equipamentos selecionados para estes dois casos de estudo, mas a nível de projeto de rega não se poderão utilizar canhões de rega nos solos Barros Pretos.

Quadro 4.2 – Parâmetros dos solos utilizados no modelo Enrolador

Caso de estudo	Solo	Capacidade utilizável, U (mm/cm)	Taxa de infiltração (mm/h) ^a	Textura
CE Beja	Barros Pretos (Bpc)	2.4	Solo nu: 2 Solo coberto: 5	Argiloso
CE Évora	Mediterrâneos Pardos (Pmg)	1.7	Solo nu: 18 Solo coberto: 36	Franco-Arenoso

^a valores retirados de Tarjuelo (2005)

Dados das necessidades de rega relativas ao período de ponta

As necessidades de rega para o período de ponta (NRp) foram apresentadas no Quadro 4.1. Para o projeto de rega selecionaram-se as NRp para uma probabilidade de não excedência de 75%.

Dados da cultura, velocidade do vento e outros parâmetros

No Quadro 4.3 apresentam-se os dados relativos à velocidade média do vento (m/s), profundidade radicular Z_r (m), eficiência de aplicação (E_a), défice permitido em termos de gestão (MAD) e tempo útil diário de rega (Trd).

Quadro 4.3 - Dados de base utilizados no dimensionamento dos sistemas de rega com canhão (Rolim, 2013)

Rotação	Cenário	Vel. Med. Vento (m/s)	Prof. Raiz Z_r (m)	Ef. Aplic. E_a	Défice permitido MAD	Tempo rega Trd (h/dia)
<i>CE Beja</i>						
B-M-T-T	Controlo	3.2	0.45	0.75	0.55	22
B-M-T-T	HadRM3P A2	3.2	0.43	0.75	0.55	22
B-M-T-T	HadRM3P B2	3.1	0.49	0.75	0.55	22
B-M-T-T	HiRHAMh A2	3.1	0.45	0.75	0.55	22
B-M-T-T	HiRHAMhh A2	3.1	0.45	0.75	0.55	22
G-T-C	Controlo	3.2	0.36	0.75	0.55	22
G-T-C	HadRM3P A2	3.2	0.48	0.75	0.55	22
G-T-C	HadRM3P B2	3.1	0.45	0.75	0.55	22
G-T-C	HiRHAMh A2	3.1	0.43	0.75	0.55	22
G-T-C	HiRHAMhh A2	3.1	0.43	0.75	0.55	22
<i>CE Évora</i>						
B-M-T-T	Controlo	2.9	0.5	0.75	0.55	22
B-M-T-T	HadRM3P A2	2.9	0.6	0.75	0.55	22
B-M-T-T	HadRM3P B2	2.9	0.6	0.75	0.55	22
B-M-T-T	HiRHAMh A2	2.8	0.6	0.75	0.55	22
B-M-T-T	HiRHAMhh A2	2.8	0.6	0.75	0.55	22
G-T-C	Controlo	2.9	0.57	0.75	0.55	22
G-T-C	HadRM3P A2	2.9	0.6	0.75	0.55	22
G-T-C	HadRM3P B2	2.9	0.6	0.75	0.55	22
G-T-C	HiRHAMh A2	2.8	0.6	0.75	0.55	22
G-T-C	HiRHAMhh A2	2.8	0.6	0.75	0.55	22

4.1.3.2.2. Resultados e discussão

Dimensionamento dos sistemas de rega com canhão com enrolador

O modelo Enrolador produziu como resultados, para cada uma das simulações realizadas, uma listagem com os equipamentos selecionados, assim como os seus parâmetros de funcionamento e as suas regulações.

Os canhões selecionados pelo modelo Enrolador para cada uma das simulações consideradas são apresentados no Quadro 4.4. Observa-se que os caudais debitados pelos canhões aumentam para todos os cenários de alteração climática, com o cenário A2 a apresentar os valores mais elevados de aumento. Verifica-se igualmente que o bocal dos canhões é na maioria dos cenários de alteração climática maior do que para o período de controlo.

Quadro 4.4 - Canhão selecionado pelo modelo Enrolador para cada simulação (Rolim, 2013)

Rotação	Cenário	Modelo canhão	Caudal (m³/h)	Pressão (kPa)	Alcance (m)	Bocal (mm)
<i>CE Beja</i>						
B-M-T-T	Controlo	Twin140	70.6	550	55.4	28
	HadRM3P A2	Twin160	82.9	600	62.5	30
	HadRM3P B2	Twin140	73.8	600	57.3	28
	HiRHAMh A2	Twin160	82.9	600	62.5	30
	HiRHAMhh A2	Twin160	82.9	600	62.5	30
G-T-C	Controlo	Twin160	66.73	550	58.5	27.5
	HadRM3P A2	Twin140	73.8	600	57.3	28
	HadRM3P B2	Twin140	70.6	550	55.4	28
	HiRHAMh A2	Twin160	82.9	600	62.5	30
	HiRHAMhh A2	Twin160	82.9	600	62.5	30
<i>CE Évora</i>						
B-M-T-T	Controlo	Twin160	66.73	550	58.5	27.5
	HadRM3P A2	Twin160	82.9	600	62.5	30
	HadRM3P B2	Twin140	73.8	600	57.3	28
	HiRHAMh A2	Twin160	82.9	600	62.5	30
	HiRHAMhh A2	Twin160	82.9	600	62.5	30
G-T-C	Controlo	Twin140	60.9	550	53.3	26
	HadRM3P A2	Twin140	73.8	600	57.3	28
	HadRM3P B2	Twin140	70.6	550	55.4	28
	HiRHAMh A2	Twin140	73.8	600	57.3	28
	HiRHAMhh A2	Twin140	73.8	600	57.3	28

Na Figura 4.4 são apresentadas as percentagens de aumento dos caudais de projeto para os cenários de alteração climática. Pode-se observar um aumento no caudal de projeto entre 5% e 24% para *CE Beja* e entre 11% a 24% para para *CE Évora* (Fig. 4.4). Considerando ambas os casos de estudo, verifica-se que o cenário B2 apresenta os valores mais baixos de aumento do caudal de projeto que variam entre 5% e 16%, enquanto os vários cenários A2 apresentam os valores mais altos de aumento que variam entre 11% e 24%.

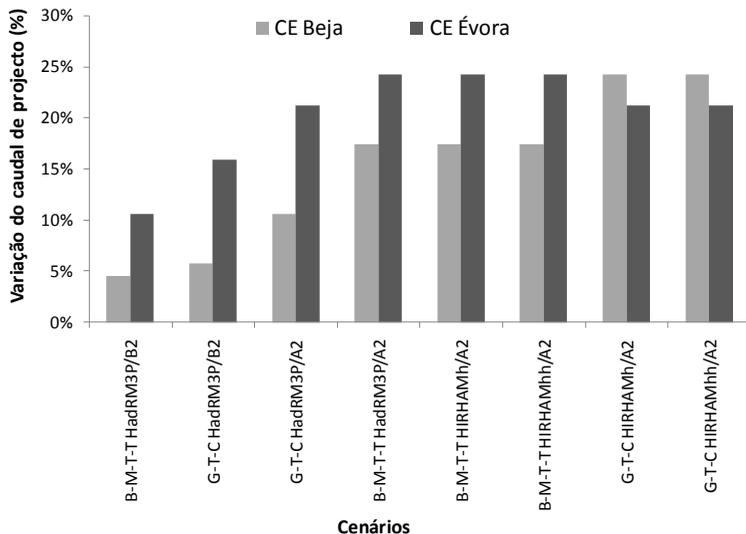


Figura 4.4 - Percentagem de variação do caudal de projeto, para cada um dos cenários de alteração climática (Rolim, 2013).

Os enroladores e condutas principais seleccionados para cada uma das simulações realizadas são listados Quadro 4.5.

Verifica-se que os menores diâmetros do tubo flexível correspondem ao cenário de controlo (100 mm). O cenário B2 (HadRM3P) apresenta metade das simulações com o diâmetro de 100 mm e a outra metade com 110 mm. Para o cenário A2 todas as simulações apresentam um diâmetro do tubo flexível de 110 mm. Quanto à pressão necessária à entrada do enrolador verifica-se que os valores são relativamente semelhantes entre todos os cenários.

Relativamente aos valores dos diâmetros das condutas principais em alumínio (vd. Fig. 4.3), verifica-se que para todas as simulações relativas aos cenários de controlo e B2 foi seleccionada a conduta de 127 mm (5"). Para o cenário A2 foram seleccionadas condutas de 127 mm (5") e de 152.4 mm (6"). Apesar de para o cenário A2 se verificar uma tendência de aumento dos diâmetros das condutas principais, o efeito dos cenários climáticos não é claro, uma vez que para um

grande número de cenários os valores dos diâmetros das condutas permanecem inalterados. A nível da pressão necessária no hidrante não se verificou uma diferenciação entre os cenários. Os resultados obtidos para estes dois parâmetros são influenciados simultaneamente pelos aumentos no caudal de projeto e pelo esquema do sistema de rega, nomeadamente quanto ao número de faixas regadas o que torna mais difícil isolar os efeitos das alterações climáticas.

Quadro 4.5 - Enrolador e conduta principal selecionada pelo modelo Enrolador para cada uma das simulações (Rolim, 2013)

Rotação	Cenário	Diâm. Tubo (mm)	Comp. tubo (m)	Pressão enrol. (kPa)	Diam. conduta (mm)	Comp. conduta (m)	Pressão hidrante (kPa)
<i>CE Beja</i>							
	Controlo	100	210	900	127	366	982
	HadRM3P A2	110	200	905	152.4	360	950
B-M-T-T	HadRM3P B2	110	200	877	127	360	964
	HiRHAMh A2	110	200	905	152.4	360	950
	HiRHAMhh A2	110	200	905	152.4	360	950
	Controlo	100	210	880	127	360	953
	HadRM3P A2	110	200	877	127	360	964
G-T-C	HadRM3P B2	100	210	900	127	366	982
	HiRHAMh A2	110	200	905	152.4	360	950
	HiRHAMhh A2	110	200	905	152.4	360	950
<i>CE Évora</i>							
	Controlo	100	210	880	127	366	954
	HadRM3P A2	110	200	905	152.4	360	950
B-M-T-T	HadRM3P B2	110	200	877	127	360	964
	HiRHAMh A2	110	200	905	152.4	360	950
	HiRHAMhh A2	110	200	905	152.4	360	950
	Controlo	100	210	853	127	360	914
	HadRM3P A2	110	200	877	127	360	964
G-T-C	HadRM3P B2	100	210	900	127	360	980
	HiRHAMh A2	110	200	877	127	360	964
	HiRHAMhh A2	110	200	877	127	360	964

4.1.4. Conclusões

O impacto das alterações climáticas sobre o projeto de sistemas de rega com canhão é considerável com um aumento do caudal de projeto entre 5 a 24%. O aumento médio das necessidades de rega anuais, para os cenários de alterações climáticas, variou entre 18% a 44%. Verifica-se, assim, que os impactos das alterações climáticas sobre as necessidades de rega anuais serão bastante mais pronunciados do que sobre as necessidades de rega relativas ao período de ponta. Assim, os esforços de adaptação deverão dar especial atenção à gestão da rega.

Os sistemas de rega com canhão foram dimensionados com o programa Enrolador, tendo-se verificado para os cenários de alteração climática um aumento dos caudais de funcionamento, dos diâmetros das condutas e dos tubos flexíveis. Estes resultados têm como implicações um aumento dos custos de investimento e exploração dos sistemas de rega e maiores consumos de energia.

4.2. Microrrega

Introdução

Os sistemas de microrrega, também designados por rega localizada, caracterizam-se pelo facto de humedecerem parcialmente o solo, utilizando emissores de baixa pressão. Estes sistemas, porque localizam a água apenas na zona radicular das plantas, são sistemas que, de um modo geral, conduzem a uma maior eficiência na utilização da água. Por outro lado, como trabalham com baixa pressão, conduzem a uma diminuição do consumo de energia relativamente aos sistemas de rega por aspersão. São por isso apontados como uma das medidas para a adaptação dos sistemas de rega às alterações climáticas.

Os sistemas de rega mais comuns podem ser classificados em duas categorias principais de acordo com o tipo de equipamento e técnica utilizada: gota-a-gota ou micro-aspersão.

Na rega gota-a-gota a água é aplicada lentamente ao solo por meio de gotejadores instalados a intervalos regulares em tubos de polietileno de baixa densidade. O caudal dos gotejadores pode variar entre 1 e 10 L/h, sendo os mais comuns de 2 e 4 L/h e em culturas pouco espaçadas de 1 e 2 L/h. Os gotejadores autocompensantes garantem um caudal constante quando a pressão disponível está dentro dos limites especificados pelo fabricante. Na Figura 4.5 apresenta-se um sistema de rega gota-a-gota.

Na rega por micro-aspersão a água é pulverizada sobre pequenas superfícies de solo, adjacentes a cada uma das plantas. Estes sistemas de rega são normalmente utilizados em plantas que apresentam grandes espaçamentos entre árvores. Os microaspersores caracterizam-se por fornecer caudais superiores aos dos gotejadores, podendo variar entre 20 a 80 L/h. Na Figura 4.6 apresentam-se a título de exemplo um gotejador (figura 4.6a) e um microaspersor (Figura 4.6b).

As condições de funcionamento devem atender à uniformidade de distribuição da água e à eficiência no uso da água, tanto mais que a obtenção de bons desempenhos se traduz em melhores rendimento das culturas regadas e em um mais adequado controlo das perdas de água e fertilizante, e conseqüentemente dos impactes ambientais ligados à rega.

O projeto de sistemas de microrrega assume, assim, uma grande complexidade dado que envolve a escolha da melhor combinação dos equipamentos (emissores, tubos, válvulas reguladoras de pressão, etc.), das características hidráulicas de funcionamento (caudal, pressão, sensibilidade ao entupimento) e dos aspetos de técnicos (nomeadamente soluções de automatização e fertilização). Dada esta complexidade resultou a necessidade de utilização de um modelo que permita de forma integrada e otimizada a procura de soluções de projeto mais adequadas

para uma dada parcela. Neste contexto, utilizou-se o modelo MIRRIG que para além de considerar o projeto de rega permite ainda avaliar o desempenho dos sistemas de microrrega em funcionamento.



Figura 4.5 – Sistema de rega gota-a-gota.



Figura 4.6 – Exemplo de dois emissores: a) gotejador; b) microaspersor.

4.2.1. Descrição do modelo DSS MIRRIG

O MIRRIG é um Sistema de Apoio à Decisão (DSS) que visa o projeto de sistemas de microrrega (sistemas gota-a-gota e micro-aspersão) e, ainda, a avaliação de desempenho destes sistemas em funcionamento (Pedras & Pereira, 2009; Pedras *et al.*, 2009).

O MIRRIG é composto por módulos de projeto, de avaliação e de análise multicritério e, contém ainda, uma base de dados (Fig. 4.7). A base de dados inclui informação atualizada sobre os emissores e tubos existentes no mercado mas, também, sobre as culturas, solos, parcelas e outros dados recolhidos dos sistemas de rega em funcionamento.

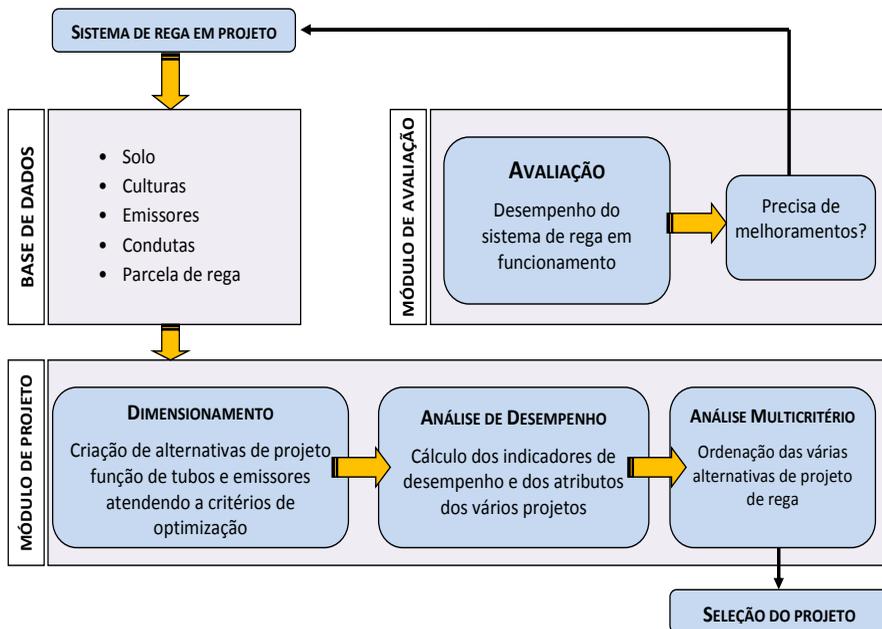


Figura 4.7 – Estrutura conceitual do DSS MIRRIG.

As alternativas de projeto podem diferir relativamente ao traçado de conduitas do sistema de rega, à pressão à cabeceira, ou às características das conduitas e aos emissores (gotejadores e micro-aspersores). O MIRRIG inclui um modelo de dimensionamento que interactivamente ajuda na construção das alternativas escolhendo os emissores, os tubos, as válvulas reguladoras de pressão e a pressão à cabeceira. Estas alternativas satisfazem as prioridades do utilizador e, simultaneamente, os objetivos de otimização nomeadamente a uniformidade de distribuição, a velocidade máxima e mínima, e a pressão nominal dos tubos.

Os modelos de análise de desempenho simulam o funcionamento do sistema de rega e calculam vários indicadores técnicos, económicos e ambientais para cada alternativa. Estes são usados como atributos das alternativas de projeto na análise multicritério.

Todas as alternativas poderão ser comparadas através da metodologia multicritério com base nos pesos definidos pelos *stakeholders* relativos aos critérios de poupança de água e económicos. Deste modo é possível seleccionar o projeto de microrrega mais adequado para a parcela de rega (Figura 4.7).

4.2.2. Metodologia

Estabelecido a duração do período de análise, npa (anos) e o número de anos de vida útil do componente, nvu (anos), é determinado o valor atual do custo de investimento pela seguinte equação (Avez et al., 1987):

$$CI_A = CI + \sum_{j=1}^{n_{sub}} \frac{CI}{(1+T_{ac})^{(j \times nvu) - nvu}} \quad (4.1)$$

sendo CI_A o valor atualizado do custo de investimento de um componente (€), CI o custo inicial ou de substituição de um componente (€), T_{ac} a taxa de atualização (%) e n_{SUB} o número total de aquisições do componente.

O custo global do investimento atualizado, CI_{AG} (€), obtém-se da equação:

$$CI_{AG} = \sum_{k=1}^{n_{comp}} CI_{A_k} \quad (4.2)$$

onde n_{comp} é o número de componentes e CI_{A_k} o valor atualizado do custo de investimento do componente k (€).

O custo fixo anual (CFA) obtém-se pela equação

$$CFA = FRC \cdot CI_{AG} \quad (4.3)$$

sendo FRC o fator de reposição do capital, calculado por:

$$FRC = \frac{T_{ac}(1+T_{ac})^{npa}}{(1+T_{ac})^{npa} - 1} \quad (4.4)$$

O custo fixo anual CFA é dado pela seguinte expressão

$$CFA = f(C_{em}, C_{tu}, C_{va}, C_{fi}, C_{fr}, C_{au}, C_{bo}) \quad (4.5)$$

dependente dos seguintes componentes, tais como: o custo dos emissores C_{em} (€), o custo das condutas e dos acessórios de ligação C_{tu} (€), o custo das válvulas e dos acessórios de ligação C_{va} (€), o custo do sistema de filtragem C_{fi} (€), o custo do sistema de fertirrega C_{fr} (€), o custo do sistema de automatização C_{au} (€) e o custo do sistema de bombagem C_{bo} (€).

Ao valor do preço dos vários componentes de rega está associado o valor do custo dos acessórios de ligação e o custo da sua montagem, praticado na área comercial.

Aos custos de operação e manutenção do sistema de microrrega, COM (€), estão associados os custos referentes à energia, à água e à mão-de-obra, como mostra a equação

$$COM = C_{en} + C_{ag} + C_{op} + C_{ma} \quad (4.6)$$

sendo C_{en} o custo da energia consumida para elevar da água da rega (€ ano^{-1}), quando o sistema recorre a bombagem, C_{ag} o custo da água (€ ano^{-1}), quando o sistema recorre a um perímetro de rega coletivo, C_{op} o custo da mão-de-obra para operar o sistema de microrrega (€ ano^{-1}) e C_{ma} o custo da mão-de-obra necessário para manter o sistema de microrrega em níveis de desempenho considerados aceitáveis (€ ano^{-1}).

O custo da energia resulta da equação:

$$C_{en} = \frac{10,787 Q_t H_t T_r N_r N_{se} C_{el}}{\eta} \quad (4.7)$$

sendo: Q_t o caudal total do sector rega ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), H_t a altura manométrica total (m), T_r a duração da rega (h), N_r o número anual de regas, N_{se} o número de sectores do sistema rega, η a eficiência do grupo bomba e C_{el} o custo da energia elétrica (€ / kWh).

O custo da mão-de-obra necessária para tornar operacional o sistema de microrrega depende de inúmeros fatores, entre os quais se pode referir: o nível de automatização do sistema de rega; o tipo de sistema de fertirrega; e o nível de automatização para a limpeza dos filtros.

O custo de conservação do sistema de rega está, dependente das características do sistema de rega, nomeadamente, do grau de sensibilidade dos emissores ao entupimento, e do número de horas de funcionamento.

4.2.3. Caso de estudo

As culturas usadas para a análise da importância da microrrega no contexto das alterações climáticas foram o milho, o girassol, o olival (tradicional e superintensivo) e a vinha. No Quadro 4.6 apresenta-se o espaçamento e a profundidade radicular consideradas para cada uma das culturas.

O Quadro 4.7 apresenta as necessidades hídricas de ponta e as anuais para as mesmas culturas.

Neste Quadro verifica-se, ainda, que o cenário A2 do modelo HadRM3P para Beja-Vinha (BV2) corresponde à simulação que gera a maior variação das necessidades hídricas anuais, atingindo cerca de 57%.

No entanto, o cenário B2 do modelo HadRM3P para Évora-Milho (EM3B2) apresenta a menor variação, cerca de 18%. Aliás, o cenário B2 do modelo HadRM3P é sempre o que gera a menor variação das necessidades hídricas anuais, para a mesma cultura e local. Dada a grande variação das necessidades hídricas anuais nos vários cenários de alterações climáticas pretende-se então avaliar a sua influência no contexto do projeto de microrrega.

Quadro 4.6- Características das culturas milho, girassol, olival e vinha

Culturas	Milho	Girassol	Olival		Vinha
			Super-intensivo	Tradicional	
Espaçamento na linha, m	0,15	0,3	1,35	10	1,1
Espaçamento na entrelinha, m	0,8	0,7	3,75	10	2,8
Prof. das raízes, m	1	0,8	1	1	1

A parcela avaliada tem 9 ha e 6 setores de rega com um declive de 2% apenas num sentido (Figura 4.8), sendo que as rampas não apresentam declive ao longo do seu percurso.

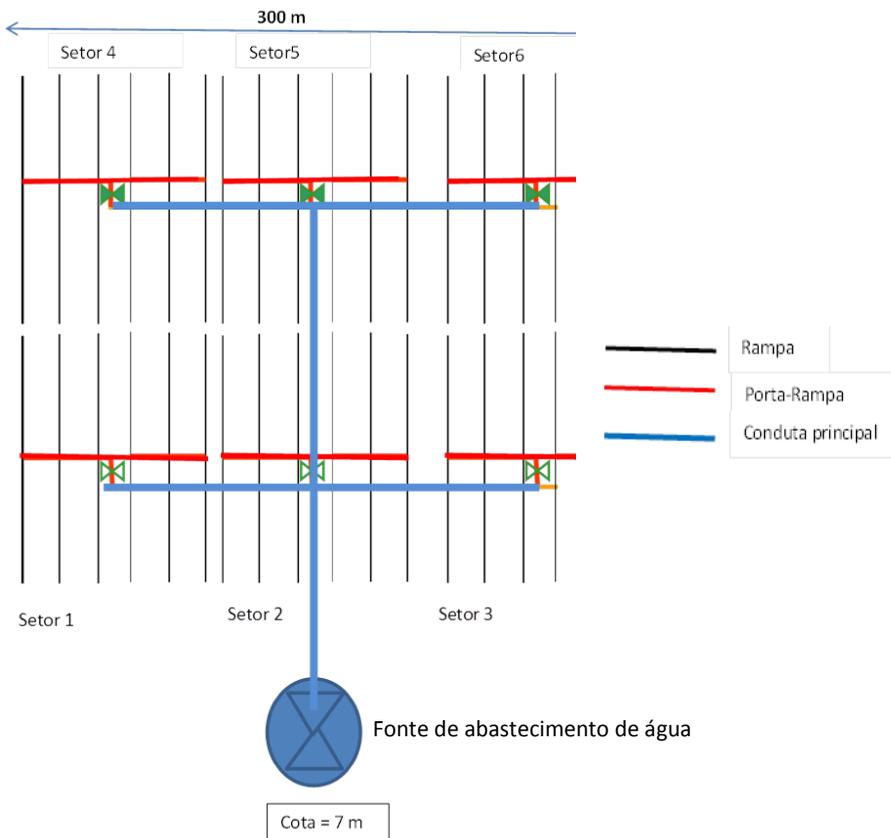


Figura 4.8 – Esquema dos setores e das condutas de rega na parcela avaliada.

Quadro 4.7 - Necessidades hídricas calculadas com o programa *IrrigRotation* para o período de base (1961-1990) e para os vários cenários de alterações climáticas (2071-2100)

Rotação/ cultura	Modelo	Cen.	CE Beja			CE Évora		
			Simul.	Necessi- dades ponta (mm/d)	Necessi- dades anuais (mm)	Simul.	Necessi- dades ponta (mm/d)	Necessi- dades anuais (mm)
B-Milho-T-T	Est. Met.	Contr.	BM1	9,3	774	EM1	8,8	699
	HadRM3P	A2	BM2	10,6	937	EM2	10,5	848
	HadRM3P	B2	BM3B2	10,4	924	EM3B2	9,9	824
	HIRHAMh	A2	BM4	11,2	957	EM4	10,6	884
	HIRHAMhh	A2	BM5	11,1	948	EM5	10,4	877
Girassol-T-C	Est. Met.	Contr.	BG1	8,9	818	EG1	8,4	715
	HadRM3P	A2	BG2	10,1	1106	EG2	10	895
	HadRM3P	B2	BG3B2	10	993	EG3B2	9,4	863
	HIRHAMh	A2	BG4	10,7	1175	EG4	10,2	986
	HIRHAMhh	A2	BG5	10,6	1171	EG5	9,9	958
Vinha	Est. Met.	Contr.	BV1	3,7	122	EV1	3,5	150
	HadRM3P	A2	BV2	4,2	191	EV2	4,2	209
	HadRM3P	B2	BV3B2	4,2	167	EV3B2	4	190
	HIRHAMh	A2	BV4	4,5	182	EV4	4,3	206
	HIRHAMhh	A2	BV5	4,4	175	EV5	4,2	203
Olival Super- Intensivo	Est. Met.	Contr.	BO1	3,3	222	EO1	3,1	266
	HadRM3P	A2	BO2	3,8	339	EO2	3,7	381
	HadRM3P	B2	BO3B2	3,7	306	EO3B2	3,5	346
	HIRHAMh	A2	BO4	4	319	EO4	3,8	367
	HIRHAMhh	A2	BO5	3,9	324	EO5	3,7	363
Olival Tradici- onal	Est. Met.	Contr.	BOT1	3,3	222	EOT1	3,1	266
	HadRM3P	A2	BOT2	3,8	339	EOT2	3,7	381
	HadRM3P	B2	BOT3B 2	3,7	306	EOT3B2	3,5	346
	HIRHAMh	A2	BOT4	4	319	EOT4	3,8	367
	HIRHAMhh	A2	BOT5	3,9	324	EOT5	3,7	363

A admissão de água ao porta-rampas faz-se pelo meio deste. A fonte de abastecimento de água encontra-se a uma distância de 25 m da parcela de rega e à cota de 7 m.

