

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA

**METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DOS IMPACTES DAS
MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA AGRICULTURA DE REGADIO E NOS
SISTEMAS DE REGA**

TESE APRESENTADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
ENGENHARIA DOS BIODISSISTEMAS

JOÃO RUI ROLIM FERNANDES MACHADO LOPES

ORIENTADOR: Doutor José Luís Monteiro Teixeira

CO-ORIENTADOR: Doutor João Carlos da Costa Catalão Fernandes

JÚRI:

Presidente: Reitor da Universidade Técnica de Lisboa

Vogais: Doutor Ricardo Paulo Serralheiro, professor catedrático da Universidade de Évora;

Doutor João Carlos da Costa Catalão Fernandes, professor associado da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa;

Doutor José Luís Monteiro Teixeira, professor associado do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutora Maria Madalena Vitório Moreira Vasconcelos, professora auxiliar da Universidade de Évora;

Doutor Rodrigo Proença de Oliveira, professor auxiliar do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.

LISBOA
2013

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA

**METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DOS IMPACTES DAS
MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA AGRICULTURA DE REGADIO E NOS
SISTEMAS DE REGA**

TESE APRESENTADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
ENGENHARIA DOS BIODISSISTEMAS

JOÃO RUI ROLIM FERNANDES MACHADO LOPES

ORIENTADOR: Doutor José Luís Monteiro Teixeira

CO-ORIENTADOR: Doutor João Carlos da Costa Catalão Fernandes

JÚRI:

Presidente: Reitor da Universidade Técnica de Lisboa

Vogais: Doutor Ricardo Paulo Serralheiro, professor catedrático da Universidade de Évora;

Doutor João Carlos da Costa Catalão Fernandes, professor associado da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa;

Doutor José Luís Monteiro Teixeira, professor associado do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutora Maria Madalena Vitório Moreira Vasconcelos, professora auxiliar da Universidade de Évora;

Doutor Rodrigo Proença de Oliveira, professor auxiliar do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.

LISBOA
2013

RESUMO

Os diferentes cenários de alteração climática projectam para Portugal um aumento da temperatura do ar, associado a uma diminuição da precipitação, o que deverá implicar uma redução na produção das culturas e um aumento da procura de água para a rega. Neste trabalho criou-se uma metodologia, baseada no desenvolvimento de ferramentas informáticas, com o objectivo de avaliar os impactes das alterações climáticas sobre o regadio. A metodologia proposta consiste na utilização combinada de um modelo de simulação do balanço hídrico (IrrigRotation), de sistemas de informação geográfica e bases de dados (IScenarios), de um programa de interpolação espacial (Interpolador) e de um modelo de projecto e avaliação de sistemas de rega com canhão (Enrolador). Esta metodologia foi aplicada experimentalmente a dois casos de estudo na região do Alentejo. Os resultados obtidos para os cenários de alterações climáticas (2071-2100) apontam para um aumento das necessidades de rega entre 13% a 70% e para um aumento das necessidades de rega relativas ao período de ponta de 12% a 21%. Verificou-se também um aumento do risco para as culturas de sequeiro, com o valor do deficit hídrico a variar entre 32% a 59%. A rotação de culturas foi identificada como uma importante ferramenta de adaptação.

Palavras-chave: Alterações climáticas, Rega, Cenários climáticos, Modelos climáticos regionais, Análise espacial, Modelos de simulação, Balanço hídrico do solo, Necessidades hídricas das culturas, Rotação de culturas, Sistemas de rega.

METHODOLOGIES FOR THE ASSESSMENT OF CLIMATE CHANGE IMPACTS ON IRRIGATED AGRICULTURE AND IRRIGATION SYSTEMS.

ABSTRACT

The different climate change scenarios forecast for Portugal an increase in air temperature associated with a reduction of the precipitation, which should implies a reduction in crop yields and a rise of water demand for irrigation. In this work a methodology was created, based on the development of software tools, with the objective of evaluating the impacts of climate change on irrigated agriculture. The proposed methodology consists in the combined use of a soil water balance model (IrrigRotation), geographic information systems and databases (IScenarios), spatial interpolation program (Interpolador) and a travelling gun irrigation systems design and evaluation model (Enrolador). This methodology was applied experimentally to two case studies in the Alentejo region. The results obtained for the climate change scenarios (2071-2100) showed an increase in seasonal irrigation requirements between 13% to 70% and an increase in peak irrigation requirements from 12% to 21%. It was also found an increase in the risk of crop failure for rainfed crops, with the value of water deficit ranging between 32% to 59%. The crops rotation was identified as an important adaptation tool.

Key-words: Climate change, Irrigation, Climate scenarios, Regional climate models, Spatial analysis, Simulation models, Soil water balance, Crop water requirements, Crops rotation, Irrigation systems.

Agradecimentos

Quero expressar os meus agradecimentos a todas as pessoas que possibilitaram a realização dos trabalhos de Doutoramento que se apresentam nesta tese. Começo por agradecer ao Orientador o Professor José Luís Monteiro Teixeira, Professor Associado do Instituto Superior de Agronomia, por todo o apoio, acompanhamento e disponibilidade demonstrada, que se traduziu nas diversas sugestões, conselhos e críticas apresentadas e na disponibilização das condições necessárias à realização dos trabalhos.

Ao co-orientador Professor João Carlos da Costa Catalão Fernandes, Professor Associado da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, agradece-se a disponibilidade e ajuda no desenvolvimento do *software* Interpolador e na realização dos diversos trabalhos relacionados com SIG e com a análise espacial.

Ao Professor Rodrigo Proença de Oliveira, Professor do Instituto Superior Técnico, agradece-se as sugestões e críticas relativas à utilização de cenários de alteração climática em estudos sectoriais sobre os recursos hídricos.

Ao Professor António Lopes Aleixo, do Instituto Superior de Agronomia, agradece-se os comentários, as informações e sugestões relativas às rotações de culturas e práticas culturais utilizadas na região do Alentejo, que permitiram a definição das simulações realizadas.

Ao Professor Francisco Abreu do Instituto Superior de Agronomia, agradecem-se os comentários e sugestões relativas ao efeito das alterações climáticas na fenologia das culturas, e a indicação da principal bibliografia de interesse.

À Professora Madalena Moreira da Universidade de Évora, agradece-se o envio de textos relativos aos impactes das alterações climáticas nos recursos hídricos, na região do Alentejo.

Aos bolseiros de Doutoramento, Engenheiro Pedro Lopes da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, e Engenheira Rosa Trancoso, do Instituto Superior Técnico, agradecem-se a disponibilidade, as informações e sugestões prestadas relativamente à utilização de dados climáticos produzidos pelos modelos climáticos.

Uma palavra de agradecimento é também devida à Professora Cristina Catita da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e ao Professor Shakib Shahidian da Universidade de Évora, com os quais colaborei ao longo do projecto que financiou parte desta tese, pelas palavras de incentivo e de apoio.

Aos colegas, amigos e família quero agradecer pela ajuda, incentivo e amizade demonstrada, durante o período em que decorreu o desenvolvimento dos trabalhos de Doutoramento, especialmente durante os períodos mais difíceis.

Agradece-se ao Centro Operativo de Tecnologias do Regadio (COTR) a disponibilização dos dados meteorológicos do Sistema Agrometeorológico para a Gestão da Rega no Alentejo (SAGRA) utilizados neste trabalho. Ao projecto PRUDENCE agradece-se a disponibilização, através dos seus arquivos de dados, das séries de dados climáticos produzidos pelos modelos regionais climáticos, utilizados nesta tese.

Este trabalho foi financiado pela bolsa de Doutoramento SFRH/BD/27743/2006 da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) e pelo projecto de investigação financiado através da FCT PTDC/AAC-AMB/113639/2009: “Estudo do impacte das alterações climáticas nos sistemas de regadio e definição de medidas de adaptação”.

Índice geral

Resumo.....	I
Abstract.....	II
Agradecimentos	III
Índice geral.....	V
Índice de figuras.....	X
Índice de quadros.....	XV
Lista de símbolos	XVIII
Lista de acrónimos e abreviaturas.....	XXV
 1. Introdução	 1
1.1. Apresentação do problema	1
1.2. Objectivos	4
1.3. Organização da dissertação.....	6
2. Alterações climáticas.....	9
2.1. Considerações gerais.....	9
2.2. Variabilidade climática.....	12
2.3. Identificação das alterações climáticas	13
2.3.1. Observações de alterações no clima	13
2.3.2. Causas das alterações climáticas	15
2.3.3. Projecções de futuras alterações no clima	17
2.3.3.1. Cenários de emissões.....	17
2.3.3.2. Projecções climáticas futuras.....	19
2.4. Incerteza	27
2.4.1. Definição.....	27
2.4.2. A incerteza na agricultura de regadio e recursos hídricos.....	29
2.5. Modelos climáticos	30
2.5.1. Considerações gerais.....	30
2.5.2. Obtenção dos dados dos cenários de alteração climática. Projecto PRUDENCE.....	34
2.5.3. Correção dos desvios dos modelos climáticos	35
2.5.3.1. Método <i>Delta Change</i>	36
2.5.3.2. Método <i>Direct Forcing</i>	36
2.5.3.3. Método de Lenderink.....	37
2.6. Impactes das alterações climáticas na agricultura de regadio.....	38
2.6.1. Introdução.....	38

2.6.2. Metodologias de avaliação dos impactes	40
2.6.2.1. Considerações gerais.....	40
2.6.2.2. Modelos de simulação das culturas	40
2.6.2.3. Outras metodologias	45
2.6.3. Principais impactes das alterações climáticas no regadio.....	46
2.6.3.1. O efeito do aumento do CO ₂ na evapotranspiração cultural	47
2.6.3.2. O efeito do aumento da temperatura nas culturas.....	49
2.6.4. Estudos de impactes na agricultura de regadio	49
3. Sistemas de informação e modelos de inferência espacial.....	57
3.1. Sistemas de informação e de apoio à decisão ambientais	57
3.1.1. Conceitos e definições	57
3.1.2. Componentes dos sistemas de informação e de apoio à decisão ambientais	58
3.1.3. Modelação da rega.....	59
3.1.4. Modelação espacial com SIG.....	62
3.1.4.1. A aplicação dos SIG na engenharia da rega	63
3.2. Modelos de interpolação espacial. Bases teóricas para o desenvolvimento do programa Interpolador.....	66
3.2.1. Considerações gerais.....	66
3.2.2. Métodos de interpolação	68
3.2.2.1. Vizinho mais próximo (VMP)	69
3.2.2.2. Inverso do quadrado da distância (IQD)	69
3.2.2.3. Colocação por mínimos quadrados (CMQ).....	70
4. Simulação das necessidades de rega. Bases teóricas para o desenvolvimento do programa IrrigRotation.....	75
4.1. Evapotranspiração.....	76
4.1.1. Evapotranspiração de referência	76
4.1.2. Evapotranspiração cultural.....	78
4.1.2.1. Introdução	78
4.1.2.2. Coeficiente cultural.....	79
4.1.2.3. A curva dos coeficientes culturais	81
4.2. Balanço hídrico do solo	83
4.2.1. Considerações gerais.....	83
4.2.2. O solo como reservatório de água	85
4.2.2.1. Profundidade de enraizamento	87
4.2.3. Equação do balanço hídrico do solo	89
4.2.4. Zonas de conforto hídrico e de carência hídrica	93
4.2.5. Cálculo da evapotranspiração cultural.....	94
4.2.5.1. O método dos coeficientes culturais de base	94
4.2.5.2. Ajustamento da evapotranspiração cultural	101

4.2.5.3. Procedimento de cálculo da ET_c implementado	103
4.2.6. A utilização do balanço hídrico na gestão da rega	104
4.2.6.1. Determinação das necessidades de rega.....	104
4.2.6.2. Condução da rega.....	106
4.2.7. Balanço hídrico do solo contínuo no tempo	108
4.3. Rotação de culturas e a gestão da água no solo	111
4.3.1. Introdução.....	111
4.3.2. Principais regras na definição de rotações	112
4.3.3. Exemplos de rotações para a região do Alentejo	114
4.3.4. As rotações e a gestão da reserva de água no solo.....	115
4.4. Análise frequencial das necessidades de rega.....	118
5. Simulação da rega com canhões com enrolador. Bases teóricas para o desenvolvimento do programa Enrolador	121
5.1. Características gerais dos enroladores	121
5.2. Critérios de projecto e condições de funcionamento	125
5.2.1. Qualidade da rega	125
5.2.1.1. Uniformidade	126
5.2.1.2. Eficiência	127
5.2.2. Critérios de dimensionamento e uniformidade de distribuição	129
5.2.3. Critérios de dimensionamento hidráulico	132
5.3. Procedimento de cálculo para o projecto de canhões com enrolador	134
5.4. Simulação da distribuição espacial da pluviometria.....	143
6. Metodologia e ferramentas informáticas desenvolvidas.....	151
6.1. Metodologia desenvolvida	151
6.2. Ferramentas informáticas desenvolvidas	154
6.2.1. Sistema de informação IScenarios	154
6.2.1.1. Considerações gerais.....	154
6.2.1.2. Sistema IScenarios desenvolvido para a região do Alentejo.....	156
6.2.2 Aplicação informática Interpolador.	167
6.2.2.1. Considerações gerais.....	167
6.2.2.2. Descrição do programa.....	167
6.2.2.3. Teste e validação do programa.....	170
6.2.3. Aplicação informática IrrigRotation.....	170
6.2.3.1. Considerações gerais.....	170
6.2.3.2. Estrutura do programa	171
6.2.3.3. Integração com SIG	177
6.2.3.4. Operação do <i>software</i>	179
6.2.3.5. Teste e validação do programa.....	180

6.2.4. Aplicação informática Enrolador.....	180
6.2.4.1. Considerações Gerais.....	180
6.2.4.2. Estrutura do programa	181
6.2.4.3. Operação do <i>software</i>	183
7. Aplicação experimental da metodologia	185
7.1. Considerações gerais.....	185
7.2. Cenários de alteração climática considerados.....	188
7.2.1. Dados das estações meteorológicas (normais climatológicas 1961-90).....	188
7.2.2. Dados dos modelos RCM	190
7.2.3. Anomalias climáticas.....	197
7.2.4. Séries climáticas perturbadas	201
7.3. Simulação do balanço hídrico do solo.....	205
7.3.1. Dados de base	206
7.3.2. Resultados e discussão	210
7.3.2.1. Necessidades hídricas das culturas.....	210
7.3.2.2. Necessidades de rega anuais.....	215
7.3.2.3. Deficit hídrico das culturas de sequeiro	218
7.3.2.4. Probabilidades de não excedência das necessidades de rega anuais e relativas ao período de ponta	221
7.3.2.5. Análise de variância (ANOVA)	223
7.3.2.6. Balanço hídrico ao nível da rotação de culturas	225
7.4. Dimensionamento dos canhões de rega com enrolador.....	229
7.4.1. Dados de base	229
7.4.2. Resultados e discussão	233
7.4.2.1. Dimensionamento dos sistemas de rega com canhão com enrolador	233
7.4.2.2. Avaliação do desempenho potencial dos sistemas de rega.....	239
7.5. Considerações finais	240
8. Conclusões e perspectivas futuras	243
9. Referências bibliográficas	251

Anexos:

Anexo I – Testes e validação do modelo IrrigRotation.....	273
Anexo II – Testes e validação do programa Interpolador.....	281
Anexo III – Listagem dos ficheiros extraídos do projecto PRUDENCE	301
Anexo IV – Formato dos dados dos modelos RCM	303
Anexo V – Ficheiros do programa AlterClim.....	305
Anexo VI – Ficheiros do programa Interpolador	309

Anexo VII – Base de dados do modelo IrrigRotation	315
Anexo VIII – Ficheiros do modelo Enrolador.....	317

Índice de figuras

Figura 2.1 – Representação esquemática dos componentes do sistema climático, os seus processos e interações (adaptado de IPCC, 2007a)	10
Figura 2.2 – Evolução dos desvios relativamente ao período de 1961-1990 da: temperatura média global; da média global do nível do mar; da cobertura de neve do hemisfério Norte (adaptado de IPCC, 2007c)	14
Figura 2.3 – Concentrações atmosféricas dos gases com efeito de estufa mais importantes ao longo dos últimos 2000 anos (adaptado de IPCC, 2007a)	16
Figura 2.4 – Cenários SRES dominados pelo tipo de governação (eixo horizontal) e valores predominantes (eixo vertical) (fonte: Aguiar, 2006)	19
Figura 2.5 – Cenários de emissões de GEE desde 2000 até 2100, à esquerda, e projecções futuras do aquecimento global em função dos cenários de emissões, à direita (adaptado: IPCC, 2007b).....	20
Figura 2.6 – Representação esquemática do efeito nas temperatura extremas, para uma distribuição normal da temperatura, quando: (a) a temperatura média aumenta; (b) a variância aumenta; (c) existe um efeito combinado de aumento da média e da variância (adaptado de Folland et al., 2001)	23
Figura 2.7 – Evolução temporal das médias das temperaturas máxima (curva de cima) e mínima (curva de baixo) em Portugal. São representados os valores das tendências (°C/década) para os períodos de 1930-1945, 1946-1975 e 1976-2002 (fonte: Miranda et al., 2006)	24
Figura 2.8 – Evolução temporal da precipitação sazonal média em Portugal. As linhas a tracejado representam a média no período 1961-1990 (fonte: Miranda et al., 2006)	25
Figura 2.9 – Anomalia da precipitação média mensal em Portugal entre os períodos 1971-2000 e 1941-1970 (fonte: Miranda et al., 2006)	25
Figura 3.1 – Componentes de construção dos Sistemas de Informação e de Apoio à Decisão Ambientais (adaptado de Denzer, 2005).....	59
Figura 3.2 – Representação do método do vizinho mais próximo (polígonos de Thiessen), em que o valor interpolado de x_0 é igual à observação mais próxima x_1 (adaptado de Soares, 2006)	69
Figura 3.3 – Representação do método do inverso do quadrado da distância em que o valor interpolado x_0 é uma média ponderada das N observações vizinhas (adaptado de Soares, 2006).....	70
Figura 3.4 – Representação esquemática dos parâmetros essenciais da função de covariância: variância C_0 e distância de correlação α (adaptado de Catalão, 2000)	71
Figura 4.1 – Representação da curva dos coeficientes culturais e dos períodos de desenvolvimento da cultura para a aproximação coeficientes culturais médios (adaptado de Allen et al., 1998)	82