O Quadro 4.8 apresenta as características do emissor utilizado em cada cultura estudada, no que se refere ao modelo e à equação do emissor: $q = K H^x$ (sendo q o caudal em l/h e H a pressão em m) e ao compasso destes.

Quadro 4.8 – Características dos emissores usados nas várias culturas .

Culturas	Milho	Girassol	Olival		Vinha
			Superintensivo	Tradicional	
Emissor: Marca, Modelo	TIRAN	TIRAN	TIRAN	OTIF	TIRAN
Emissor: equação característica	$q = 1,387 H^{0,46}$	$q = 1,387 H^{0,46}$	$q = 1,387 H^{0,46}$	$q = 2,3802 H^{0,5033}$	$q = 1,387 H^{0,46}$
Espaçamento entre emissores (m)	0,5	0,5	0,8	0,9	0,8
Espaçamento na entrelinha (m)	1,6	1,4	3,8	10	2,8
Caudal do gotejador (L/h)	1,5	1,5	4	8	4
Nº de rampas / linhas de cultura	01-fev	01-fev	01-jan	01-jan	01-jan

O Quadro 4.9 apresenta os parâmetros utilizados na análise económica que visam o cálculo do custo fixo anual e do custo de operação e manutenção dos projetos de microrrega no período de base (1961-1990) e para os vários cenários de alterações climáticas (2071-2100).

Quadro 4.9 - Parâmetros utilizados na análise económica para determinar os atributos dos projetos de rega para o período de base e para os vários cenários de alterações climáticas.

Culturas	Milho	Girassol	Olival		Vinha
			Superintensivo	Tradicional	
Período de análise, npa (anos)	7	7	30	30	30
Taxa de atualização %	4	4	4	4	4
Custo de energia, €/kWh	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Custo da água, €/m ³	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

4.2.4. Resultados

Os resultados da análise de desempenho dos projetos de rega, para os vários cenários de alterações climáticas, após terem sido dimensionados de acordo com os critérios de otimização, são apresentados no Quadro 4.10 para o *CE Beja* e na Quadro 4.11 para o *CE Évora*.

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram o custo fixo anual e o custo de operação e manutenção para os projetos de rega, relativos ao período de base e aos cenários de alterações climáticas, para as culturas do milho, do girassol, do olival (tradicional e superintensivo) e da vinha, para o *CE Beja* e o *CE Évora*.

Quando se compara o custo fixo anual dos projetos no período de base com os dos vários cenários de alterações climáticas, para uma mesma cultura e local, estes não apresentam diferenças no valor, ou seja, o seu custo é constante.

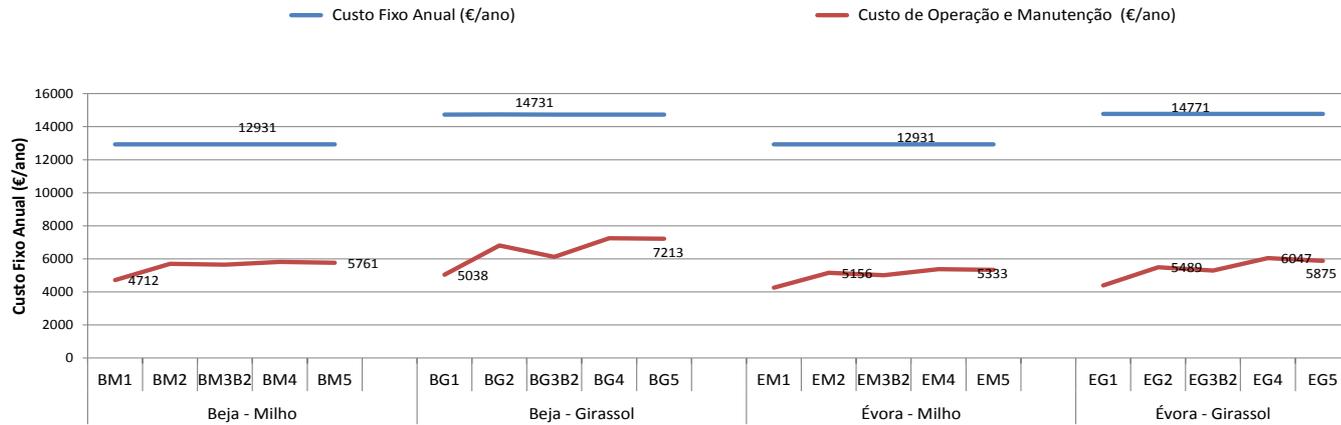
No entanto, o mesmo já não acontece com o custo de operação e manutenção. Este apresenta variações que estão diretamente relacionadas com a variação das necessidades hídricas anuais produzidas nos cenários de alterações climáticas. No período de base (1961-1990) as necessidades anuais são inferiores aos dos vários cenários de alterações climáticas (2070-2100). O cenário HadRM3P A2 é o que regista as maiores necessidades hídricas anuais, enquanto o cenário HadRM3P B2 apresenta os menores valores. Verifica-se, assim, um paralelismo entre a tendência das necessidades hídricas anuais e o custo de operação e manutenção dos projetos de microrrega.

Quadro 4.10– Resultado das simulações para o Caso Estudo Beja

Rotação/ cultura	Modelo	Cen.	CE Beja					
			Pressão (m)	Caudal (L/h)	Unifor- midade (%)	Custo Fixo Anual (€/ano)	Custo oper.e manut. (€)	
B-Milho-T-T	Estação	Contr.	BM1	19.3	56477	97.4	12931	4712
	HadRM3P	A2	BM2	19	55962	97.3	12931	5693.
	HadRM3P	B2	BM3B2	20	57655	97.5	12931	5650
	HIRHAMh	A2	BM4	19	55962	97.3	12931	5815
	HIRHAMhh	A2	BM5	19	55962	97.3	12931	5760
Girassol-T-C	Estação	Contr.	BG1	21	64648	97.3	14731	5038
	HadRM3P	A2	BG2	21	64648	97.3	14743	6812
	HadRM3P	B2	BG3B2	21	64648	97.3	14731	6116
	HIRHAMh	A2	BG4	21	64425	97.4	14731	7243
	HIRHAMhh	A2	BG5	21	64648	97.3	14731	7212
Vinha	Estação	Contr.	BV1	20	26517	97.4	2847	735
	HadRM3P	A2	BV2	20	26517	97.4	2847	1151
	HadRM3P	B2	BV3B2	20	26517	97.4	2847	1007
	HIRHAMh	A2	BV4	20	26517	97.4	2847	1097
	HIRHAMhh	A2	BV5	20	26517	97.4	2847	1055
Olival super - intensivo	Estação	Contr.	BO1	25	24285	97.6	2167	1375
	HadRM3P	A2	BO2	25	24285	97.6	2167	2101
	HadRM3P	B2	BO3B2	25	24285	97.6	2167	1896
	HIRHAMh	A2	BO4	25	24285	97.6	2167	1977
	HIRHAMhh	A2	BO5	25	24285	97.6	2167	2008
Olival tradicional	Estação	Contr.	BOT1	30	19018	98.1	466.06	1455
	HadRM3P	A2	BOT2	30	19018	98.1	466.06	2225
	HadRM3P	B2	BOT3B2	30	19018	98.1	466.06	2006
	HIRHAMh	A2	BOT4	30	19018	98.1	466.06	2091
	HIRHAMhh	A2	BOT5	30	19018	98.1	466.06	2124

Quadro 4.11 – Resultado das simulações para o Caso Estudo Évora

Rotação/ cultura	Modelo	Cen.	CE Évora					
			Pressão (m)	Caudal L/h	Unifor- midade (%)	Custo Fixo Anual (€/ano)	Custo oper. e manut. (€)	
B-Milho-T-T	Estação	Contr.		19.1	56133	97.4	12931	4250
	HadRM3P	A2	BM2	19.1	56133	97.4	12931	5156
	HadRM3P	B2	BM3B2	19.1	56133	97.4	12931	5010
	HIRHAMh	A2	BM4	19.1	56133	97.4	12931	5375
	HIRHAMhh	A2	BM5	19.1	56133	97.4	12931	5333
Girassol-T-C	Estação	Contr.		20.3	64424	97.6	14771	4385
	HadRM3P	A2	BG2	20.3	64424	97.6	14771	5489
	HadRM3P	B2	BG3B2	20.3	64424	97.6	14771	5292
	HIRHAMh	A2	BG4	20.3	64424	97.6	14771	6047
	HIRHAMhh	A2	BG5	20.3	64424	97.6	14771	5875
Vinha	Estação	Contr.		20	26517	97.4	2848	905
	HadRM3P	A2	BV2	20	26517	97.4	2848	1260
	HadRM3P	B2	BV3B2	20	26517	97.4	2848	1146
	HIRHAMh	A2	BV4	20	26517	97.4	2848	1242
	HIRHAMhh	A2	BV5	20	26517	97.4	2848	1224
Olival super - intensivo	Estação	Controlo		25	24285	97.6	2167	1649
	HadRM3P	A2	BO2	25	24285	97.6	2167	2361
	HadRM3P	B2	BO3B2	25	24285	97.6	2167	2144
	HIRHAMh	A2	BO4	25	24285	97.6	2167	2275
	HIRHAMhh	A2	BO5	25	24285	97.6	2167	2250
Olival tradicional	Estação	Controlo		30	19018	98.1	466	1744
	HadRM3P	A2	BOT2	30	19018	98.1	466	2498
	HadRM3P	B2	BOT3B2	30	19018	98.1	466	2268
	HIRHAMh	A2	BOT4	30	19018	98.1	466	2406
	HIRHAMhh	A2	BOT5	30	19018	98.1	466	2380



Necessidades anuais (mm)

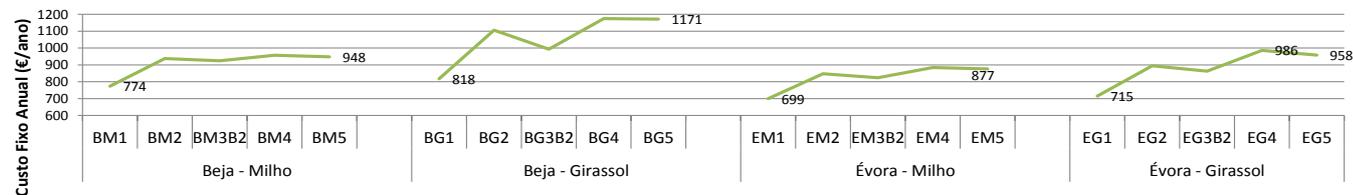


Figura 4.9 – As necessidades anuais, o custo fixo anual e o custo de operação e manutenção dos projetos de rega, para o período de base e para os vários cenários de alterações climáticas, para as culturas do milho e girassol.

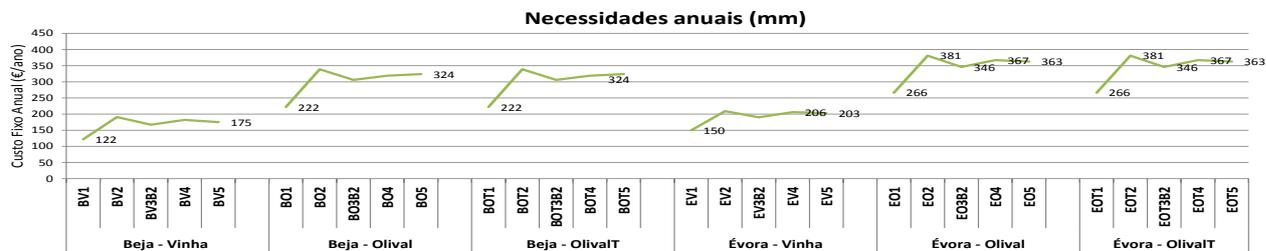
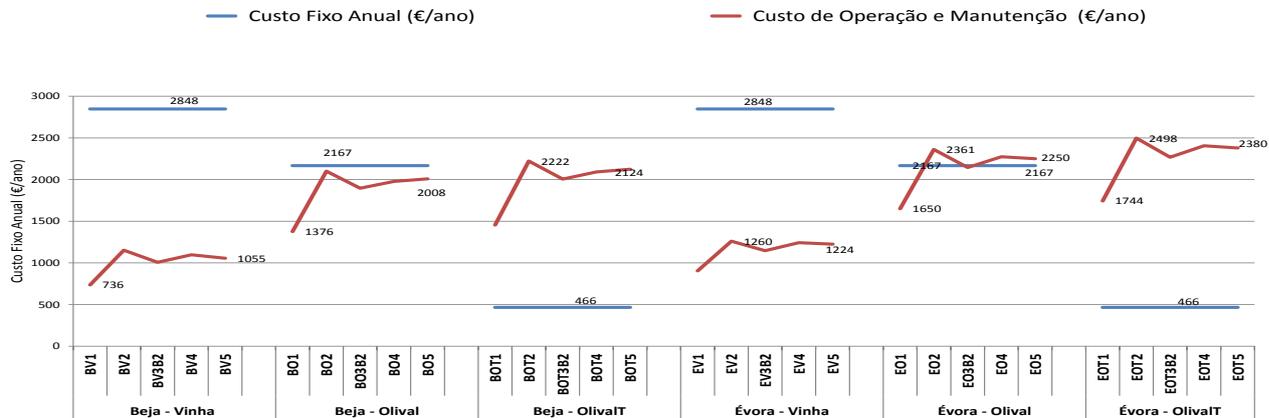


Figura 4.10 – As necessidades anuais, o custo fixo anual e o custo de operação e manutenção dos projetos de rega, para o período de base e para os vários cenários de alterações climáticas, para as culturas da vinha, olival tradicional e olival superintensivo.

4.2.5. Conclusões

Pretendeu-se mostrar a importância do projeto de microrrega no contexto das alterações climáticas. Para tal foram projetados sistemas de microrrega otimizados para o período de base (1961-1990) e para os vários cenários de alterações climáticas (2071-2100). As culturas analisadas foram o milho, o girassol, o olival (tradicional e superintensivo) e a vinha.

Os resultados obtidos mostram que os equipamentos dos projetos de rega dos vários cenários das alterações climáticas são iguais aos do cenário base, e que a variação da pressão requerida não apresenta uma tendência crescente. Assim, para uma cultura e local, o custo fixo anual dos projetos é constante para os vários cenários de alterações climática e igual ao cenário de base. Por outro lado, regista-se um aumento na duração da rega, que se reflete principalmente no custo de operação e manutenção do sistema de rega, devido ao aumento das necessidades hídricas anuais dos vários cenários de alterações climáticas.

Referências bibliográficas

- Avilez, F., F. Estácio e M. C. Neves. 1987. *Análise de projetos agrícolas no contexto da política agrícola comum*. Banco Pinto & Sotto Mayor, Lisboa.
- Cardoso, J.V.J.C., 1965. *Os solos de Portugal. Sua classificação, caracterização e génese, 1- A Sul do rio Tejo*. Secretaria de estado da agricultura, direcção geral dos serviços agrícolas, Lisboa. 310 pp.
- Granier, J., Molle, B., Deumier, J.-M., Lacroix, B., 2003. Optimisation des réglages et de l'utilisation des systèmes d'irrigation par canon-enrouleur. Ingénieries-EAT, numéro spécial 2003 Technologies pour les agrosystèmes durables. pp. 125-140.
- James, L.G., 1998. *Principles of farm irrigation systems design*. Krieger, Florida, USA. 543 pp.
- Pedras, C.M.G., Pereira, L.S., Gonçalves, J.M., 2009. Multicriteria analysis for design and evaluation of microirrigation systems. *The DSS MIRRIG. AgWat*, 96: 691 – 701.
- Pedras, C.M.G. and Pereira, L.S., 2009. Multicriteria analysis for design of microirrigationsystems. Application and sensitivity analysis. *AgWat*, 96: 702 – 710.
- Pereira, L.S., 2004. *Necessidades de água e métodos de rega*. Publicações Europa-América, Mem Martins, Portugal. 312 pp.
- Raposo, J.R., 1996. *A rega. Dos primitivos regadios às modernas técnicas de rega*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal. 485 pp.
- Tarjuelo, J.M., 2005. *El Riego por Aspersión y su Tecnología*, 3ª ed., Mundi-Prensa, Madrid. 581 pp.
- Teixeira, J.L., 1989. *Modelos de programação e condução da rega*. Tese de Doutoramento, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 303 pp.
- Rolim, J., 2013. Metodologias para a avaliação dos impactes das mudanças climáticas na agricultura de regadio e nos sistemas de rega. Tese de Doutoramento em Engenharia dos Biosistemas, Instituto Superior de Agronomia, UTL. 322 pp.
- Tiercelin, J.-R. e Granier, J., 2006. L'irrigation par aspersion. In *Traité d'irrigation*. Tiercelin, J.R.; Vidal, A. (eds), pp. 549-583. Lavoisier, Paris, France.

Capítulo 5

IMPACTE ECONÓMICO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NO REGADIO E DEFINIÇÃO DE MEDIDAS DE ADAPTAÇÃO

Rui Fragoso¹ e Carlos Noéme²

¹*Centro de Estudos e Formação Avançada em Gestão e Economia (CEFAGE), Universidade de Évora*

²*Departamento de Ciências e Engenharia de Biosistemas (DCEB), Secção de Economia, Gestão e Sociologia, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa*

Introdução

As alterações na produtividade agrícola, como consequência das mudanças climáticas, têm um efeito sobre toda a economia. Assim, se houver uma redução na produtividade implicará também uma redução dos *outputs* produzidos e por conseguinte um aumento do custo de produção. Da mesma forma, as mudanças na agricultura e nos preços afetarão as decisões das famílias sobre o consumo (Iglesias *et al.*, 2011b).

Do ponto de vista económico as alterações climáticas irão levar ao aumento da escassez de água nas zonas mediterrâneas, à redução dos rendimentos agrícolas e ao reforço do novo paradigma do uso da água baseado na racionalidade da sua utilização. Deste modo, pretende-se avaliar o impacte económico das alterações climáticas no regadio do Alentejo. O objetivo é determinar como é que as alterações climáticas poderão alterar o valor económico da água e por conseguinte a afetação dos recursos de base (terra, água, trabalho e capital) e o rendimento dos produtores agrícolas.

Este objetivo geral encerra os seguintes objetivos específicos: i) Avaliar o valor da água no regadio através da determinação da disposição a pagar, com base no cálculo do preço sombra da água; ii) Determinar as alterações no uso dos recursos de base (água, terra, trabalho e capital); iii) Determinar as alterações no valor da terra; iv) avaliar as alterações do modelo agrícola de regadio, nomeadamente, ao nível do aproveitamento das áreas de regadio; e v) avaliar o impacte das alterações climáticas no rendimento dos produtores agrícolas.

Para simular o comportamento dos produtores agrícolas face aos cenários alternativos de alterações climáticas, foi desenvolvido um modelo de decisão

baseado na teoria da empresa e aplicado às condições específicas dos perímetros de rega do Caia e de Odivelas, no Alentejo. Este tipo de abordagem tem-se mostrado muito flexível e permite ter uma visão sistémica das respostas aos estímulos da política económica e ambiental. Vários cenários alternativos de alterações climáticas, de preço da água ou de direitos de utilização de água podem ser modelados e avaliados os seus resultados em termos das alterações no uso dos recursos, no custo ou no preço marginal, bem como nos preços de mercado.

Os resultados foram obtidos para os perímetros de rega do Caia e de Odivelas no Alentejo, por serem os casos que melhor representam as condições da agricultura de regadio nos solos caraterísticos da região de Évora e nos solos caraterísticos da região de Beja, respetivamente. As simulações realizadas tiveram em conta cenários alternativos de alterações climáticas que implicam a diminuição da produtividade média das culturas de sequeiro e de regadio e o acréscimo das necessidades de rega das culturas, bem como a adoção de medidas de adaptação que visam atenuar as quebras previsíveis na produtividade média da terra e por conseguinte nos níveis de produção dos produtos agrícolas.

5.1. Políticas e medidas de adaptação: uma abordagem integrada

A adaptação às mudanças climáticas está intimamente ligada aos recursos hídricos e ao seu papel no desenvolvimento sustentável. Segundo o relatório da UN-Water (2010), as medidas de adaptação podem ser organizadas em cinco categorias, apontando adequações necessárias á gestão dos recursos hídricos, como forma de incorporar esse tema:

- i) Planeamento e criação de novas infraestruturas (reservatórios, sistemas de irrigação, sistemas de tratamento de esgotos, restauração de ecossistemas);
- ii) Ajuste de operações e regulação de práticas de sistemas existentes para a adaptação das novas condições (controle da poluição, mudanças climáticas, crescimento populacional);
- iii) Manutenção ou reabilitação de sistemas existentes (barragens, sistemas de irrigação, canais, bombas, rios, etc);
- iv) Modificações nos processos de sistemas existentes (aproveitamento de água de chuva, conservação da água, regulação de preços, legislação, participação dos que tomam decisões, educação do consumidor, consciencialização);
- v) Introdução de tecnologias mais eficientes (dessalinização, biotecnologia, rega gota-a-gota, reutilização da água, reciclagem, painéis solares).

Para se tomarem medidas de adaptação é imprescindível compreender os efeitos das alterações climáticas e fazer com que as informações sobre as decisões tomadas, sobre como lidar com essas situações, sejam divulgadas. É, também, necessário que estas medidas estejam em sintonia com as práticas de gestão do solo e dos recursos hídricos, pois essa associação potencia a resiliência e segurança hídrica (UN-Water, 2010).

Algumas das potenciais soluções passam por mudanças nas infraestruturas e limitação de rega. No entanto, estas medidas não são bem aceites por todos os sectores sociais. As políticas a adotar devem ter em consideração as variações regionais do clima, principalmente na Europa, com regiões áridas a sul e outras com maior disponibilidade de água a norte. Para a boa aplicação das medidas de adaptação estas políticas deverão garantir coerência e eficiência. (Iglesias et al., 2011a).

Os cenários de alterações climáticas têm como objetivo compreender melhor as incertezas futuras, a fim de ajudar na tomada de decisões consistentes sob uma ampla gama de cenários futuros possíveis. Eles são gerados por três grandes tipos de modelos e estruturas analíticas: modelos de avaliação integrada, modelos climáticos e modelos e outras abordagens utilizadas para ajudar a avaliar os impactos, adaptação e vulnerabilidade (Moss et al., 2010).

5.2. Determinação do valor económico da água

No final do século XX o paradigma da gestão da água alterou-se substancialmente, focando-se mais na promoção da eficiência da gestão da água, na gestão da procura e na reafecção eficiente do recurso entre os seus utilizadores (Kallis e Nijkamp, 2000). A Diretiva Quadro da Água (WFD), a nível da União Europeia, definiu como objetivo principal atingir um “bom estado” da água na União Europeia até 2015 e introduziu alterações no modelo institucional de governança, reforçando a utilização de critérios e métodos económicos na gestão da água (Petersen, 2009).

O objetivo é eliminar práticas de desperdício e encorajar a eficiência e conservação no uso do recurso, mas uma abordagem exclusivamente baseada no mercado não é capaz de garantir a proteção dos recursos hídricos e dos ecossistemas (Daily, 1997). A descentralização da gestão da água no regadio, a adoção de sistemas de preços, a afetação de direitos de água e de esquemas de troca de direitos no mercado são mecanismos frequentemente utilizados para aumentar a produtividade da água e para resolver problemas de equidade no acesso ao recurso (Dinar e Maria Saleth, 2005; Johansson et al., 2002; Tiwari e Dinar, 2002; Tsur et al., 2004; e Roe et al., 2005; Veetil et al., 2011).

O impacto do preço da água no regadio, e considerando apenas a Península Ibérica conduziu à elaboração de vários trabalhos no âmbito da WFD (Varela-Ortega et al., 1998; Gomez-Limon e Riesgo, 2004; Noéme e Fragoso, 2004; Roe et al., 2005; Fragoso e Marques, 2009). Estes estudos avaliam os impactos da política de preço da água na procura da água, na afetação da água às diferentes culturas de regadio, nos rendimentos dos agricultores, na recuperação dos custos com a água e na procura de fatores de produção. Os seus resultados apresentam muitas características semelhantes e salientam que os efeitos da política de preço da água no regadio dependem sobretudo das características locais, nomeadamente, das condições estruturais e institucionais específicas.

Para estabelecer uma política de gestão da água, capaz de regular o uso da água com atuação direta sobre a procura, são necessários três elementos fundamentais, nomeadamente, o valor económico da água, o custo total da água e o preço da água (Rogers et al., 1998; 2002). O valor económico da água é determinado do lado da procura e deve incluir os benefícios dos utilizadores, os benefícios dos fluxos de retorno, os benefícios indiretos e os valores intrínsecos. Por sua vez o custo total da água é dado pelo lado da oferta e compreende: os custos de operação e manutenção das infraestruturas do regadio e os serviços com a água, os custos de capital, os custos de oportunidade, os custos económicos e as externalidades ambientais. Estes autores consideram como custo da oferta de água a soma dos custos de operação e manutenção com os custos de capital. O preço da água é o montante unitário que é fixado pelo setor institucional para valorizar a água de modo a assegurar a recuperação dos custos, a equidade no acesso e no uso e a sustentabilidade e pode ou não ser subsidiado. Apesar de existir alguma ambiguidade em relação ao significado destes conceitos, o preço da água pode ser estabelecido tanto do lado procura como do lado da oferta (Fragoso e Marques, 2009).

Geralmente a oferta de água é garantida pelo Estado ou por entidades públicas que cobram um preço que reflete apenas o custo médio de fornecimento. Nestas circunstâncias o preço da água não reflete a valorização que os produtores agrícolas fazem da água, uma vez que não é estabelecido um preço da água de acordo com o seu valor marginal (Young, 2005).

Num cenário de escassez de água, para um dado preço zero, se a procura for superior à oferta, o valor da água pode ser derivado diretamente da curva da procura (Gibbons, 1986; Young, 2005; Medellin-Azuara, 2010), que representa a disposição que o consumidor tem para pagar pela água. Quando a água é escassa e as alternativas de consumo são também limitadas, a procura é pouco elástica e a sua curva apresenta uma inclinação elevada. Pelo contrário, quando a água é abundante ou as alternativas de consumo são variadas, a procura é mais elástica e sua curva mais plana. Neste caso, o preço da água deve ser estabelecido pelo lado

da oferta, uma vez que os custos de fornecimento de água se tornam mais relevantes do que o valor da água.