Figura 4.2 – Curva dos coeficientes culturais de base em que se mostra a evolução do coeficiente cultural basal K_{cb} e do coeficiente de evaporação do solo K_e ao longo das várias fases da cultura. A linha a tracejado representa a curva dos coeficientes culturais médios $K_c = K_{cb} + K_e$ (Adaptado de Allen et al., 1998).	83
Figura 4.3 – Esquema do modelo de reservatório do solo (simplificado) (adaptado de Allen et al., 1998)	85
Figura 4.4 – Variação da profundidade do balanço hídrico ao longo do tempo de acordo com o desenvolvimento da cultura (adaptado de Teixeira, 1989)	88
Figura 4.5 – Esquema dos termos do balanço hídrico da zona de enraizamento em regadio (adaptado de Fernando, 1998)	90
Figura 4.6 – Balanço hídrico do solo considerando a cultura com a raiz mais profunda da rotação	92
Figura 4.7 – Delimitação das zonas de conforto hídrico e de carência hídrica (adaptado de Teixeira, 1989)	93
Figura 4.8 – Coeficiente de redução da evaporação K_r (adaptado de Allen et al., 1998)	97
Figura 4.9 – Representação esquemática da determinação da fracção de solo humedecido exposto à radiação solar (f_{ew}) como função da fracção de cobertura (f_c), da fracção humedecida (f_w) e do tipo de sistema de rega. (adaptado de Allen et al., 1998)	99
Figura 4.10 – Balanço hídrico da camada evaporativa do solo (adaptado de Allen et al., 1998)	101
Figura 4.11 – Coeficiente de stress hídrico e o ajustamento da ET_c em função da reserva de água no solo (adaptado de Fernando, 1998)	102
Figura 4.12 – Algoritmo de cálculo da ET_c implementado no <i>software</i> IrrigRotation, de acordo com a metodologia dos K_c de base proposta por Allen et al. (1998)	104
Figura 5.1 – Esquema típico de um sistema de rega com enrolador (adaptado de: Tarjuelo, 2005)	122
Figura 5.2 – Perfis pluviómetros aplicados por um canhão em movimento para ângulos de sector compreendidos entre os 180° (ou 360°) e os 330° (adaptado de Keller e Bliesner, 1990)	130
Figura 5.3 – Intervalo de pressões recomendado à saída do canhão em função do caudal debitado (CEMAGREF, 1992)	132
Figura 5.4 – Ábaco das perdas de carga nos tubos semi-rígidos de polietileno (série de 800 kPa) dos enroladores (adaptado de CEMAGREF, 1992)	133
Figura 5.5 – Exemplo dos dados característicos de um canhão disponibilizados pelo fabricante (adaptado de Komet, 2011).	137
Figura 5.6 – Fluxograma do procedimento de cálculo utilizado para dimensionar sistemas de canhão com enrolador	143
Figura 5.7 – Representação esquemática das posições do canhão e das posições dos pluviómetros consideradas na simulação do funcionamento do canhão	147

Figura 5.8 – Fluxograma do módulo de simulação da distribuição de água à parcela pelo canhão.	149
Figura 6.1 – Metodologia desenvolvida para a avaliação dos impactes dos cenários de alteração climática na agricultura de regadio e nos sistemas de rega	152
Figura 6.2 – Representação esquemática do sistema IScenarios	156
Figura 6.3 – Região do Alentejo com a localização das estações de Beja e Évora (▲) e dos pontos a) das grelhas do modelo climático HadRM3P relativas ao vento (+) e a todas as outras variáveis (×); e b) das grelhas dos modelos HIRHAMh (◆) e HIRHAMhh (●).....	158
Figura 6.4 – Estrutura de ficheiros do programa de leitura e formatação dos dados dos modelos climáticos.	160
Figura 6.5 – Fluxograma dos elementos e da estrutura do <i>software</i> Interpolador.....	169
Figura 6.6 – Estrutura de ficheiros do programa Interpolador	169
Figura 6.7 – Estrutura conceptual do modelo IrrigRotation	171
Figura 6.8 – Interface gráfica do modelo IrrigRotation	172
Figura 6.9 – Fluxograma do modelo de balanço hídrico contínuo no tempo IrrigRotation...173	
Figura 6.10 – Representação esquemática da construção da sequência de culturas com um passo de tempo diário	174
Figura 6.11 – Algoritmo responsável pela criação da matriz dos dados culturais que contém para cada dia da simulação os diferentes parâmetros da cultura.....	174
Figura 6.12 – Exemplo de uma tabela de resultados, criada para cada uma das simulações, na qual são armazenados os dados das necessidades de rega calculadas pelo modelo IrrigRotation	176
Figura 6.13 – Integração do modelo IrrigRotation num SIG	178
Figura 6.14 – Interface gráfica do modelo IrrigRotation e a sua ligação ao <i>software</i> GeoMedia através de uma barra de ferramentas (destacada a azul) que contém um comando responsável por correr o modelo IrrigRotation	178
Figura 6.15 – Estrutura conceptual do programa Enrolador.	181
Figura 6.16 – Estrutura de ficheiros do programa Enrolador	182
Figura 7.1 – Representação esquemática das diversas etapas e dados de base utilizados durante a aplicação experimental da metodologia desenvolvida a dois casos de estudo na região do Alentejo.	186
Figura 7.2 – Diagrama de extremos e quartis da temperatura média para a) Beja e para b) Évora	193
Figura 7.3 – Diagrama de extremos e quartis da Precipitação para a) Beja e para b) Évora.....	194
Figura 7.4 – Diagrama de dispersão das médias mensais da temperatura média, relativas ao período de controlo dos modelos RCM, sobre os valores observados para as estações meteorológicas de a), c), e) Beja e de b), d), f) Évora	195

Figura 7.5 – Diagrama de dispersão das médias mensais da precipitação, relativas ao período de controlo dos modelos RCM, sobre os valores observados para as estações meteorológicas de a), c), e) Beja e de b), d), f) Évora	196
Figura 7.6 – 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.	199
Figura 7.7 – Ciclo anual das anomalias da evapotranspiração de referência 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.....	200
Figura 7.8 – Médias mensais da temperatura máxima das séries climáticas perturbadas produzidas para a) Beja e b) Évora;	202
Figura 7.9 – Médias mensais da temperatura mínima das séries climáticas perturbadas produzidas para a) Beja e b) Évora	202
Figura 7.10 – Médias mensais da precipitação das séries climáticas perturbadas produzidas para a) Beja e b) Évora	203
Figura 7.11 – 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.....	204
Figura 7.12 – Carta de solos (IDRHa, 2010) relativa às manchas de solos existentes na região de a) Évora (folha nº 460) e na região de b) Beja (folha nº 521).	207
Figura 7.13 – Variação das necessidades hídricas das culturas para o período de 2071-2100, considerando apenas uma folha para cada rotação, para a) Beja e b) Évora.....	214
Figura 7.14 – Variação das necessidades hídricas das culturas para Beja e para o período de 2071-2100, considerando a média das quatro folhas da rotação B-M-T-T.....	215
Figura 7.15 – Variação média das necessidades de rega anuais para o período de 2071-2100, considerando apenas uma folha para cada rotação, para a) Beja e b) Évora.....	217
Figura 7.16 – Variação média das necessidades de rega anuais para Beja e para o período de 2071-2100, considerando a médias das quatro folhas da rotação B-M-T-T.....	217
Figura 7.17 – Variação média do deficit hídrico das culturas de sequeiro para o período de 2071-2100, considerando apenas uma folha de cada rotação, para a) Beja e b) Évora	221
Figura 7.18 – Variação média do deficit hídrico da cultura do trigo para Beja e para o período 2071-2100, considerando a média das quatro folhas da rotação B-M-T-T.....	221
Figura 7.19 – 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 (Zr max_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.....	227

Figura 7.20 – 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 (Zr max_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	228
Figura 7.21 – Representação esquemática da parcela hipotética utilizada no dimensionamento dos sistemas de rega de canhão, com o recurso ao modelo Enrolador. 230	
Figura 7.22 – Percentagem de variação do caudal de projecto, para cada um dos cenários de alteração climática, para a) Beja e b) para Évora	235

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Aquecimento médio global da superfície terrestre projectado para o final do século XXI (fonte: IPCC, 2007b).....	21
Quadro 2.2 – Comparação das principais vantagens e desvantagens dos métodos de regionalização estatísticos e dinâmicos (fonte: Wilby e Wigley, 1997 <i>cit. in</i> Mourato, 2009).....	34
Quadro 5.1 – Percentagem de água perdida pelo fole em função da dotação aplicada (CEMAGREF, 1992).....	124
Quadro 5.2 – Largura recomendada das faixas regadas em função da velocidade do vento (Tarjuelo, 2005)	130
Quadro 5.3 – Valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CU) e da eficiência de aplicação (Ea) que se podem alcançar para sistemas de rega com canhão móvel quando bem projectados e geridos (Keller e Bliesner, 1990; Tarjuelo, 2005).....	131
Quadro 5.4 – Taxa de infiltração do solo, em função da textura e da cobertura do solo (Tarjuelo, 2005).....	134
Quadro 5.5 – Valores típicos para o coeficiente de atrito (C) da equação de Hazen-Williams (Keller e Bliesner, 1990).....	141
Quadro 7.1 – Médias mensais e 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 a estação de Beja.....	189
Quadro 7.2 – Médias mensais e 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 a estação de Évora	189
Quadro 7.3 – Médias anuais dos dados climáticos produzidos pelos modelos RCM, considerados neste trabalho, 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.....	190
Quadro 7.4 – Desvios médios entre os dados dos modelos RCM relativos ao período controlo (1961-90) e os dados observados nas estações meteorológicas (controlo RCM - observados); e desvios médios entre os cenários de alteração climática (2071-2100) e os dados de controlo dos modelos RCM (cenário RCM - controlo RCM); para as variáveis temperatura média (T_{med}) e precipitação (P).....	191
Quadro 7.5 – 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	197
Quadro 7.6 – Médias sazonais das anomalias climáticas de P e T_{med} , expressas como a diferença entre os valores dos cenários de alteração climática RCM (2071-2100) e o período de controlo (1961-90).....	198

Quadro 7.7 – 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)	201
Quadro 7.8 – Parâmetros dos solos Pmg e Bpc (Cardoso, 1965)	208
Quadro 7.9 – Parâmetros das culturas do milho, trigo, beterraba sacarina, tomate, Girassol e cevada, utilizados como dados de entrada no modelo IrrigRotation	209
Quadro 7.10 – Parâmetros do período sem cultura (<i>nongrowing season</i>)	210
Quadro 7.11 – Médias das necessidades hídricas das culturas, para o período de controlo e para os cenários de alteração climática, considerando apenas uma folha para cada rotação	211
Quadro 7.12 – Média das necessidades hídricas da cevada para os diferentes cenários de alteração climática, considerando apenas uma folha da rotação, e retirando os valores dos <i>outliers</i>	212
Quadro 7.13 – Médias das necessidades hídricas das culturas para o período de controlo e para os cenários de alteração climática, considerando a média das quatro folhas da rotação B-M-T-T, para Beja.....	213
Quadro 7.14 – Necessidades de rega anuais (NRg) obtidas pelo programa IrrigRotation, considerando apenas uma das folhas para cada rotação, para o período de controlo (1961-90) e para os diferentes cenários de alteração climática (2071-2100).....	216
Quadro 7.15 – Necessidades de rega anuais (NRg) obtidas pelo programa IrrigRotation, para Beja e para a rotação B-M-T-T, considerando a média das quatro folhas da rotação, e em que se comparam os valores obtidos para o período de controlo (1961-90) com os resultados dos diferentes cenários de alteração climática	216
Quadro 7.16 – Médias do deficit hídrico (DH) das culturas de sequeiro, expresso em altura de lâmina de água (mm) e em percentagem (%), para o período de controlo e para os cenários de alteração climática, considerando apenas uma folha de cada rotação	220
Quadro 7.17 – Médias do deficit hídrico (DH) da cultura do trigo (B-M-T-T) para Beja, expresso em altura de lâmina de água (mm) e em percentagem (%), para o período de controlo e para os cenários de alteração climática, considerando a média das quatro folhas da rotação.....	220
Quadro 7.18 – Valores das necessidades de rega anuais e das necessidades de rega para o período de ponta (média de 10 dias) para as probabilidades de não excedência de 75%, 80%, 90%, para o período de controlo e para os cenários de alteração climática	222
Quadro 7.19 – Valor p obtido para a análise de variância (ANOVA a um factor) para cada uma das culturas da rotação B-M-T-T, para o caso de estudo Beja, em que se comparam simultaneamente todos os cenários climáticos.....	224
Quadro 7.20 – Valor p obtido para a análise de variância (ANOVA a um factor) para cada uma das culturas da rotação B-M-T-T, para o caso de estudo Beja, em que se realizam diferentes comparações entre os cenários climáticos.....	225

Quadro 7.21 – Médias anuais das necessidades hídricas (NH) e do deficit hídrico (DH), para Beja, da cultura do trigo produzida em monocultura para o período de controlo (1961-90) e para o cenário A2 do modelo HadRM3P (2071-2100).....	226
Quadro 7.22 – Parâmetros dos solos utilizados como dados de entrada no modelo Enrolador.....	230
Quadro 7.23 – Necessidades de rega para o período de ponta (Rgp), para as diferentes simulações consideradas, para uma probabilidade de não excedência de 75%.....	232
Quadro 7.24 – Dados de base utilizados para realizar o dimensionamento dos sistemas de rega com canhão.....	233
Quadro 7.25 – Canhão seleccionado pelo modelo Enrolador para cada uma das simulações	234
Quadro 7.26 – Enrolador seleccionado pelo modelo Enrolador para cada uma das simulações	236
Quadro 7.27 – Conduta principal seleccionada pelo modelo Enrolador para cada uma das simulações	237
Quadro 7.28 – Parâmetros de funcionamento e regulações dos sistemas de rega com canhão dimensionados.....	238
Quadro 7.29 – Indicadores de desempenho potenciais dos sistemas de rega dimensionados com o modelo Enrolador, em condições em que não ocorra vento e quando sejam bem geridos e mantidos	239

Lista de símbolos

A	área a regar	ha
Ac	ascensão capilar	mm dia ⁻¹
C	coeficiente de atrito	-
CC	capacidade de campo	-
C(d)	função de covariância em função da distância d	-
C ₀	variância	-
C _{ℓℓ}	matriz de covariância do vector ℓ	-
C _{zℓ}	matriz da covariância cruzada entre os vectores ℓ e $\hat{z}$	-
CE	coeficiente de emurchecimento permanente	-
CU	coeficiente de uniformidade	%
CV	coeficiente de variação	-
D _{aic}	número de dias após o início do crescimento da raiz	dia
D	altura média de água aplicada ao solo	mm
D _{nc}	diâmetro nominal da conduta	mm
Db	Dotação bruta de rega	mm
d _i	distância inicial à extremidade da parcela	m
d _i	distância entre a observação x _i e o ponto a estimar x ₀	km
DH	deficit hídrico	mm
DI	dotação líquida de rega	mm
DI _{ajust}	dotação liq. de rega ajustada para o intervalo entre regas	mm
D _{MAD}	altura média de água aplicada ao solo para satisfazer o MAD	mm
D _{mc}	Diâmetro molhado do canhão	m
D _{pl}	Distância do pluviómetro ao canhão	m
Dr	drenagem a partir da zona radicular	mm dia ⁻¹
Dr _e	drenagem a partir da camada superficial	mm dia ⁻¹
DRg	dotação de rega	mm
Drp	percolação profunda	mm dia ⁻¹
D _{tm}	número total de dias do período de crescimento da raiz	dia
DU	uniformidade de distribuição	%
E	evaporação do solo	mm dia ⁻¹
$\bar{E}$	erro médio	-
e _a	pressão actual de vapor	kPa
e _i	resíduos	-

$ e_i $	resíduos absolutos	-
E_a	eficiência de aplicação	%
E_{ajust}	largura de faixa regada ajustada em função do número de faixas	m
E_d	eficiência de distribuição	%
E_f	eficiência global da rega	%
E_{FR}	largura de faixa regada	m
E_{pc}	espaçamento entre as posições do canhão	m
E_{pp}	espaçamento entre as posições dos pluviómetros	m
$\bar{E}_r$	erro relativo absoluto médio	-
E_{rec}	largura de faixa recomendada	%
e_s	pressão de vapor de saturação	kPa
E_s	escoamento superficial	mm dia ⁻¹
$(e_s - e_a)$	deficit da pressão de vapor	kPa
E_t	eficiência de transporte	%
ET_o	evapotranspiração de referência	mm dia ⁻¹
ET_C	evapotranspiração cultural	mm dia ⁻¹
$ET_{c\_ajustada}$	evapotranspiração cultural ajustada	mm dia ⁻¹
$F(x)$	função de distribuição empírica	-
f_c	fracção efectiva da superfície do solo coberta pela vegetação	-
$1-f_c$	fracção do solo exposta à radiação solar directa	-
$f_{c\ eff}$	fracção efectiva do solo sombreada pela vegetação	-
f_{ew}	fracção do solo humedecida e exposta à radiação solar directa	-
FL	fracção de lavagem	-
f_w	fracção do solo humedecida pela rega ou precipitação	-
G	densidade do fluxo de calor do solo	MJ m ⁻² dia ⁻¹
h	altura média das plantas	m
H_{ac}	perda de carga devido à altura do canhão ao solo	m
H_c	perda de carga contínua	m
H_{cp}	perda de carga na conduta principal	m
H_{es}	perda de carga no enrolador	m
H_{max}	carga no ponto da parcela mais favorável	m
h_{max}	altura máxima das plantas	m
H_{min}	carga no ponto da parcela mais desfavorável	m
h_{min}	altura mínima das plantas	m
H_s	perda de carga nas singularidades	m
H_t	perda de carga no tubo flexível	m

I	intervalo entre regas	dia
I_t	taxa média de aplicação	mm/h
J	perda de carga unitária	m/m
J_t	perda de carga unitária no tubo flexível	m/m
K_C	coeficiente cultural	-
$K_{C\text{ ini}}$	coeficiente cultural para o período inicial	-
$K_{C\text{ mid}}$	coeficiente cultural o período intermédio o valor	-
$K_{C\text{ end}}$	coeficiente cultural para a data da colheita ou para o último dia do período final	-
$K_{C\text{ max}}$	valor máximo do K_C imediatamente a seguir a uma chuva ou a uma rega	-
$K_{C\text{ min}}$	valor mínimo do K_C para solo seco e nu	-
K_{cb}	coeficiente cultural basal	-
$K_{cb\text{ (Tab)}}$	valor tabelado de $K_{cb\text{ mid}}$ ou $K_{cb\text{ end}}$	-
$k_{cb\text{ ini}}$	coeficiente cultural basal para o período inicial	-
$k_{cb\text{ mid}}$	coeficiente cultural basal para o período intermédio	-
$k_{cb\text{ end}}$	coeficiente cultural basal para a data da colheita ou para o último dia do período final	-
$K_{cb\text{ full}}$	valor de K_{cb} no período intermédio para vegetação que cubra totalmente o solo	-
K_e	coeficiente de evaporação do solo	-
K_r	coeficiente de redução da evaporação	-
K_S	coeficiente de stress hídrico do solo	-
ℓ	vector das observações	-
ℓ_i	valor da observação no ponto x_i	-
LAI	Índice de área foliar	m^2/m^2
L_c	comprimento da conduta principal	m
L_f	comprimento da faixa a regar	m
L_{ini}	Duração do período inicial	dia
L_{dev}	Duração do período de crescimento rápido	dia
L_{maior}	comprimento da maior dimensão da parcela.	m
L_{mid}	Duração do período intermédio	dia
L_t	comprimento do tubo flexível	m
L_{late}	Duração do período final	dia
$LRFU$	limite da reserva facilmente utilizável	mm
$LRFE$	limite da reserva facilmente evaporável	mm
m	média das observações de Z_i	mm
n	número de ordem de um dado acontecimento	-

N	Número de observações	-
n_h	nº de horizontes do solo até à profundidade radicular	-
nf	número de faixas a regar	-
NH	necessidades hídricas	mm
nsg	nível superior de gestão	mm
nig	nível inferior de gestão	mm
np	número de pluviómetros	-
NRg _T	necessidades totais de rega	mm
NRg	necessidades de rega	mm
Or	oportunidade de rega	-
p	fracção de água facilmente utilizável	-
p_{ini}	fracção de água facilmente utilizável durante o período inicial	-
$p_{Tabelado}$	valor tabelado da fracção de água facilmente utilizável	-
P	precipitação	mm
P_i	precipitação no dia i	mm
$P(x_n)$	probabilidade de um dado valor (x_n) não ser excedido	-
P_c	pressão necessária ao canhão	kPa
$P_{cenário}$	precipitação diária corrigida relativa aos cenários de alteração climática	mm
$P_{controlocorr}$	precipitação diária simulada pelo modelo RCM para o período de controlo corrigida	mm
Pe	precipitação efectiva	mm dia ⁻¹
PELQ	eficiência potencial de aplicação relativa ao primeiro quartil das observações mais desfavoráveis	%
P_{hidr}	pressão necessária no hidrante	kPa
P_{obs}	precipitação diária observada relativa ao período de controlo	mm
$\bar{P}_{obs}$	precipitação média mensal observada relativa ao período de controlo	mm
$P_{RCMcenário}$	precipitação diária simulada pelo modelo RCM relativa aos cenários de alteração climática	mm
$\bar{P}_{RCMcenário}$	precipitação média mensal simulada pelo modelo RCM relativa aos cenários de alteração climática	mm
$P_{RCMcontrolo}$	precipitação diária simulada pelo modelo RCM para o período de controlo	mm
$\bar{P}_{RCMcontrolo}$	precipitação média mensal simulada pelo modelo RCM para o período de controlo	mm
Q	caudal de projecto	m ³ /h
R	alcance do canhão	m
R_e	reserva de água na camada evaporativa do solo	-

REW	água facilmente evaporável	mm
R_{evap}	camada evaporativa	-
RFU	reserva facilmente utilizável	mm
RH_{max}	humidade relativa máxima	%
RH_{med}	humidade relativa média	%
RH_{min}	humidade relativa mínima	%
R_i	reserva de água no solo para o dia i	mm
R_{min}	valor da reserva correspondente ao limite da reserva facilmente utilizável	mm
R_T	raio médio da terra	km
R_g	rega	mm dia ⁻¹
R_{gp}	necessidades de rega para o período de ponta	mm dia ⁻¹
R_n	radiação líquida à superfície da cultura	MJ m ⁻² dia ⁻¹
R_s	radiação solar global	MJ m ⁻² dia ⁻¹
RU	reserva utilizável do solo	mm
R^2	coeficiente de determinação	-
$R1(t)$	camada correspondente à porção do solo ocupada pelas raízes	-
$R2(t)$	camada do solo entre Z_r e $Z_{r \text{ max\_rot}}$	-
T	temperatura média diária do ar a 2 m de altura	°C
TEW	água evaporável total	mm
T_{ew}	transpiração a partir da fracção f_{ew}	mm dia ⁻¹
$T_{\text{cenário}}$	temperatura diária corrigida relativa aos cenários de alteração climática	°C
$T_{\text{controlocorr}}$	temperatura diária simulada pelo modelo RCM para o período de controlo corrigida	°C
T_f	tempo de rega parado no final	h
T_i	tempo de rega parado no início	h
T_{max}	temperatura máxima do ar	°C
T_{med}	temperatura média do ar	°C
T_{min}	temperatura mínima do ar	°C
td2m	temperatura do ponto de orvalho a 2 metros de altura	K
T_{obs}	temperatura diária observada relativa ao período de controlo	°C
$\bar{T}_{\text{obs}}$	temperatura média mensal observada relativa ao período de controlo	°C
$T_{\text{RCMcenário}}$	temperatura diária simulada pelo modelo RCM relativa aos cenários de alteração climática	°C
$\bar{T}_{\text{RCMcenário}}$	temperatura média mensal simulada pelo modelo RCM relativa aos cenários de alteração climática	°C

$T_{RCMcontrol}$	temperatura diária simulada pelo modelo RCM para o período de controlo	$^{\circ}C$
$\bar{T}_{RCMcontrol}$	temperatura média mensal simulada pelo modelo RCM para o período de controlo	$^{\circ}C$
Trd	tempo útil diário de rega	h/dia
U_2	velocidade média diária do vento a 2 m de altura	$m\ s^{-1}$
V_c	velocidade linear de deslocação do canhão	m/h
V_{esc}	velocidade de escoamento	m/s
Vol_{cone}	volume do cone	m^3
$Vol_{elipsoide}$	volume do elipsóide	m^3
Vr	quantidade de água adicionada à zona explorada pelas raízes devido ao seu crescimento	$mm\ dia^{-1}$
WUE	Water Use Efficiency	kg/m^3
X	variável aleatória	-
x_0	valor interpolado para um dado ponto	-
x_1	valor da observação mais próxima	-
x_i	pontos correspondentes às posições das estações meteorológicas	-
Y_i	valor da ordenada para o pluviómetro i	m
Y_{ini}	valor da ordenada inicial para o pluviómetro i=0	m
Z_{avg}	altura média infiltrada na parcela	mm
Z_e	profundidade da superfície do solo que está sujeita a secagem devido à evaporação	m
z_i	valor observado	-
$Zrec_i$	altura de água recolhida em cada pluviómetro	mm
$\hat{z}$	vector dos valores estimados	-
$\hat{z}_i$	valor estimado de ordem i	-
Z_f	factor de aprofundamento das raízes.	-
Z_{lq}	altura média de água infiltrada no primeiro quartil	mm
$Z_{lq,MAD}$	altura média infiltrada no primeiro quartil das observações mais desfavoráveis quando é igual ao MAD	mm
Z_{max}	máxima altura de água aplicada (perfil pluviométrico)	m
Z_{pl}	pluviometria aplicada num dado pluviómetro	mm/h
Z_r	profundidade efectiva das raízes	m
Z_{ri}	profundidade efectiva de enraizamento no dia i	m
$Z_{r,lq}$	média da altura de água infiltrada e armazenada na zona radicular no primeiro quartil das observações mais desfavoráveis	mm
$Z_{r\ min}$	profundidade efectiva inicial de enraizamento	m
$Z_{r\ Max}$	profundidade efectiva máxima de enraizamento	m

$Z_{r \max\_rot}$	profundidade máxima da raiz mais profunda de toda a rotação	m
α	distância de correlação	-
α_{sr}	ângulo do sector regado.	graus
γ	constante psicrométrica	kPa °C ⁻¹
Δ	declive da curva de pressão de vapor	kPa °C ⁻¹
ΔH_{rel}	diferença de carga devida ao desnível do terreno entre o hidrante e a posição inicial do canhão	m
Δt	intervalo de tempo	dia
ΔV	variação do volume de água armazenado na camada do solo situada entre Z_r e $Z_{r \max\_rot}$	mm
ΔZ_i	espessura de cada horizonte do solo	m
ΔZ_r	aumento da profundidade da raiz	m
ΔR	variação do volume de água armazenado no solo	mm
$\bar{\theta}$	teor de humidade médio do solo	m ³ /m ³
θ_{CC}	teor de água do solo à capacidade de campo	m ³ /m ³
θ_{CCi}	teor de água do solo à capacidade de campo para o horizonte i	m ³ /m ³
θ_{CE}	teor de água do solo ao coeficiente de emurchecimento	m ³ /m ³
θ_{CEi}	teor de água do solo ao coef. emurchecimento para o horizonte i	m ³ /m ³
λ	longitude	radianos
σ	desvio padrão	-
Φ	Latitude	radianos

Lista de acrónimos e abreviaturas

ANOVA	Análise de variância
AOGCM	Modelos de circulação geral acoplados atmosfera-oceano
A1	Cenário SRES global económico
A1F1	Cenário SRES uso intenso de combustíveis fósseis
A1T	Cenário SRES uso mínimo de combustíveis fósseis
A1B	Cenário SRES equilíbrio entre todas as fontes de energia
A2	Cenário SRES regional económico
AR4	Fourth Annual Assessment Report of the IPCC
B1	Cenário SRES global ambiental
B2	Cenário SRES regional ambiental
B-M-T-T	Rotação Beterraba sacarina-Milho-Tomate-Trigo
CAOP	Carta Administrativa Oficial de Portugal
CEER	Centro de engenharia dos Biosistemas
CEMAGREF	Centre National du Machinisme Agricole, du Genie Rural, des Eaux et des Forets
CFC	Clorofluorcarbonetos
CMQ	Colocação por mínimos quadrados
CORDEX	A COordinated Regional climate Downscaling EXperiment
COTR	Centro Operativo e de Tecnologia de Regadio
DMI	Instituto de Meteorologia Dinamarquês
DODS	Distributed Oceanographic Data System
DSSAT	Decision Support System for Agrotechnology Transfer
EFMA	Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva
ENSEMBLES	Providing ensemble-based predictions of climate changes and their impacts
ENSO	El Niño-Southern Oscillation
FACE	Free-Air CO ₂ Enrichment
FAO	Organização da Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
FAO-PM	Método FAO Penman-Monteith
FAR	Fourth Assessment Report
GCM	Modelo de Circulação Global
GDD	Growing Degree Days
GEE	Gases com Efeito de Estufa
G-T-C	Rotação Girassol-Trigo-Cevada
HC	Hadley Center for Climate Prediction and Research

HCFC	Hidroclorofluorcarbonetos
IDRHa	Instituto de Desenvolvimento Rural e Hidráulica
IgeoE	Instituto Geográfico do Exército
IGP	Instituto Geográfico Português
IM	Instituto de Meteorologia
INAG	Instituto da Água
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IQD	Inverso do quadrado da distância
MAD	Deficit permitido em termos de gestão (Management Allowed Depeletion)
MDT	Modelo Digital do Terreno
NAO	Oscilação do Atlântico Norte
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PRUDENCE	Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects
RCM	Modelo Climático Regional
SAD	Sistemas de Apoio à Decisão
SADA	Sistemas de Apoio à Decisão Ambientais
SAGRA	Sistema Agrometeorológico para a Gestão da Rega no Alentejo
SIA	Sistemas de Informação Ambientais
SIADA	Sistemas de Informação e de Apoio à Decisão Ambientais
SIAM	Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures
SGBD	Sistema de Gestão de Base de Dados
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRES	Special Report on Emission Scenarios.
TGICA	Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change.
VMP	Vizinho mais próximo
WMO	Organização Meteorológica Mundial

1. Introdução

1.1. Apresentação do problema

A agricultura é muito dependente do clima o que a torna bastante vulnerável às alterações climáticas. A agricultura de regadio é responsável por uma fatia muito importante da quantidade total de alimentos produzidos e é um dos maiores utilizadores de água. Em Portugal estima-se que o consumo de água para rega represente, segundo o INAG (2001), cerca de 74% do total da água consumida no país, o que lhe atribui uma relevância especial ao nível da gestão dos recursos hídricos e da conservação do ambiente.

Actualmente a comunidade científica refere que existem evidências de que estão a ocorrer alterações climáticas (IPCC, 2007c). Os diferentes cenários de alteração climática disponíveis para Portugal projectam um aumento da temperatura do ar e uma redução na precipitação média anual, com uma maior concentração desta durante o Inverno e um declínio em todas as outras estações do ano, particularmente expressivo durante a Primavera (Miranda et al., 2006, Alcamo et al., 2007; Christensen et al., 2007). Kundzewicz et al., 2007, também referem uma considerável redução na disponibilidade de água para o sul da Europa, com uma maior frequência e severidade das secas. Um aumento na temperatura associado com uma redução na precipitação pode levar a uma redução na produção das culturas e a um aumento da procura de água por parte da agricultura. Este facto poderá originar uma redução na quantidade de alimentos produzidos constituindo um risco importante ao nível da segurança alimentar. O aumento da procura de água para a rega, como forma de contrariar os efeitos das alterações climáticas, associado com a redução de precipitação irá aumentar a pressão sobre os recursos hídricos, o que poderá ter implicações ao nível do ambiente e dos recursos naturais (Turrall e Faurés, 2010).

De modo a permitir o ajustamento da agricultura de regadio a uma realidade caracterizada pela incerteza climática é necessário desenvolver estudos e metodologias que permitam a gestão dos riscos, que decorrem dum clima em mudança, sobre os sistemas agrícolas. Assim, é necessário criar ferramentas que permitam a avaliação dos impactes das alterações climáticas e a definição de medidas de adaptação, de modo a sustentar a decisão agronómica num contexto de incerteza. Com o objectivo de avaliar os impactes na agricultura e no regadio e definir medidas de adaptação têm sido desenvolvidos diversos estudos baseados na utilização de cenários de alteração climática, sob a forma de dados de entrada em modelos de crescimento das culturas e de simulação do balanço hídrico do solo (Rosenberg et al., 2003; Brandão, 2006; Pinto et al., 2006; Easterling et al., 2007 Rodriguez Díaz et al., 2007; Daccache et al., 2010; Lovelli et al., 2010; Xiong et al., 2010; De Lorenzi et al., 2012).

A problemática da incerteza é um ponto central em qualquer estudo de impacte das alterações climáticas sobre a agricultura e o regadio uma vez que estes estudos são realizados através da utilização de modelos de simulação das culturas, ou do balanço hídrico do solo, que utilizam dados climáticos produzidos por modelos climáticos tendo por base um determinado cenário de emissões de gases com efeito de estufa. Assim, à incerteza do processo de modelação das culturas, ou do balanço hídrico, junta-se a incerteza das simulações dos modelos climáticos e a incerteza dos cenários de emissões. Acresce, ainda, o facto de que actualmente não existe conhecimento suficiente sobre a influência que uma concentração crescente de CO₂ na atmosfera, associada com um aumento das temperaturas, terá no desenvolvimento das culturas e, em particular, no que toca às suas necessidades hídricas e à eficiência na utilização da água.

É necessário que a avaliação dos impactes e a definição das medidas de adaptação tenham em conta esta problemática da incerteza, pois pretende-se realizar uma adaptação antecipada e planeada da agricultura às condições futuras do clima. A implementação de medidas que visem o aumento exagerado da resiliência dos sistemas agrícolas, com o objectivo de reduzir os riscos climáticos, pode resultar em quebras importantes da rentabilidade das explorações agrícolas e numa diminuição da quantidade de alimentos produzidos. A definição das medidas de adaptação e a gestão dos riscos deve ser efectuada com base num equilíbrio entre a necessidade de reduzir os riscos climáticos e de assegurar a sustentabilidade económica, social e ambiental da actividade agrícola (Baethgen e Terra, 2010).

É de realçar que, hoje em dia, o processo de decisão na agricultura e no regadio se efectua num contexto de elevada incerteza, não só a nível climático como ao nível dos mercados, devido às perspectivas do elevado crescimento da população mundial com impactes ao nível da procura de alimentos e com efeitos nos níveis de segurança alimentar. É por isso pertinente o desenvolvimento de metodologias e de estudos que contribuam para apoiar a tomada de decisão neste contexto de incerteza.