No regadio a água é um fator de produção, i.e., um bem intermédio num processo produtivo. Portanto, não se trata de uma procura final, mas antes de uma procura derivada da procura final dos produtos agrícolas nos mercados e da sua importância no processo produtivo. Desta forma, a procura da água no regadio é uma função do preço da água e dos preços dos produtos nos mercados agrícolas. Para o caso de um produtor que produz n culturas considerando um único fator (q), que é a água, o lucro é dado por:

$$\pi = \sum_{j=1}^n [p_j f_j(q_j) - w q_j] \quad (5.1)$$

onde $f_j(q_j) = y_j$ é uma função de produção crescente e estritamente côncava, com $j=1,2,\dots,n$, que representa a resposta da cultura à utilização do fator água; p_j é o preço de mercado da cultura j ; e w é o preço da água. As condições necessárias de maximização do lucro são $\frac{\partial \pi}{\partial q_i} = 0$ ou $f'_j(q_j(w)) = \frac{w}{p} \Rightarrow q_j(w) = f'^{-1}_j(w/p)$, em que $q_j(w)$ é a quantidade de água utilizada na cultura j ao preço w . Desta forma, a procura bruta de água para rega é dada pela seguinte expressão:

$$q(w) = \sum_{j=1}^n q_j(w) = \sum_{j=1}^n f'^{-1}_j(w/p) \quad (5.2)$$

No caso de termos n culturas e k agricultores, a procura da água por cultura é dada por $q_j(w)$:

$$q(w) = \sum_i^k q_i(w) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n f'^{-1}_{ij}(w/p) \quad (5.3)$$

A procura derivada da água de rega pode ser obtida de várias formas. Uma delas consiste em não considerar de forma explícita os custos da água para o seu utilizador e limitar o seu consumo a um determinado nível x . Neste caso, o problema consiste em saber quanto é que os agricultores estão dispostos a pagar para utilizar Δ unidades adicionais de água. Quando o uso da água atinge o nível x , o seu valor é $pf(x)$ e o volume adicional Δ de água gera um rendimento marginal de $p[f(x+\Delta)-f(x)]$. Para valores suficientemente pequenos de Δ , o rendimento marginal é dado por $pf'(x)$, que é o preço máximo que os agricultores estão dispostos a pagar para disporem de uma unidade adicional de água para rega. Este preço é também designado de preço sombra da água e o seu valor só é positivo se a restrição da disponibilidade de água se verificar com o sinal de igual. Portanto, a decisão de afetação da água entre j alternativas de culturas pode ser conhecida resolvendo o seguinte problema de maximização do lucro do produtor:

$$\pi(p, x) = \text{Max} \sum_{j=1}^n p_j f_j(q_j), \text{ sujeito a } \sum_{j=1}^n q_j \leq x \quad (5.4)$$

com a seguinte formulação de Lagrange:

$$\mathcal{L} = p_f f_j(q_j) - \lambda [x - \sum_{j=1}^n q_j] \quad (5.5)$$

em que λ é multiplicador da restrição da água que representa o seu preço sombra.

Esta abordagem pode ser alargada a outros fatores de produção fixos que não a água, como é geralmente o caso da terra, e a fatores variáveis. Os primeiros são incluídos através da introdução de restrições adicionais. Os últimos podem ser adquiridos em quantidades ilimitadas e são incluídos como variáveis que assumem um valor positivo desde que o valor da produtividade marginal seja maior ou igual ao preço de mercado. Para incorporar a não linearidade das funções de produção ou das funções de custo, o problema linear de maximização do lucro do produtor apresentado anteriormente pode ser transformado num problema não linear.

Em ambos os casos, pode-se ter facilmente a procura derivada da água de rega, resolvendo o problema de maximização do lucro para diferentes níveis de disponibilidade de água x , o que nos permite obter diferentes valores de afetação da água de rega q_j e os correspondentes níveis de preço sombra λ da restrição da água.

Outra alternativa possível para obter a procura derivada da água de rega, é a abordagem positiva baseada na análise de regressão e relação quantidade-preço que se estabelece a partir dos dados relativos aos preços pagos pela água e às quantidades utilizadas.

No entanto, esta abordagem tem alguns problemas relacionados com a falta de disponibilidade de dados e com o fato das variações do preço da água serem geralmente reduzidas, o que conduz a estimativas pouco precisas (Tsur, 2005).

O custo total da oferta de água (CT) pode ser separado em custos variáveis (CV) e custos fixos (CF). Os primeiros estão diretamente relacionados com a quantidade de água que é fornecida e geralmente incluem os custos de bombagem, de transporte, trabalho temporário e de operação e manutenção. Os últimos, não variam em função da quantidade de água fornecida e dizem respeito aos custos de depreciação das infraestruturas e dos equipamentos, juros pagos sobre o capital fixo e custos fixos de operação e manutenção.

Como geralmente o custo variável da água é uma função convexa crescente, o custo médio da água, dado por $CM(q) = \partial TC(q)/q$, é uma função em forma de U, o custo marginal da água, dado por $Cm(q) = \partial VC(q)/\partial q$, é uma função crescente que cruza a curva do custo médio no seu ponto mínimo.

Para um dado preço da água w , o lucro do fornecedor, i.e., da entidade gestora da água, é dado por $\pi = wq - CT(q)$ e a quantidade ótima de água a fornecer deve

satisfazer a seguinte condição: $\frac{\partial[wq-CT(q)]}{q} = 0 \Leftrightarrow Cm(q) = w$. Deste modo a entidade gestora de água deverá fornecer a quantidade de água $q(w) = Cm^{-1}(w)$ e beneficiar de um lucro operacional de $wq(w) - VC(q(w))$ e de um lucro total de $wq(w) - TC(q(w))$.

Se o preço da água w for inferior ao CM, as receitas operacionais não cobrem os custos fixos (CF) e a entidade gestora de água opera com perdas. Nestas condições, a entidade gestora da água irá continuar a operar no curto prazo enquanto o seu lucro operacional for positivo. No entanto, no longo prazo a entidade gestora terá de ser compensada pelos agricultores ou pelo erário público.

Nos grandes projetos de irrigação, o custo marginal da oferta de água é geralmente constante e a oferta de água está limitada à capacidade máxima de armazenamento útil x (Tsur, 2005). Nestes casos, o custo médio da água é inferior ao custo marginal e por conseguinte um preço da água fixado ao custo marginal, como é típico na teoria microeconómica, representa uma perda para entidade gestora. No entanto, se a procura da água atingir a capacidade máxima do sistema x num nível acima do custo marginal, fixar o preço da água ao custo médio $CM(x)$ permite que a entidade gestora da água atinja o seu ponto crítico.

5.3. Metodologia

A metodologia utilizada baseia-se na determinação do valor económico, tendo-se para o efeito desenvolvido um modelo de programação matemática positiva adaptado às condições de oferta agrícola das obras de rega do Caia, no Alto Alentejo, e de Odivelas no Baixo Alentejo. Trata-se de um modelo agregado ao nível do perímetro de rega que maximiza o rendimento do produtor, tendo em conta as restrições do aparelho de produção, nomeadamente, dos recursos de base (terra, água, trabalho e capital) e os custos implícitos da produção agrícola. Desta forma flexibiliza-se, através da função objetivo não linear, o pressuposto da proporcionalidade fixa dos fatores de produção e do produto característico das funções de produção de Lontief.

São várias as metodologias disponíveis para avaliar os impactes das alterações climáticas nas condições de produção agrícola, nomeadamente, da produtividade dos fatores (Kaiser et al., 1993; Reilly et al., 2003; Parry et al., 2004). Iglesias et al. (2011b) utiliza um modelo de equilíbrio geral computacional (CGE) para simular os efeitos macroeconómicos das alterações climáticas. Este modelo representa o funcionamento da economia global, baseado numa abordagem de mercado e de evolução dos preços, e tem sido utilizado frequentemente para estudar os impactes das alterações climáticas na agricultura (Hertel, 1997; Stern et al., 2006).

Outro tipo de abordagem muito utilizada para avaliar os impactos das alterações climáticas na agricultura, nomeadamente na agricultura de regadio, são os modelos de equilíbrio parcial (Ward, 2009). Estes modelos permitem considerar de forma explícita as condições hidro-económicas da zona de estudo e a sua estrutura adapta-se facilmente ao problema da determinação da melhor afetação dos recursos, característico da teoria microeconómica da produção (Mills, 1984; Buysse et al., 2007). Neste caso, os agentes económicos otimizam o seu rendimento em função da tecnologia de produção e comercialização e dos fatores de produção a que têm acesso.

Recentemente assistiu-se a um renovado interesse da comunidade científica pela utilização de modelos de programação matemática de equilíbrio parcial para modelar o comportamento económico. Vários fatores estão na origem desse interesse, nomeadamente, a formalização da programação matemática positiva (PMP) por Howitt (1995), que permite a calibração exata dos modelos sem restrições adicionais de calibração.

A PMP constitui uma forma flexível e realista de simular o comportamento dos agentes económicos em que se obtêm soluções mais alisadas. Desta forma, evitam-se soluções abruptas e descontinuadas, frequentes nos modelos tradicionais de programação matemática, que na generalidade dos casos são bastante improváveis de ocorrerem na realidade.

A constituição progressiva de bases de dados baseadas na recolha de dados, quer ao nível da exploração agrícola quer ao nível regional, tem permitido o desenvolvimento de inúmeras aplicações da PMP adaptadas a diferentes níveis de desagregação da tomada de decisão (Heckelei e Britz, 2005; Frahan et al., 2007; e Heckelei et al., 2012). As aplicações da PMP à agricultura de regadio são também frequentes (Medellín-Azuara et al., 2010).

5.3.1. O modelo económico de programação matemática positiva

A PMP é um método de calibração que se baseia no conhecimento empírico, o que significa que os resultados do processo devem refletir com exatidão a realidade observada. A ideia é que os agentes económicos otimizem os seus planos de produção tendo em conta fatores que não são observáveis, como por exemplo: o comportamento de aversão ao risco dos produtores, a heterogeneidade da qualidade dos recursos de base, as restrições de mercado, as rotações agronómicas e a tenacidade e capacidade técnica.

O modelo de PMP é calibrado para os valores observados de outputs, tendo em conta a informação contida nas variáveis duais das restrições de calibração. Por sua vez, esta informação é utilizada para calibrar uma função objetivo não linear de maximização do rendimento do produtor. Os valores duais das restrições de

calibração são usados para incluir, na função custo, os custos implícitos da produção agrícola.

Na primeira etapa foi desenvolvido o modelo de PL que a seguir se apresenta de maximização do lucro do produtor, sujeito às restrições do aparelho de produção e às restrições de calibração. O lucro do produtor é medido pelo valor acrescentado líquido que incorpora, do lado dos proveitos o valor da produção agrícola e o valor das ajudas agrícolas; do lado dos custos, inclui todos os custos reais com fatores de produção (consumos intermédios, trabalho, amortizações de capital e juros pagos). Para modelar o aparelho de produção consideram-se os fatores de produção primários (terra, água, trabalho e capital). A terra e a água são fatores fixos, em que a sua utilização está limitada pela totalidade da terra beneficiada com regadio e pela água utilizada na agricultura de regadio, no ano de 2008, nas obras de rega do Caia e de Odivelas. O capital e o trabalho são tratados como fatores variáveis, que podem ser adquiridos livremente em função dos preços de mercado em vigor. As restrições de calibração foram limitadas superiormente pelas áreas das culturas observadas no ano de 2008 nas obras de rega do Caia e de Odivelas.

A estrutura simplificada do modelo de PL é dada pelo seguinte conjunto de expressões matemáticas:

$$\text{Max } Z = p'x - c'x \quad (5.6)$$

Sujeito a

$$Ax \leq b \quad [\lambda] \quad (5.6a)$$

$$x \leq x_0 + \varepsilon \quad [\rho] \quad (5.6b)$$

$$x \geq 0 \quad (5.6c)$$

Onde: Z é a função objetivo; p é o vetor de preços dos produtos agrícolas; x é o vetor não negativo relativo aos níveis das atividades de produção em hectares; c é o vetor de custos reais unitários (ha) por atividade de produção; A é a matriz dos coeficientes técnicos (m×n) de produção; b é o vetor dos recursos disponíveis no aparelho de produção; x₀ é o vetor dos níveis observados das atividades de produção no ano de referência; ε é o vetor de pequenos números positivos para prevenir a dependência linear entre os conjuntos das inequações (5.6a) e (5.6b); λ é o vetor dos valores duais ou preços sombra dos recursos do aparelho de produção (5.6a); e ρ é o vetor dos valores duais ou dos preços sombra das restrições de calibração (5.6b).

De acordo com Heckelei e Wolff (2003), assumindo que os recursos de (5.6a) são utilizados na sua totalidade, as condições de otimização de primeira ordem da função (5.6) permitem obter os seguintes valores duais:

$$\rho^p = p^p - c^p - A^{p'}\lambda \quad (5.7)$$

$$\rho^m = 0 \quad (5.8)$$

$$\lambda = (A^m)^{-1}(p^m - c^m) \quad (5.9)$$

Na função (5.6) o vetor x é decomposto num $[(n-m)\times 1]$ vetor x^p das atividades “preferíveis” que são limitadas pelas restrições (5.6b) e num vetor $(m\times 1)$ das atividades marginais que são limitadas pelos recursos disponíveis (5.6a).

A segunda etapa da abordagem PMP consiste em utilizar os valores duais ρ para calibrar o termo não linear da função custo de produção e, por conseguinte, da função objetivo relativa ao lucro do produtor. Considerando a forma quadrática temos então a seguinte função do custo variável de produção:

$$C^v(x) = d'x + x'Qx \quad (5.10)$$

Onde, d é um $(n\times 1)$ vetor dos parâmetros do termo linear da função custo; Q é uma $(n\times n)$ matriz simétrica, semi definida positiva, de elementos q_{ii} na diagonal para as atividades i e i' com $i \neq i'$.

O custo marginal de (5.10) é dado por:

$$MC^v = \nabla C^v(x)_{x_0} = d + Qx_0 = c + \rho \quad (5.11)$$

Onde ∇C^v é um $(1\times n)$ vetor gradiente das primeiras derivadas de $C^v(x)$ para $x=x_0$.

Para resolver este sistema indeterminado de n equações e $[n+n(n+1)/2]$ parâmetros, existem várias alternativas relacionadas com diferentes formas de especificação dos parâmetros da função custo de produção (Heckelei e Britz, 2005). Tendo em conta a calibração “míope” que foi feita do modelo, i.e., com base na observação dos fatores e dos produtos de apenas um ano, optou-se por utilizar o método das elasticidades exógenas para especificar os parâmetros da função custo de produção.

A opção pelo método das elasticidades exógenas é não só a forma mais convincente de especificação dos parâmetros da função custo, bem como permite incorporar no modelo de informação exógena *ex-ante*. Neste caso os elementos fora da diagonal da matriz Q são fixados a zero e o efeito marginal dos preços $\partial x/\partial p$ é igual a q_{ii}^{-1} , tal que a elasticidade ε_{ii} é dada por:

$$\varepsilon_{ii} = \frac{1}{q_{ii}} \cdot \frac{p_i^0}{x_i^0} \Leftrightarrow Q = q_{ii} = \frac{1}{\varepsilon_{ii}} \cdot \frac{p_i^0}{x_i^0} \text{ e } d_i = c_i + \rho_i - q_{ii}x_i^0 \quad (5.12)$$

Para tentar minimizar os efeitos de uma calibração “míope” no comportamento de resposta do modelo às alterações de parâmetros optou-se por estimar as elasticidades ε_{ii} com base na informação relativa a várias observações e recorrendo ao método dos mínimos quadrados. Deste modo, estabeleceu-se para o período de 2000 a 2008 o seguinte modelo de regressão na forma logarítmica

entre a área das culturas x e os respetivos rendimentos brutos y :

$$\text{Min } E = \sum_i \epsilon_i^{\left(\frac{1}{2}\right)}$$

Sujeito a

(5.13)

$$\ln(x_i^0) = \epsilon_{ii} \ln(y_i^0) + \epsilon_i$$

onde E é o erro total da regressão e ϵ_i é o erro relativo a cada atividade.

A terceira etapa da abordagem PMP consiste em integrar na função objetivo (5.6) a função custo de produção não linear definida em (5.10), de acordo com a regra de especificação apresentada em (5.12), e considerar na estrutura do modelo apenas as restrições do aparelho de produção definidas em (5.6a), i.e., sem as restrições de calibração (5.6b). Portanto, o modelo de simulação tem a seguinte formulação final:

$$\text{Max } Z = p'x - \hat{d}'x - \frac{1}{2}x'Qx$$

Sujeito a

(5.14)

$$Ax \leq b \quad [\lambda]$$

$$x \geq 0$$

Este modelo é consistente com a função custo derivada na etapa anterior e reproduz com grande exatidão os níveis observados das atividades produtivas x , bem como os valores duais ou preços sombra dos recursos b , nomeadamente nos casos dos recursos fixos terra e água, em ambos os casos de estudo considerados relativos às obras de rega do Caia e de Odivelas.

Assumindo que os recursos fixos são utilizados na totalidade, as condições de otimização de primeira ordem do programa (5.14) permitem obter os seguintes valores duais para as restrições dos recursos representados pelo vetor b :

$$\lambda = (A\hat{Q}^{-1}A')(A\hat{Q}^{-1}(p - d) - b) \quad (5.15)$$

Como foi referido anteriormente este modelo de simulação foi desenvolvido para as obras de rega do Caia, no Alto Alentejo, e de Odivelas, no Baixo Alentejo. Deste modo, o modelo tenta representar de forma agregada as condições da produção agrícola destas duas obras de rega, classificadas no grupo II dos aproveitamentos hidroagrícolas. Estas duas obras de rega são características da agricultura de regadio no Alentejo conforme o objeto de estudo neste trabalho, foi utilizada a obra de rega do Caia com 7271 ha de área beneficiada como *proxi* dos solos dos regadios do Alto Alentejo e do Alentejo Central e usámos informação relativa à obra de rega de Odivelas com 12362 ha de área beneficiada como *proxi* dos solos dos regadios do Baixo Alentejo.

No modelo de simulação, apresentado em (5.14), o objetivo é maximizar o lucro do produtor agrícola em função das áreas das culturas, dados os preços relativos dos produtos (p'), dos fatores de produção (d') e os custos implícitos ou percebidos pelos produtores (Q), tendo em conta os recursos disponíveis (b).

O lucro do produtor é calculado de forma agregada ao nível do perímetro de rega e é dado por um indicador de valor acrescentado líquido da produção agrícola. Este indicador resulta da diferença entre os proveitos e os custos reais da atividade agrícola. Nos proveitos considerou-se a venda dos produtos nos mercados agrícolas e as ajudas. Os custos incluem os custos fixos e os custos variáveis reais. Portanto, o modelo dá-nos a retribuição da atividade agrícola para os recursos fixos, i.e., o custo de oportunidade destes recursos.

Os recursos dados pelas restrições associadas ao parâmetro b são recursos fixos e fatores variáveis. A terra e a água são recursos fixos e os restantes fatores, nomeadamente, o capital e o trabalho são variáveis. Deste modo, o parâmetro b é fixado de forma exógena para a terra e para a água e o seu valor é dado pelo valor dual ou preço sombra da restrição. Portanto, os recursos fixos são utilizados enquanto o valor da sua produtividade marginal for positivo e, no caso da água, superior à taxa de exploração que os produtores pagam até que o recurso se esgote. Nos recursos variáveis a sua utilização depende apenas da relação entre o preço do fator e o respetivo valor da produtividade marginal. Portanto, a utilização destes recursos é limitada pela utilização dos fatores fixos terra e água e a sua retribuição é feita ao preço de mercado, que é um parâmetro exógeno no modelo.

A valorização dos recursos no modelo depende das áreas das atividades, i.e, das culturas, que são dadas pelo vetor das variáveis de decisão X . Como o objeto do estudo é a agricultura de regadio consideram-se as principais atividades de regadio que são praticadas nos perímetros de rega do Caia e de Odivelas. No primeiro caso, predominam as grandes culturas como é o caso do milho e do trigo, sendo também de registar a área do tomate para a indústria. No caso de Odivelas, a principal cultura é olival de regadio, com mais de metade da área do perímetro, sendo o milho a segunda cultura. Para além dessas culturas, é de referir a existência de áreas importantes de frutos, (como o melão), o tomate e arroz. Em ambos os casos, o modelo prevê, não só a substituição entre culturas de regadio, como a substituição entre culturas regadio e de sequeiro, tendo-se considerado nestas últimas um custo de oportunidade da terra que reflete a média das culturas de sequeiro mais utilizadas na região para alternar com as culturas de regadio, nomeadamente o girassol de sequeiro e o trigo.

5.3.2. Cenários de avaliação dos efeitos económicos das alterações climáticas

Com o intuito de obter dados específicos sobre alterações climáticas para a região do Alentejo, foi desenvolvido um sistema de informação, descrito no capítulo 2,

que considera o modelo climático HadRM3P (Jones et al., 2004) e os modelos HIRHAMh e HIRHAMhh (Bøssing-Christensen et al., 2007). Para o modelo HadRM3P foram considerados os cenários A2 e B2 de alterações climáticas (simulações A21 e B21) e para os modelos HIRHAMh e HIRHAMhh os cenários da família A2 (simulações A22 e A23). As simulações foram feitas para o período 2071-2100 e tem como cenário de controlo a simulação feita com dados climáticos 1961-1990.

Uma das principais medidas propostas no projeto para atenuar o impacto das alterações climáticas na região do Alentejo foi a introdução de variedades de ciclo longo para manter os níveis de produtividade. Desta forma, os quatro cenários anteriormente descritos foram incluídos em dois conjuntos de simulações. O primeiro, designado “simulação 1”, não considera qualquer estratégia de mitigação, admitindo por conseguinte o encurtamento dos ciclos de produção, e uma consequentemente redução nos níveis de produtividade e uma ligeira redução das necessidades em rega. Esta medida foi designada por *Variedade culturais atuais (VCA)* (vd. 3.1.3). A segunda alternativa designada “simulação 2” considera uma estratégia de mitigação com base na adoção de variedades de culturas de ciclo longo para a manutenção dos níveis de produtividade. Esta medida foi designada por *Novas variedade culturais (NVC)* (vd. 3.1.3). Os valores previstos das necessidades de rega para os vários cenários foram apresentados no Quadro 3.3. para todas as culturas e são agora apresentados em relação aos valores do cenário base no Quadro 5.1

Quadro 5.1 - Impactes das alterações climáticas nas necessidades de rega nos perímetros de rega do Caia e Odivelas

	Base m ³ /ha	Cenários da simulação 1 % de alteração				Cenários da simulação 2 % de alteração			
		A21	B21	A22	A23	A21	B21	A22	A23
CAIA									
Trigo	1500	-10	-10	3	0	75	44	88	84
Miho	7000	-6	-3	-3	-4	28	19	29	28
Tomate	6000	-2	-1	0	-1	21	14	20	18
Frutas	5500	-2	-1	0	-1	21	14	20	18
Girassol	2000	-2	-4	0	0	26	16	29	26
Olival	2000	12	10	11	9	43	30	38	37
Outras cult. regadas	4000	-2	-2	0	-1	29	19	31	28
ODIVELAS									
Arroz	13000	-3	-1	0	-1	24	16	25	24
Milho	7521	-4	-4	-4	-4	32	20	30	30
Tomate p/ indústria	667	-1	-2	-1	-1	20	13	19	18
Melão/ melancia	4964	-1	-5	-9	-9	18	10	19	17
Girassol	2270	7	2	4	6	37	23	36	36
Trigo	825	-7	-11	10	8	144	90	158	157
Frutos	4459	-1	-2	-1	-1	20	13	19	18
Olival	1669	20	17	16	18	53	38	44	46
Outras cult. regadas	5187	-1	-1	0	0	30	19	29	28

Na simulação 2 haverá um aumento das necessidades em água de todas as culturas em ambos os perímetros de rega. Estes acréscimos de água serão mais acentuados nos casos do trigo e do olival. As necessidades de água na cultura do trigo aumentarão entre 44% e 84% no Caia e de 90% a 158% em Odivelas.

A redução na produtividade das culturas depende de dois fatores: i) menor intersecção da radiação, devido ao encurtamento do ciclo vegetativo, ii) défice hídrico. Nas culturas regadas só interessa o primeiro fator. Assim, na simulação 2 não haverá qualquer alteração da produtividade das culturas regadas (Quadro 5.2). Nas culturas de sequeiro, na simulação 1 conjugam-se os dois fatores anteriormente referidos e na simulação 2 a redução depende apenas do défice hídrico.

Quadro 5.2 - Impactes das alterações climáticas na produtividade das culturas nos perímetros de rega do Caia e Odivelas

	Base m ³ /ha	Cenários da simulação 1				Cenários da simulação 2			
		% de alteração				% de alteração			
		A21	B21	A22	A23	A21	B21	A22	A23
CAIA									
Trigo	3500	-24	-18	-21	-21	0	0	0	0
Miho	12000	-23	-17	-23	-23	0	0	0	0
Tomate	70000	-21	-15	-21	-21	0	0	0	0
Frutas	10500	-21	-15	-21	-21	0	0	0	0
Girassol	1500	-19	-14	-20	-20	0	0	0	0
Olival	8500	-25	-21	-25	-25	0	0	0	0
Outras cult. regadas	17667	-21	-15	-22	-22	0	0	0	0
Culturas de sequeiro	1325	-28	-19	-30	-28	-28	-19	-30	-28
ODIVELAS									
Arroz	13000	-22	-16	-22	-22	0	0	0	0
Milho	7521	-23	-17	-23	-23	0	0	0	0
Tomate p/ indústria	667	-21	-15	-21	-21	0	0	0	0
Melão/ melancia	4964	-23	-17	-24	-24	0	0	0	0
Girassol	2270	-19	-14	-20	-20	0	0	0	0
Trigo	825	-24	-18	-21	-21	0	0	0	0
Frutos	4459	-21	-15	-21	-21	0	0	0	0
Olival	1669	-25	-21	-25	-25	0	0	0	0
Outras cult. regadas	5187	-21	-15	-22	-22	0	0	0	0
Culturas de sequeiro	1515	-30	-21	-29	-29	-30	-21	-29	-29

As estimativas apresentadas no Quadro 5.2 mostram que nos cenários da simulação 1, verificar-se-á, em ambos os perímetros de rega, uma redução na produtividade das culturas entre 15% e 25%. Esta redução será ainda maior para as culturas de sequeiro, podendo atingir os 30%. Na simulação 2, a adoção de variedades de culturas de ciclo longo permite manter a produtividade das culturas de regadio.

5.4. Resultados

Como seria de esperar, os resultados do modelo de PMP refletem no cenário de base a situação observada em termos das áreas das culturas, em ambos os perímetros de rega. No Quadro 5.3 apresenta-se as elasticidades da procura de terra utilizadas para calibrar a função do custo de produção agregada nos perímetros de rega do Caia e Odivelas.

Quadro 5.3 - Elasticidade da procura da terra nos perímetros de rega do Caia e Odivelas

Perímetro de rega do Caia		Perímetro de rega de Odivelas	
Culturas	Elasticidade	Culturas	Elasticidade
Trigo	0.856	Arroz	0.397
Milho	0.75	Milho	0.409
Tomate	0.593	Tomate p/ indústria	0.315
Frutos	0.696	Melão/Melancia	0.316
Girassol	0.929	Girassol	0.429
Olival	0.728	Trigo	0.388
Outras cult. regadas	0.684	Frutos	0.326
Culturas de sequeiro	0.962	Olival	0.575
		Outras cult. Regadas	0.396
		Culturas de sequeiro	0.552

Fonte: resultados do modelo de minimização dos mínimos quadrados.

Os valores das elasticidades foram obtidos através de estimação econométrica utilizando o método dos mínimos quadrados baseados em dados de áreas de cultivo e rendimentos de 2001 a 2008. As elasticidades obtidas são mais elevadas no perímetro de rega do Caia do que no caso de Odivelas. O maior efeito de substituição no perímetro de rega do Caia está relacionado com uma maior percentagem de culturas anuais e com alterações no padrão de culturas. No caso de Odivelas, as áreas das culturas manteve-se mais estável no período analisado, até porque a proporção das culturas plurianuais, nomeadamente, do olival é por demais evidente.