No presente, os sistemas de rega são projectados com base em séries climáticas históricas, utilizando tipicamente séries com 30 anos, assumindo que os parâmetros estatísticos que caracterizam o clima se mantêm constantes ao longo do tempo. Uma vez que o clima irá mudar nas próximas décadas, esta premissa deixa de ser válida. Assim, no projecto de rega, para além dos dados climáticos observados, também se deverão considerar séries climáticas futuras, produzidas por modelos climáticos. Uma vez que as infra-estruturas de regadio são planeadas para horizontes temporais bastante alargados é necessária a avaliação dos impactes e a definição de margens de segurança para o período em que estarão a funcionar. Neste contexto, têm surgido recentemente diversos trabalhos que

demonstram a necessidade da adopção de séries climáticas futuras, correspondentes aos cenários de alteração climática, para efeitos de planeamento e gestão da água para rega e para a gestão dos recursos hídricos (Turrall e Faurés, 2010).

As projecções de alteração do clima são produzidas por modelos climáticos que utilizam cenários de emissões de CO₂, definidos pelo IPCC (*Intergovernmental Panel for Climate Change*) (IPCC, 2007a; IPCC-TGICA, 2007). Os modelos climáticos podem ser classificados em função da dimensão da área considerada nas simulações e em função da resolução espacial do cálculo. No primeiro grupo estão os modelos de circulação global (GCM) que simulam o clima a uma escala global, com uma grelha de aproximadamente 300 km de lado e no segundo estão os modelos climáticos regionais (RCM) que simulam as condições climáticas numa escala regional, utilizando uma grelha com a resolução espacial de aproximadamente 50 km (Cunha et al., 2006; Miranda et al., 2006; Santos, 2006; IPCC, 2007a). Os modelos climáticos consideram estimativas de futuras emissões de gases com efeito de estufa para diferentes níveis de desenvolvimento social e tecnológico. Estes cenários, desenvolvidos pelo IPCC, são conhecidos como SRES (*Special Report on Emission Scenarios*) (Nakicenovic et al., 2000; Parry et al., 2007; IPCC, 2007a,b).

Os estudos efectuados para a avaliação dos impactes das alterações climáticas na agricultura, e mais especificamente sobre o regadio, baseiam-se geralmente na utilização de modelos de culturas, ou de simulação do balanço hídrico, em conjunto com dados de cenários de alteração climática, produzidos por modelos climáticos (GCM e/ou RCM). Esta abordagem é bastante indicada, uma vez que não é possível replicar experimentalmente as futuras condições do clima e os seus impactes sobre a produção agrícola, sendo necessário recorrer a modelos para se obter uma estimativa dos impactes (Braga e Pinto, 2009). Os resultados das simulações permitem projectar os impactes prováveis e definir e testar medidas de adaptação (Jones, 2000; Döll, 2002; Brandão, 2006; Pinto et al., 2006; Rodriguez Díaz et al., 2007; Daccache et al., 2010; Lovelli et al., 2010; Xiong et al., 2010; Hunink e Droogers, 2011; De Lorenzi et al., 2012).

O desenvolvimento de modelos de simulação da rega tem constituído uma importante área de investigação nos últimos anos (Bastiaanssen, et al., 2007). Estes estudos, nos domínios da agricultura e do ambiente, têm evoluído através da integração de vários modelos de simulação entre si, com SIG e com sistemas de apoio à decisão (Denzer, 2005; Tarjuelo et al., 2005). No contexto da rega têm sido desenvolvidos um conjunto de ferramentas e de sistemas de informação compostos por programas e bases de dados, de que são exemplos os modelos de simulação do balanço hídrico ISAREG (Teixeira e Pereira, 1992), CROPWAT (Smith, 1998), SIMDualKc (Rolim et al., 2007) e mais recentemente o modelo IrrigRotation (Rolim e Teixeira, 2008) que permite a simulação do balanço hídrico para rotações de

culturas e o modelo AQUACROP (Raes et al., 2009). A integração de modelos de simulação do balanço hídrico com modelos de simulação dos sistemas de rega encontra-se descrita no trabalho de Granier et al. (2003). Estes modelos podem simular diferentes alternativas de projecto e gestão com o objectivo de melhorar a gestão da água para rega e a eficiência dos sistemas de rega.

1.2. Objectivos

Identificação dos objectivos

O objectivo desta tese é o desenvolvimento de uma metodologia que permita avaliar os impactes das alterações climáticas sobre a agricultura de regadio, nomeadamente sobre o projecto de rega. A metodologia a desenvolver deverá contemplar todas as etapas do projecto de rega, iniciando-se na recolha dos dados edafo-climáticos e terminando no dimensionamento dos sistemas de rega. O desenvolvimento de um conjunto de ferramentas informáticas permite incorporar a incerteza climática decorrente das alterações climáticas na engenharia de rega, que inclui o projecto dos sistemas de rega e a gestão da água para rega.

Para a concretização do objectivo geral anteriormente referido foram definidos os seguintes objectivos específicos:

- i) Seleccionar as séries de dados climáticos relativas aos cenários de alteração climática produzidas por modelos climáticos regionais;
- ii) Desenvolver um sistema de informação (IScenarios), baseado em SIG, que permita a manipulação dos dados de saída de vários modelos climáticos regionais e a construção das séries climáticas futuras;
- iii) Desenvolver um programa (Interpolador) que realize a interpolação espacial das variáveis agrometeorológicas utilizadas pelo modelo do balanço hídrico do solo;
- iv) Desenvolver um modelo de simulação do balanço hídrico do solo, contínuo no tempo, que permita determinar as necessidades de rega para as rotações de culturas (IrrigRotation);
- v) Desenvolver uma aplicação informática (Enrolador) que permita o dimensionamento e a avaliação do desempenho de sistemas de rega de canhão com enrolador;
- vi) Realizar a aplicação experimental da metodologia desenvolvida a dois casos de estudo na região do Alentejo, com o objectivo de a testar e de se avaliarem os

impactes das alterações climáticas nas necessidades de rega das rotações de culturas de regadio, nos caudais de ponta e no dimensionamento dos canhões de rega.

Justificação dos objectivos

O conjunto de ferramentas informáticas a desenvolver deverá permitir que o projecto e a gestão da rega se efectuem com base tanto em séries de dados observados, provenientes de estações meteorológicas, como em cenários de alteração climática produzidos pelos modelos climáticos. Deste modo, será possível formular novas estratégias de projecto e de gestão que permitam a adaptação dos sistemas de regadio aos efeitos das alterações climáticas. Pretende-se que, com base em modelos computacionais, bases de dados e sistemas de informação geográfica (SIG), seja possível apoiar os decisores no planeamento e gestão dos sistemas de rega, num contexto de incerteza climática.

O sistema de informação IScenarios foi desenvolvido com o objectivo de efectuar o processamento dos dados produzidos pelos modelos climáticos, de modo a produzir as séries climáticas futuras relativas aos cenários de alteração climática. Os dados dos cenários de alteração climática, produzidos pelos modelos climáticos, são espacialmente distribuídos e são disponibilizados num formato de difícil utilização, o que leva a que seja necessária a utilização de ferramentas informáticas e a realização de diversos passos para se converterem os dados no formato normalmente utilizado pelos modelos de simulação do balanço hídrico do solo. O formato e o volume de dados constituem um obstáculo à sua utilização em estudos no domínio da agricultura e do regadio.

O desenvolvimento do programa Interpolador (Rolim et al., 2011) teve como objectivo permitir combinar para um dado ponto do terreno séries de dados meteorológicos com diferentes distribuições espaciais. Permite, assim, que seja possível interpolar as anomalias dos cenários de alteração climática para os pontos das estações meteorológicas, de modo a se construam as séries climáticas futuras. Outro dos objectivos deste programa é o de aumentar a qualidade dos dados de entrada do modelo de balanço hídrico do solo, através da realização da interpolação espacial dos dados meteorológicos de entrada do modelo, o que permite a redução da incerteza associada à variabilidade espacial das variáveis agrometeorológicas.

O modelo de simulação do balanço hídrico, IrrigRotation (Rolim e Teixeira, 2008), foi desenvolvido com o objectivo de realizar a simulação do balanço hídrico do solo, de forma

continua no tempo, de modo a permitir a determinação das necessidades de rega ao nível das rotações de culturas, que são a técnica base da agricultura sustentável.

O programa Enrolador é utilizado, na metodologia desenvolvida no sentido de exemplificar o cálculo dos impactes das alterações climáticas sobre o dimensionamento dos sistemas de rega. Os sistemas de rega com canhão são particularmente interessantes para a definição de medidas de adaptação às alterações climáticas na agricultura pois são indicados para regas de complemento ou de socorro em climas semi-áridos (Raposo, 1996; Tarjuelo, 1999). Os canhões de rega pela sua mobilidade enquadram-se bem na rega das rotações de culturas, uma vez que é necessário ter um equipamento que se possa deslocar de uma folha da rotação para outra.

Por último pretende-se efectuar a aplicação experimental da metodologia desenvolvida a dois casos de estudo na região do Alentejo, com o objectivo de avaliar o seu desempenho e de realizar o levantamento de futuras necessidades de investigação. Os resultados desta aplicação deverão produzir para cada cenário climático as necessidades hídricas e de rega das culturas, os valores do deficit hídrico das culturas de sequeiro, assim como os caudais de ponta e os equipamentos de rega seleccionados. Nesta aplicação experimental, pretende-se, também, avaliar o comportamento das rotações de culturas do ponto de vista da gestão da água do solo e qual o seu efeito nas necessidades de rega das culturas para diferentes cenários climáticos.

1.3. Organização da dissertação

A dissertação está organizada em oito capítulos. No capítulo 2 faz-se a revisão bibliográfica sobre o tema das alterações climáticas, focando a definição do clima, a sua variabilidade e as causas das alterações climáticas. Descrevem-se os modelos climáticos, os cenários de emissões de gases com efeito de estufa e as projecções de alterações climáticas actualmente disponíveis. Enunciam-se as principais fontes de incerteza e realiza-se a revisão dos métodos de estudo a ser utilizados em estudos sectoriais na agricultura de regadio. Apresentam-se os principais impactes das alterações climáticas nos sistemas agrícolas de regadio descritos na literatura, com especial enfoque nas necessidades hídricas e de rega das culturas e na gestão da água para rega. No capítulo 3 descreve-se o estado de arte relativamente à utilização de sistemas de informação na engenharia da rega. Os métodos de cálculo das necessidades de rega são apresentados no capítulo 4, juntamente com a caracterização dos modelos do balanço hídrico do solo e com a descrição das rotações de culturas de um ponto de vista de gestão da água no solo. No capítulo 5 apresentam-se as principais características dos canhões de rega com enrolador

descrevendo-se o processo do seu dimensionamento, assim como as principais regulações e critérios de funcionamento.

A metodologia de análise dos impactes das alterações climáticas e as ferramentas computacionais, desenvolvidas ao longo deste trabalho, são apresentadas no capítulo 6. Neste capítulo apresenta-se o sistema de informação IScenarios, o *software* Interpolador, o modelo de balanço hídrico do solo IrrigRotation e o programa Enrolador. Para cada uma destas ferramentas descreve-se o seu processo de desenvolvimento, as suas características e o seu modo de operação.

No capítulo 7 aborda-se a aplicação experimental da metodologia desenvolvida a dois casos de estudo na região do Alentejo, descrevendo-se os dados de entrada utilizados e a forma como se aplicou a metodologia. Realiza-se uma análise dos dados climáticos observados, dos dados produzidos pelos modelos RCM, das anomalias climáticas e das séries climáticas perturbadas, produzidas com base na perturbação dos dados das estações meteorológicas considerando as anomalias calculadas para cada cenário climático. Apresentam-se os resultados obtidos para as necessidades hídricas das culturas e para as necessidades de rega afectadas das respectivas probabilidades de não excedência. Também se apresentam os resultados obtidos para o deficit hídrico das culturas de sequeiro. Os sistemas de rega com canhão foram dimensionados com base nos caudais de ponta calculados para cada um dos cenários climáticos considerados, apresentando-se os equipamentos seleccionados. Os impactes identificados são analisados e discutidos.

Finalmente, no capítulo 8, apresentam-se as conclusões dos trabalhos desenvolvidos, identificam-se algumas medidas de adaptação e formulam-se as perspectivas de desenvolvimentos futuros.

2. Alterações climáticas

2.1. Considerações gerais

O clima é definido como a média das condições meteorológicas, ou de uma forma mais rigorosa, como a descrição estatística de variáveis relevantes (e.g. a temperatura, precipitação, humidade, vento, etc.) ao longo de um período de tempo que tipicamente corresponde a 30 anos, de acordo com o definido pela Organização Meteorológica Mundial (WMO) (IPCC, 2007a). O clima corresponde, assim, às propriedades estatísticas de um conjunto de estados da atmosfera e que incluem os valores médios, as medianas, as variâncias, as covariâncias e as probabilidades de ocorrência de valores extremos das variáveis climatológicas (Peixoto, 1987). O clima e o tempo atmosférico são duas formas complementares de descrever o mesmo sistema mas referindo-se a escalas de tempo diferente. O tempo refere-se à evolução diária do estado da atmosfera, enquanto o clima corresponde às características médias da atmosfera num dado local e numa dada estação do ano, permitindo a sua comparação com outros locais ou estações (Miranda, 2001).

O sistema climático (Fig. 2.1) é complexo, sendo constituído por cinco componentes principais que interagem entre si: a atmosfera, a hidrosfera, a criosfera, a superfície terrestre e a biosfera, sendo a componente atmosférica a que caracteriza o clima (IPCC, 2007a). Os diversos componentes estabelecem um conjunto de interações complexas, entre si, que envolvem processos físicos, químicos e biológicos, sendo o conhecimento actual relativo a estas interações ainda muito diminuto (Miranda, 2001; Mollion, 2010). O sistema climático evolui ao longo do tempo devido à sua dinâmica interna e devido a forçamentos externos tais como as erupções vulcânicas, as variações na actividade solar ou os forçamentos de origem antropogénica, dos quais se destacam a alteração da composição da atmosfera e do uso do solo (IPCC, 2007a).

O sol fornece a energia ao sistema climático na forma de radiação de curto comprimento de onda. Cerca de um terço da energia solar que atinge o topo da atmosfera é reflectido directamente para o espaço. Os restantes dois terços são absorvidos pela superfície terrestre e numa menor extensão pela atmosfera (IPCC, 2007a). O equilíbrio do clima global depende basicamente do equilíbrio radiativo do sistema terra-atmosfera-oceano. Assim, o fluxo de radiação solar, ou radiação de curto comprimento de onda, que entra no sistema climático deve ser igual ao fluxo de radiação de longo comprimento de onda, radiação infravermelha térmica, que é emitida pela superfície terrestre e atmosfera e que sai do sistema para o espaço exterior (Mollion, 2010).

Existem fundamentalmente três formas de alterar o balanço de radiação do planeta: i) alterando a radiação solar que entra no sistema climático devido a alterações na órbita da

terra ou na quantidade de radiação emitida pelo Sol; ii) alterações na fracção de radiação solar que é reflectida (albedo) devidas a alterações na cobertura de nuvens, na concentração de aerossóis na atmosfera e na vegetação e usos do solo; iii) através da alteração da quantidade de radiação de longo comprimento de onda que é emitida da Terra para o espaço causada pela alteração da concentração de gases com efeito de estufa (IPCC, 2007a).

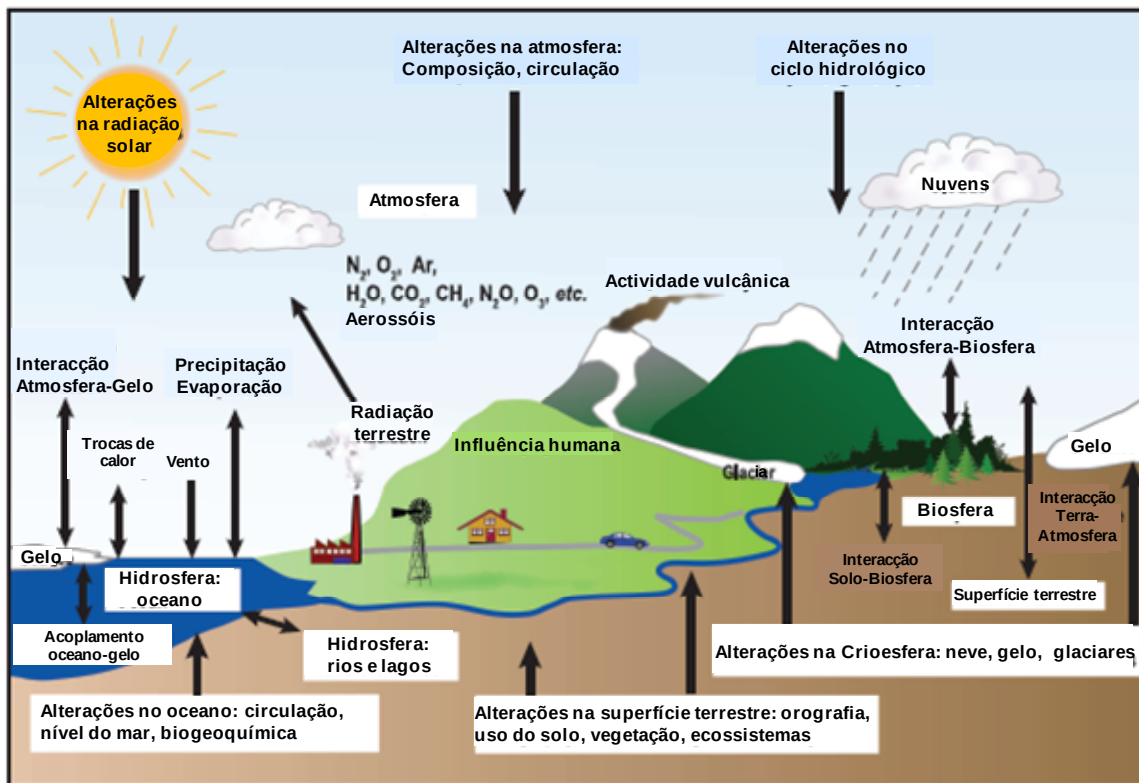


Figura 2.1 – Representação esquemática dos componentes do sistema climático, os seus processos e interações (adaptado de IPCC, 2007a).

A superfície terrestre, por ser muito mais fria do que o sol, emite radiação de longo comprimento de onda, principalmente na gama do infravermelho. Grande parte desta radiação térmica emitida pela terra e oceanos é absorvida pelos gases com efeito de estufa GEE (e.g. vapor de água, dióxido de carbono, metano e óxido nitroso) presentes na atmosfera e reemitida de volta para a superfície terrestre. A este fenómeno dá-se o nome de efeito de estufa. O efeito de estufa faz com que a atmosfera terrestre retenha uma parte apreciável da energia fornecida pelo sol, aquecendo a superfície da Terra. Sem a acção natural do efeito de estufa a temperatura média à superfície da terra rondaria os $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, em vez do seu valor médio global que é de cerca de $14\text{ }^{\circ}\text{C}$. A actividade humana, principalmente a queima de combustíveis fósseis e a desflorestação, intensificaram grandemente o efeito

de estufa natural, causando aquecimento global. (Duarte Santos, 2006; IPCC, 2007a,b; Melo-Abreu e Pereira, 2010).

Os dois gases mais abundantes na atmosfera, azoto (78%) e oxigénio (21%), não exercem quase nenhum efeito de estufa. Os gases com efeito de estufa (GEE) mais importantes são em primeiro lugar o vapor de água e em segundo o dióxido de carbono (CO_2). O metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), o ozono (O_3), os clorofluorcarbonetos (CFC), os hidroclorofluorcarbonetos (HCFC) e vários outros gases presentes na atmosfera em pequenas quantidades, contribuem igualmente para o efeito de estufa (IPCC, 2007a,b).

As emissões antropogénicas de GEE produzem um aumento da energia absorvida pela atmosfera, que aquece o clima da Terra, constituindo, assim, um forçamento radiativo positivo. (IPCC, 2007a,b). É de referir que a concentração de CO_2 na atmosfera aumentou cerca de 35% durante a era industrial, e este aumento é devido às actividades humanas, principalmente à combustão de combustíveis fósseis e à deflorestação. Deste modo, a humanidade alterou a composição química da atmosfera global com implicações substanciais no clima. As alterações climáticas provocadas pelo homem resultaram principalmente de alterações nas concentrações dos GEE na atmosfera, mas também das alterações na quantidade de aerossóis na atmosfera, e das mudanças no uso do solo (IPCC, 2007a,b). Os aerossóis atmosféricos consistem em partículas sólidas ou líquidas, de diferentes tamanhos e composições, suspensas na atmosfera, que podem ser de origem natural ou antropogénica (Miranda, 2001; Solomon et al., 2007).

As alterações climáticas são definidas pelo IPCC (2007c) como as alterações no estado do clima que podem ser identificadas por variações na média e/ou na variabilidade das suas propriedades, e que persistem por um longo período de tempo, tipicamente décadas ou períodos mais longos. As alterações climáticas podem ser consequência de processos naturais internos ou de forçamentos externos, ou devidas a mudanças antropogénicas persistentes na composição da atmosfera e no uso do solo. A *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) define as alterações climáticas apenas como a alteração no clima que é atribuída directa ou indirectamente à actividade humana, que altera a composição da atmosfera global e que se adiciona à variabilidade climática natural (UNFCCC, 1992). A UNFCCC distingue assim as alterações climáticas que resultam da alteração da composição da atmosfera devida à actividade humana, da variabilidade climática atribuída a causas naturais (IPCC, 2007c).

Num estudo sobre a problemática das alterações climáticas são ainda importantes os conceitos de normal climatológica e de anomalia climática. A descrição quantitativa do clima é feita através de um conjunto de valores de grandezas meteorológicas observadas, tais

como a temperatura, a humidade, a precipitação, a nebulosidade, a radiação solar, etc. A normal climatológica consiste nas médias mensais de vários elementos meteorológicos, calculados para um período de 30 anos (e.g. 1961-90), sendo estes valores utilizados para definir o clima de um dado local ou região (IM, 2012a,b, Miranda, 2001). A designação de normais climatológicas deve-se ao facto de se considerar que, com um valor mínimo de 30 anos, as variáveis meteorológicas seguem aproximadamente a distribuição normal ou gaussiana (IM, 2012b). A Organização Meteorológica Mundial (WMO) determina que as normais climatológicas começam no primeiro ano de cada década (sendo, as normais de 1931-1960 e 1961-1990 consideradas as normais de referência) (IM, 2012a). Na utilização de um período de 30 anos para realizar a caracterização do clima de um dado local deve-se ter em conta que esse período não é, em muitos casos, suficiente para eliminar as flutuações interanuais do clima. Assim, para diferentes períodos de 30 anos, algumas variáveis meteorológicas poderão apresentar diferenças estatisticamente significativas (Miranda, 2001). O conceito de anomalia climática corresponde à diferença entre o clima médio de um longo período de tempo, como por exemplo a normal climatológica, e o clima de um dado período em análise (IM, 2012b).

2.2. Variabilidade climática

Para a correcta compreensão dos impactes das alterações climáticas é necessário ter em conta a variabilidade climática natural, mesmo na ausência de alterações climáticas. Segundo o IPCC (2007a) a variabilidade climática refere-se a variações do estado médio e de outras estatísticas do clima (tais como o desvio padrão ou a ocorrência de extremos, etc.) em todas as escalas espaciais e temporais que vão para além dos acontecimentos climáticos individuais.

A variabilidade climática pode resultar de processos naturais internos ao sistema climático (variabilidade de origem interna), ou de variações no forçamento externo, naturais ou antropogénicas, (variabilidade de origem externa) (Miranda, 2001; IPCC, 2007b; Mollion, 2010). Assim, o sistema climático é considerado como um sistema forçado e a variabilidade resulta directamente das alterações do nível de forçamento (Miranda, 2001). O forçamento radiativo é uma medida da influência de um dado factor na alteração do balanço de energia que entre e sai do sistema climático, sendo que os forçamentos positivos tendem a aumentar a temperatura da superfície terrestre enquanto forçamentos negativos tendem a causar arrefecimento (IPCC, 2007b).

Os factores de variabilidade de origem externa explicam as oscilações observadas como resultado de alterações nas condições exteriores ao sistema climático, em particular as

alterações periódicas ou esporádicas do *input* solar, ou as alterações da composição atmosférica devidas a factores “externos” (vulcões, impactos cósmicos, etc.). Assim, os factores de variabilidade externa, ou forçamentos externos, são (Miranda, 2001): ciclos de Milankovitch; impactos cósmicos; actividade solar; vulcões; tectónica global e deriva dos continentes.

Em paralelo com os mecanismos de forçamento externo, a interacção não linear entre os diferentes componentes do sistema climático dá origem a variabilidade interna (Miranda, 2001). Os forçamentos internos são os processos inerentes ao sistema terra-atmosfera-oceano e que estão submetidos a mecanismos de compensação ou realimentação do sistema (*feedbacks*). Os mecanismos de *feedback* podem ser negativos quando se opõem a uma dada perturbação climática e tendem a restabelecer o estado de equilíbrio original. São positivos quando amplificam a perturbação climática levando o clima a um novo estado de equilíbrio diferente do inicial. Os principais forçamentos internos são (Mollion, 2010): efeito de estufa, albedo planetário, cobertura das nuvens, circulação geral da atmosfera e circulações oceânicas. A importância das oscilações internas, nas variações a longo prazo do clima é bastante especulativa dada a incerteza dos modelos climáticos (Miranda, 2001).

2.3. Identificação das alterações climáticas

2.3.1. Observações de alterações no clima

O IPCC (2007c) afirma que o aquecimento do sistema climático é inequívoco, sendo evidente, a partir dos dados observados, um aumento global das temperaturas médias do ar e dos oceanos, a fusão generalizada da neve e gelo e a subida global do nível médio do mar (fig.2.2).

Desde que existem registos instrumentais da temperatura verifica-se que onze dos doze anos entre 1995 e 2006 estão entre os 12 anos mais quentes de que há registo. A tendência global de aumento da temperatura do ar ao longo de 100 anos, entre 1906-2005, foi de 0.74 °C (Fig. 2.2). Este aumento é generalizado em todo o globo sendo mais acentuado nas latitudes mais elevadas a Norte. Os continentes apresentam um aquecimento mais rápido do que os oceanos (IPCC, 2007b,c).

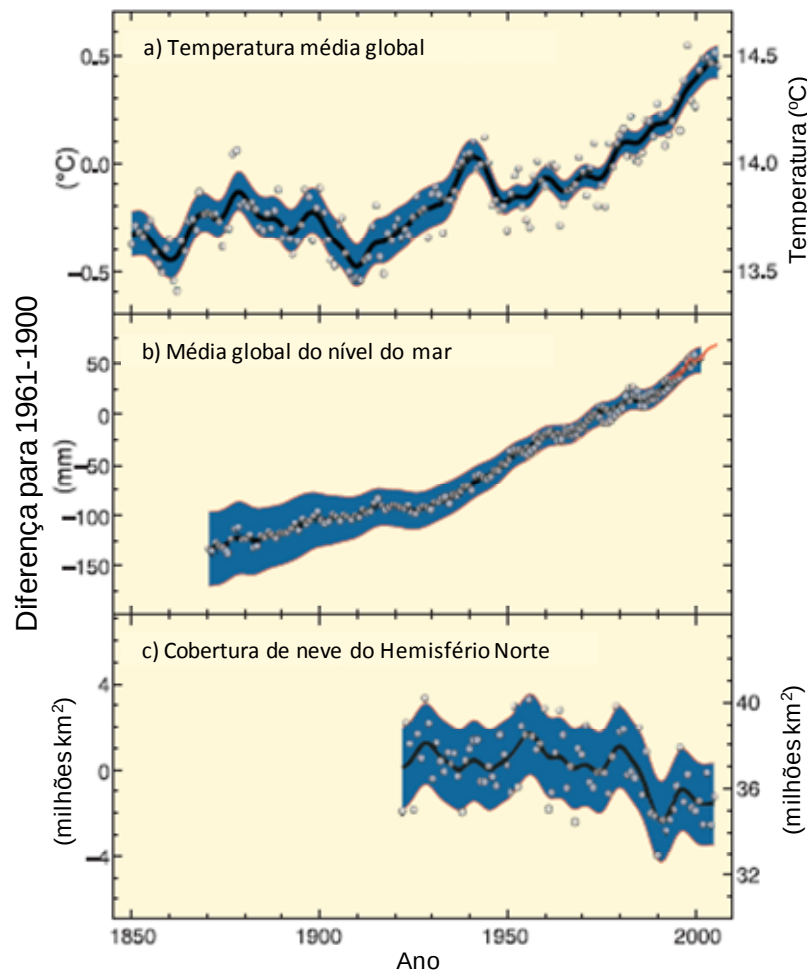


Figura 2.2 – Evolução dos desvios relativamente ao período de 1961-1990 da: temperatura média global; da média global do nível do mar; e da cobertura de neve do hemisfério Norte (adaptado de IPCC, 2007c).

A subida do nível do mar é consistente com o aquecimento global. A taxa média global de subida do nível do mar, desde de 1993 é de 3.1 mm/ano, com as contribuições da expansão térmica e da fusão dos glaciares, das calotas de gelo e dos mantos de gelo polares (fig.2.2). Têm sido igualmente observadas globalmente diminuições nas extensões da superfície terrestre cobertas por neve e gelo (fig.2.2), (IPCC, 2007b,c).

A precipitação global anual parece não ter variado, mas o padrão da sua distribuição alterou-se tornando-se mais intensa nas zonas com os valores mais elevados de precipitação e mais escassa nas regiões que apresentam os valores mais baixos. As chuvadas tendem a tornar-se menos frequentes mas de maior intensidade, verificando-se um aumento das cheias e inundações. (IPCC, 2007c; Melo-Abreu e Pereira, 2010). Entre 1900 e 2005 a precipitação aumentou em regiões do Leste da América do Norte e do Sul, na Europa do Norte e na Ásia central e do Norte, mas diminuiu no Sahel, no Mediterrâneo, no Sul de África e em regiões do Sul da Ásia. A precipitação é muito variável espacial e

temporalmente, sendo os dados em muitas regiões limitados. Secas mais intensas e prolongadas têm sido observados sobre muitas regiões desde os anos 1970s, particularmente nos trópicos e regiões subtropicais. Em certas regiões um aumento da temperatura global em paralelo com uma diminuição da precipitação tem contribuído para agravar a frequência e a intensidade das secas. (IPCC, 2007a,b).

Nos últimos 50 anos, os dados observados mostram que à medida que o clima muda a probabilidade de ocorrência dos eventos climáticos é afectada. A frequência e intensidade de eventos extremos, tais como as vagas de frio e as geadas, têm diminuído, enquanto que as ondas de calor, as secas, e os episódios de precipitações fortes e cheias têm aumentado em muitas partes do mundo. O aumento da frequência de precipitações fortes é consistente com o aquecimento global, uma vez que este conduz aos aumentos observados no vapor de água atmosférico (IPCC, 2007b).

Tem sido observado que muitos sistemas naturais estão a ser afectados pelas alterações climáticas sentidas ao nível regional (IPCC, 2007c). Em algumas regiões os sistemas hidrológicos têm sido afectados através de um aumento do escoamento e da antecipação do caudal de ponta na primavera, em muitos rios alimentados pelo degelo dos glaciares e da neve acumulada nas montanhas. Nos ecossistemas terrestres tem-se observado uma antecipação dos eventos fenológicos da primavera, e a uma deslocação da distribuição espacial das espécies, vegetais e animais, em direcção aos pólos. Outros efeitos das alterações climáticas incluem os efeitos regionais do aumento da temperatura e da redução da precipitação na agricultura e florestas, com uma antecipação das culturas de primavera no hemisfério Norte. No Sul da Europa verifica-se uma redução das produções das culturas devido ao stress hídrico ou térmico, assistindo-se também a um aumento da erosão do solo e dos fogos florestais (IPCC, 2007c).

2.3.2. Causas das alterações climáticas

Segundo o IPCC (2007c) a maior parte do aumento da temperatura média global, verificado desde meados do século XX, é muito provavelmente devido aos aumentos observados na concentração dos GEE de origem antropogénica. O IPCC (2007b) refere ainda que os padrões de aquecimento global apenas são simulados pelos modelos climáticos que incluam forçamentos antropogénicos. No entanto, subsistem dificuldades em simular as alterações climáticas a escalas mais pequenas do que a escala continental.

Mudanças nas concentrações dos gases com efeito de estufa (GEE) e aerossóis na atmosfera, assim como na cobertura da superfície terrestre e na radiação solar recebida alteram o balanço de energia do sistema climático. As concentrações atmosféricas globais

de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) aumentaram marcadamente desde o período pré-industrial (1750) como resultado das actividades humanas, excedendo largamente os valores pré-industriais (fig.2.3). Estas alterações nas concentrações dos GEE na atmosfera provocam forçamentos radiativos, que têm levado ao aquecimento global (IPCC, 2007b,c).

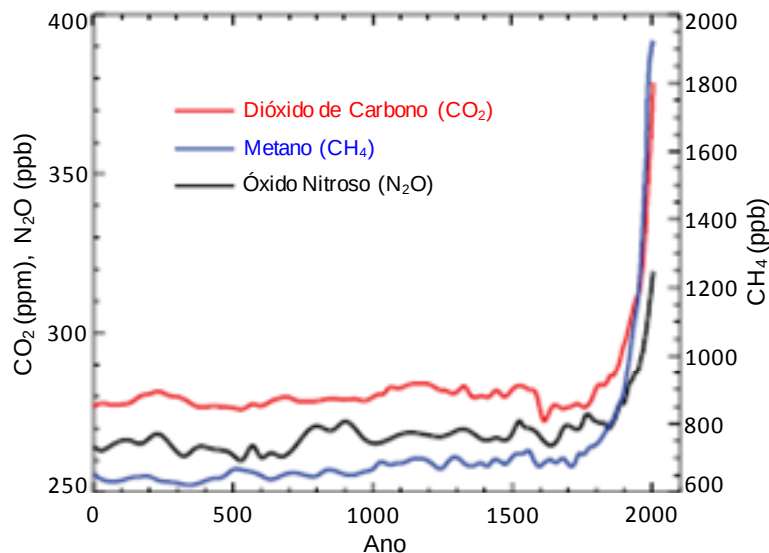


Figura 2.3 – Concentrações atmosféricas dos gases com efeito de estufa mais importantes ao longo dos últimos 2000 anos (adaptado de IPCC, 2007a).

O dióxido de carbono (CO_2) é o GEE antropogénico mais importante. As suas emissões anuais cresceram cerca de 80% entre 1970 e 2004. A concentração global atmosférica de CO_2 aumentou de um valor pré-industrial de 280 ppm para 379 ppm em 2005. A concentração atmosférica de CO_2 em 2005 excedeu de longe a variação natural ao longo dos últimos 650.000 anos (180 ppm a 300 ppm) de acordo com o valor determinado através dos cilindros de gelo. O aumento global nas concentrações de CO_2 na atmosfera é devido principalmente à utilização de combustíveis fósseis, com as alterações do uso do solo a fornecerem também uma contribuição importante, apesar de mais reduzida (IPCC, 2007b).

A concentração atmosférica global de metano (CH_4) tem aumentado de um valor pré-industrial de cerca de 715 ppb para 1774 ppb em 2005. O valor da concentração atmosférica em 2005 excede a variação natural nos últimos 650.000 anos (320 ppb a 790 ppb) tal como determinado pelos cilindros de gelo. Os aumentos observados nas concentrações de CH_4 são devidos principalmente às actividades antropogénicas, predominantemente à agricultura e à utilização dos combustíveis fósseis (IPCC, 2007b).

A concentração atmosférica de óxido nitroso (N_2O) aumentou de um valor pré-industrial de cerca de 270 ppb para 319 ppb em 2005. Mais de um terço de todas as emissões deste gás são antropogénicas, principalmente devidas à agricultura (IPCC, 2007b).