Para ambos os perímetros de rega, Caia e Odivelas, os resultados foram estudados em termos das alterações no valor económico da água, no uso dos recursos, no aproveitamento do regadio em termos das áreas das culturas, do preço dual da terra e do rendimento da produção agrícola.

5.4.1. Valor económico da água

O valor económico da água é calculado como a soma do preço sombra da água e com a taxa de exploração das obras de rega públicas, que é cobrada por m³ de água consumida, i.e., o preço que os agricultores pagam pela água. Na maior parte

dos casos, este preço é muito inferior ao que estão dispostos a pagar. Portanto, o valor económico da água corresponde ao valor de uso da água no regadio.

A Figura 5.1 mostra os resultados obtidos na simulação 1 para o valor da água nos perímetros de rega do Caia e de Odivelas para o cenário base e para os quatro cenários alternativos considerados para as alterações climáticas.

Para ambos os perímetros de rega, Caia e Odivelas, os resultados foram estudados em termos das alterações no valor económico da água, no uso dos recursos, no aproveitamento do regadio em termos das áreas das culturas, do preço dual da terra e do rendimento da produção agrícola.

No perímetro de rega do Caia, a redução mais significativa (86%) do valor económico da água ocorre no cenário A21. Os resultados obtidos no cenário B21 e A22 são os menos desfavoráveis, uma vez que a descida do valor da água é de 60%. Deste modo, o valor económico da água decresce de $150\text{€}/10^3 \text{ m}^3$ no cenário base, para valores entre $60,4$ e $20,7\text{€}/10^3 \text{ m}^3$ (variação entre 60% e 86%) numa situação de alterações climáticas. No perímetro de rega de Odivelas, o valor económico da água é de $113\text{€}/10^3 \text{ m}^3$ no cenário base, sendo a sua diminuição menor do que no caso do perímetro de rega do Caia e varia entre 26% a 42%.

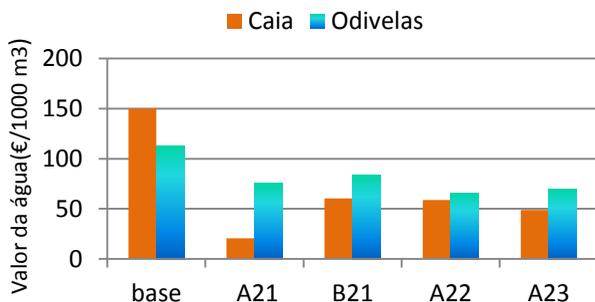


Figura 5.1 - Valor económico da água nos cenários de alterações climáticas simulação 1 nos perímetros de rega do Caia e Odivelas (Fonte: Resultados dos modelos PMP).

Os resultados do valor económico da água obtidos para a simulação 2 são apresentados na Figura 5.2.

Nos cenários da simulação 2, o consumo de água também atinge a totalidade das quotas de água, como nos cenários da simulação 1. No entanto, o valor económico da água aumenta em todos os cenários de alterações climáticas. No perímetro do Caia os valores aumentam de $150\text{€}/10^3 \text{ m}^3$ até mais de $250\text{€}/10^3 \text{ m}^3$. No caso de Odivelas este aumento é ainda maior, onde o valor da água aumenta de $113\text{€}/10^3 \text{ m}^3$ a mais de $320\text{€}/10^3 \text{ m}^3$, o que significa um acréscimo entre 183% e 216%.

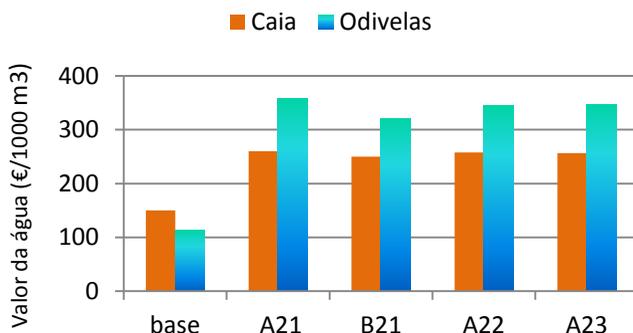


Figura 5.2 - Valor económico da água nos cenários de alterações climáticas da simulação 2 nos perímetros de rega do Caia e Odivelas (Fonte: Resultados dos modelos PMP).

5.4.2. Uso dos recursos

O uso dos recursos é avaliado em termos da percentagem das alterações nas áreas de regadio e de sequeiro e na intensidade de utilização da mão-de-obra e do capital. No Quadro 5.4 apresentam-se os resultados obtidos para as simulações nos diferentes cenários de alterações climáticas.

No perímetro de rega do Caia a área de regadio apresenta um pequeno aumento que atinge o valor máximo de 5% no cenário A21. Nos restantes cenários de alterações climáticas, a redução na área de regadio atinge os 2% ou 3%. Devido a esse aumento da área de regadio e à acentuada diminuição da produtividade das culturas de sequeiro, a área de sequeiro diminui entre 9 a 19%. No entanto, no perímetro de Odivelas, a área de regadio diminui 5% a 6%, o que conduz a um aumento da área de sequeiro de 12% a 14%. Os efeitos das alterações climáticas no uso da mão-de-obra e do capital são menores do que os observados para a área de regadio. No perímetro de rega do Caia, o uso da mão-de-obra diminui entre 3% e 6% e do capital cerca de 3%. No caso do perímetro de rega de Odivelas, essas diminuições são mais elevadas e atingem os 6%.

Na simulação 2, a área de regadio diminui em todos os cenários, uma vez que as necessidades de água e, portanto, o consumo de água aumentaram. No perímetro de rega do Caia, a área de regadio diminui de 16% a 26%, i.e., de 900 a quase 1.500 ha num perímetro de rega potencial de 7.237 ha. O declínio na área de regadio é menor no perímetro de rega de Odivelas, apresentando valores de 12% no cenário B21 até 17% no cenário A21. No caso da simulação 2, verifica-se aumento das áreas de sequeiro maior do que o observado na simulação 1.

Quadro 5.4 – Uso dos recursos nos cenários de alterações climáticas da simulação nos perímetros de rega do Caia e Odivelas

Recursos	Base	Cenários de Simulação 1				Cenários de Simulação 2			
		% de alteração				% de alteração			
		A21	B21	A22	A23	A21	B21	A22	A23
CAIA									
Área de regadio (ha)	5665	5	3	2	3	-25	-16	-27	-26
Área de sequeiro (ha)	1572	-19	-12	-9	-12	16	25	15	16
Trabalho (h/ha)	44	-5	-3	-6	-6	-9	-6	-9	-9
Capital (€/ha)	1502	0	-1	-3	-2	-15	-10	-16	-15
ODIVELAS									
Área de regadio (ha)	8809	-6	-5	-5	-5	-17	-12	-15	-16
Área de sequeiro (ha)	3553	14	12	13	14	14	19	15	15
Trabalho (h/ha)	55	-6	-4	-6	-6	-9	-6	-8	-9
Capital (€/ha)	1835	-6	-5	-6	-6	-13	-9	-11	-12

Fonte: Resultados do modelo de PMP.

O impacto negativo sobre o uso da mão-de-obra e do capital também são mais elevados na simulação 2 do que nos cenários da simulação 1. No perímetro de rega do Caia, o uso de mão-de-obra decresce de 6 a 9% e o uso do capital diminui de 10 a 16%. No perímetro de rega de Odivelas, a redução no uso da mão-de-obra é semelhante, mas o decréscimo no uso do capital é menor e atinge no máximo 13%. A diminuição no uso de trabalho e do capital é superior à da simulação 1 devido à maior redução na área de regadio que se verifica na simulação 2 que, como consequência, leva a que as necessidades em capital e mão-de-obra sejam inferiores.

O Quadro 5.5 mostra o preço dual da terra nos perímetros de rega do Caia e de Odivelas obtido nos diferentes cenários de alterações climáticas considerados nas duas simulações. Este indicador pode ser interpretado como a disposição a pagar pela terra, ou seja, o seu custo de oportunidade.

O preço dual da terra diminui em todos os cenários de alterações climáticas para ambos os perímetros de rega estudados. Na simulação 1, no perímetro de rega do Caia, este indicador cai de 168,4€/ha ano no cenário base para 146,4€/ha ano no cenário B21 e 92,9€/ha ano no cenário A22. No caso do perímetro de rega de Odivelas o preço dual da terra no cenário base é de 242,5€/ha, portanto superior ao valor obtido para o perímetro de rega do Caia. No entanto, as diminuições no custo de oportunidade da terra são mais elevadas no perímetro de rega de Odivelas, atingindo valores de preços duais entre 1,6€/ha ano no cenário A21 e 60,9€/ha ano no cenário B21.

Nos cenários das alterações climáticas da simulação 2, a terra não é usada totalmente e por conseguinte o preço dual da terra é zero, o que significa que não existe disposição a pagar por unidade adicional de terra.

Quadro 5.5 – Preço dual da terra nos cenários de alterações climáticas da simulação 2 nos perímetros de rega do Caia e Odivelas

	Cenários de alteração climática (€/ha)				
	Base	A21	B21	A22	A23
Perímetro de rega do Caia:					
Simulação 1	168.4	138.7	146.4	92.9	109.3
Simulação 2	168.4	0.0	0.0	0.0	0.0
Perímetro de rega de Odivelas					
Simulação 1	242.5	1.6	60.9	13.2	12.0
Simulação 2	242.5	0.0	0.0	0.0	0.0

Fonte: Resultados do modelo de PMP.

5.4.3. Aproveitamento do regadio

As alterações decorrentes dos efeitos das alterações climáticas no aproveitamento do regadio são avaliadas em termos das alterações previsíveis nas áreas das culturas, como se apresenta no Quadro 5.6 para as simulações 1 e 2.

Quadro 5.6 – Aproveitamento do regadio nos cenários de alterações climáticas nos perímetros de rega do Caia e Odivelas – alteração das áreas

Culturas	Base (ha)	Cenários de simulação 1				Cenários de simulação 2			
		% de alteração				% de alteração			
		A21	B21	A22	A23	A21	B21	A22	A23
Caia:									
Trigo	1773	9	6	9	10	-37	-18	-43	-40
Milho	1783	10	7	3	5	-32	-25	-32	-31
Tomate	578	-3	-2	-5	-5	-8	-7	-8	-8
Frutos	249	-6	-4	-8	-8	-7	-5	-7	-6
Girassol	203	38	27	31	32	-38	-22	-39	-36
Olival	387	-12	-11	-13	-12	-6	-4	-5	-5
Outras cult. regadas	693	-6	-4	-7	-7	-5	-4	-5	-5
Odivelas:									
Arroz	260	7	6	9	8	-91	-70	-87	-87
Trigo	229	7	6	7	7	-23	-10	-24	-24
Milho	1113	-1	0	0	0	-40	-29	-37	-37
Tomate	254	-3	-2	-3	-4	-11	-8	-10	-10
Melão/melancia	168	-5	-3	-5	-5	-7	-5	-7	-7
Frutos	202	-5	-3	-5	-5	-6	-4	-5	-5
Girassol	190	19	15	20	19	-55	-35	-51	-51
Olival	5056	-9	-8	-9	-9	-9	-6	-7	-8
Outras cult. Regadas	1337	-4	-3	-4	-5	-11	-8	-10	-10

Fonte: Resultados do modelo de PMP.

No conjunto das simulações 1, a tecnologia agrícola é mantida e devido às alterações climáticas há um encurtamento do ciclo das plantas, que leva à redução das necessidades em água e da produtividade por hectare.

Os resultados obtidos com a simulação 1 indicam que no perímetro de rega do Caia, as áreas de trigo e de milho aumentam até 9 e 10% e a área de girassol aumenta entre 27 e 38%. As áreas das culturas permanentes diminuem, nomeadamente o olival, que reduz mais de 11%. A situação no perímetro de Odivelas não é muito diferente. A área de girassol tem um aumento de 15 a 19%, bem como as áreas de trigo (3 a 10%) e arroz (6 a 19%). As áreas das culturas permanentes também diminuem, sendo novamente a maior redução observada no caso do olival (9%). Estes resultados mostram que se a tecnologia agrícola atual (variedades das culturas) for mantida, as culturas mediterrâneas (olival, tomate, frutas e melão/melancia), que apresentam na região do Alentejo vantagens competitivas, devem ser as mais penalizadas pelas alterações climáticas. Todavia, as culturas menos competitivas no Alentejo, como os cereais, podem tornar-se nas áreas de regadio mais importantes.

Na simulação 2, diminui a área de todas as culturas de regadio. No perímetro de rega do Caia, as maiores reduções nas áreas das culturas ocorrem nos casos do trigo (18 a 43%), milho (25 a 32%) e girassol (22 a 38%). Estas culturas são aquelas que têm os níveis mais elevados de necessidades em água e simultaneamente os maiores acréscimos devido às alterações climáticas. Do ponto de vista do aproveitamento das áreas de regadio, o perímetro de rega de Odivelas é mais afetado pelo impacto das alterações climáticas. Neste caso, as áreas de arroz, trigo, milho e girassol são as mais penalizadas.

Por exemplo, no cenário A21 o arroz quase desaparece do padrão cultural, sendo a sua área reduzida em 91%. No mesmo cenário, as áreas de trigo, milho e girassol caem 23%, 40% e 55%, respetivamente. Ao contrário do que acontecia na simulação 1, as culturas mediterrâneas são as menos afetadas em ambos os perímetros de rega estudados, com variações nas suas áreas de 3% a 11%.

5.4.4. Rendimento da produção agrícola

De acordo com a Figura 5.3, que mostra as alterações no rendimento da produção agrícola nos cenários da simulação 1, as alterações climáticas levam a reduções substanciais em ambos os perímetros de rega. No perímetro do Caia o rendimento da produção agrícola é de 825 €/ha no cenário base. Perante as alterações climáticas, cai pelo menos 40% no cenário B21, o que representa, no mínimo, uma perda de 360 €/ha. Nos cenários A21, A22 e A23, as perdas de rendimento chegam aos 60%.

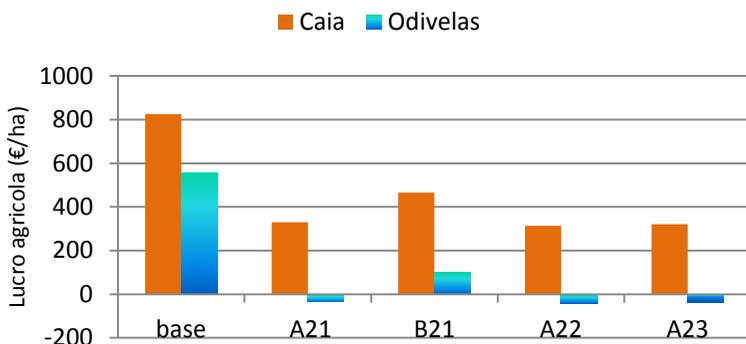


Figura 5.3 – Rendimento da produção agrícola nos cenários de alterações climáticas da simulação 1 nos perímetros de rega do Caia e Odivelas (Fonte: Resultados do modelo de PMP).

No perímetro de rega de Odivelas a situação é ainda pior. No cenário base o lucro agrícola é de 555€/ha, no entanto atinge valores negativos nos cenários A21(-35 €/ha) A22(-46 €/ha) e A23(-36 €/ha). O cenário B21 é o único cenário de alterações climáticas em que se regista um rendimento da produção agrícola positivo (100 €/ha). Os valores negativos, verificados no perímetro de rega de Odivelas, estão relacionados, por um lado, com o forte impacte das alterações climáticas na produtividade das culturas na simulação 1, e, por outro lado, pela componente fixa da taxa de rega (taxa de conservação) que pode atingir mais de 40€/ha em algumas áreas onde a água ainda é distribuída por gravidade.

A Figura 5.4 mostra os resultados obtidos para o rendimento da produção agrícola nos cenários da simulação 2 em ambos os perímetros de rega estudados.

Na simulação 2, os valores do rendimento da produção agrícola diminuem em todos os cenários das alterações climáticas, mas menos do que nos cenários da simulação 1. No perímetro do Caia, o rendimento da produção agrícola cai cerca de 13% no cenário de B21 e 20% nos cenários da família A2. No perímetro de Odivelas a redução do rendimento da produção agrícola é ainda maior, chegando a atingir os 25% no cenário A21.

Os resultados em termos das alterações no valor da água, no rendimento da produção agrícola e no preço dual da terra, sugerem que o aumento no consumo de água na simulação 2 induz uma transferência de rendimento da terra para a água de rega, o que explica que o preço dual da terra diminua muito mais do que o rendimento da produção agrícola e que o valor da água aumente.

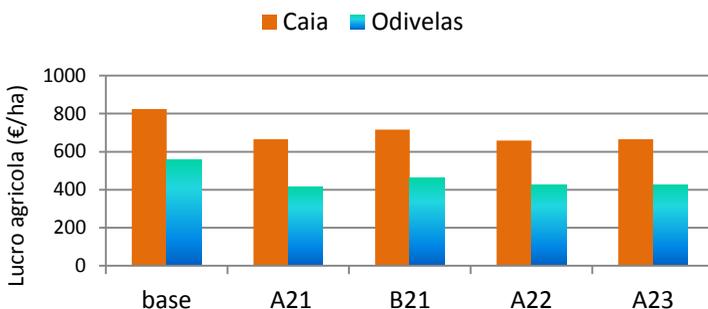


Figura 5.4 – Rendimento da produção agrícola nos cenários de alterações climáticas da simulação 2 nos perímetros de rega do Caia e Odivelas (Fonte: Resultados do modelo de PMP).

5.5. Conclusão

Neste estudo avaliaram-se os impactes económicos das alterações climáticas na agricultura de regadio no Alentejo. Neste âmbito, foi desenvolvido um modelo de oferta agrícola com base na programação matemática positiva e na utilização de elasticidades exógenas da procura da terra para calibrar uma função custo de produção quadrática. O modelo maximiza o rendimento da produção agrícola agregada ao nível do perímetro de rega, tendo em conta as condições tecnológicas da produção agrícola, os mercados de fatores e de produto e as disposições da política agrícola e da política de gestão da água. Neste modelo, o valor económico da água é dado pelo preço sombra da água e pelo que os agricultores pagam efetivamente pela taxa de exploração.

O modelo foi aplicado às condições da produção agrícola dos perímetros de rega do Caia no Alto Alentejo e de Odivelas no Baixo Alentejo. Estes dois perímetros de rega, para além de refletirem de forma bastante abrangente as condições da produção agrícola de regadio no Alentejo, ajustam-se relativamente bem como proxy das condições socioeconómicas em que são explorados no regadio, respetivamente, os solos característicos da região de Évora e da região de Beja, estudados por Rolim (2013).

Os resultados do modelo aplicados aos dois casos de estudo foram obtidos para várias famílias de cenários gerais de alterações climáticas e tendo em conta diferentes modelos de simulação climática, bem como duas distintas estratégias de mitigação dos efeitos.

O impacto das alterações climáticas na agricultura de regadio traduz-se primeiramente na redução do ciclo das culturas e por conseguinte numa redução

da produtividade das culturas que é acompanhada pela diminuição das necessidades de rega.

Nestas condições, e admitindo que a tecnologia de produção agrícola se mantenha inalterada, é de esperar que o consumo de água se mantenha, mas o seu valor económico deverá baixar significativamente. Esta redução deverá ser mais significativa no perímetro de rega do Caia e, portanto, nos solos da região de Évora do que no perímetro de Odivelas, i.e., nos solos da região de Beja.

Estes impactes no consumo e no valor económico da água têm repercussões no uso dos outros recursos de base. No caso do perímetro de rega do Caia é de esperar que a redução das necessidades de água para rega permita um ligeiro aumento da área de regadio, de modo a tentar compensar a perda de rendimento decorrente da diminuição da produtividade. No entanto, este aumento da área regada não tem efeito direto, nem no emprego, nem no investimento, uma vez, que as necessidades de trabalho e de capital decrescem ligeiramente. No caso do perímetro de rega de Odivelas, as alterações climáticas provocaram uma diminuição generalizada do uso dos recursos de base (terra, trabalho e capital). No entanto, apesar da manutenção das tecnologias agrícolas num contexto de alterações climáticas conduzir a uma extensificação generalizada no uso dos recursos agrícolas, é de esperar que para além da água, a terra continue a ser um recurso limitante, como indicam os valores positivos obtidos para o custo de oportunidade da terra.

Em termos do aproveitamento do regadio, dadas as condições distintas dos perímetros de rega em termos estruturais e em termos institucionais, é de esperar que os produtores assumam formas distintas de ajustamento às alterações climáticas. No caso do perímetro de rega do Caia, i.e., dos solos da região de Évora, é de esperar um aumento das áreas das grandes culturas regadas com menores necessidades de água, como é o caso do trigo e do girassol. No perímetro de rega de Odivelas e nos solos de Beja, as alterações climáticas levarão a uma diminuição da área de todas as culturas regadas, sendo particularmente relevante o fato dessa redução afetar de forma muito incisiva culturas estratégicas para a região e para o agronegócio português, como o olival, os frutos, as hortícolas e horto-industriais.

Os impactes económicos decorrentes das alterações climáticas fazem-se sentir de modo muito significativo numa descida do rendimento da produção agrícola, que poderá ser de 40 a 60% no perímetro de rega do Caia, i.e., nos solos de Évora e assumir inclusivamente resultados negativos no médio e longo prazo no caso de Odivelas, i.e., nos solos de Beja.

A adoção de variedades de ciclo longo permite manter a produtividade das culturas nos níveis atuais, mas à custa da intensificação do uso de alguns fatores,

nomeadamente, da água. Neste caso é de esperar um aumento significativo do valor económico da água decorrente do aumento da escassez do recurso, que inclusivamente levará a uma transferência de rendimentos do recurso terra para o recurso água.

Nestas condições, apesar de se verificar um acréscimo da pressão sobre os recursos da agricultura de regadio (terra e água), não é de esperar que aumente nem o emprego, nem o investimento agrícola, mantendo-se assim a expectativa de descida das necessidades de trabalho e capital.

Devido à falta de água haverá também uma diminuição da área de todas as culturas de regadio. No entanto, contrariamente à situação sem medidas de mitigação dos efeitos das alterações, como é a manutenção das tecnologias agrícolas, as culturas particularmente afetadas pela redução da área não são as culturas mediterrâneas, mas antes as grandes culturas, como os cereais e o girassol.

A introdução de medidas de mitigação dos efeitos das alterações climáticas, baseadas na utilização de culturas de ciclo mais longo, permite manter os níveis atuais de produtividade das culturas, mas não consegue evitar as perdas do rendimento da produção agrícola. No entanto, relativamente a uma situação sem medidas de mitigação, é de esperar que as perdas de rendimento sejam substancialmente atenuadas, uma vez que essas agora atingem no máximo 25%.

Uma das limitações do estudo prende-se com o fato da avaliação das alterações climáticas estar apenas associada ao impacte na produtividade das culturas e nas suas necessidades de água de rega e por conseguinte nos rendimentos agrícolas. Deixou-se assim de fora o estudo de um possível impacte na estrutura dos preços nos mercados e nos mercados dos fatores de produção que não a água. Esta limitação é também um estímulo à continuação e aprofundamento do estudo, até porque o modelo de oferta agrícola desenvolvido, facilmente acomoda uma parametrização dos preços dos produtos e dos fatores.

Referências Bibliográficas

- Buyse, J, Van Huylenbroeck, G., & Lauwers, L. (2007). Normative, positive and econometric mathematical programming as tools for incorporation of multi-functionality in agricultural policy modelling. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 120: 70-81.
- Daily, G.C. (eds.) (1997). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington, DC, USA
- Dinar, A., & Maria-Saleth, R. (2005). Issues in Water Pricing Reforms: From Getting Correct Prices to Setting Appropriate Institutions. In Folmer, H. & Tietenberg, T. (Eds.). *International Yearbook of Environmental and Resource Economics New Horizons in Environmental Economics*, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK.
- Fragoso, R., C. Marques (2013), The Economic Impact of Alternative Water Pricing Policies in Alentejo Region, *CEFAGE-UE Working Paper* 2013.

- Fragoso, R, & Marques, C. (2009). Avaliação económica de tarifas de água no uso agrícola: um estudo de caso no Sul de Portugal. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 47(3): 699-718.
- Frahan, H., Buysse, B., Polomé, J., Fernagut, B., Harmignie, O., Lauwers, L., Van Huylenbroeck, G., & Van Meensel, J. (2007). Positive mathematical programming for agriculture and environmental policy analysis: review and practice. In: Weintraub, A., Bjorndal, T., Epstein, R., & Romero, C. (eds.), *Management of Natural Resources: A Handbook of Operations Research Models, Algorithms and Implementations*. Kluwer Academic Publishers.
- Gibbons, D.C. (1986) *The economic value of water*. Washington DC: Resources for the Future, 101 p.
- Gomez-Limón, J.A., & Riesgo, L. (2004). Irrigation water pricing: differential impacts on irrigated farms. *Agricultural Economics*, 31: 47-66.
- Heckelei, T., Britz, W., Zang, Y. (2012). Positive Mathematical Programming Approaches - Recent Developments in Literature and Applied Modelling. *Bio-based and Applied Economics*, 1(\): 109-124.
- Heckelei, T. & Britz, W. (2005). Models based on positive mathematical programming: state of art and further extensions. In: Arfini, F. (ed.) *Modelling Agricultural Policies: State of Art, New Challenges*. Monte Università Parma, Parma: 48-74.
- Heckelei, T., & Wolff, H. (2003). Estimation of constrained optimization models for agricultural supply analysis based on generalized maximum entropy. *European Review of Agricultural Economics*, 30(1): 27-50.
- Hertel, Thomas W. (editor), 1997. *Global Trade Analysis: Modeling and Applications*, New York; Cambridge University Press, 1997.
- Howitt, R. (1995). Positive Mathematical Programming. *American Journal of Agricultural Economics*, 77(2): 329-342.
- Iglesias et al. (2011a), Re-thinking water policy priorities in the Mediterranean region in view of climate change, *Environmental Science & Policy*, 14(2011), p.744–757
- Iglesias et al. (2011b), A regional comparison of the effects of climate change on agricultural crops in Europe, *Climatic Change* (2012) 112:29–46
- Johansson, R.C, Tsur, Y., Roe, T.L., Doukkali, R., Dinar, A. (2002). Pricing irrigation water: a review of theory and practice. *Water Police*, 4: 173-199.
- Kaiser HM, Riha SJ, Wilks DS, Rossier DG, Sampath R (1993). A farm-level analysis of economic and agronomic impacts of gradual warming. *American Journal of Agricultural Economics*, 75:387–398
- Kallis, G., Nijkamp, P. (2000). Evolution of EU water policy: A critical assessment and hopeful perspective. *Journal of Environmental Law and Policy*, 3(27): 301–335.
- Medellin-Azuara, J., Harou, J., Howitt, R. (2010). Estimating economic value of agricultural water under changing conditions and the effects of special aggregation. *Science of the Total Environment*, 408: 5639-5648.
- Mills, G. (1984). *Optimization in Economic Analysis*. George Allen & Unwin Ltd, London.
- Moss et al. (2010), The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, 08823, Vol. 463
- Noéme, C, & Fragoso, R. (2004). Evaluation of Alternative Policies of Irrigation Water Price. Application to Large Farms in Alentejo Region. *The CIGR Journal of Scientific Research and Development*, Manuscript 04006, Vol. – VI – December.

- Parry, M.L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, Fischer, G. (2004). Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14 : 53–67
- Petersen, T., Klauer, B., & Manstetten, R. (2009). The environment as a challenge for governmental responsibility – The case of the European Framework Directive. *Ecological Economics*, 68: 2058-2065.
- Roe, T., Dinar, A., Tsur, Y., Diao, X. (2005). Feedback links between economy wide and farm-level policies: With application to irrigation water management in Morocco. *Journal of Policy Modeling*, 27: 905-928.
- Rogers, P., Silva, R., Bhatia, R. (2002). Water is an economic good: How to use prices to promote equity, efficiency, and sustainability. *Water Policy*, 4: 1-17.
- Rogers, P., Bhatia, R., & Huber, A. (1998). *Water as a social and economic good: How to put the principle into practice*. Global Water Partnership/Swedish International Development Cooperation Agency, Stockholm, Sweden.
- Rolim, J. (2013). *Metodologias para Avaliação dos Impactes das Mudanças Climáticas na Agricultura de Regadio e nos Sistemas de Rega*. Tese de Doutoramento em Engenharia dos Biosistemas, Instituto Superior de Agronomia – Universidade de Lisboa.
- Reilly, J., F. Tubiello, B. McCarl, D. Abler, R. Darwin, K. Fuglie, S. Hollinger, C. Izaurralde, S. Jagtap, J. Jones, L. Learns, D. Ojima, E. Paul, K. Paustian, S. Riha, N. Rosenberg, and C. Rosenzweig, 2003: U.S. agriculture and climate change: New results. *Climatic Change*, 57, 43-69, doi:10.1023/A:1022103315424.
- Stern, N., S.Peters, V.Bakhshi, A.Bowen, C.Cameron, S.Catovsky, D.Crane, S.Cruickshank, S.Dietz, N.Edmonson, S.-L.Garbett, L.Hamid, G.Hoffman, D.Ingram, B.Jones, N.Patmore, H.Radcliffe, R.Sathiyarajah, M.Stock, C.Taylor, T.Vernon, H.Wanjie, and D.Zenghelis (2006), *Stern Review: The Economics of Climate Change*, HM Treasury, London.
- Tiwari, D., Dinar, A. (2002). Balancing future food demand and water supply: The role of economic incentives in irrigated agriculture. *Quarterly Journal of International Agriculture*, 41(1-2): 77-97.
- Tsur, Y. (2005). Economic Aspects of Irrigation Water Pricing. *Canadian Water Resources Journal*, 30(1): 31-46.
- Tsur, Y., Roe, T.L., Doukkali, R.M., Dinar, A. (2004). *Pricing irrigation water: Principles and cases from developing countries*. RFF Press, Washington, DC, USA.
- UN-Water Partners (2010), *Climate Change Adaptation: The Pivotal Role of Water*, Policy Brief.
- Varela-Ortega, C., Sumpsi, J.M., Garrido, A., Blanco, M., Iglesias, E. (1998). Water pricing policies, public decision making and farmers' response: implications for water policy. *Agricultural Economics*, 19: 193-202.
- Veettil, P.C., Speelman, S., Frija, A., Buysse, J., Van-Huylenbroeck, G. (2011). Complementarity between water pricing, water rights and local water governance: A Bayesian analysis of choice behaviour of farmers in the Krishna river basin, India. *Ecological Economics*, 70: 1756-1766.
- Ward, F.A. (2009). Economics in integrated water management. *Environmental Modelling and Software*, 24: 948-958.
- Young, R.A. (2005). *Determining the economic value of water: Concepts and Methods*. Washington DC: Resources for the Future.

Capítulo 6

O IMPACTE DAS PROJEÇÕES DOS MODELOS DE CLIMA NO ARMAZENAMENTO DE ÁGUA PARA REGA

Madalena Moreira¹, Deepti Rani², Sandra Mourato³, Rita Cabral Guimarães¹, Ricardo Serralheiro¹ e João Corte Real⁴

¹*Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas (ICAAM), Universidade de Évora*

²*Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas (ICAAM), Department of Hydrology, Indian Institute of Technology Roorkee*

³*Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas (ICAAM), Instituto Politécnico de Leiria - Escola Superior de Tecnologia e Gestão*

⁴*Research Unit in Aeronautical Sciences (UNICA), Departamento de Aeronáutica e Transportes, Universidade Lusófona*

Introdução

A operação de sistemas de reservatórios com objetivo de usos múltiplos, como sejam o abastecimento urbano, industrial e rega de zonas agrícolas, a produção de energia elétrica, o controlo de cheias, as ações recreativas e os requisitos ecológicos, é um desafio exigente pela quantidade de variáveis envolvidas.

Os modelos de operação de reservatórios devem incluir estudos delineados especificamente para reavaliar as políticas de operação para os sistemas já existentes, tendo em conta a maximização de benefícios, minimizando os custos e as perdas de água e garantindo as necessidades de água.

Previsões de crescente competição por água para satisfazer as necessidades para a agricultura, para a indústria e para o consumo doméstico são preocupação em todo o mundo (WWF, 2007). O aumento rápido das necessidades globais de energia contribui, ainda, para transformar o sector da água em área prioritária de ação.

Em todo o mundo o sector agrícola é o maior consumidor de água, sendo responsável por cerca de 70% de todo o consumo. As projeções das necessidades de água para rega referem um aumento entre 15-20% até 2025 (Rani e Moreira, 2010). Um desafio importante é reduzir o consumo de água, introduzindo práticas de rega mais sustentáveis.

No caso de bacias hidrográficas partilhadas devem ser consideradas necessidades adicionais como sejam; o acordo na utilização da água, a tomada de decisão

bilateral sobre a construção de barragens e a gestão e a operação dos reservatórios, pois estas decisões têm consequências particularmente importante quando aumenta a necessidade de água para os diferentes usos.

As práticas de gestão e operação dos reservatórios devem adaptar-se continuamente às alterações nas prioridades de uso da água, alterações do uso do solo, alterações de práticas agrícolas e desenvolvimentos tecnológicos e alterações nas políticas ambientais públicas e na regulamentação económica e técnica.

As projeções dos modelos de clima potenciam ainda mais estas situações pela redução da precipitação média, o aumento da temperatura e o aumento da frequência de precipitações intensas. Estes indicadores apontam para a redução do caudal afluente aos reservatórios, o aumento da evaporação do espelho de água e o aumento das necessidades dos consumos urbano, industrial ou para rega (Mourato, 2010).

Neste capítulo é apresentado um caso de estudo do impacte das projeções dos modelos de clima na disponibilidade de água no sistema Alvito-Odivelas, dois reservatórios integrados no Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva com usos de abastecimento público e rega, respetivamente. Atualmente, este sistema recebe água do reservatório de Loureiro através da transferência de caudais entre as bacias hidrográficas do Rio Guadiana e do Rio Sado.

Este estudo foi desenvolvido à escala mensal e a metodologia aplicada consta da avaliação da série de caudais mensais afluentes aos reservatórios para um período de controlo de 30 anos (1961-1990), geração de séries sintéticas de escoamento afluente aos reservatórios; obtenção das séries de precipitação e evaporação, sobre o espelho de água, para o período controlo; cálculo das necessidades para os diferentes usos e sua evolução; determinação das séries de precipitação e temperatura para o período cenário (2071-2100) com base em modelos de clima; aplicação de um modelo hidrológico para cálculo das séries de escoamento afluentes aos reservatórios para o período cenário; estimativa das séries de evaporação e precipitação para o período cenário; estimativa das necessidades dos diferentes usos para o período cenário; aplicação de um modelo de otimização para o período de controlo e para o período cenário e comparação dos resultados relativos à garantia de satisfação da rega.

Relativamente à estrutura do capítulo, no ponto dois é apresentada a descrição do sistema de reservatórios Alvito-Odivelas e são apresentados os dados necessários ao desenvolvimento do trabalho, no ponto três são apresentadas as ferramentas aplicadas, no ponto quatro são apresentados os resultados e, finalmente, no ponto cinco são apresentadas as conclusões do trabalho realizado, destacando a capacidade de fornecimento de água para rega, a partir do reservatório de Odivelas.

6.1. Dados

6.1.1 Descrição do sistema de reservatórios Alvito-Odivelas

O sistema de reservatórios Alvito-Odivelas está localizado na Ribeira de Odivelas, na Região Alentejo, no Sul de Portugal e é parte integrante do Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva, Figura 6.1.

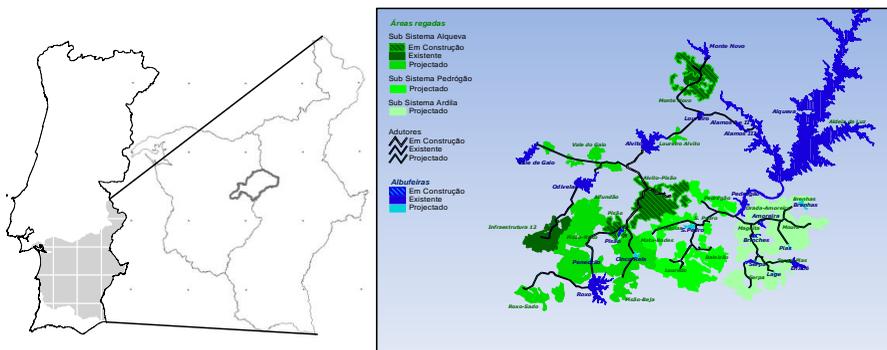


Figura 6.1 - Sul de Portugal com a representação da grelha de resolução dos modelos de clima. Bacia de Odivelas e sistema Alvito-Odivelas, integrado no Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva.

As características geométricas dos reservatórios de Alvito e de Odivelas são apresentadas

Quadro 6.1- Características geométricas dos reservatórios Alvito e Odivelas.

Características \ Reservatório	Reservatório	
	Alvito	Odivelas
Cota máxima	197,5 m	103,0 m
Volume máximo	132,5 Mm ³	96,0 Mm ³
Volume útil	130,0 Mm ³	70,0 Mm ³
Volume morto	2,5 Mm ³	26,0 Mm ³

Na Figura 6.2 são apresentadas as bacias hidrográficas nas secções dos reservatórios do sistema Alvito-Odivelas.

O reservatório de Alvito abastece água para consumo urbano dos municípios de Alvito, de Cuba, de Portel, de Viana do Alentejo e da Vidigueira e, atualmente, o aproveitamento hidroelétrico, através da descarga para Odivelas e Pisão. A Bacia

hidrográfica do Rio Odivelas na secção da barragem de Alvito apresenta uma área de drenagem de 210 km².

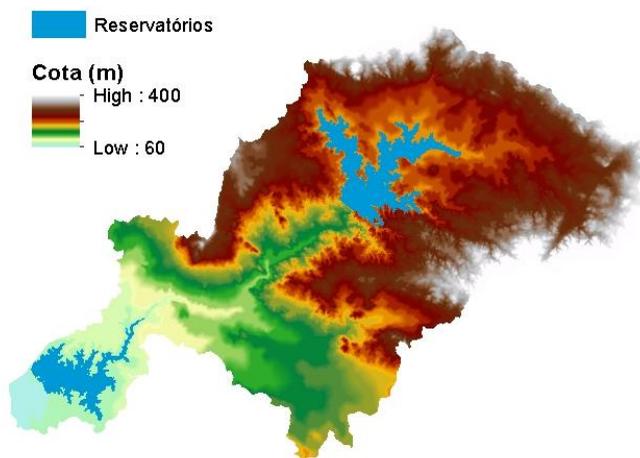


Figura 6.2 -Reservatórios e bacias hidrográficas do sistema Alvito-Odivelas.

O reservatório de Odivelas abastece água para a Infraestrutura 12, com 6845 ha de regadio. A Bacia hidrográfica do Rio Odivelas na secção da barragem de Odivelas tem uma área de drenagem de 438 km².

Relativamente às condições de funcionamento considerou-se que se o volume de água disponível em Odivelas for insuficiente para satisfazer as necessidades, é transferido o défice de volume do reservatório de Alvito. Se existir défice no reservatório de Alvito para satisfazer as necessidades, o volume de água necessário é importado do reservatório de Alqueva, através do sistema da barragem do Loureiro.

6.1.2 Dados climáticos

Os dados climáticos considerados neste estudo foram calculados com base nas séries diárias de precipitação registadas nas estações meteorológicas de Cuba, Ferreira do Alentejo, Viana do Alentejo e Portel e nas séries de temperatura média diária registadas na estação Meteorológica de Viana do Alentejo, para o período 1961-1990.

Estudos da variabilidade histórica da Região do Alentejo permitiram concluir que na zona norte interior foi registado um aumento do número de anos secos do período 1931-1960 para o período 1961-1990 (Mourato *et al.*, 2010), Figura 6.3.

Interior Norte do Alentejo

1931-1960

1961-1990

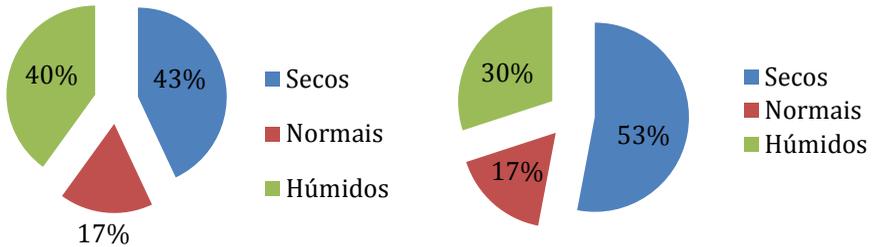


Figura 6.3- Evolução da classificação dos anos hidrológicos, relativamente à precipitação média anual.

Estes resultados podem ser exemplificados pela variação da precipitação anual na estação meteorológica de Portel, Figura 6.4. É identificada a tendência para redução da precipitação anual no período 1939-2007.

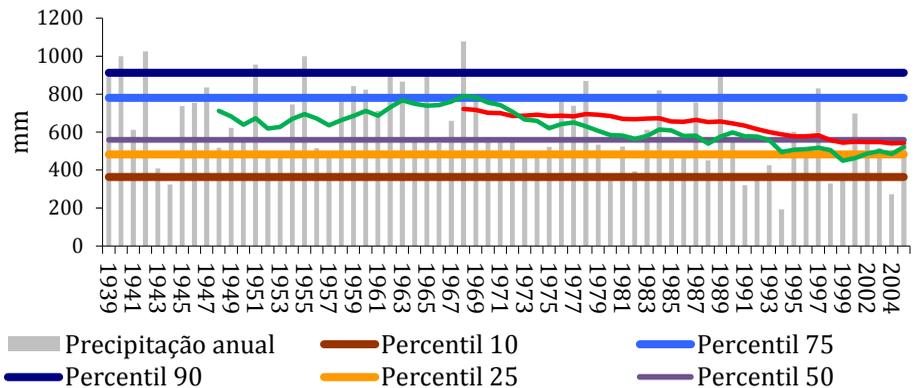


Figura 6.4- Variação da precipitação anual na estação meteorológica de Portel, percentis e médias móveis avançadas de 10 anos e de 30 anos.

6.1.3 Projeções dos modelos de clima para o período cenário 2071-2100 e correção do viés

Para representar o clima no final do século, no período cenário 2071-2100, foram consideradas as projeções de séries de precipitação e de séries de temperatura obtidas pela aplicação do Modelo Regional do Clima HadRM3P forçado pelo Modelo Global de Clima HadAM3P e desenvolvido no projeto PRUDENCE (Christensen, 2005). Foram considerados os resultados destes modelos para o cenário de emissões A2 do *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES)

(Nakicenovic *et al.*, 2000; IPCC, 2001). A resolução espacial dos RCM é perto de 50 km (resolução da grelha de 0,44° – 0,5°).

Nas Figuras 6.5 e 6.6 são apresentados os ciclos anuais da precipitação e da temperatura para os períodos controlo e cenário resultantes dos modelos de clima (Mourato,2010)

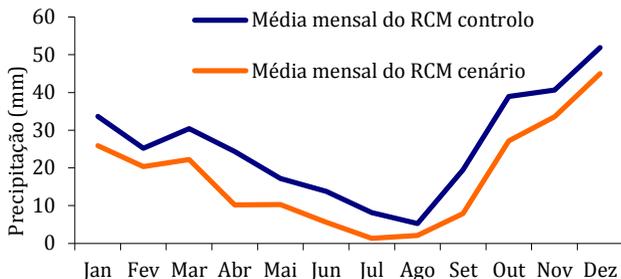


Figura 6.5- Ciclo anual da precipitação para Viana do Alentejo.

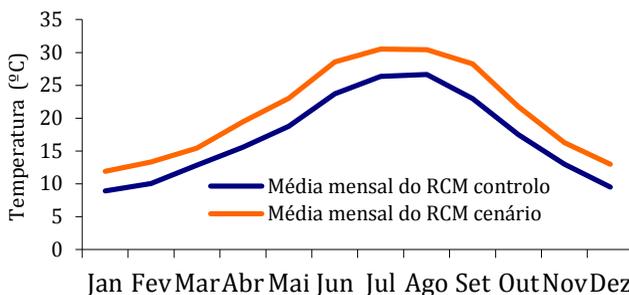


Figura 6.6- Ciclo anual da temperatura para Viana do Alentejo.

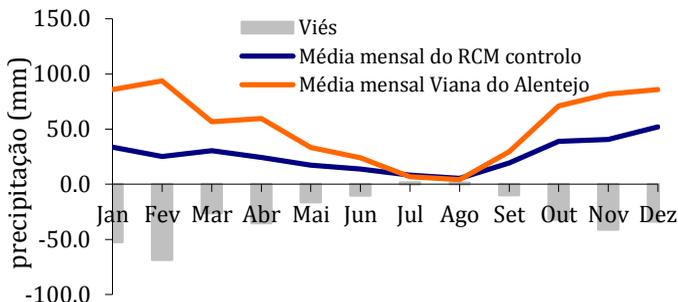


Figura 6.7- Ciclo anual dos registos e projeções da precipitação para a estação meteorológica de Viana do Alentejo.

Para a Região do Alentejo, entre o período de controlo (1961-1990) e o período cenário (2071-2100) verifica-se uma diminuição de 30% na precipitação média anual e um aumento de 3,7°C no valor médio da temperatura

6.2. Métodos

Neste ponto são apresentadas as ferramentas aplicadas no desenvolvimento do trabalho.

6.2.1 Método da correção do viés das projeções dos modelos de clima

Os resultados dos modelos de clima para o período cenário 2071-2100 foram corrigidos do viés de modo a serem introduzidos no modelo hidrológico SHETRAN (Mourato *et al.*, 2008b).

De entre os métodos de correção do viés existentes optou-se por considerar o Método Delta Change, assumindo fatores mensais multiplicativos para a precipitação e fatores mensais aditivos para a temperatura. Neste método de correção do viés a variabilidade da série observada no período de controlo é mantida para o período cenário, sendo corrigida pela evolução da média (Eq. 6.1 e Eq. 6.2 para a precipitação e temperatura, respetivamente).

$$P_{\text{cenário}} = P_{\text{obs}} \times \frac{\bar{P}_{\text{RCMcenário}}}{\bar{P}_{\text{RCMcontrolo}}} \quad (6.1)$$

$$T_{\text{cenário}} = T_{\text{obs}} + (\bar{T}_{\text{RCMcenário}} - \bar{T}_{\text{RCMcontrolo}}) \quad (6.2)$$

Onde:

$P_{\text{cenário}}$: Precipitação diária no período cenário corrigida (mm);

P_{obs} : Precipitação diária observada no período de controlo (mm);

$\bar{P}_{\text{RCMcenário}}$: Precipitação média mensal do ciclo anual projetada no período cenário (mm);

$\bar{P}_{\text{RCMcontrolo}}$: Precipitação média mensal do ciclo anual projetada no período de controlo (mm);

$T_{\text{cenário}}$: Temperatura média diária no período cenário corrigida (°C);

T_{obs} : Temperatura média diária observada no período de controlo (°C);

$\bar{T}_{\text{RCMcenário}}$: Temperatura média mensal do ciclo anual projetada no período cenário (°C);

$\bar{T}_{\text{RCMcontrolo}}$: Temperatura média mensal do ciclo anual projetada no período de controlo (°C).

6.2.2. Modelo hidrológico

O modelo hidrológico aplicado é o SHETRAN e foi desenvolvido pelo Water Resources Systems Research Laboratory (WRSRL) da Universidade de Newcastle Upon Tyne baseado no modelo SHE (Système Hydrologique Européen, Abbott *et al.* 1986). É um modelo tridimensional, fisicamente baseado, espacialmente distribuído que simula o escoamento superficial e subsuperficial e que inclui o transporte de sedimentos e de contaminantes. Este modelo dá informação detalhada no tempo e no espaço do escoamento e do transporte na bacia hidrográfica. No trabalho aqui apresentado não foram aplicados os módulos de sedimentos e de qualidade da água.

O movimento da água na bacia integra os processos principais da fase terrestre do ciclo hidrológico (interceção, evapotranspiração, escoamento superficial e na rede hidrográfica, escoamento nas camadas saturadas e insaturadas). A interceção é calculada através da equação de Rutter (que depende das áreas de solo ocupadas, da drenagem e da capacidade de armazenamento das copas. A evapotranspiração de referência pode ser calculada com a equação de Penman-Monteith (Monteith, 1965) ou através de observações da evaporação em função da tensão do solo e da transpiração contabilizada em função da densidade das raízes. A infiltração na zona insaturada (UZ) é calculada pela equação de Richards, que é função dos parâmetros hidráulicos do solo como sejam o potencial de pressão matricial do solo e a condutividade hidráulica representada pela equação de Brooks e Corey. O escoamento superficial pode ser produzido pelo excesso da precipitação sobre a capacidade de infiltração (escoamento de Horton) ou pelo excesso de saturação (escoamento de Dunne). O escoamento na rede hidrográfica é modelado pelas equações de Saint-Venant (modelo de onda difusa) com a aplicação da equação de Manning-Strickler.

O modelo SHETRAN tem sido considerado adequado no estudo dos impactos de alterações climáticas e do uso do solo (Bathurst *et al.* (1996), Bathurst *et al.* (2004), Lukey *et al.* (2000), Bathurst *et al.* (2005)).

Para construção do modelo hidrológico aplicado às bacias hidrográficas de Alvito e Odivelas foi calibrado e validado o software SHETRAN com base em registos de escoamento diário, disponíveis em estações hidrométricas localizadas na Ribeira de Odivelas.

O modelo de calibração aplicado foi desenvolvido em Mourato (2010) e classificado como multi-bacia hidrográfica, multi-localização e multi-resposta.

A calibração multi-bacia consiste na calibração simultânea do modelo em várias bacias hidrográficas, com diferentes processos dominantes. Esta metodologia aumenta a capacidade do modelo SHETRAN representar mudanças.

A calibração multi-localização consiste na calibração da resposta hidrológica em várias localizações dentro da mesma bacia hidrográfica. Esta metodologia permite integrar dinâmicas diferentes no comportamento de uma bacia hidrográfica.

A calibração multi-resposta consiste na calibração com base em registos de várias variáveis, como sejam caudal e cota piezométrica. Esta metodologia permite dar maior relevo ao estudo integrado da bacia hidrográfica.

O processo de calibração desenvolvido, de modo manual, aplica elevado tempo de computação do modelo SHETRAN. O processo adotado na calibração e posterior validação do modelo foi repetido até que os parâmetros adotados possam obter indicadores de desempenho considerados aceitáveis. Na secção de Odivelas, à escala diária, os resultados do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) e do viés de volumes obtidos na calibração foram, respetivamente, de 63% e de 2% e na validação de 68% e de 5%. À escala mensal os resultados do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) obtidos na calibração foram de 95% e na validação de 92%.

6.2.3. Geração de séries sintéticas dos caudais afluentes aos reservatórios

No processo da geração de séries de escoamento os dados sintéticos não acrescentam informação aos dados, quer se trate de séries históricas, quer se trate de séries resultantes dos RCM. Dada a natureza estocástica do processo de escoamento, as séries sintéticas permitem uma melhor avaliação do processo de planeamento já que constituem sequências alternativas de valores de escoamento com igual probabilidade de ocorrência.

Para gerar uma sequência de valores de escoamento assume-se que o processo de escoamento é estocástico e que, portanto, a sua evolução no tempo envolve o conceito de probabilidade. Processo estocástico é entendido como uma coleção ordenada de variáveis aleatórias que evoluem no tempo, X_1, X_2, \dots, X_T , cuja sequência x_1, x_2, \dots, x_T resultante da sua observação representa uma única realização do processo. Com a utilização de modelos de geração pretende-se obter sequências alternativas, x_1, x_2, \dots, x_T , passíveis de ocorrerem no futuro e que representem o mesmo processo estocástico (Guimarães, 2005).

Uma vez que o processo estocástico não é conhecido, procura-se que o modelo seja capaz de reproduzir as propriedades estatísticas da série histórica.

As séries de escoamento mensal geradas neste trabalho foram obtidas através da desagregação das séries anuais. O processo da geração das séries de escoamento anual começou com uma análise dos dados existentes para identificar tendências ou outras alterações e a independência.

A aplicação do teste de Mann-Kendall tal como recomendado pela World Meteorological Organization (1998) e do teste de Mann-Whitney tal como recomendado em Salas (1993) revelou que a série não apresenta tendência ou outras alterações determinísticas.

A verificação da independência foi feita através da análise do respetivo correlograma, definido pela representação gráfica do coeficiente de autocorrelação r_k em função de k . r_k é o estimador do coeficiente de autocorrelação ρ_k definido por (Box e Jenkins, 1976),

$$\rho_k = \frac{Cov[X_t X_{t+k}]}{Var[X]} \tag{6.3}$$

O estimador de máxima verosimilhança de ρ_k é dada por (Salas *et al.*, 1980),

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (X_i - \bar{X}_i)(X_{i+k} - \bar{X}_{i+k})}{\left[\sum_{i=1}^{n-k} (X_i - \bar{X}_i)^2 \sum_{i=1}^{n-k} (X_{i+k} - \bar{X}_{i+k})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \tag{6.4}$$

onde \bar{x}_i e $\bar{x}_i + k$ são, respectivamente, a média dos primeiros $n - k$ valores de x_i e a média dos últimos $n - k$ valores de x_i e k é o incremento temporal que não deve ser superior a $n/4$ (Box e Jenkins, 1976).

Uma série pode ser considerada independente se $r_k = 0$ para $k \neq 0$. No entanto, devido a flutuações amostrais a estimativa do coeficiente de autocorrelação pode apresentar valores diferentes de zero, tornando-se por isso necessário ter uma indicação de quanto ele pode diferir do seu valor teórico. Salas *et al.* (1980) sugerem a utilização do intervalo de confiança $(1 - \alpha)$ definido por Anderson(1941),

$$\left[\frac{-1 - Z_{1-\alpha/2} \sqrt{n-k-1}}{n-k} ; \frac{-1 + Z_{1-\alpha/2} \sqrt{n-k-1}}{n-k} \right] \tag{6.5}$$

onde $Z_{1-\alpha/2}$ é o quantil $1-\alpha/2$ da distribuição Normal estandardizada. Assim, considera-se a independência da série, para o nível de confiança $(1 - \alpha)$ se r_k se situar naquele intervalo (Guimarães, 2005).

Admitindo-se a hipótese de independência e da não existência de tendências da série de escoamentos anuais históricos ou projetados, os valores de escoamento podem ser tratados como variáveis aleatórias representadas por uma função de distribuição de probabilidade. A escolha da função de distribuição representativa de uma determinada série de escoamentos anuais é, por isso, o primeiro passo a efetuar com vista à geração de valores de escoamento.

Sendo os valores de escoamento anual a soma dos valores do escoamento diário, será de esperar que a eles se ajuste a distribuição Normal, desde que estes últimos

sejam independentes e que o número de dias do ano seja suficientemente grande (Quintela, 1967).