As contribuições antropogénicas para o forçamento radiativo provêm de várias outras fontes. O aumento da concentração de aerossóis na atmosfera tende a produzir um efeito de arrefecimento produzindo um forçamento negativo, embora haja um elevado nível de incerteza relativamente ao forçamento produzido. As alterações na concentração do ozono troposférico e de halocarbonetos produzem um forçamento radiativo positivo. Alterações no albedo da superfície terrestre, devido a mudanças na cobertura do solo, tendem a produzir um pequeno forçamento negativo (IPCC, 2007b).

2.3.3. Projecções de futuras alterações no clima

2.3.3.1. Cenários de emissões

O relatório SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*) do IPCC (Nakicenovic et al., 2001) define um conjunto de cenários de emissões de GEE, que são utilizados pelos modelos de clima para produzir projecções para o clima futuro. Neste relatório os cenários são padronizados de modo a garantir uma maior consistência na comparação entre resultados de diferentes modelos climáticos e cenários. O conjunto de cenários SRES contém 40 cenários de emissões tendo por base perfis plausíveis de emissões de GEE resultantes de pressupostos contrastantes de desenvolvimento económico e crescimento populacional durante o período 2000-2100 (Nakicenovic et al., 2001; Solomon, et al., 2007; Turrall e Faurés, 2011).

As emissões futuras de GEE são o produto de sistemas muito complexos e dinâmicos, sendo determinadas por vários factores, em que se destacam o desenvolvimento demográfico, o desenvolvimento sócio-económico, e a mudança tecnológica, cuja evolução futura é muito incerta. Os cenários são imagens alternativas da forma como o futuro poderá evoluir. Eles são uma ferramenta com a qual se pode analisar o modo como os vários factores poderão influenciar as emissões futuras e também as incertezas associadas (Nakicenovic et al., 2001).

Os cenários SRES (Nakicenovic et al., 2001) foram desenvolvidos para representar a ampla gama dos principais factores e emissões descritas na literatura e de modo a reflectirem o conhecimento corrente acerca das incertezas subjacentes. Assim, foram criadas quatro linhas de evolução (*storylines*), representando diferentes padrões de evolução a nível demográfico, social, económico, tecnológico e ambiental.

Cada cenário representa uma interpretação quantitativa específica de cada uma das quatro linhas de evolução, sendo que todos os cenários baseados na mesma linha de evolução constituem uma família de cenários. No relatório SRES não é atribuída qualquer preferência por qualquer dos cenários, não lhes sendo atribuída nenhuma probabilidade de ocorrência (Nakicenovec et al., 2001).

As quatro famílias de cenários SRES correspondentes às quatro linhas de evolução das emissões de GEE são (Nakicenovec et al., 2001; 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*. A família de cenários A1 é dividida em três grupos que descrevem direcções alternativas de mudança tecnológica dos sistemas de energia. Estes três grupos distinguem-se pelo seu ênfase tecnológico: uso intenso de combustíveis fósseis (A1F1), uso mínimo de combustíveis fósseis (A1T) ou equilíbrio entre todas as fontes de energia (A1B), entendendo-se por equilíbrio “não depender demasiado de uma fonte de energia em particular”.

A2 – A família de cenários A2 descreve um mundo muito heterogéneo. O tema subjacente é a auto-suficiência 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 linhas de evolução (*storylines*).

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 como uma mudança rápida nas estruturas económicas em direcção 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 linha de evolução B1 e A1. Este cenário também é orientado para a protecção 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 2.4. Estes dois eixos permitem, assim, definir as quatro famílias de cenários A1, A2, B1 e B2.

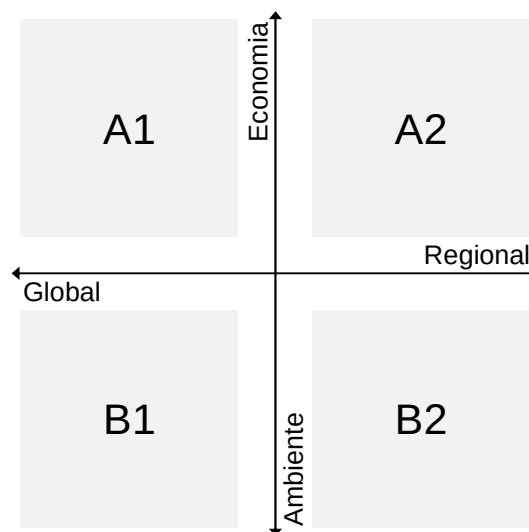


Figura 2.4 – Cenários SRES dominados pelo tipo de governação (eixo horizontal) e valores predominantes (eixo vertical) (fonte: Aguiar, 2006).

2.3.3.2. Projeções climáticas futuras

O *Special Report on Emissions Scenarios*, SRES, (Nakicenovic et al., 2001) do IPCC projecta um aumento das taxas de emissões dos GEE entre 25% a 90% entre 2000 e 2030 (Fig. 2.5), com os combustíveis fósseis a continuarem a ser a principal fonte de emissões. A emissão contínua de GEE, às taxas actuais ou superiores, causará mais aquecimento e induzirá alterações no sistema climático durante o século XXI, maiores do que as observadas durante o século XX (Fig. 2.5). As simulações com modelos climáticos mostram que, mesmo que todos os agentes de forçamento radiativo se mantivessem constantes a níveis do ano 2000, ocorreria mais aquecimento nas próximas duas décadas a uma taxa de cerca de 0.1°C por década, devido principalmente à lenta resposta dos oceanos. Se as emissões futuras de GEE estiverem dentro da gama de valores dos cenários SRES, o aumento projectado será o dobro, 0.2°C por década. As emissões antropogénicas de CO₂,

passadas e futuras, continuarão a contribuir para o aquecimento global e subida do nível do mar durante séculos, devido às escalas temporais associadas aos processos climáticos e *feedbacks*, necessários para remover estes gases da atmosfera (IPCC, 2007b,c).

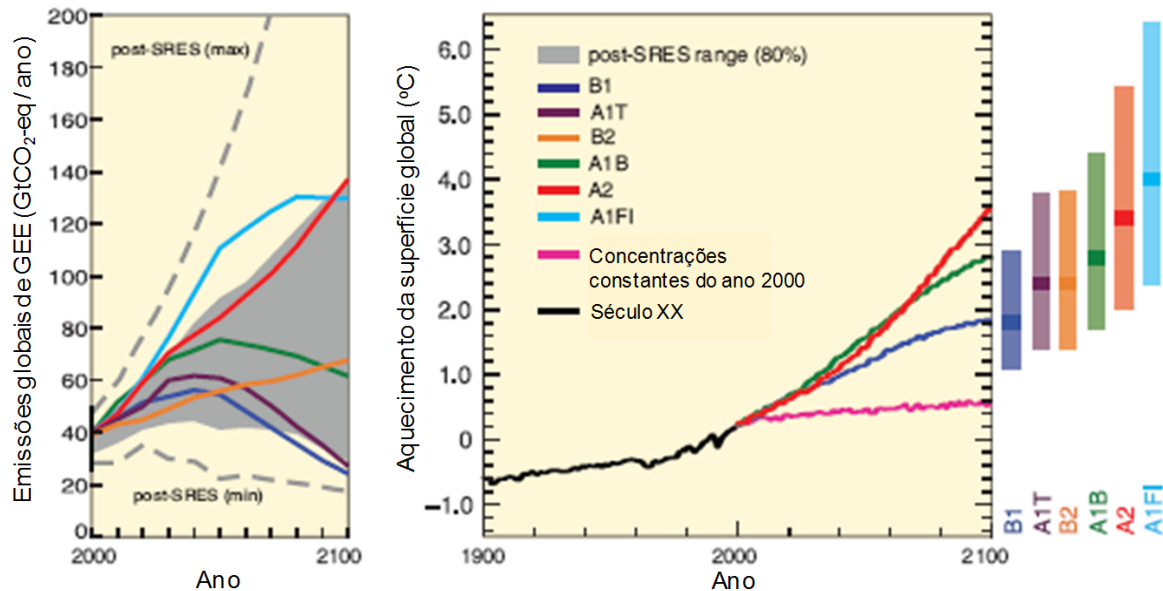


Figura 2.5 – Cenários de emissões de GEE desde 2000 até 2100, à esquerda, e projecções futuras do aquecimento global em função dos cenários de emissões, à direita (adaptado: IPCC, 2007b).

No quarto relatório de avaliação do IPCC (*Fourth Assessment Report - FAR*) foram realizados avanços na modelação das alterações climáticas, que permitiram melhorar a estimativa para o aquecimento projectado para os diferentes cenários de emissão, e melhorar a avaliação da gama de variação da incerteza (IPCC, 2007b). As projecções para o clima futuro apresentadas no FAR dependem de um número maior de modelos climáticos, de complexidade e realismo crescentes, e consideram diferentes cenários de emissões SRES de modo a se obterem melhores estimativas e uma avaliação da sua probabilidade (IPCC, 2007a,b).

Da observação da Figura 2.5 verifica-se que os cenários de emissões de GEE apresentam uma ampla gama de variações. Esta variação nos cenários SRES propaga-se às projecções da temperatura ao longo do século XXI, que apresentam resultados que variam entre um ligeiro (+1°C) até um considerável (+6°C) aumento da temperatura, consoante o cenário de emissões considerado. Verifica-se ainda uma considerável variação dentro de cada cenário SRES, como resultado da utilização de diferentes modelos climáticos. Apesar desta variação nas projecções do clima futuro, todos os modelos são consistentes com um aumento de temperatura. No caso da precipitação as projecções são muito menos

consistentes, com alguns modelos a preverem um aumento da precipitação enquanto outros predizem reduções, para um mesmo cenário (IPCC, 2007b,c; Turrall e Faurés, 2011).

No Quadro 2.1 apresentam-se as melhores estimativas e a gama de variações prováveis para o aquecimento médio global para seis cenários de emissões (IPCC, 2007c). A estimativa para o cenário de menores emissões, B1, é de +1.8 °C (com uma variação entre +1.1 °C e +2.9 °C). A melhor estimativa para o cenário que apresenta o valor mais elevado de aquecimento (A1F1) é de +4.0 °C (com uma variação de +2.4 °C a +6.4 °C). É esperado que o aquecimento seja maior sobre os continentes e nas latitudes mais a Norte, e menor sobre os oceanos do hemisfério Sul (IPCC, 2007b,c).

Quadro 2.1 – Aquecimento médio global da superfície terrestre projectado para o final do século XXI (fonte: IPCC, 2007b).

Cenário	Alterações na temperatura (°C em 2090-2099 relativamente a 1980-1999)	
	Melhor estimativa	Variação provável
Concentrações constantes ao nível do ano 2000	0.6	0.3-0.9
Cenário B1	1.8	1.1-2.9
Cenário A1T	2.4	1.4-3.8
Cenário B2	2.4	1.4-3.8
Cenário A1B	2.8	1.7-4.4
Cenário A2	3.4	2.0-5.4
Cenário AaF1	4.0	2.4-6.4

Da observação da Figura 2.5 e do Quadro 2.1 verifica-se que existe um elevado grau de incerteza nas projecções climáticas que se propaga à avaliação dos impactes das alterações climáticas sobre um dado ecossistema ou sector de actividade humana. Assim, **em estudos sobre os impactes das alterações climáticas é necessário considerar um conjunto de simulações produzidas por vários modelos climáticos e diferentes cenários de emissões** (Cunha et al., 2006; Mourato, 2009; Turrall e Faurés, 2011).

A variabilidade climática provavelmente tenderá a aumentar mas é difícil de prever em que extensão e ao longo de quanto tempo. O efeito combinado de uma mudança no clima “médio” associado com um aumento da variabilidade do clima resultará em impactes negativos maiores e mais frequentes do que uma mudança em apenas um deles (média ou variância), tal como se ilustra na Figura 2.6 para a temperatura. (Folland et al., 2001; Turrall e Faurés, 2011).

Segundo o IPCC (2007b) é provável que ocorram aumentos de precipitação nas altas latitudes, sendo provável que ocorram diminuições na maioria das regiões terrestres subtropicais em continuação dos padrões e tendências observados atualmente. É bastante

provável que os extremos de temperatura e eventos de precipitação forte se tornem mais frequentes. Os impactos negativos das alterações climáticas incluirão um risco aumentado de cheias, assim como de ondas de calor e um aumento da frequência de secas e fogos florestais. As áreas montanhosas sofrerão um recuo dos glaciares e uma redução na cobertura de neve e gelo (IPCC, 2007b).

Para meados do século XXI é projectado o aumento do escoamento anual dos rios e das disponibilidades hídricas para as altas latitudes, assim como para algumas regiões tropicais húmidas. Para algumas regiões nas latitudes médias e nos trópicos é projectada uma redução da precipitação. Em especial muitas das regiões semi-áridas (e.g. a bacia do Mediterrâneo, Oeste dos Estados Unidos, África do sul e Nordeste Brasileiro) sofrerão uma diminuição dos recursos hídricos disponíveis devido às alterações climáticas. Na Europa é expectável que as alterações climáticas possam ampliar as diferenças regionais. No Sul da Europa, as projecções das alterações climáticas apontam para um agravamento das condições (elevadas temperaturas e seca). No norte da Europa é projectado um aumento de precipitação, e um aumento da estação de crescimento das plantas devido ao aumento da temperatura. Alguns sistemas e sectores serão especialmente afectados pelas alterações climáticas, tendo interesse apontar a agricultura nas baixas latitudes, incluindo os ecossistemas do tipo Mediterrânico, que serão bastante afectados devido a uma acentuada redução na precipitação e a um aumento da temperatura e da evapotranspiração (IPCC, 2007b).

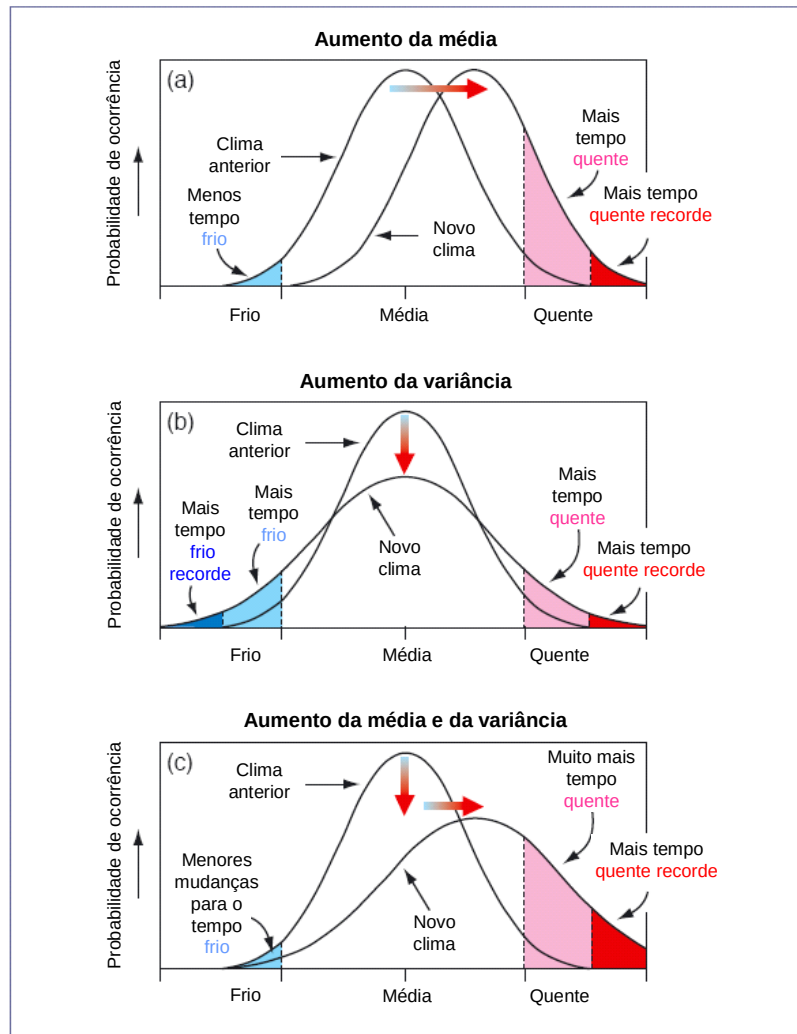


Figura 2.6 – Representação esquemática do efeito nas temperatura extremas, para uma distribuição normal da temperatura, quando: (a) a temperatura média aumenta; (b) a variância aumenta; (c) existe um efeito combinado de aumento da média e da variância (adaptado de Folland et al., 2001).

Projeções climáticas para Portugal

Quanto à observação das alterações climáticas em Portugal, destaca-se o trabalho de Miranda et al. (2006), no projecto SIAM. As séries meteorológicas observadas em Portugal relativas ao período 1931-2000 indicam que o clima apresentou, ao longo do século XX, dois períodos de aquecimento (1910-1945; 1975-2002) intercalados por um período de arrefecimento (1945-1975) (vd. Fig. 2.7). A partir de 1970, a temperatura média do ar aumentou, em todas as regiões de Portugal, a uma taxa de cerca de 0.5 °C/década, que corresponde a mais do dobro da taxa de aquecimento média mundial observada. Verificaram ainda, uma subida mais intensa das temperaturas mínimas, o que resultou numa redução da amplitude térmica diária (Fig. 2.7). A confirmarem estes resultados, o IM (2010) refere na Análise Climatológica da Década 2000-2009 que as tendências climáticas

observadas nas últimas décadas em Portugal (1931-2009) apontam para um aquecimento associado a uma redução da precipitação, de acordo com as tendências observadas a nível global. Assistiu-se a um aumento da temperatura média desde 1970, a uma taxa de $0.35^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (IM, 2010). Abreu et al. (2010) analisaram séries de 80 anos (de 1925 a 2006) de dados meteorológicos da estação meteorológica da Tapada da Ajuda. Neste estudo verificam a existência de um período de aquecimento até 1945/50 seguido de um período de arrefecimento entre 1950 até 1970, seguido de um período de aquecimento desde 1970 até 2006. Segundo estes autores os valores médios das temperaturas máximas diárias têm aumentado a uma taxa de $0.36^{\circ}\text{C}/\text{década}$ e as mínimas a uma taxa de $0.42^{\circ}\text{C}/\text{década}$.

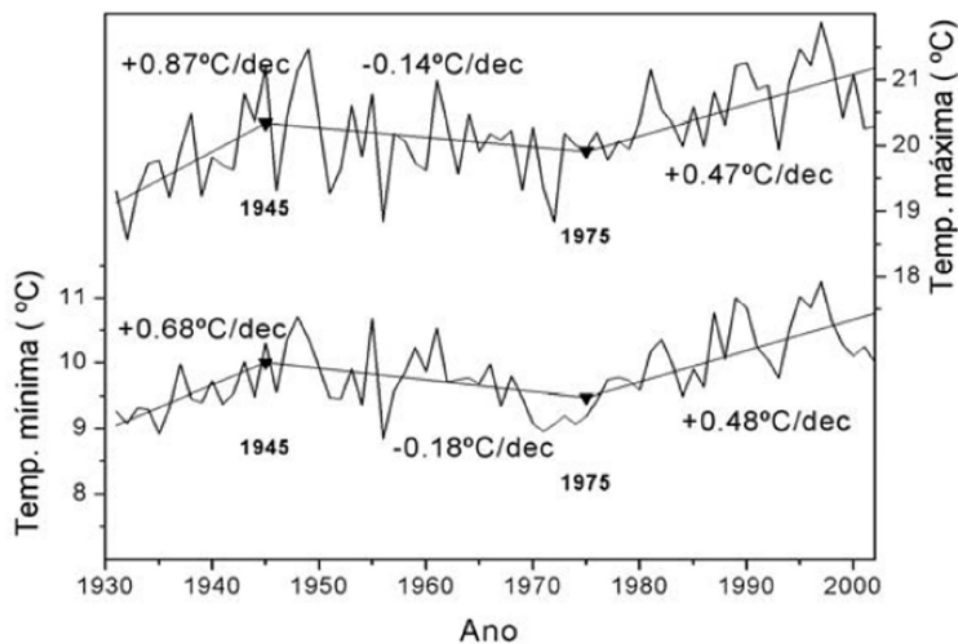


Figura 2.7 – Evolução temporal das médias das temperaturas máxima (curva de cima) e mínima (curva de baixo) em Portugal. São representados os valores das tendências ($^{\circ}\text{C}/\text{década}$) para os períodos de 1930-1945, 1946-1975 e 1976-2002 (fonte: Miranda et al., 2006).

Miranda et al. (2006) e (IM, 2010) referem que a evolução observada da precipitação apresentou uma elevada variabilidade durante o século XX não se verificando tendências significativas quanto ao seu valor médio anual (Fig. 2.8). Referem, no entanto, que observaram nas últimas três décadas do século XX, uma redução muito significativa da precipitação no fim do Inverno e início da Primavera em especial durante o mês de Março, acompanhada por aumentos muito ligeiros no Outono e Inverno (Fig. 2.9). No Inverno a variabilidade interanual da precipitação aumentou, alternando-se a ocorrência de Invernos mais secos com mais chuvosos (IM, 2010). Abreu et al. (2010) observaram igualmente uma diminuição sistemática da precipitação, registada na estação da Tapada da Ajuda, a partir de 1965, sendo a redução particularmente expressiva durante o mês de Março.

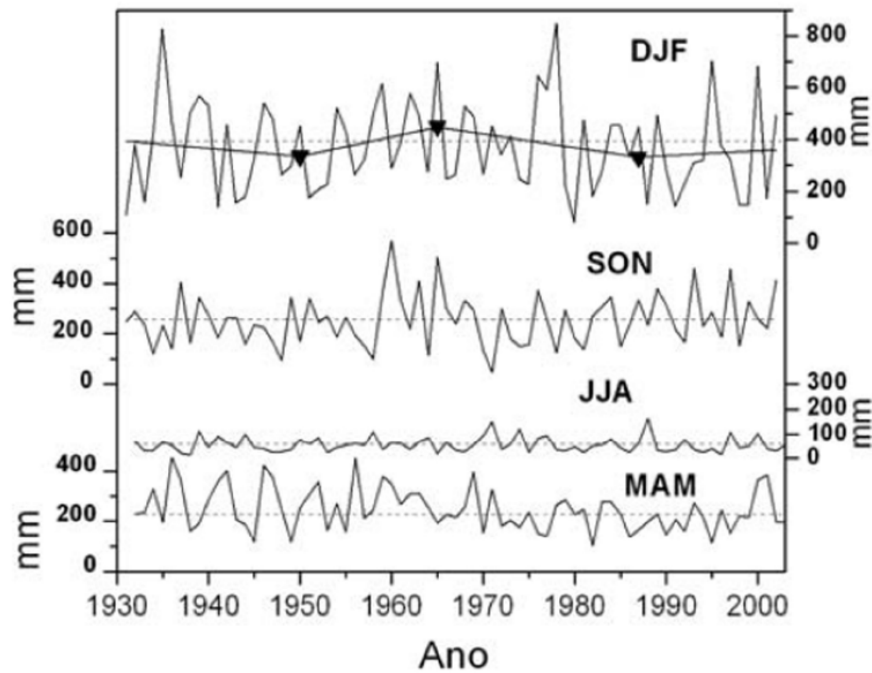


Figura 2.8 – Evolução temporal da precipitação sazonal média em Portugal. As linhas a tracejado representam a média no período 1961-1990 (fonte: Miranda et al., 2006).

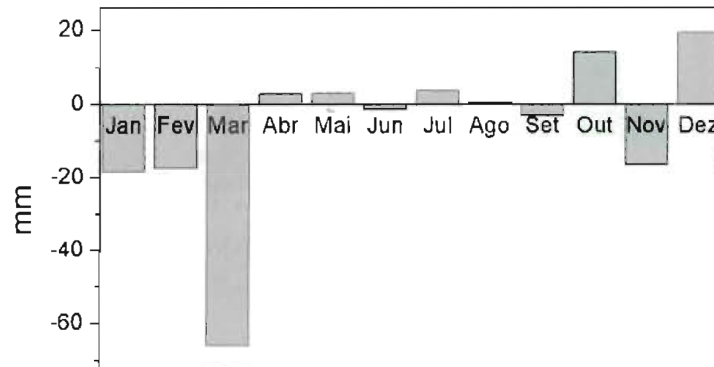


Figura 2.9 – Anomalia da precipitação média mensal em Portugal entre os períodos 1971-2000 e 1941-1970 (fonte: Miranda et al., 2006).

Relativamente aos fenómenos climáticos extremos tem-se observado, nas últimas três décadas, uma intensificação da frequência e intensidade das situações de seca em Portugal Continental. Foi também observado uma tendência significativa de aumento no número anual de noites tropicais (temperatura mínima do ar $> 20^{\circ}\text{C}$), assim como do aumento de número anual de dias de Verão (temperatura máxima $> 25^{\circ}\text{C}$). Verifica-se também uma tendência de aumento do índice de duração das ondas de calor, principalmente no interior do país (Miranda et al., 2006; IM, 2010). No entanto, existem outros índices climáticos que apresentam tendências significativas de diminuição e de que são exemplos o índice anual

de dias e noites frias, o índice anual de temperaturas mínimas inferiores a 0 °C (*frost days*) e no índice de duração anual das ondas de frio (IM, 2010).

Abreu et al. (2010) referem ainda que a evapotranspiração de referência, ET_0 , tem vindo a aumentar no Inverno, Primavera e Verão, apresentando uma ligeira tendência de redução durante o Outono.

Quanto às projecções do clima futuro para Portugal durante o século XXI, Miranda et al. (2006) efetuaram o estudo das simulações produzidas por um conjunto de modelos climáticos (GCM e RCM) relativas a diferentes cenários de emissões. As diferenças entre os diferentes resultados dos diversos cenários e modelos considerados permitem avaliar a incerteza associada às projecções climáticas analisadas. Para todos os modelos e cenários, os resultados apontam para um aumento significativo da temperatura média durante o século XXI em todas as regiões de Portugal. Nas projecções relativas aos cenários SRES (Nakicenovic et al., 2001) é previsto um aumento da temperatura na Península Ibérica até 2100 entre 2 °C e 8.6 °C, em relação ao período de controlo (1961-90). Recentemente o Instituto de Meteorologia (IM, 2012) desenvolveu projecções de cenários climáticos para Portugal continental, para o século XXI. Foram utilizados dois cenários económicos contrastantes, um menos gravoso em que se controla o aumento das emissões de GEE e outro, mais gravoso, em que as emissões crescem continuamente. Os resultados apresentados para a temperatura apontam para um aquecimento médio, que no final de século XXI, atingirá os valores de 2.5 °C e 4 °C, consoante os cenários. Os resultados mostram também um claro contraste entre o litoral e o interior, com o interior a apresentar os valores mais elevados de aquecimento.

A incerteza relativa à futura evolução da precipitação é substancialmente maior do que para a temperatura. No entanto, quase todos os modelos projectam uma diminuição da precipitação média anual ao longo do século XXI, em todo o território, sendo de prever que as reduções variem entre 20% a 40% com as maiores perdas a verificarem-se na região Sul do país. Os modelos apontam também para uma redução da precipitação durante a Primavera, Verão e Outono, não existindo um sinal claro de evolução durante o Inverno (Miranda et al. 2006). O padrão espacial da evolução da precipitação dominante é o contraste Norte-sul, com uma forte redução percentual no sul de Portugal (IM, 2012). As projecções desenvolvidas pelo IM (2012) para o Sul do país e para o período de 2071-2100 apontam para reduções da precipitação entre 15% a 30%. Convém ainda salientar que a distribuição espacial das alterações climáticas é desigual ao longo do território, com o interior a apresentar os valores mais elevados de aquecimento e o Sul as maiores reduções de precipitação, verificando-se a existência de uma orla costeira, onde as alterações serão menores (Miranda et al., 2006; IM, 2012).

No âmbito de estudos relativos à utilização de cenários climáticos em Portugal tem também interesse referir os trabalhos de Cunha et al. (2006) e de Mourato (2009). Cunha et al. (2006) utilizaram dados de vários modelos (GCM e RCM) e diferentes cenários de emissões, tendo verificado que os vários cenários estudados apontam para um aumento dos valores da temperatura em todo o país, com a temperatura no Sul de Portugal a apresentar aumentos entre 2.3 °C a 5.9 °C. As tendências de evolução da precipitação não são tão claras, com os modelos a apontarem para uma redução da precipitação nos meses de Primavera e Verão, mas existindo dúvidas relativamente ao sinal e à magnitude nas alterações da precipitação durante o Inverno. Os modelos projectam uma variação da precipitação média anual para o Sul de Portugal entre -42% e +6%.

Mourato (2009) avaliou as projecções climáticas para a região do Alentejo, para as variáveis temperatura do ar e precipitação relativas ao período entre 2071 e 2100. Considerou um conjunto de modelos RCM e o cenário de emissões A2. Os resultados apontam para que as temperaturas médias anuais aumentem entre 3.3 °C a 5.3 °C, com os valores mais elevados de aumento a registarem-se no Verão. Relativamente à precipitação média anual verificou uma redução que oscila entre os valores de -30% a -19%. No Inverno as percentagens de redução variam entre -17% e +1.5%.

2.4. Incerteza

2.4.1 Definição

A incerteza, segundo Funtowicz e Ravetz (1990), corresponde a uma situação de informação desadequada que pode ser devida à inexactidão, à falta de confiança, ou à falta de conhecimento. Walker et al. (2003) definem a incerteza como qualquer desvio do ideal inalcançável de um conhecimento completamente determinístico de um dado sistema. Segundo estes autores a incerteza nos sistemas de apoio à decisão baseados em modelos pode ser dividida em três dimensões: a **localização** da incerteza dentro do processo de modelação; o **nível** de incerteza desde um conhecimento totalmente determinístico até à ignorância total do processo ou sistema; e a **natureza** da incerteza que pode ser devida ao conhecimento incompleto ou à variabilidade inerente ao fenómeno em estudo.

A tipologia desenvolvida por Walker et al. (2003) para descrever a incerteza pode ser detalhada do seguinte modo:

- A **localização** da incerteza no processo de modelação:
 - o Incerteza na especificação das fronteiras do sistema e das suas condições iniciais;

- o Incerteza associada à estrutura do modelo, tanto ao nível da definição do modelo conceptual e algoritmo como da sua implementação computacional;
 - o Incerteza nos dados de entrada do modelo;
 - o Incerteza devido aos dados e métodos utilizados para calibrar os parâmetros dos modelos;
 - o Incerteza na variável de saída do modelo, que acumula as incertezas anteriores.
- O **nível** de incerteza:
 - o Certeza determinística, que corresponde à situação teórica inatingível em que se conhece o sistema de forma precisa e completa;
 - o Incerteza estocástica, é a incerteza que pode ser tratada adequadamente em termos estatísticos, e corresponde aquilo que vulgarmente se chama de “incerteza” nas ciências naturais;
 - o Incerteza dos cenários, é uma abordagem de análise que permite lidar com incertezas relacionadas com o ambiente externo a um sistema, geralmente relativo ao futuro, e aos seus efeitos no sistema.
 - o Reconhecimento de falta de conhecimento dos mecanismos e relações do sistema em estudo.
 - o Ignorância total, que corresponde a outra situação extrema teórica.
- A **natureza** da incerteza:
 - o Incerteza epistémica devida ao conhecimento imperfeito dos sistemas, que poderá ser reduzida através de mais investigação;
 - o Incerteza devida à variabilidade ou aleatoriedade inerente ao sistema.

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, incertezas na descrição e no conhecimento dos processos de natureza física, química e biológica, 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 fontes de incerteza em estudos do clima e dos cenários climáticos futuros são de acordo com Duarte Santos (2006): o conhecimento imperfeito do comportamento passado das variáveis que caracterizam o clima, devido principalmente ao número reduzido de estações meteorológicas e à sua distribuição desigual ao nível do globo, às mudanças na instrumentação utilizada e às modificações no ambiente circundante das estações; o insuficiente conhecimento dos fenómenos físicos, químicos, biológicos e geológicos que

ocorrem no sistema climático; a necessidade de recorrer a aproximações nos modelos climáticos para simular o comportamento e as interações das várias componentes do sistema climático, sendo de destacar as parametrizações para representar fenómenos tais como a formação das nuvens, que ocorrem numa escala espacial de dimensão mais pequena do que a grelha dos modelos climáticos. 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 projectados para o futuro (Duarte Santos, 2006).

As projecções 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) apresentados em Nakicenovic et al., (2001), que permitem avaliar o efeito sobre o sistema climático de diferentes taxas de emissões de GEE (Duarte Santos, 2006).

2.4.2. A incerteza na agricultura de regadio e recursos hídricos

A incerteza é um componente intrínseco do processo de tomada de decisão no regadio. Os sistemas agrícolas são sistemas complexos, não sendo possível ter um conhecimento perfeito de todas as variáveis e processos que neles ocorrem, estando além disso sujeitos à variabilidade dos processos meteorológicos, à incerteza dos mercados, etc. A estas incertezas junta-se a incerteza da evolução do clima em função das emissões de GEE. Assim, no processo de planeamento, projecto, gestão e exploração dos sistemas de regadio torna-se necessário a consideração da incerteza de um modo explícito. Segundo Mourato (2009) a incerteza associada às projecções futuras do clima produzidas pelos modelos climáticos pode ser avaliada através da consideração de uma gama de diferentes modelos climáticos e cenários de emissões de GEE. Quanto à evolução futura de outros factores que influenciam o projecto e a gestão dos sistemas de rega, apenas é possível estimar os seus valores. São exemplos destes factores o crescimento da procura de água para rega, o crescimento da população mundial, a evolução da procura alimentos, a competição entre os diversos sectores pela utilização do recurso água, os efeitos do aumento da temperatura do

ar e da concentração de CO₂ na atmosfera nas necessidades de rega e na produtividade das culturas, etc.

A metodologia correntemente utilizada para avaliar os efeitos das alterações climáticas na agricultura (Braga e Pinto, 2009) e sistemas de regadio consiste na utilização de modelos de simulação do crescimento das culturas (Brandão, 2006) ou do balanço hídrico do solo (Jones, 2000; Döll, 2002; Rodríguez Díaz et al., 200; Lovelli et al., 2010), na impossibilidade de se medirem diretamente os efeitos do aquecimento global sobre as culturas. Um modelo ao simular um processo introduz necessariamente incerteza. Resta referir que modelos mais complexos podem conduzir a melhores resultados para as suas condições de desenvolvimento e calibração. No entanto esta melhoria nos resultados poderá não compensar o aumento da incerteza introduzido pelo maior número de parâmetros utilizados (Mourato, 2009). Sendo a modelação imprescindível em estudos de impactes das alterações climáticas no regadio a avaliação da incerteza é muito importante para a identificação e estimativa do valor do erro associado aos resultados obtidos.

De acordo com Duarte Santos (2006) a avaliação dos impactes das alterações climáticas sobre diversos sistemas (naturais e sociais) também contém a incerteza que resulta da incapacidade em separar os efeitos que provêm de transformações sociais, económicas, tecnológicas ou ambientais dos que resultam apenas das alterações climáticas. Assim, a mudança climática constitui apenas um factor de pressão negativa adicional sobre os sistemas agrícolas de regadio, o qual deverá ser identificado de modo a se desenvolverem as respectivas medidas de adaptação.

Os trabalhos de Cunha et al. (2006) e de Mourato (2009) destacam-se como exemplos de dois estudos realizados em Portugal, no domínio dos recursos hídricos, que efectuem a avaliação de incerteza através da consideração de diferentes modelos climáticos e que propagam essa incerteza aos resultados dos modelos hidrológicos, de modo a avaliar os impactes dos cenários de alterações climáticas.