Nos casos em que os valores de escoamento apresentem uma distribuição assimétrica as distribuições a ajustar podem ser várias, sendo as mais utilizadas a distribuição Log-normal a dois e três parâmetros e a distribuição Gamma a três parâmetros. É muito provável que várias distribuições de probabilidade se ajustem igualmente bem aos valores de escoamento anual observados e a decisão sobre qual utilizar é portanto subjetiva (Clarke, 1973).

Neste trabalho, foi utilizado um modelo baseado na distribuição log-normal a dois parâmetros, combinado com a transformação de Wilson-Hilferty (Wilson e Hilferty, 1931). A utilização desta transformação permite preservar a assimetria dos escoamentos históricos que permanece mesmo depois da transformação logarítmica. (Guimarães e Santos, 2011).

O esquema de geração de escoamentos anuais é o seguinte (Guimarães e Santos, 2011):

- 1) Tomar os logaritmos dos valores da série resultante dos RCM, $y_i = \ln x_i$;
- 2) Calcular a média (\bar{y}), desvio padrão(s_y) e coeficiente de assimetria (g_y) da série transformada;
- 3) Gerar variáveis aleatórias (t_i) com distribuição normal $N(0,1)$;
- 4) Aplicar a transformação de Wilson-Hilferty aos valores de t_i obtidos anteriormente:

$$v_i = \frac{2}{g_y} \left(1 + \frac{g_y}{6} t_i - \frac{g_y^2}{36} \right) - \frac{2}{g_y}, \quad (6.6)$$

onde v_i é uma variável aleatória com média zero, variância unitária e assimetria g_y .

- 5) Obter os valores sintéticos de escoamento anual através de:

$$\hat{x}_i = \bar{x} + s_x v_i \quad (6.7)$$

Para a geração dos escoamentos mensais efetuar-se-á a desagregação dos valores anuais em mensais por utilização do método dos fragmentos proposto por Svanidze em 1961 (Svanidze, 1980). Este método permite simular escoamentos mensais tendo em consideração a distribuição do escoamento dentro do ano e a dependência estocástica não só dos escoamentos entre os vários anos como também dos escoamentos entre os vários meses (Svanidze, 1980).

Ao contrário dos escoamentos anuais, os escoamentos mensais, geralmente, não são normalmente distribuídos. Por este facto, quando se utilizam modelos de geração sequencial ou modelos de desagregação é necessário efetuar transformações aos dados para os normalizar e só assim se poderão utilizar aqueles modelos para a geração de escoamentos mensais (Guimarães, 2005).

A metodologia para aplicação do método dos fragmentos para desagregar valores anuais em valores mensais, admitindo a geração prévia de valores de escoamento anual \hat{x}_{i*} , é a seguinte:

- 1 - Ordenar os valores de escoamento anual observados x_i por ordem crescente de magnitude;
- 2 - Calcular os fragmentos correspondentes a cada valor de escoamento anual da série resultante dos RCM

$$F = [f_{i,j}] = \left[\frac{Y_{i,j}}{\bar{Y}_i} \right] = \begin{bmatrix} \frac{Y_{1,1}}{\bar{Y}_1} & \frac{Y_{1,2}}{\bar{Y}_1} & \dots & \frac{Y_{1,12}}{\bar{Y}_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{Y_{n,1}}{\bar{Y}_n} & \frac{Y_{n,2}}{\bar{Y}_n} & \dots & \frac{Y_{n,12}}{\bar{Y}_n} \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

onde F é uma matriz de dimensão (n x 12) que contém os n fragmentos da série gerada através dos RCM. O índice i, i = 1, 2, ..., n representa o ano e o índice j, j = 1, 2, ..., 12 representa o mês. $Y_{i,j}$ é o escoamento do mês j no ano i e $\bar{Y}_i = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} Y_{ij}$ é o escoamento mensal médio do ano i.

3 - Formar r classes de escoamento anual. Para a primeira e última classe apenas se definem os limites superior e inferior, respetivamente. A definição das classes é feita por agrupamento dos anos com valores de escoamento semelhantes e elas podem ou não ser de igual amplitude. Um estudo sobre este assunto pode ser encontrado em Arsénio (2003). Este autor utilizou o método dos fragmentos para a geração de escoamentos mensais para a ribeira de Odivelas, tendo experimentado vários intervalos de classes. Para o caso em estudo, a divisão em classes de amplitudes diferentes conduziu a bons resultados. Além disso verifica-se que a utilização de poucas classes com muitos fragmentos em cada classe foi a pior alternativa. Arsénio (2003) sugere que a divisão em classes seja feita por tentativas até se encontrar a que produza melhores resultados em termos de preservação das estatísticas mensais da série histórica. Será esta a abordagem que se adotará neste trabalho.

4 - Desagregar cada valor de escoamento anual gerado \hat{x}_i através de:

$$\hat{y}_i = \hat{y}_i \times F_i, \quad (6.9)$$

onde \hat{y}_i é um vetor que contém os escoamentos mensais gerados do ano i, isto é, $\hat{y}_i = [\hat{y}_{i,1}, \hat{y}_{i,2}, \dots, \hat{y}_{i,12}]$. O índice i, i = 1, 2, ..., n representa o ano na série gerada. \hat{y}_i é o escoamento mensal médio gerado do ano i, obtido por $\hat{y}_i = \frac{\hat{x}_i}{12}$ e F_i é o fragmento a utilizar, isto é, uma das linhas da matriz F. A selecção de F_i a utilizar para desagregar cada valor anual gerado \hat{x}_i é feita do seguinte modo: identificar qual a classe a que pertence \hat{x}_i e se nessa classe existir mais do que um fragmento,

então deve recorrer-se a uma escolha aleatória, sem reposição, de um fragmento F_i dessa classe. Quando se esgotam os fragmentos de uma classe procede-se à reposição dos mesmos fragmentos que podem voltar ser utilizados aleatoriamente (Guimarães, 2005).

A avaliação da qualidade das séries geradas por qualquer modelo pode ser feita pela comparação das suas estatísticas com as estatísticas da série gerada através dos resultados dos RCM. Se as estatísticas da série existente são preservadas pelas séries geradas então considera-se que estas são sequências alternativas à série existente podendo ser utilizadas para o objetivo para que foram geradas.

A comparação da estatística, ϑ , da série histórica com a estatística, $\hat{\theta}$, das séries geradas, pode ser feita determinando a média e o desvio padrão de $\hat{\theta}$,

$$M(\hat{\theta}) = \frac{1}{s} \sum_{m=1}^s \hat{\theta}_m \quad (6.10)$$

$$s(\hat{\theta}) = \left[\frac{1}{s-1} \sum_{m=1}^s (\hat{\theta}_m - M(\hat{\theta}))^2 \right]^{1/2} \quad (6.11)$$

onde $\hat{\theta}_m$ representa a estatística $\hat{\theta}$ calculada para a m^a série gerada e s é o número de séries geradas.

Depois de calculadas $M(\hat{\theta})$ e $s(\hat{\theta})$ pode estabelecer-se o intervalo de confiança $(1 - \alpha)$ para ϑ ,

$$\left[M(\hat{\theta}) - Z_{1-\frac{\alpha}{2}} s(\hat{\theta}); M(\hat{\theta}) + Z_{1-\frac{\alpha}{2}} s(\hat{\theta}) \right] \quad (6.12)$$

onde $Z_{1-\alpha/2}$ é o quantil $1-\alpha/2$ da distribuição Normal estandardizada.

Considera-se que a estatística ϑ da série existente é preservada nas séries geradas se ela se situar dentro daquele intervalo.

6.2.4. Modelo de operação de sistemas de reservatórios

Dois modelos baseados em Programação Dinâmica são aplicados para otimização da operação do sistema de reservatórios. A Programação Dinâmica (DP) convencional é aplicada diretamente à operação dos reservatórios e o Modelo de Importação (WIM) é aplicado ao reservatório de Odivelas para calcular a quantidade de água necessária a importar de modo a que o reservatório possa responder à necessidade para os diferentes usos (Deepti Rani, 2004; Deepti Rani *et al.*, 2005).

A programação dinâmica (DP) é um procedimento de otimização para tomada de decisão em processos de várias fases. Este método foi introduzido por Bellman (1957) e aplicado aos reservatórios de Alvito e de Odivelas.

O algoritmo de programação dinâmica decompõe o problema complexo de multifases aplicado à otimização do sistema de reservatórios numa série de fases simples que são resolvidos sequencialmente.

Os problemas de operação dos sistemas envolvem conflitos nos objetivos como sejam os usos para; rega, controlo de cheias, produção hidroelétrica e preservação do ambiente. Em geral são usadas duas aproximações para resolver os problemas de otimização multiobjetivo; 1- considerando alguns dos objetivos como restrições, 2 – combinar os objetivos através de uma média pesada.

O Modelo de Importação foi formulado para calcular as necessidades de importação de água para um reservatório com défice de armazenamento.

Este modelo aplicado ao sistema de reservatórios Alvito-Odivelas em série permite começar por estimar o volume de água que é necessário importar do reservatório de Alvito de modo a responder a toda a necessidade no reservatório de Odivelas. De seguida a aplicação do Modelo de Programação Dinâmica ao reservatório de Alvito deve ter em consideração a necessidade de exportação de água como um consumo. A aplicação posterior do Modelo de Programação Dinâmica ao reservatório de Odivelas permite otimizar a utilização de água disponível no reservatório.

A formulação geral do Modelo de Importação de água (*backward moving*) aplicada ao reservatório de Odivelas, Figura 6.8, é a seguinte:

$$\sum_{t=1}^N C_t \times WIM_{O,t} \tag{6.13}$$

em que:

C_t é o custo da água importada do reservatório de montante para o reservatório de jusante, durante o período de tempo t [€].

$WIM_{O,t}$ é o volume de água a importar, durante o período de tempo t [dam^3].

No caso de se verificar que o custo da importação de água é constante, a função objetivo anterior transforma-se em:

$$\text{Min} \sum_{t=1}^N WIM_{O,t} \tag{6.14}$$

em que:

$WIM_{O,t}$ é o volume de água a importar, durante o período de tempo t [dam^3].

A equação recursiva a aplicar é:

$$ft(S_t) = \text{Min}_{WIM_{O,t}} [WIM_{O,t} + ft + 1(S_t + 1)], fN(SN) = 0 \quad (6.15)$$

As restrições são dadas pelas seguintes equações:

(i) *Balanço de água*

$$S_{t+1} = S_t + I_{O,t} + Ppt_{O,t} + WIM_{O,t} - ECFL_{O,t} - DI_{O,t} - Evp_{O,t} - OVFL_{O,t} \quad (6.16)$$

(ii) *Limites de armazenamento*

$$0 \leq S_{t+1} \leq K_0 \quad (6.17)$$

em que:

K_0 é capacidade de armazenamento útil do reservatório de Odivelas

(iii) *Limites de importação de água*

$$WIM_{O,t} \geq 0 \quad (6.18)$$

$$ECFL_{O,t} + DI_{O,t} + Evp_{O,t} - S_t - I_{O,t} - Ppt_{O,t} \leq WIM_{O,t} \leq K_0 + ECFL_{O,t} + DI_{O,t} + Evp_{O,t} - S_t - I_{O,t} - Ppt_{O,t} \quad (6.19)$$

(iv) *Descarga de cheia*

$$OVFL_{O,t} = 0 \quad \text{if } WIM_{O,t} > 0$$

$$OVFL_{O,t} = S_t + I_{O,t} + Ppt_{O,t} + WIM_{O,t} - ECFL_{O,t} - DI_{O,t} - Evp_{O,t} - S_{t+1} \quad (6.20)$$

if $WIM_{O,t} = 0$ and $S_{t+1} = K_0$

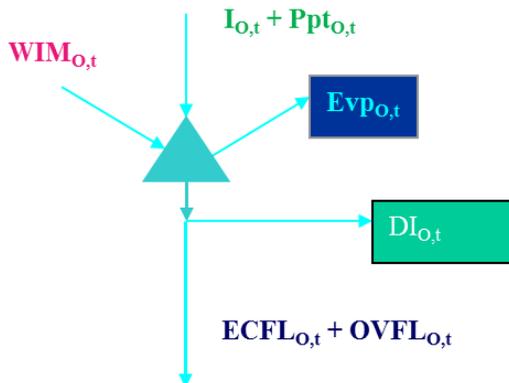


Figura 6.8- Esquema de aplicação do balanço de água, em Odivelas.

De seguida apresenta-se o modelo de operação baseado na programação dinâmica e aplicado ao reservatório de Alvitto.

A função objetivo corresponde à minimização da soma pesada do desvio quadrado do consumo necessário, ou seja:

$$\text{Min} \sum_{t=1}^N \text{TSD}_t \quad (6.21)$$

em que:

$$\text{TSD}_t = w_1(DW_{A,t} - RW_{A,t})^2 + w_2(WIM_{O,r} - TW_{A,r})^2 + w_3(OVFL_{A,t} - 0)^2 \quad (6.22)$$

$$0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (6.23)$$

A primeira condição é imposta para garantir a necessidade de abastecimento urbano no reservatório de Alvito;

A segunda condição é imposta para garantir a necessidade para rega no reservatório de Odivelas.

A terceira condição é imposta para minimizar a descarga superficial do reservatório. Esta é a última prioridade depois de ter garantido as anteriores.

As restrições são dadas pelas seguintes equações:

(i) *Balanço de água*

$$S_{t+1} = S_t + I_{A,t} + Ppr_{A,t} - O_{A,t} - Evp_{A,t} \quad (6.24)$$

(ii) *Limites de armazenamento*

$$0 \leq S_{t+1} \leq K_A \quad (6.25)$$

em que:

K_A é capacidade de armazenamento útil do reservatório de Alvito

(iii) *Limite de descarga*

$$O_{A,t} \geq 0 \quad (6.26)$$

em que:

$O_{A,t}$ é a descarga do reservatório, incluindo: descarga para abastecimento urbano (RWA,t), água transferida para rega em Odivelas ($TW_{A,t}$), caudal ecológico ($REFL_{A,t}$) e descarga de superfície ($OVFL_{A,t}$).

em que:

$$\begin{aligned} \text{REFL}_{A,t} &= O_{A,t} && \text{if } O_{A,t} < \text{ECFL}_{A,t} \\ &= \text{ECFL}_{A,t} && \text{if } O_{A,t} < \text{ECFL}_{A,t} + \text{DW}_{A,t} \end{aligned} \quad (6.27)$$

$$= 0, \quad \text{if } O_{A,t} \geq \text{ECFL}_{A,t} + \text{DW}_{A,t}$$

$$\text{RW}_{A,t} = O_{A,t} - \text{REFL}_{A,t} \quad \text{if } O_{A,t} - \text{REFL}_{A,t} < \text{DW}_{A,t} \quad (6.28)$$

$$= \text{DW}_{A,t} \quad \text{if } O_{A,t} - \text{REFL}_{A,t} \geq \text{DW}_{A,t}$$

$$\text{TW}_{A,t} = O_{A,t} - \text{REFL}_{A,t} - \text{RW}_{A,t} \quad \text{if } O_{A,t} - \text{REFL}_{A,t} - \text{RW}_{A,t} < \text{WIM}_{O,t} \quad (6.29)$$

$$= \text{WIM}_{O,t} \quad \text{if } O_{A,t} - \text{REFL}_{A,t} - \text{RW}_{A,t} \geq \text{WIM}_{O,t}$$

$$\text{OVFL}_{A,t} = O_{A,t} - \text{REFL}_{A,t} - \text{RW}_{A,t} - \text{TW}_{A,t} \quad (\text{com } S_{t+1} = K_A) \quad (6.30)$$

Finalmente descreve-se, de seguida, o modelo de operação baseado na programação dinâmica e aplicado ao reservatório de jusante, reservatório de Odivelas.

A função objetivo corresponde à minimização da soma do desvio quadrado do consumo necessário, ou seja:

$$\text{Min} \sum_{t=1}^N C_t \times \text{WIM}_{O,t} \quad (6.31)$$

em que:

$$\text{TSD}_t = (\text{DI}_{O,t} - \text{RI}_{O,t})^2 \quad (6.32)$$

em que:

$\text{RI}_{O,t}$ é a água descarregada para rega;

$\text{DI}_{O,t}$ é a água necessária para regar através do reservatório de Odivelas.

As restrições são dadas pelas seguintes equações:

(i) *Balanço de água*

$$S_{t+1} = S_t + I_{O,t} + \text{Ppt}_{O,t} - \text{RI}_{O,t} - O_{A,t} - \text{EFL}_{O,t} - \text{Evp}_{O,t} - \text{OVFL}_{O,t} \quad (6.33)$$

(ii) *Limites de armazenamento*

$$0 \leq S_{t+1} \leq K_O \quad (6.34)$$

em que:

K_O é capacidade de armazenamento útil do reservatório de Odivelas

(iii) *Limite de descarga*

$$RI_{0t} \geq 0 \quad (6.35)$$

$$\begin{aligned} ECFL_{0,t} + Evp_{0,t} - S_t - I_{0,t} - Ppt_{0,t} &\leq RI_{0,t} \\ &\leq K_0 + EFL_{0,t} + DI_{0,t} + Evp_{0,t} - S_t - I_{0,t} - Ppt_{0,t} \end{aligned} \quad (6.36)$$

Descarga de superfície

$$OVFL_{0,t} = S_t + I_{0,t} + Ppt_{0,t} - EFL_{0,t} - RI_{0,t} - Evp_{0,t} - S_{t+1} \quad (6.37)$$

em que:

$$S_{t+1} = K_0$$

6.3. Resultados

Na comparação entre os resultados registados no período controlo (1961-1990) e os resultados obtidos para o período cenário (2071-2100) foi identificada uma redução de 30% na precipitação total e um crescimento de 3,7 °C na temperatura média.

O resultado da calibração do modelo hidrológico aplicado às bacias hidrográficas em causa, com base em registos de escoamento diário disponíveis nas estações hidrométricas localizadas na Ribeira de Odivelas (www.inag.pt) para o ano hidrológico 1964-1965 (ano seco) e 1965-1966 (ano húmido), é apresentado na Figura 6.9.

A comparação do escoamento mensal histórico na secção da barragem de Odivelas para o período 1961-1973 (anos com registos e anteriores à construção da barragem) e o escoamento mensal gerado pelo modelo hidrológico com base nas projeções do modelo de clima para o período controlo, mostra que o modelo sobre-estima os caudais de ponta de cheia do hidrograma (Mourato *et al.*, 2008a).

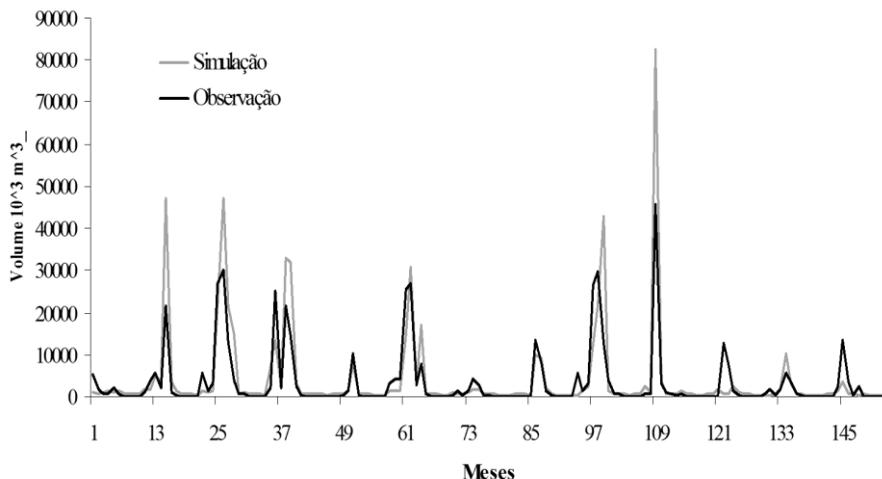


Figura 6.9 - Hidrograma de validação na secção de Odivelas.

Na Figura 6.10 está representada a variação do escoamento afluente à secção de Odivelas no período histórico (1952-1973) com registos antes da construção da barragem e no período cenário (2071-2100).

O caudal afluente mensal médio é reduzido entre 20% e 95% durante a estação húmida. No entanto, verifica-se um aumento na estação seca, confirmando que o padrão de distribuição do caudal mensal médio pode variar em cenários de alterações climáticas.

Os resultados da simulação à escala mensal permitem obter uma redução média anual de cerca de 90% para os dois reservatórios, entre o período 2071-2083, e o período 1961-1973.

O resultado obtido deve ser interpretado tendo em conta as restrições na realização do trabalho que se identificam: os erros na calibração do modelo, a aplicação de um método de cálculo da evapotranspiração mais expedito e a incerteza associada aos dados do RCM e da correção do viés.

No entanto, os resultados obtidos alertam para a necessidade de estudar medidas de adaptação à redução da disponibilidade de água

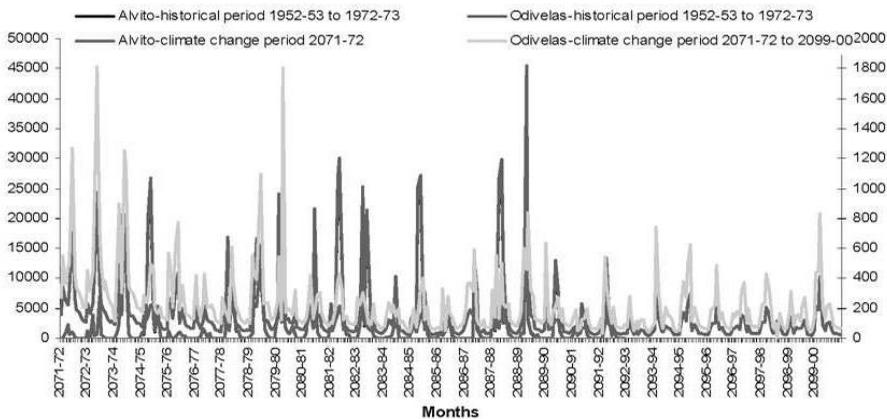


Figura 6.10- Volume mensal de água afluyente nos reservatórios de Odivelas e Alvito.

Para o período cenário (2071-2100), os volumes de água afluentes aos reservatórios de Odivelas e de Alvito, resultados da simulação com aplicação do SHETRAN, são os apresentados na Figura 6.11.

A série de escoamento mensal acumulado e afluyente ao reservatório de Alvito reduz de cerca de 92% no período cenário, relativamente ao período controlo 1961-1990, Figura 6.12.

Na Figura 6.13 são apresentados o ciclo anual do caudal afluyente no período controlo e no período cenário para os dois reservatórios.

Os resultados do modelo de importação de água no reservatório de Odivelas mostra que as necessidades em Odivelas (caudal ecológico mais evaporação) excedem o valor do caudal afluyente, pelo que a necessidade de importação do reservatório de Alvito num cenário de alterações climáticas é superior à necessidade para rega (principal uso do reservatório), Figura 6.14.

A necessidade de importação média anual aumenta até 180% quando comparada com os resultados históricos. Este resultado mostra que as perdas por evaporação são muito elevadas e que o volume importado deve corresponder à necessidade para rega e para satisfazer o caudal ecológico.

Com exceção de alguns anos mais secos, para o período histórico, o reservatório de Alvito permite a transferência do caudal necessário para a rega em Odivelas. No entanto, devido ao reduzido caudal afluyente ao reservatório de Alvito, projetado pelos cenários de alterações climáticas, não é possível satisfazer as necessidades de abastecimento urbano, mesmo que a necessidade de caudal seja reduzida para 90% do valor atual, Figura 6.15.

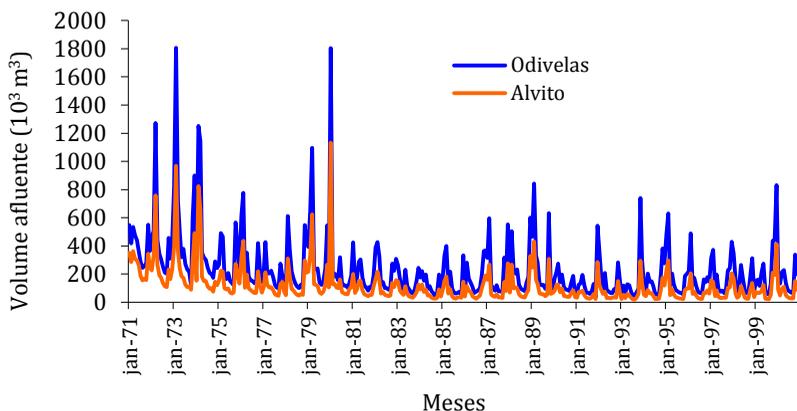


Figura 6.11- cenário de simulação dos caudais afluentes aos reservatórios de Odivelas e de Alvito no período cenário 2071-2100.

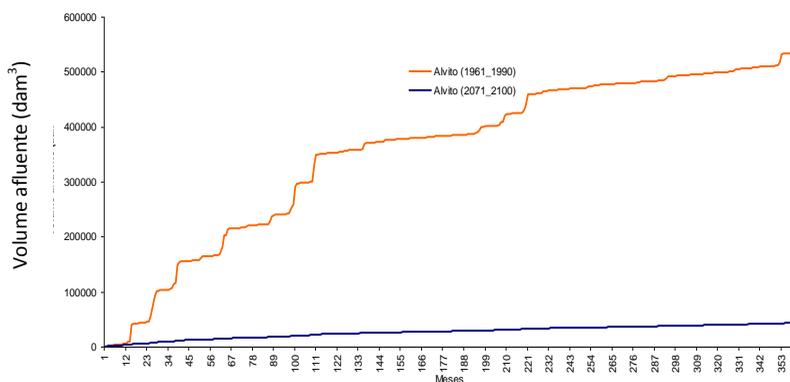


Figura 6.12 - Série de escoamento mensal acumulado e afluente ao reservatório de Alvito.

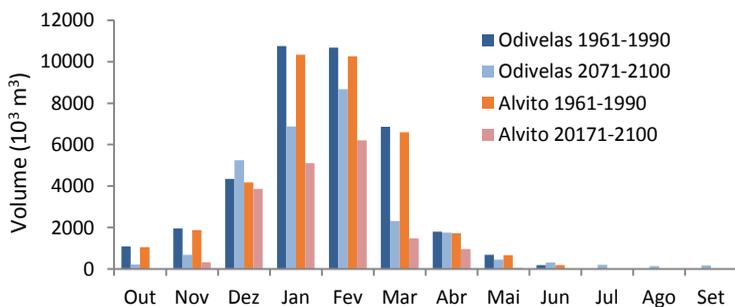


Figura 6.13- Ciclo anual do caudal afluente a Alvito e Odivelas, no período controlo e no período cenário.

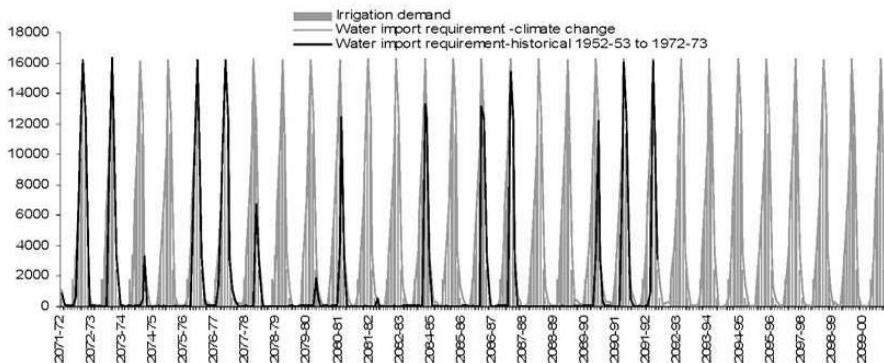


Figura 6.14- Volume de água importado para Odivelas num período histórico e num cenário de alterações climáticas.

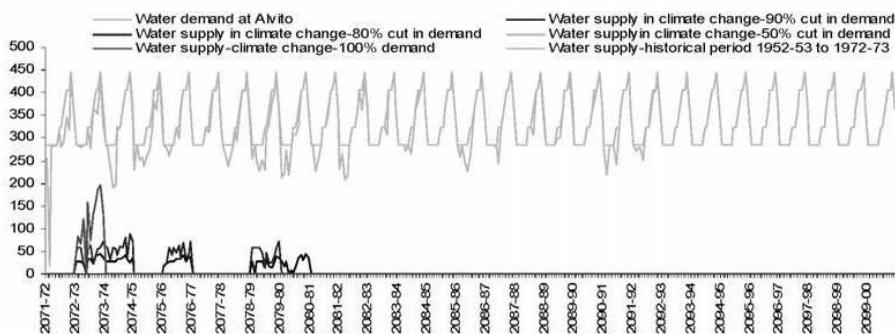


Figura 6.15- Abastecimento urbano a partir do reservatório de Alvito para períodos históricos e período cenário, considerando o reservatório vazio no início da simulação no período em estudo.

Em todos os resultados apresentados anteriormente considerou-se o reservatório vazio como condição inicial das simulações. Se for considerada uma condição inicial correspondente a reservatório cheio, Alvito pode responder às necessidades de abastecimento urbano nos primeiros 10 anos consecutivos. Estes resultados confirmam a importância da perda de água através da evaporação, Figura 6.16.

Estes resultados mostram que o desempenho dos sistemas de reservatórios é fortemente influenciado pelas perdas por evaporação, sugerindo menores vantagens na construção de armazenamento em reservatórios.

Os resultados da aplicação do modelo de Importação de água ao reservatório de Odivelas permitem concluir que 42% da água necessária para rega tem que ser importada de Alvito, nomeadamente entre Maio e Setembro, com um ciclo anual representado na Figura 6.17.

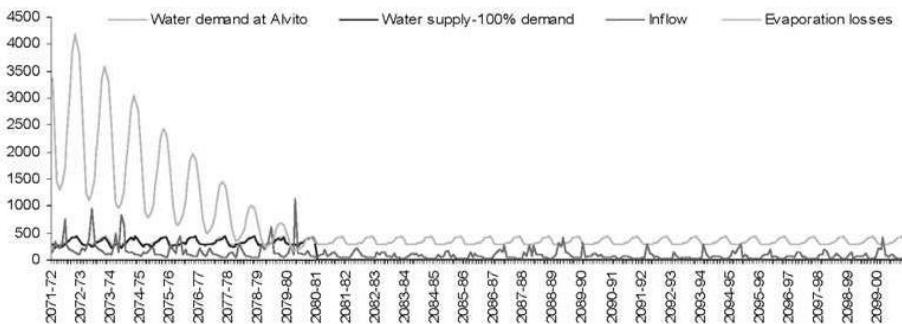


Figura 6.16 - Perdas por evaporação no reservatório Alvito, em cenário de alterações climáticas, considerando o reservatório cheio no início da simulação no período em estudo.

Os resultados mostraram que há necessidade de importar água; quando o escoamento mensal é inferior a 10 hm^3 quando o volume de água armazenado é inferior a 20 hm^3 .

A aplicação do Modelo de Operação ao Reservatório Alvito permite concluir que o volume descarregado é igual à soma do volume necessário a exportar para Odivelas mais a disponibilidade de água para o caudal ecológico e o relativo à descarga superficial, Figura 6.18.

Com este ciclo de descarga de Alvito pode ser concluído que em Odivelas o abastecimento para rega pode ser satisfeito em 90 % das necessidades, Figura 6.19.



Figura 6.17- Ciclo anual de importação para o reservatório de Odivelas.



Figura 6.18- Ciclo anual de descarga do reservatório de Alvito.

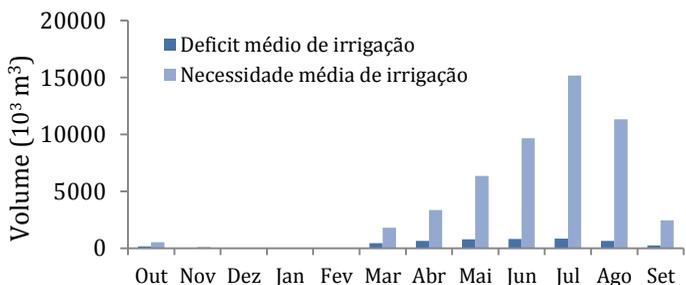


Figura 6.19- Ciclo anual de abastecimento para rega em Odivelas.

O ciclo anual de importação requerido no reservatório de Odivelas, em contexto de alterações climáticas é representado na Figura 6.20



Figura 6.20- Ciclo de importação de água no reservatório de Odivelas, em cenário de alterações climáticas.

Na simulação para o período cenário, verifica-se que a partir de Setembro de 2089 o reservatório de Alvito não tem capacidade para fazer face ao consumo e

necessidade de exportação para Odivelas (Figura 6.21). Conclui-se então que é necessário importar água de Loureiro para as necessidades em Alvito e em Odivelas.

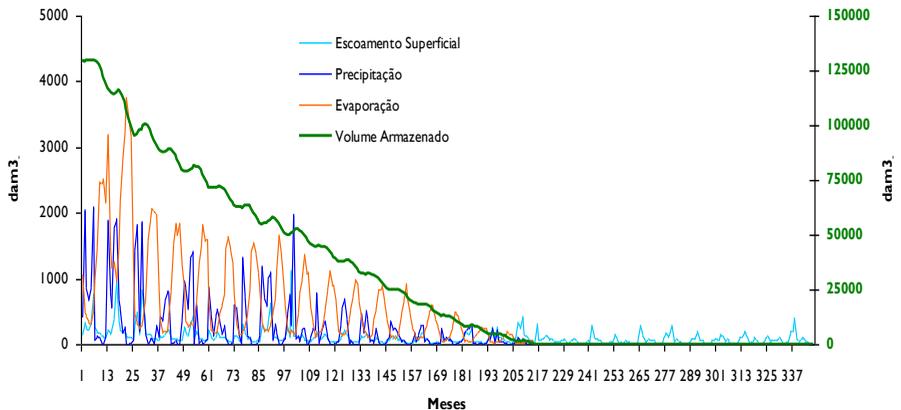


Figura 6.21- Variação do volume de armazenamento no reservatório de Alvito.

6.4. Conclusões

Este capítulo apresenta a metodologia e uma aplicação da avaliação do impacto das alterações climáticas no sistema de reservatórios Alvito-Odivelas. Os resultados foram obtidos pela introdução das projeções dos modelos de clima no modelo hidrológico fisicamente baseado SHETRAN e no Modelo de Importação e de operação de reservatórios baseados em Programação Dinâmica. As conclusões aqui apresentadas mostram que as projeções dos modelos de clima para um período futuro podem alterar drasticamente o desempenho dos sistemas. No caso particular deste sistema de reservatórios, ele não terá capacidade de responder à necessidade para abastecimento urbano, mesmo que esta seja reduzida de 10% do valor atual. As necessidades totais, incluindo as perdas por evaporação, excedem o caudal afluente. A garantia do sistema de reservatórios decresce rapidamente à medida que as necessidades se aproximam da média do caudal afluente. Os resultados indicam que o desempenho do sistema de reservatórios Alvito-Odivelas será significativamente influenciado pelas perdas por evaporação, que serão maiores num clima em mudança.

O sistema Alvito-Odivelas não consegue responder à necessidade dos volumes totais de rega. Este défice pode ser compensado pela transferência de água a partir de Loureiro, através do túnel Loureiro-Alvito.

Agradecimentos

O financiamento para a realização deste trabalho foi pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), Portugal através das postdoctoral grant (SFRH/BPD 26929/2006) e doctoral grant (SFRH/BPD 26929/2006).

- Bolsa de Doutoramento no âmbito do Programa PROTEC com a referência SFRH/PROTEC/49223/2008.

- Bolsa de estudo de curta duração no estrangeiro da Fundação Calouste Gulbenkian. Utilizada para deslocação ao Water Resource Systems Research Laboratory da School of Civil Engineering and Geosciences. Universidade de Newcastle UponTyne no período entre 1 de Julho e 16 de Julho de 2007.

Referências bibliográficas

Abbott MB, Bathurst JC, Cunge JA, O'Connell PE, Rasmussen J. 1986. An introduction to the European Hydrologic System – Systeme Hydrologique Europeen: "SHE" 1. History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology* 87: 45-49.

Arsénio, J.J.G. (2003). "Gestão de Albufeiras-Avaliação do Potencial dos Sistemas com Recurso a séries Sintéticas de Escoamentos". Master's Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisbon.

Bathurst JC, Ewen J, Parkin G, O'Connell PE, Cooper JD. 2004. Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 3. Blind validation for internal and outlet responses. *Journal of Hydrology* 287: 74–94.

Bathurst JC, Kilsby C, White S. 1996. Modelling the impacts of climate and land use change on basin hydrology and soil erosion. In: *Mediterranean Europe. Mediterranean Desertification and Land Use*. C. J. Brandt and J. B. Thornes (eds.). Chichester, John Wiley and Sons Ltd. 355-387.

Bathurst JC, Moretti G, El-Hames A, Moaven-Hashemi¹ A, Burton A. 2005. Scenario modelling of basin-scale, shallow landslide sediment yield, Valsassina, Italian Southern Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5: 189–202.

Bellman R (1957) *Dynamic programming*. Princeton Univ. Press, Princeton, New Jersey.

Christensen JH. 2005. Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European climate change risks and Effects. PRUDENCE Final Report, available from <http://prudence.dmi.dk/public/publications/>

Christensen, N.S., Wood, A.W., Voisin, N., Lettenmaier, D.P. and Palmer, R.N. (2004). The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado river basin. *Climate Change*, 62: 337-363.

Clarke, R.T. (1973) – *Mathematical models in hydrology*. FAO Irrigation and Drainage Paper, 19.

Deepti Rani (2004). *Multilevel optimization of a water resources system*. PhD Thesis, Dept. of Mathematics, Indian Inst. of Tech., Roorkee, India.

Deepti Rani, Srivastava, D.K. and Gulati, T.R. (2005). Derivation and Selection of Intra-Basin Water Transfer Policy for PAV Link Project. In: *Proc. XII World Water Congress of IWRA –*

- Water for Sustainable Developments—Towards Innovative Solutions , New Delhi (India), 22-25th November 2005.
- Ewen J, Parkin G, O'Connell PE. 2000. SHETRAN: distributed river basin flow and transport modelling system. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering* 5: 250-258.
- Guimarães, R. C. and Santos, E. G. (2011). Principles of Stochastic Generation of Hydrologic Time Series for Reservoir Planning and Design: A Case Study. *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000375 (Jan 14, 2011)
- Guimarães, R. Cabral (2005) – Simulação no Dimensionamento e Gestão de Sistemas de Recursos Hídricos. Geração de Séries Sintéticas de Escoamento. Tese apresentada à Universidade de Évora para obtenção do grau de Doutor em Engenharia dos Recursos Hídricos, Évora (Portugal).
- Hanson CE, Palutikof JP, Livermore MTJ, Barring L, Bindi M, Corte-Real J, Duaro R, Giannakopoulos C, Good P, Holt T, Kundzewicz Z, Leckebusch G, Moriondo M, Radziejewski M, Santos J, Schlyter P, Schwarb M, Stjernquist I, Ulbrich U. 2007. Modelling the Impact of Climate Extremes: An overview of the MICE Project. *PRUDENCE. Special Issue, Climatic Change* 81: 163-177.
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, pp. 881.
- Lukey BT, Sheffield J, Bathurst JC, Hiley RA, Mathys N. 2000. Test of the SHETRAN technology for modelling the impact of reforestation on badlands runoff and sediment yield at Draix, France. *Journal of Hydrology* 235: 44–62.
- Monteith JL. 1965. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology* 19: 205-224
- Mourato, S., Deepti Rani, Moreira, M. and Corte-Real, J. (2008a). A exploração dos recursos hídricos no sistema Alvito-Odivelas para um cenário de alteração climática. *Workshop Internacional sobre Clima e Recursos Naturais nos países de língua portuguesa: Parcerias na Área do Clima e Ambiente (WSCRA08)*. Ilha do Sal.
- Mourato, S., Moreira, M. and Corte-Real, J. (2008b). Correção de viés em modelos regionais de clima e impactes na modelação dos recursos hídricos. *9º Congresso da Água*. Cascais.
- Mourato, S., Moreira, M. and Corte-Real, J. (2010), Interannual variability of precipitation distribution patterns in Southern Portugal. *Int. J. Climatol.*, 30: 1784–1794. doi: 10.1002/joc.2021
- Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, de Vries HJM, Fenhann J, Gaffin S, Gregory K, Grubler A, Jung TY, Kram T, La Rovere EL, Michaelis L, Mori S, Morita T, Papper W, Pitcher H, Price L, Riahi K, Roehrl A, Rogner H-H, Sankovski A, Schlesinger M, Shukla P, Smith S, Swart R, van Rooijen S, Victor N, Dadi Z. 2000. *Special Report on Emissions Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Quintela, A. (1967) – Recursos de Águas Superficiais em Portugal Continental. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Rani D, Moreira MM, Mourato S (2008) Preliminary analysis of Alvito-Odivelas reservoir system operation under climate change scenarios. In: *Proceedings of drought management: scientific and technological innovations*, Zaragoza, Spain, *Options Méditerranéennes, Series A*, vol 80, pp133–138.

- Rani, D. and Moreira, M. M (2010). Simulation–optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation, *Water Resour. Manage.*, 24, 1107–1138, 2010.
- Salas, J. D. (1993). Analysis and modeling of hydrologic time series. *Handbook of Hydrology*, D. R. Maidment, ed., McGraw-Hill, New York.
- Svanidze , G. G. (1980). *Mathematical Modeling of Hydrologic Series*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado.
- Wilson, E. B. and Hilferty, M. M. (1931). Distribution of Chi-square. *Proceedings National Academy of Science*, 17, 648-688.
- World Meteorological Organization (1988). Analyzing long time series of hydrological data with respect to climate variability. Wcap-3, WMO/TD N° 224, Geneva.
- WWF (2007) *Climate solutions—WWF’s vision for 2050*. Available via DIALOG. <http://assets.panda.org/downloads/climatesolutionweb.pdf>

Capítulo 7

ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E NECESSIDADES DE REGA NA BACIA DO GUADIANA

Ricardo P. Serralheiro¹; Pedro Valverde²; Mário de Carvalho¹

¹ ICAAM, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas, Universidade de Évora

² Bolseiro do projeto FCT PTDC _AAC-AMB_115587/2009

Introdução

As alterações climáticas (AAC) são assunto hoje universalmente reconhecido, com impactes que podem ir do positivo ao muito negativo. São pois preocupação geral, quer da investigação e ciência, quer dos políticos e até das gentes comuns, reconhecendo-se a necessidade de procurar formas de atenuar os impactes negativos das AAC (Santos e Miranda, 2006). No presente caso, o que se pretendeu averiguar foram os efeitos das alterações climáticas nos recursos hídricos, mais especificamente nas necessidades de rega na bacia do rio Guadiana.

O estudo que serviu de base ao desenvolvimento da presente comunicação faz parte do projeto FCT PTDC_AAC-AMB_115587/2009: “Desenvolvimento de uma Metodologia para a Integração dos Efeitos das Alterações Climáticas na Gestão de Recursos Hídricos para uma Bacia Hidrográfica Portuguesa”, liderado pela FEUP, (coordenador do projeto Prof. Rodrigo Maia), com a participação do ICAAM/UE e ainda do COTR e de investigadores americanos do USBR e da NOAA. Os resultados, que se apresentam nesta comunicação, foram já em parte publicados (Valverde et al., 2014), ou estão incluídos em artigos que aguardam publicação.

Investigou-se, numa primeira fase do trabalho, a tendência de variação das necessidades úteis de rega na bacia hidrográfica do Guadiana para as principais culturas agrícolas de regadio com mais importância na região, durante um período histórico de 47 anos (1963 – 2009), para o qual se encontraram séries de dados meteorológicos que se consideraram suficientemente completas, no que respeita a dados da precipitação e das temperaturas. Nesta análise aplicou-se o modelo de balanço hídrico do solo ISAREG (Teixeira e Pereira, 1992; Teixeira, 1994) para calcular as necessidades hídricas e as necessidades úteis de rega das culturas. Os

resultados indicam, para toda a bacia do Guadiana, um aumento da temperatura média do ar e uma diminuição da precipitação anual, que seguem a tendência das alterações climáticas identificadas a maior escala por vários autores (Santos e Miranda, 2006; IPCC, 2007). No período analisado verificou-se na bacia do Guadiana uma tendência de aumento das necessidades úteis de rega das principais culturas de regadio (Valverde et al., 2014).

Havia portanto a necessidade de averiguar se as referidas tendências observadas para o período histórico se mantinham, e caso afirmativo de que forma, para o futuro. Numa segunda fase do trabalho, consideraram-se cinco cenários de alterações climáticas, que se combinaram com três cenários de alterações das áreas e culturas de regadio atualmente praticadas na bacia do Guadiana. Estas combinações de cenários agrícolas e climáticos foram aplicadas a dois períodos futuros (2011 – 2040 e 2041 – 2070).

7.1. Metodologia

7.1.1. Espaço: unidades de análise na bacia do Guadiana

O espaço de incidência da presente análise é a parte portuguesa da bacia do rio Guadiana. É um espaço suficientemente vasto para nele se manifestarem diferenças (fisiográficas, dos solos, dos elementos climáticos e agrícolas), que constituem especificidades sub-regionais a que era preciso atender. Assim, com base nas bacias hidrográficas dos principais afluentes do Guadiana, adotaram-se 6 unidades espaciais (unidades de análise, Figura 7.1 e Quadro 7.1), que dão conta das referidas especificidades espaciais, fisiográficas e hidroagrícolas e que tinham já sido definidas e usadas em trabalhos anteriores (Vivas et al., 2010, Serralheiro et al., 2010).

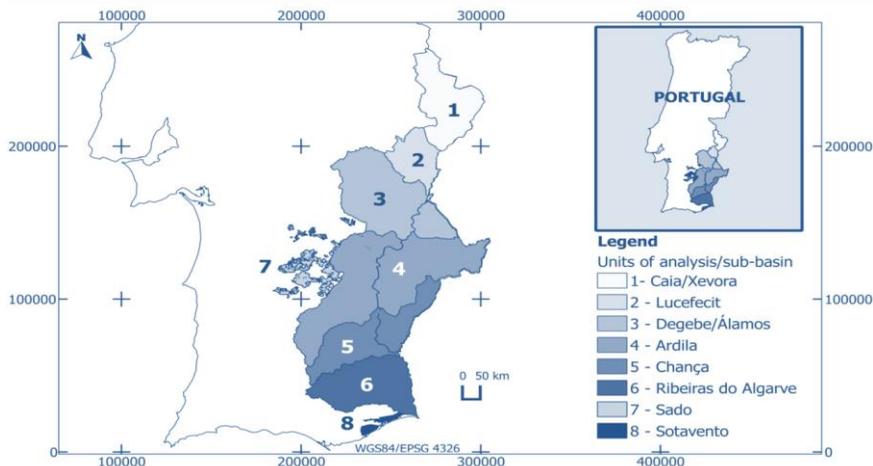


Figura 7.1 – Unidades de análise definidas na bacia do Guadiana, complementadas com as unidades que utilizam, por transvase entre bacias, água do Guadiana: 7 (regadios de Alqueva situados na bacia do Sado) e 8 (regadio do Sotavento Algarvio, que é abastecido pelas albufeiras de Odeleite e Beliche).

Quadro 7.1 – Áreas e precipitação média anual, nas 6 unidades de análise da bacia do Guadiana

Unidade de análise	Sub-bacias	Área (Km ²)	SAU (Km ²) (*)	P (mm) (**)
1	Caia	1.376	1.047	619
2	Lucefecit	753	575	617
3	Degebe, Alcarrache	2.351	1.777	535
4	Cobres, Ardila	3.857	2.998	503
5	Oeiras, Carreiras, Chança	1.664	1.17	479
6	Vascão, Odeleite, Beliche	1.581	475	596
Total		11.581	8.042	-----

Notas:

(*) Superfície agrícola utilizada ponderada por unidade de análise (fonte: INE Recenseamento Agrícola 2009);

(**) Precipitação anual média nos anos hidrológicos entre os anos de 1963 a 2009 (fonte: SNIRH/INAG(s/d))

7.1.2. Informação Meteorológica

Em trabalho anterior (Serralheiro et al., 2010), tinha-se reunido a informação meteorológica disponível, dos postos udométricos e estações meteorológicas situadas dentro da bacia do Guadiana (Figura 7.2), tendo-se conseguido uma série de 47 anos (1963 – 2009) bastante completa nos dados essenciais de valores de precipitações e temperaturas.

Para o tratamento de variáveis climáticas mais complexas, como é o caso da evapotranspiração de referência, ETo, para cujo cálculo a FAO recomenda o método de Penman-Monteith, a informação meteorológica disponível é claramente insuficiente para caracterizar a bacia do Guadiana. Contudo, algumas estações (Figura 7.2b) e informação recente obtida pelas estações automáticas da rede do COTR e disponível na sua base SAGRANET, permitiram correlacionar, obtendo-se elevados coeficientes de determinação R² (Santos e Maia, 2005; Shahidian et al. 2012) os valores da ETo obtidos pelo método de Penman-Monteith com os obtidos pela equação de Hargreaves – Samani (1985)

$$ETo = 0,0023 Ra (Tmax - Tmin)^{0,5} (Tmed + 17,8) \quad (7.1)$$

que requiere os valores da radiação global Ra (determinável a partir da data e da latitude do lugar) e das temperaturas máxima Tmax, mínima Tmin e média Tmed. Estes valores estão facilmente disponíveis (sítios INAG (s/d) e IM (s/d) na internet) relativos aos postos meteorológicos da bacia do Guadiana (Figura 7.2a), o que permitiu dispor de boa informação relativa à ETo em toda a bacia.

7.1.3. Cálculo das necessidades hídricas e das necessidades úteis de rega das culturas

Utilizou-se para este cálculo o modelo ISAREG (Teixeira e Pereira, 1992; Teixeira, 1994), que realiza o balanço hídrico do solo e da cultura, segundo os procedimentos recomendados pela FAO (Doorenbos e Kassam, 1979).

A precipitação efetiva P_{ef} foi calculada a partir da precipitação total Pt:

$$P_{ef} = \begin{cases} Pt(125 - 0.2Pt) / 125 & ; (Pt < 250mm) \\ 125 + 0.1Pt & ; (Pt \geq 250mm) \end{cases} \quad (7.2)$$

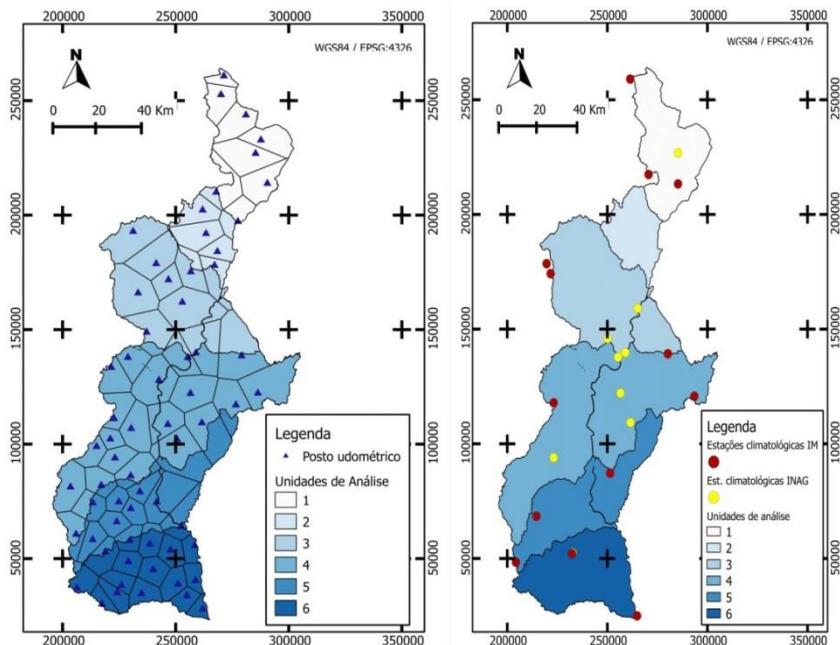


Figura 7.2 – Localização e representatividade espacial (método de Thiessen) dos postos udométricos do ex-INAG (à esquerda) e rede de estações meteorológicas (ex-INAG e ex- IM) com dados disponíveis na bacia do Guadiana

Um dos ficheiros de dados de base requeridos pelo ISAREG é o da caracterização dos solos. No presente caso, consideraram-se apenas duas situações pedológicas esquemáticas: um perfil de 60 cm de espessura e capacidade utilizável 100mm, que poderá ser adequado para as culturas herbáceas e anuais na maioria dos solos do Guadiana, predominantemente Luvisolos e Cambissolos; um perfil de 100cm de espessura e capacidade utilizável de 200mm, que será adequado às culturas lenhosas permanentes e às herbáceas e anuais em solos profundos e pesados, como são os Vertissolos.

No cálculo das necessidades hídricas e das necessidades úteis de rega das culturas requer também a indicação de coeficientes culturais e do espaçamento das plantas, tendo-se utilizado os valores constantes do Quadro 7.2 (Valverde et al., 2014).

Quadro 7.2 - Coeficientes culturais Kc e de cobertura do solo Kr

Cultura	Coefs. Cobert. solo (Kr)	Coef. culturais (Kc) por fase cultural		
		Inicial	Crescim	Final
Trigo	100%	0,3	1,15	0,25
Milho	100%	0,3	1,2	0,35
Vinha	50%	0,3	0,7	0
Olival Adulto (*)	59%	0,65	0,5	0,5
Citrinos	70%	0,7	0,65	0,7

7.1.4. Análises de tendências e significâncias

Numa primeira aproximação, consideraram-se as médias móveis de dez anos dos valores das variáveis. A informação que daí resulta, com os valores extremos atenuados, revelou-se de pouca utilidade.

Mais úteis são certamente as regressões dos valores das variáveis com o tempo, pelo método dos mínimos quadrados, evidenciando as tendências de variação e dando o valor do coeficiente de determinação, que caracteriza o grau de ajustamento da correlação efetuada. A significância estatística das tendências encontradas foi depois calculada utilizando o teste não paramétrico de Mann-Kendall, frequentemente usado na análise de dados hidrológicos.

7.2. Resultados: Fase I - Análise de tendências e significâncias

Os resultados da análise de tendências estão ilustrados nas Figuras 7.3 a 7.7 e as significâncias das tendências resumidas no Quadro 7.3. Nas figuras 7.3, 7.5, 7.6 e 7.7 estão ainda representadas as curvas das médias móveis de dez anos.

7.2.1. Precipitação anual

Os valores anuais da precipitação estão representados no gráfico de barras da Figura 7.3, na qual a linha tracejada marca a tendência de variação. É clara a tendência para a diminuição das precipitações anuais no período histórico de referência, 1963 – 2009.

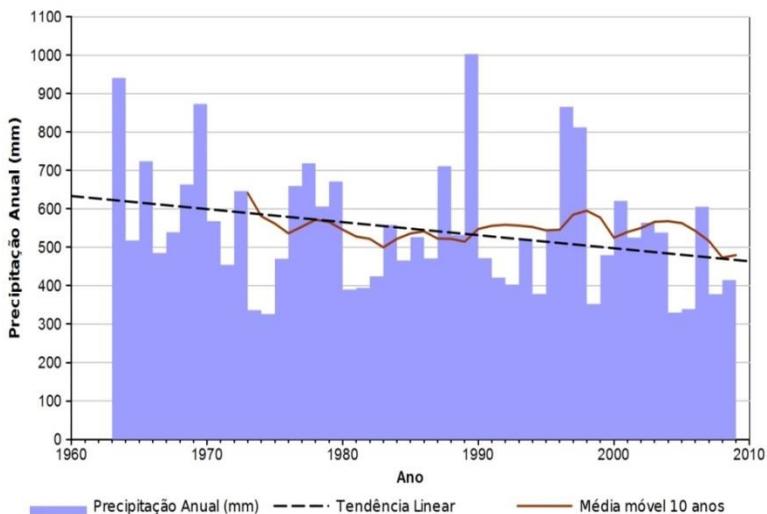


Figura 7.3 – Tendência verificada no período histórico de referência (1963 – 2009) de variação da precipitação anual

7.2.2. Precipitações mensais

Observam-se na Figura 7.4 as tendências de variação das precipitações mensais. Verifica-se que as maiores tendências são no sentido da diminuição, sendo significativas as diminuições dos meses de janeiro e de fevereiro e ainda a de junho. Note-se como estas variações constituem aumento da irregularidade da distribuição mensal das precipitações. Note-se em particular que as diminuições de inverno e primavera afetarão principalmente as culturas de cereais e forragens de inverno e as hortícolas, aumentando o interesse que pode ter o regadio de complemento nestas culturas. Particular observação merecerá também a diminuição da precipitação em junho, quando se formam os frutos no olival, tornando as produções nesta cultura mais dependentes da prática da rega no fim da primavera/início do verão.

7.2.3. Temperatura média Anual

É nítida na Figura 7.5 a tendência para o aumento das temperaturas médias anuais, na linha aliás do que tem sido observado em outros estudos de alterações climáticas (Santos e Miranda, 2006).

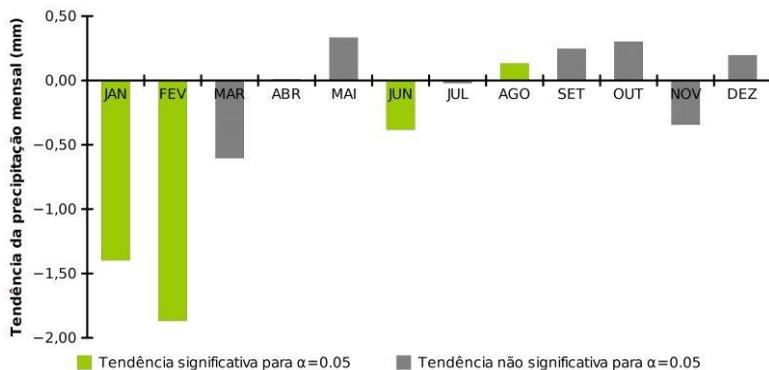


Figura 7.4 – Tendência verificada no período histórico de referência (1963 – 2009) de variação das precipitações médias mensais. Significância da tendência.

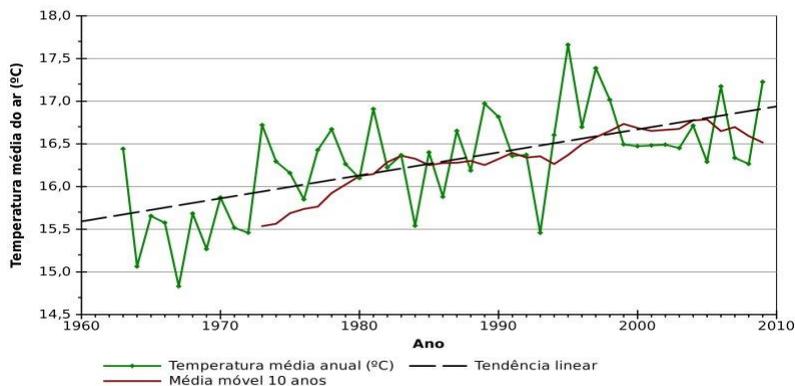


Figura 7.5 – Tendência verificada no período histórico de referência (1963 – 2009) de variação das temperaturas médias anuais

7.2.4. Evapotranspiração de referência, ETo

Também a evapotranspiração de referência tem nítida tendência para aumentar, como se vê na Figura 7.6 e como, de certo modo, seria de esperar, uma vez observadas as tendências de aumento das temperaturas. Note-se no entanto que pode, sendo como é o caso a ETo calculada pela expressão de Hargreaves-Samani, verificar-se outra tendência, se a amplitude térmica diminuir (por as temperaturas mínimas crescerem mais rapidamente que as máximas). Não é o caso da análise presente, ilustrado na Figura 7.6.

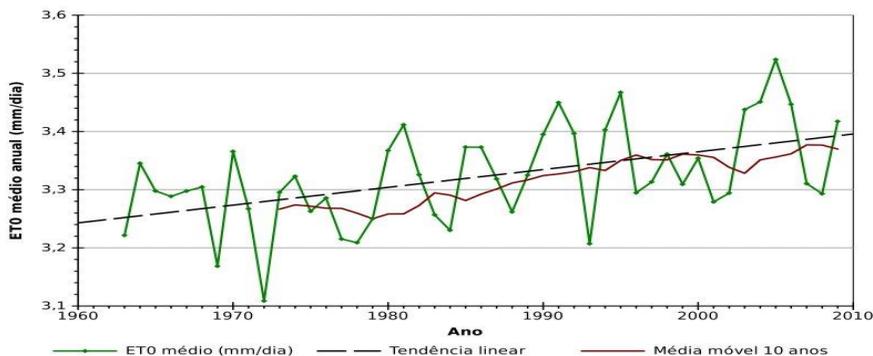


Figura 7.6 – Tendência verificada no período histórico de referência (1963 – 2009) de variação da evapotranspiração de referência, ETO

7.2.5. Necessidades úteis de rega de algumas culturas

As Figuras 7.7 (a,b e c) ilustram para os casos das culturas milho, trigo e olival, a título de exemplos, as diferentes tendências verificadas nas várias culturas experimentadas. No caso do milho (Figura 7.7a), o aumento é menos significativo por se “diluir” em necessidades de rega já normalmente elevadas. Em volume, esse aumento é importante.

Consequência das irregularidades das precipitações mensais de inverno e primavera, observadas acima e ilustradas na Figura 7.4), o trigo vê as suas necessidades de rega aumentarem significativamente (Figura 7.7b).

Já o olival, espécie tipicamente mediterrânea, há milhares de anos adaptada a este clima, com sua fisiologia própria e seus mecanismos de controlo estomático, parece indiferente às alterações climáticas (Figura 7.7c), observando-se mesmo uma certa diminuição (não significativa estatisticamente) das suas necessidades de rega.

O Quadro 7.3 contém o resumo das tendências de aumento ou diminuição das necessidades úteis de rega das culturas em cada uma das unidades de análise da bacia do Guadiana, com os valores médios e as respetivas significâncias de acordo com o teste de Mann-Kendall. As tendências das necessidades de rega que apresentaram significância estatística para $\alpha=5\%$ estão assinaladas com o símbolo “●”.

Como já se tinha constatado, só para o trigo são significativos os valores gerais de aumentos das necessidades de rega, o que se deve ao aumento da irregularidade das precipitações de inverno. É pois o aumento das necessidades da rega de complemento, a fazer de inverno, numa cultura tradicionalmente de sequeiro.

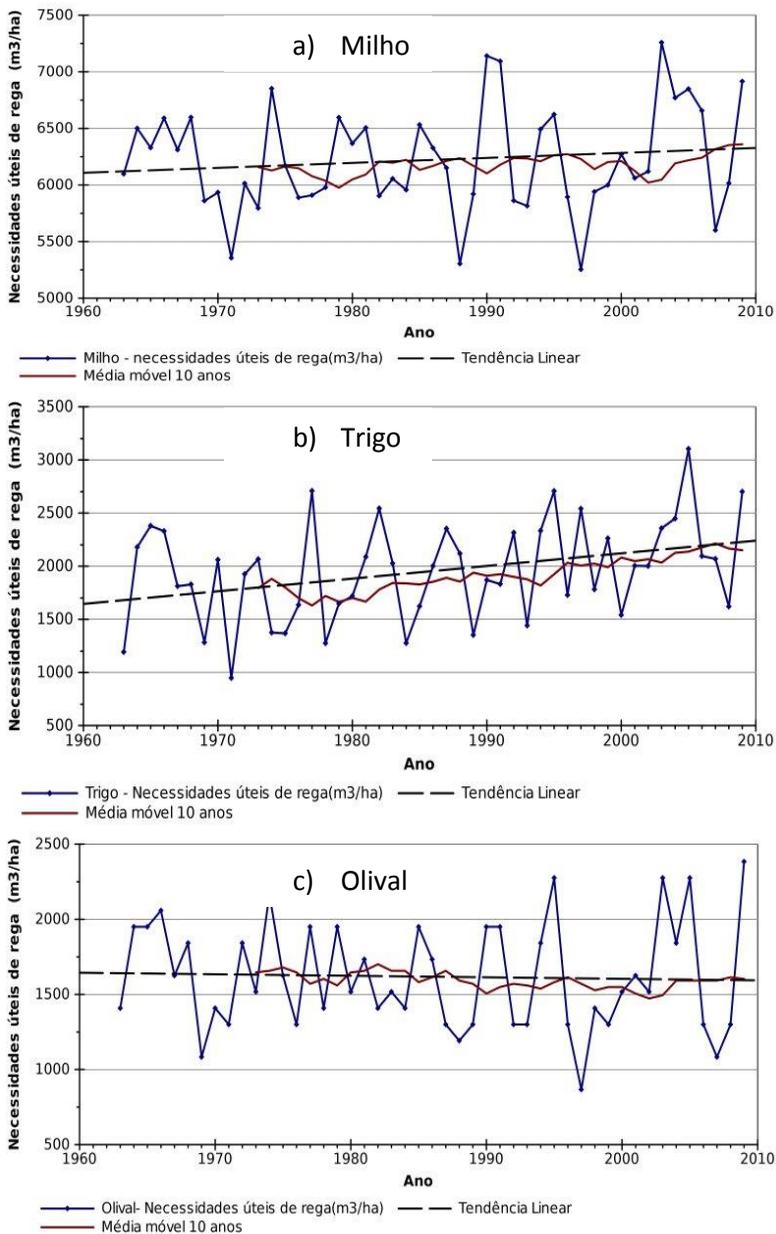


Figura 7.7 – Tendências verificadas no período histórico de referência (1963 – 2009) de variação das necessidades úteis de rega (ETC) das culturas milho, trigo e olival (a título de exemplos)

Quadro 7.3 - Resumo das tendências ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) e teste de significância

Cultura	Unidades de Análise:	1	2	3	4	5	6	Média
Milho	Tendência	-3,6	6,1	6,8	14,4	10	-7,4	4,4
	Teste de signif.	-	-	-	●	●	-	-
Trigo	Tendência	0,6	15,5	14,8	35	11,7	-6	11,9
	Teste de signif.	-	-	●	●	-	-	●
Olival	Tendência	-7,6	2,9	3,3	4,5	-1,7	-7,5	-1
	Teste de signif.	-	-	-	-	-	-	-
Vinha	Tendência	0,1	3,4	4,9	4,4	3,8	-0,7	2,7
	Teste de signif.	-	-	●	●	-	-	-
Citrosinos	Tendência	-3,2	3,1	11	10,8	2,8	-13	1,9
	Teste de signif.	-	-	-	-	-	-	-

7.3. Resultados: Fase II – Simulação de cenários climáticos (CCS) e agrícolas de regadio futuros (CAS)

7.3.1. Cenários de alterações climáticas (CCS)

Logicamente, os cenários climáticos de futuro são definidos com base em hipóteses fundamentadas de aumento das temperaturas e diminuição dos valores da precipitação, conforme as tendências verificadas e consideradas pela generalidade dos modelos de alterações climáticas. De facto, na definição dos cenários climáticos são considerados critérios mais completos, nomeadamente as hipóteses de alteração das emissões de CO_2 . A metodologia de trabalho usada no caso presente está simplificada esquematizada no Quadro 7.4.

As variações de temperaturas e de precipitações estão ilustradas na Figura 7.8, abrangendo o período histórico e os dois períodos futuros simulados.

Quadro 7.4 - Caracterização resumida dos cenários climáticos considerados, com dois períodos futuros de aplicação

Período	CCS	T (°C)		P (mm)	
Futuro 1 (2011-2040)	1 - Warmer and drier	0.99	(25pctl)	-4.89	(75pctl)
	2 - Warmer and more drier	0.99	(25pctl)	-10.7	(25pctl)
	3 - Middle	1.23	(50pctl)	-8.76	(50pctl)
	4 - Hotter and drier	1.39	(75pctl)	-4.89	(75pctl)
	5 - Hotter and more drier	1.39	(75pctl)	-10.7	(25pctl)
Futuro 2 (2041-2070)	1 - Warmer and drier	1.73	(25pctl)	-9.8	(75pctl)
	2 - Warmer and more drier	1.73	(25pctl)	-21.79	(25pctl)
	3 - Middle	2.31	(50pctl)	-15.2	(50pctl)
	4 - Hotter and drier	2.61	(75pctl)	-9.8	(75pctl)
	5 - Hotter and more drier	2.61	(75pctl)	-21.79	(25pctl)

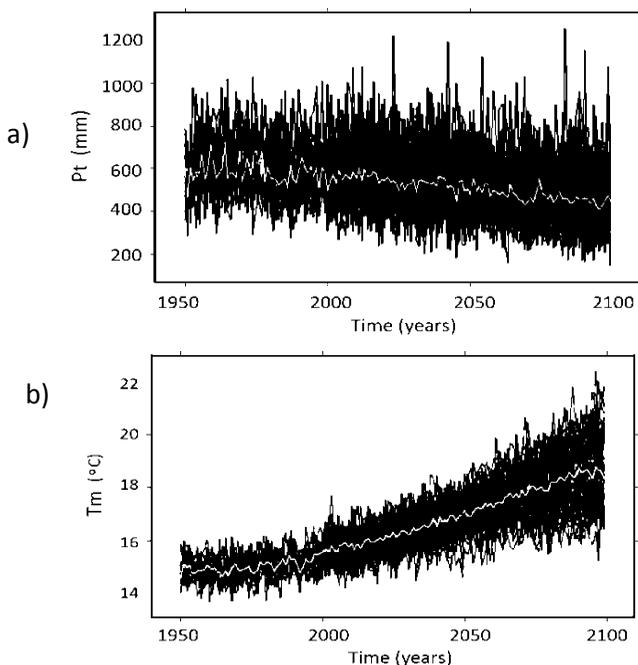


Figura 7.8 – Variações dos valores modelados a) das temperaturas médias; b) das precipitações totais anuais, simulados para a bacia do Guadiana

7.3.2. Cenários Agrícolas (CAS)

Consideraram-se 3 cenários agrícolas futuros, a desenvolver sobre o presente, sendo este o descrito no Recenseamento Agrícola de 2009 (INE, 2011). Resumidamente, os 4 cenários caracterizam-se da forma seguinte:

- Presente: RA 2009 (INE, 2011)
- Cenário Futuro A: todo o sistema de Alqueva terminado em 2015 e completamente utilizado em 2020. “Completamente utilizado” significará, em cada ano, uma razão superior a 80% entre a área regada (utilizada com culturas de regadio) e a área equipada para rega (a correspondente à soma de todos os sistemas, avultando o de Alqueva completo).
- Cenário futuro B: ampliação do regadio de Alqueva em 45% (cerca de 50000 ha), de acordo com pretensões já faladas por organizações de agricultores e pela própria EDIA.
- Cenário futuro C: Voltando à área do cenário A, com culturas escolhidas para economizar água e outros fatores de produção; lenhosas, cereais de inverno, proteaginosas. Contrariamente ao otimismo inerente ao cenário anterior, admite-se neste cenário C que os constrangimentos ao regadio são significativos, como o preço da água e de outros fatores e os condicionalismos ambientais e da sustentabilidade, implicando práticas agrícolas de regadio conservativas do solo, da água, da energia e da biodiversidade.

No Quadro 7.5 apresentam-se as áreas regadas das diversas culturas selecionadas correspondentes a cada um dos quatro cenários referidos.

7.3.3. Necessidades Hídricas e Necessidades Úteis de Rega das Culturas

Pode observar-se no Quadro 7.6 que as necessidades hídricas (ET_c) e as necessidades úteis de rega aumentam no futuro, para todas as culturas, em relação às necessidades semelhantes calculadas para o período histórico de referência. Pode também verificar-se que, deste ponto de vista, nenhum dos cenários climáticos futuros se distingue dos restantes por ser mais ou menos gravoso para todas as culturas (cada cenário pode ser mais gravoso para uma, para outras não).

Quadro 7.5 – Caracterização dos 4 cenários agrícolas, quanto a ocupação da área pelas culturas regadas (ha)

	1 - Cenário Agrícola PRESENTE (ha)								
	1	2	3	4	5	6	Sado	Sotav.	TOTAL
Milho	1200	650	1767	183	11	15	939	0	4765
Trigo	2029	417	1991	1459	121	6	751	0	6774
Leguminosas	206	145	17	38	4	6	87	0	503
FORAGENS primav.	247	92	586	145	7	12	94	0	1183
FORAGENS de inver.	393	160	1329	589	149	5	263	0	2888
Girassol	296	12	367	992	97	0	145	0	1909
Hortícolas	1709	302	787	514	63	102	523	156	4156
Pastagens	277	57	627	526	49	205	237	0	1978
Pomares	630	285	138	147	191	239	146	138	1914
Citrinos	96	34	110	222	43	1366	61	1431	3363
Olivais	3804	612	5480	18407	2411	47	1710	0	32471
Vinhas	405	1135	5623	2463	137	63	689	66	10581
Golfe	0	0	0	0	0	34	0	126	160
Total	11292	3901	18822	25684	3283	2100	5645	1917	72644
	2-CENÁRIO AGRÍCOLA A (horizonte temporal 2020)								
	1	2	3	4	5	6	Sado	Sotav.	TOTAL
Milho	1209	685	1808	11230	14	18	7411	0	22375
Trigo	2117	473	2177	10514	141	7	5925	0	21354
Leguminosas	217	146	19	1062	5	7	684	0	2140
FORAGENS primav.	286	97	646	1277	8	14	745	0	3073
FORAGENS de inver.	434	184	1435	3772	174	6	2074	0	8079
Girassol	314	14	380	2858	113	0	1143	0	4822
Hortícolas	1792	345	845	6744	73	114	4132	400	14445
Pastagens	295	60	635	3397	57	240	1872	0	6556
Pomares	668	330	154	1890	224	276	1156	354	5052
Citrinos	100	40	123	972	51	1583	480	3669	7018
Olivais	4091	696	5908	41972	2870	56	13501	0	69094
Vinhas	538	1521	7007	11513	191	85	5442	169	26466
Golfe	0	0	0	0	0	34	0	323	357
Total	12059	4589	21139	97202	3921	2439	44564	4915	190828

Quadro 7.5 (cont.) – Caracterização dos 4 cenários agrícolas, quanto a ocupação da área pelas culturas regadas (ha)

	3-CENÁRIO AGRÍCOLA B (horizonte temporal 2040)								
	1	2	3	4	5	6	Sado	Sot	TOTAL
Milho	1753	993	2621	16283	20	25	11159	0	32854
Trigo	3070	685	3157	15245	205	11	8922	0	31295
Leguminosas	314	212	28	1540	7	10	1031	0	3142
Frragens primav.	414	140	937	1852	12	20	1122	0	4497
Frragens de inver.	629	267	2081	5469	252	9	3123	0	11830
Girassol	455	20	552	4145	164	0	1721	0	7057
Hortícolas	2599	501	1226	9778	106	165	6222	808	21405
Pastagens	428	86	921	4926	83	347	2818	0	9609
Pomares	968	479	224	2741	324	400	1741	715	7592
Citrinos	145	57	178	1410	74	2295	722	7413	12294
Olivais	5932	1009	8567	60860	4161	81	20330	0	100940
Vinhas	779	2205	10161	16694	276	123	8195	342	38775
Golfe	0	0	0	0	0	49	0	653	702
Total	17485	6654	30652	1E+05	5685	3536	67106	9931	281992
	4-CENÁRIO AGRÍCOLA C (horizonte temporal 2040)								
	1	2	3	4	5	6	Sado	Sotav.	TOTAL
Milho	421	236	626	3907	4	6	2812	0	8012
Trigo	2754	781	2855	15792	114	13	9360	0	31669
Leguminosas	215	144	19	1055	4	7	753	0	2197
Frragens primav.	284	95	640	1270	6	14	814	0	3123
Frragens de inver.	564	304	1883	5665	140	12	3290	0	11858
Girassol	312	14	377	2841	89	0	1230	0	4863
Hortícolas	1782	340	837	6704	57	114	4433	200	14467
Pastagens	294	59	629	3377	45	240	2024	0	6668
Pomares	704	361	236	2132	350	276	1397	554	6010
Citrinos	100	40	123	972	51	1583	498	3669	7036
Olivais	4091	696	5908	41972	2870	56	14020	0	69613
Vinhas	538	1521	7007	11513	191	85	5652	169	26676
Golfe	0	0	0	0	0	34	0	323	357
Total	12059	4589	21139	97202	3921	2439	46281	4915	192545

Quadro 7.6 - Necessidades úteis de rega $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$

	Histórico (1963 – 2009)	Período Futuro 1 (2011-2040), para os cinco cenários climáticos				
		CCS -1	CCS -2	CCS -3	CCS -4	CCS -5
Milho	5663	5919	5970	6056	6081	6071
Trigo	1654	1796	1930	1932	1904	1891
Leguminosas	244	275	303	307	266	275
Fornagens primav.	3797	4001	4025	4039	4033	4066
Fornagens de inver.	1654	1796	1930	1932	1904	1891
Girassol	3349	3577	3650	3671	3663	3676
Hortícolas	5647	5935	5980	6017	6049	6043
Pastagens	4978	5301	5418	5454	5460	5451
Pomares	5128	5402	5528	5576	5589	5583
Citrinos	4225	4415	4556	4625	4616	4628
Olivais	1441	1587	1628	1644	1658	1660
Vinhas	2916	3122	3156	3186	3193	3201
Golfe	4978	5301	5418	5454	5460	5451

7.3.4. Necessidades Globais de Água para Rega

Observe-se finalmente no Quadro 7.7 o registo das necessidades globais de água para rega na bacia do Guadiana, combinando os cenários climáticos e os agrícolas, para os dois períodos futuros. Note-se que estes resultados são principalmente determinados pelos cenários agrícolas, cujos efeitos se sobrepõem aos das alterações climáticas. Há pois que planear muito criteriosamente as áreas e as culturas a regar. Vistos os enormes consumos de água que implicaria, dificilmente será viável o cenário agrícola B. São mais esperáveis o cenário A, seguido no tempo pelo cenário C.

Quadro 7.7 - Necessidades globais de água para rega na bacia do Guadiana ($\text{hm}^3 \text{ano}^{-1}$) para os dois períodos futuros, nos 5 cenários climáticos e nos 4 cenários agrícolas

CENÁRIO AGRÍCOLA	Período Futuro	CCS-1	CCS-2	CCS-3	CCS-4	CCS-5	Capacidade de ALQUEVA Total 4160 hm^3 Útil 3000 hm^3
Presente	2011-2040	253.4	258.1	260.7	261.6	261.0	
	2041-2070	266.7	271.6	285.5	288.2	288.3	
A	2011-2040	736.4	750.4	758.1	759.3	758.4	
	2041-2070	773.9	787.8	823.9	834.1	833.5	
B	2011-2040	1093.1	1113.8	1125.2	1127.1	1125.8	
	2041-2070	1148.6	1169.4	1222.7	1237.9	1237.1	
C	2011-2040	684.0	700.8	707.3	707.7	706.7	
	2041-2070	720.5	739.4	773.4	782.4	782.8	

7.4. Conclusões

Verificou-se no período histórico de referência o aumento das temperaturas e da evapotranspiração e a diminuição dos valores das precipitações. Em consequência, foram aumentando as necessidades hídricas (ETc) e as necessidades úteis e globais de água para rega.

Parece que de alguma forma as tendências observadas no próximo passado se projetarão para o próximo futuro. Assim, genericamente, verifica-se para o futuro um aumento das necessidades hídricas e de rega das culturas, em relação ao período histórico de referência, mas nenhum dos cenários climáticos se revelou especialmente gravoso, sendo as necessidades globais de água para rega na bacia do Guadiana determinadas mais pelos cenários agrícolas que pelo grau das alterações climáticas. Verifica-se finalmente que a bacia do Guadiana, com a albufeira de Alqueva, dispõe de recursos hídricos suficientes para responder, mediante adequada gestão, à procura de água para rega que razoavelmente se pode esperar no futuro, mesmo com as alterações climáticas previsíveis. Bastará provavelmente não considerar com sustentabilidade o cenário agrícola B.

Referências bibliográficas

- COTR/SAGRANET (s/d) – sítio www.cotr.pt/sagranet
- Doorenbos J., Kassam A., (1979). Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. FAO. Rome
- Hargreaves G.H., Samani. Z.A.,(1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agric. 1:96-99.
- INAG, (s/d). *SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos*. Instituto da Água, I.P. (INAG, I.P.). Ministério do Ambiente, sítio <http://snirh.pt>
- INE, (2011). Recenseamento Agrícola 2009, Dados definitivos. Informação à Comunicação Social. Lisboa, Instituto Nacional de Estatística (INE, I.P.), 17 Maio 2011, 13 pp.
- IM, (s/d). Instituto de Meteorologia (IM, I.P.), sítio <http://www.meteo.pt>
- IPCC, (2007). Intergovernmental Panel on Climate Change, Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4)
- Santos F.D., Miranda P., (2006). Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactes e Medidas de Adaptação - Projecto SIAM II, Gradiva, Lisboa.
- Santos M., Maia J., (2005). Calibração da ETo estimada pelo método de Hargreaves e tina evaporimétrica classe A. Atas do I Congresso Nacional de Rega e Drenagem. Beja. 2005.
- Serralheiro R., Carvalho M., Corte-Real J., Toureiro C., (2010). 1ª Fase do Sistema de Previsão e Gestão de Secas (SPGS) - Relatórios 1 a 4, 2009 e 2010, ICAAM, Universidade de Évora.
- Shahidian S., Serralheiro R., Serrano J., Teixeira J.L., Naim H., Santos F.L., (2012). Hargreaves and Other Reduced-set Methods for Calculating Evapotranspiration. Chapter in Ayse Irmak (editor). *Evapotranspiration – Remote sensing and Modeling*. In Tech, January 2012, pp. 59-80. ISBN 978-953-307-808-3.
- Teixeira J.L., Pereira L.S. ,(1992). ISAREG, an irrigation scheduling model. ICID Bulletin, 41(2): 29-48
- Teixeira J.L. ,(1994). ISAREG – Manual do Utilizador. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa
- Valverde, P.; Serralheiro, R.; Carvalho, M.; Shahidian, S.; Rodrigues, C. (2014) - Efeitos das alterações climáticas nas necessidades úteis de rega na bacia do Guadiana (Effects of climate change on crop net irrigation requirements in the Guadiana basin). *Recursos Hídricos*, Lisboa, APRH, vol. 35, nº 1, 15pp.
- Vivas E., Silva C., Correia L., Maia R., (2010). Definição de unidades de análise para prevenção, avaliação e gestão de situações de seca. Aplicação ao caso da bacia do rio Guadiana. Atas da Conferência 10º Congresso da Água — Marcas d'Água, Algarve, Março de 2010, ISBN 978-972-99991-9-2.