2.5. Modelos climáticos

2.5.1. Considerações gerais

Os modelos climáticos de circulação global, GCM (*General Circulation Models*), 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 14 a 40 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 energia, do momento linear, e da massa (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 actualmente 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; Solomon et al., 2007).

A confiança nos resultados dos modelos de circulação geral (GCM), tem vindo a aumentar uma vez que estes têm sido capazes de reproduzir satisfatoriamente o comportamento do clima durante os últimos 150 anos, período para o qual existem registos de medições directas de várias variáveis meteorológicas (Duarte Santos, 2006). Miranda et al. (2006) referem igualmente a capacidade dos modelos para reproduzir de forma satisfatória as principais características das tendências do clima passado, quando se tem em consideração as concentrações observadas de GEE, as emissões de aerossóis e a variabilidade solar. Apesar da confiança crescente nos cenários climáticos produzidos pelos modelos GCM, existem incertezas associadas às simulações dos modelos que provêm dos cenários de emissões de GEE e das diferenças nas formulações dos diversos modelos. Adicionalmente, alguns fenómenos tais como a formação de nuvens são extremamente difíceis de representar, sendo introduzidas incertezas através da sua parametrização. É ainda de salientar que a resolução espacial dos modelos GCM é demasiado pequena para representar com o detalhe necessário a orografia e as linhas de costa, assim como os próprios sistemas meteorológicos (Miranda et al., 2006).

Os modelos climáticos são muito exigentes do ponto de vista da capacidade de cálculo, existindo por isso um número não muito elevado de simulações do clima futuro em função dos diferentes cenários de emissões, e até há relativamente pouco tempo os modelos climáticos produziam apenas simulações de equilíbrio nas quais as concentrações de CO₂ não variam no tempo. Actualmente os modelos consideram simulações transientes, em que

a concentração de CO₂ varia ao longo do tempo, o que produz projecções futuras das alterações climáticas muito mais realistas (Cunha et al. 2006; Duarte Santos 2006).

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 espaciotemporal, em particular no caso de sectores muito sensíveis aos efeitos climáticos locais resultantes da orografia ou do contraste térmico entre as regiões litorais e do interior, 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 das alterações climáticas, a partir dos resultados dos modelos GCM, à escala necessária para realizar os estudos de impacto nos diversos sectores. Estas metodologias são designadas por técnicas de regionalização e podem genericamente ser divididas em duas classes: regionalização dinâmica e regionalização estatística (Duarte Santos, 2006; Miranda et al., 2006).

Regionalização dinâmica

A técnica da regionalização dinâmica baseia-se na utilização de modelos regionais climáticos, RCM (*Regional Climate Models*). Estes modelos 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). Para além dos modelos RCM, existem também modelos globais em que a resolução pode ser aumentada em zonas limitadas (Miranda et al., 2006).

A maior resolução espacial da grelha dos modelos RCM permite ter em consideração informação topográfica com uma maior definição, o que permite captar detalhes importantes da geomorfologia da região (e.g. linhas de costa e orografia). (Cunha et al., 2006; Miranda et al., 2006).

A utilização de modelos regionais (RCM) tem a grande vantagem de permitir obter cenários com uma maior definição espacial, mas incorpora as incertezas provenientes do modelo GCM bem como as que resultam do próprio processo de regionalização dinâmica (Duarte Santos, 2006).

Regionalização estatística

Nas metodologias de regionalização estatística identificam-se as relações existentes entre os padrões de circulação de larga escala e as variáveis climáticas observadas localmente. São utilizados modelos estatísticos que relacionam as variáveis climáticas de larga escala, os preditores, com as variáveis de nível regional ou local, os predicandos. Estas relações são posteriormente utilizadas nas saídas dos modelos GCM, relativas às alterações futuras da circulação geral, obtendo-se assim uma estimativa do clima futuro a nível regional ou local. (Duarte Santos 2006; Miranda et al., 2006).

As técnicas de regionalização estatística têm sido aplicadas de uma forma generalizada devido à sua simplicidade e baixa exigência computacional, quando comparadas com os métodos dinâmicos. (Miranda et al., 2006). O maior inconveniente da sua utilização na construção de cenários climáticos prende-se com pressuposto de que as relações estatísticas encontradas no clima actual se mantêm inalteradas no clima futuro, mesmo com forçamentos diferentes dos que ocorrem actualmente, o que pode ser fisicamente inconsistente. (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 de referir que actualmente estes modelos se estão a tornar a principal forma de realizar estudos de impacte das alterações climáticas. Apesar das vantagens na utilização de modelos RCM face ao uso de modelos GCM ou de técnicas de regionalização estatística, 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 nuvens e 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 foçadas pelos resultados dos modelos GCM. Deste modo erros sistemáticos propagam-se das maiores para as menores escalas. (Miranda et al., 2006). As vantagens e desvantagens dos dois métodos de regionalização são apresentadas de forma resumida no Quadro 2.2 (Wilby e Wigley, 1997 *cit. in* Mourato, 2009).

Quadro 2.2 – Comparação das principais vantagens e desvantagens dos métodos de regionalização estatísticos e dinâmicos (fonte: Wilby e Wigley, 1997 *cit. in* Mourato, 2009).

	Regionalização estatística	Regionalização dinâmica
Vantagens	• Menos exigente do ponto de vista computacional; • Produz séries de variáveis climáticas para um dado ponto a partir das saídas dos GCM; • Permite obter variáveis não disponíveis nos RCM; • Facilmente transferível para outras regiões; • Baseada em procedimentos estatísticos padronizados; • Capaz de incorporar directamente no método os dados observados.	• Produz resultados baseados na modelação de processos fisicamente consistentes; • Produz informação com maior resolução espacial.
Desvantagens	• Requer séries observadas muito extensas e confiáveis para a calibração; • Dependente da escolha das variáveis de previsão; • Não estacionariedade na relação entre o preditor e o predicando; • Não considera os mecanismos de <i>feedback</i> do sistema climático.	• Exigente em termos de capacidade de computação; • Número limitado de cenários disponíveis; • Muito dependente das condições de fronteira dos GCM.

2.5.2. Obtenção dos dados dos cenários de alteração climática. Projecto PRUDENCE.

Os dados dos cenários de alteração climática são disponibilizados através dos arquivos de dados do *Data Distribution Centre* do IPCC (IPCC, 2011) ou de projectos de investigação (IPCC-TGICA, 2007). Como exemplos de projectos que disponibilizam dados para a Europa podem-se referir os projectos PRUDENCE (Christensen, 2005), ENSEMBLES (Hewitt e Griggs, 2004) e mais recentemente o projecto CORDEX (Bøssing Christensen, 2012). No caso particular deste trabalho serão adoptados os dados disponibilizados pelo projecto PRUDENCE (*Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects*), uma vez que o IPCC-TGICA (2007) recomenda a sua utilização em estudos de sectoriais de avaliação dos impactes das alterações climáticas. É também de referir que Mourato (2009) utilizou dados deste projecto para região do Alentejo, o que permite ter um termo de comparação para as séries climáticas perturbadas que serão produzidas neste trabalho.

O projecto PRUDENCE é um projecto à escala Europeia, que visa disponibilizar informação detalhada do clima futuro, com resoluções espaciais e temporais adequadas para permitir uma correcta avaliação dos impactes e dos riscos das alterações climáticas. As principais limitações em estudos anteriores eram a falta de uma resolução espacial apropriada, a falta de integração dos modelos no longo prazo e a falta de comparabilidade entre os resultados de diferentes modelos. Estas questões são resolvidas neste projecto, através da utilização

de um conjunto de modelos de alta resolução (RCM) e da avaliação e tratamento da incerteza nas projecções futuras do clima. A avaliação da incerteza devida à diferente formulação dos modelos, à variabilidade climática natural e aos cenários alternativos de emissões de GEE é realizada através da consideração de um conjunto de diferentes cenários climáticos (Christensen, 2005).

O projecto PRUDENCE fornece, para a Europa, uma série de cenários de alteração climática de alta-resolução para o período de 2071-2100, assim como as respectivas 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 considerados foram os cenários SRES A2 e B2 (Nakicenovic et al., 2000). Os modelos climáticos RCM utilizados para a produção das projecções futuras de alteração climática foram: ARPEGE; CHRM; HadRM; HIRHAM; REMO; ICTP-RegCM; PROMES; CLM; RACMO; RCAO; MRI-20km-AGCM (Christensen, 2005).

2.5.3. Correção dos desvios dos modelos climáticos

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 correcção dos desvios dos modelos climáticos, em particular da variável precipitação que é de difícil modelação, tendo sido desenvolvidas diversas técnicas para correcção dos dados dos modelos climáticos (Mourato, 2009). No entanto, também existem autores que optam por não realizar a correcção dos desvios utilizando directamente os dados produzidos pelos modelos climáticos (Lovelli et al., 2010).

A correcção dos desvios dos dados relativos aos cenários de alteração climática é realizada através da utilização de coeficientes de correcção que são aplicados às series de dados produzidas pelos modelos climáticos. Os coeficientes de correcção 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 (Mourato, 2009).

Mourato (2009) descreve três métodos de correcção dos desvios: *Delta Change*; *Direct Forcing*; e o método de Lenderink. Estes três métodos de correcção dos desvios são os mais utilizados em estudos sobre os impactes das alterações climáticas sobre os recursos

hídricos. De seguida, apresentam-se as equações de correcção dos desvios, para cada um dos três métodos, de acordo com a formulação descrita em Mourato (2009).

2.5.3.1. Método *Delta Change*

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

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

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];

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

$\overline{P}_{\text{RCMcontrolo}}$ – Precipitação média mensal simulada pelo modelo RCM para o período de controlo [mm];

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

$$T_{\text{cenário}} = T_{\text{obs}} + (\overline{T}_{\text{RCMcenário}} - \overline{T}_{\text{RCMcontrolo}}) \quad (2.2)$$

onde:

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

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

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

$\overline{T}_{\text{RCMcontrolo}}$ – Temperatura média mensal simulada pelo modelo RCM para o período de controlo [°C];

2.5.3.2. Método *Direct Forcing*

Neste método a precipitação diária corrigida é obtida de acordo com a seguinte expressão:

$$P_{\text{cenário}} = P_{\text{RCMcenário}} \times \frac{\bar{P}_{\text{obs}}}{\bar{P}_{\text{RCMcontrolo}}} \quad (2.3)$$

onde:

$\bar{P}_{\text{obs}}$ – Precipitação média mensal observada relativa ao período de controlo [mm];

$P_{\text{RCMcenário}}$ – Precipitação diária simulada pelo modelo RCM relativa aos cenários de alteração climática [mm];

A correcção dos dados de temperatura realiza-se do seguinte modo:

$$T_{\text{cenário}} = T_{\text{RCMcenário}} + (\bar{T}_{\text{obs}} - \bar{T}_{\text{RCMcontrolo}}) \quad (2.4)$$

onde:

$\bar{T}_{\text{obs}}$ – Temperatura média mensal observada relativa ao período de controlo [°C];

$T_{\text{RCMcenário}}$ – Temperatura diária simulada pelo modelo RCM relativa aos cenários de alteração climática [°C];

2.5.3.3. Método de Lenderink

Neste método (Lenderink, et al., 2007) a precipitação diária é corrigida através da utilização em primeiro lugar da equação 2.5, aplicando-se ao resultado desta a equação 2.6:

$$P_{\text{controlocorr}} = P_{\text{RCMcontrolo}} \times \frac{\bar{P}_{\text{obs}}}{\bar{P}_{\text{RCMcontrolo}}} \quad (2.5)$$

$$P_{\text{cenário}} = P_{\text{controlocorr}} \times \frac{\bar{P}_{\text{RCMcenário}}}{\bar{P}_{\text{RCMcontrolo}}} \quad (2.6)$$

onde:

$P_{\text{controlocorr}}$ – Precipitação diária simulada pelo modelo RCM para o período de controlo corrigida [mm];

$P_{\text{RCMcontrolo}}$ – Precipitação diária simulada pelo modelo RCM para o período de controlo [mm];

Tal como para a precipitação a temperatura também é corrigida através da realização de dois passos, dados pelas seguintes expressões:

$$T_{\text{controlocorr}} = T_{\text{RCMcontrolo}} + (\bar{T}_{\text{obs}} - \bar{T}_{\text{RCMcontrolo}}) \quad (2.7)$$

$$T_{\text{cenário}} = T_{\text{controlocorr}} + (\bar{T}_{\text{RCMcenário}} - \bar{T}_{\text{RCMcontrolo}}) \quad (2.8)$$

onde:

$T_{\text{controlocorr}}$ – Temperatura diária simulada pelo modelo RCM para o período de controlo corrigida [°C];

$T_{\text{RCMcontrolo}}$ – Temperatura diária simulada pelo modelo RCM para o período de controlo [°C].

O método de correcção dos desvios dos modelos climáticos que tem sido mais utilizado é o *Delta Change*. Este método mantém a variância da temperatura e o coeficiente de variação da precipitação e não altera o número de dias de precipitação (Mourato, 2009). Os métodos *Delta Change* e *Direct Forcing* produzem a mesma resposta em termos de valores médios mas apresentam diferenças quanto aos valores extremos. O método *Delta Change* mantém a variabilidade observada no clima actual, enquanto que o método do *Direct Forcing* considera a variabilidade futura do clima, produzida pelos modelos climáticos (Graham et al., 2007; Lenderink et al., 2007; Mourato, 2009). O método de Lenderink et al. (2007) consiste na combinação dos métodos *Direct Forcing* e *Delta Change*. Neste método é efectuada em primeiro lugar a correcção da série de dados do modelo climático relativa ao período de controlo, tendo por base os dados observados para o mesmo período, através do método *Direct Forcing*. Em segundo lugar, à série de controlo corrigida é aplicado o método do *Delta Change* (Lenderink et al., 2007; Mourato, 2009).

Os factores mensais de correcção dos desvios, utilizados nestes três métodos assumem a forma de factores multiplicativos para a precipitação e de factores aditivos para temperatura e demais variáveis meteorológicas. No caso da precipitação os factores são multiplicativos para se manter o número de dias com chuva num dado ano. Os factores correctivos utilizados nos três métodos são geralmente mensais embora possam ser calculados para outros passos de tempo (Cunha et al., 2006; Mourato, 2009).

2.6. Impactes das alterações climáticas na agricultura de regadio

2.6.1. Introdução

A agricultura é muito dependente das condições meteorológicas, sendo um dos sectores mais expostos aos efeitos das alterações climáticas. A nível global os principais impactes esperados são o efeito do aumento das temperaturas do ar na fenologia das culturas e o efeito do aumento da concentração atmosférica de CO₂ na eficiência fotossintética das plantas (Braga e Pinto, 2009). No caso particular de Portugal para além destes dois efeitos

junta-se o efeito da redução da precipitação média anual, tendo como consequências um aumento das necessidades de rega das culturas de regadio e do deficit hídrico das culturas de sequeiro. De acordo com Melo-Abreu e Pereira (2010) os principais impactes das alterações climáticas projectados sobre a agricultura são:

- Alteração das datas de ocorrência dos eventos fenológicos;
- Modificações no crescimento e produção das culturas;
- Uso da água e necessidades hídricas das culturas;
- Necessidades de rega;
- Competição de infestantes e eficiência dos herbicidas;
- Taxa de erosão do solo
- Incidência de pragas e doenças e eficiência dos produtos fitofarmacêuticos;

Quanto aos impactes das alterações climáticas sobre o regadio e a gestão da água na agricultura na região Mediterrânica, antecipa-se que ocorra uma diminuição das disponibilidades de água (redução da precipitação, dos caudais dos cursos de água e da recarga dos aquíferos). Assim, prevê-se que a água se venha a tornar um recurso em declínio, tornando-se um factor crítico da produção agrícola. No entanto, o risco climático a longo prazo, associado à gestão da água na agricultura, está sujeito a uma elevada incerteza, uma vez que as projecções dos cenários futuros de alteração climática estão sujeitas a um elevado grau de incerteza, em especial a variável precipitação (vd. secção 2.3.3.2). A avaliação dos impactes e o desenvolvimento de medidas de adaptação no regadio engloba a consideração das tecnologias e práticas que mantenham as plantas em conforto hídrico, desde as práticas de gestão de água no solo, tais como o *mulching*, até à total satisfação das necessidades hídricas das culturas através da rega, incluindo ainda as necessidades de drenagem e a defesa contra cheias (Turrall e Faurés, 2011).

No desenvolvimento das medidas de adaptação é necessário ter em conta que os sistemas agrícolas estão sujeitos a diversas condicionantes, sendo os impactes projectados das alterações climáticas apenas uma fonte de pressão adicional. Outra condicionante muito importante é o rápido crescimento da população mundial, em que se prevê que esta ultrapasse os 9 mil milhões de pessoas em 2050 (Turrall e Faurés, 2011). Existe, assim, uma pressão no sentido do aumento da produção de alimentos de modo a satisfazer as necessidades alimentares da população mundial. No futuro, as estratégias de produção agrícola e de segurança alimentar serão mais complexas, uma vez que é necessário aumentar a produção agrícola num contexto de alterações climáticas que tenderão a reduzir a produtividade das culturas, em muitas regiões, aumentando as vulnerabilidades dos

sistemas de produção actuais. Assim, o sector agrícola tenderá, quando possível, a aumentar a sua área de produção e a intensificar a utilização dos recursos hídricos e do solo, tornando maiores os seus impactes sobre o ambiente (Turrall e Faurés, 2011).

2.6.2. Metodologias de avaliação dos impactes

2.6.2.1. Considerações gerais

Para se realizar uma adaptação planeada para as condições climáticas futuras é necessário dispor de metodologias de análise, que permitam projectar os possíveis impactes e desenvolver medidas de adaptação e mitigação. Actualmente existe um considerável número de estudos de impactes das alterações climáticas sobre a agricultura, mas o número de estudos no domínio do regadio ainda é pequeno quando comparado com o número de trabalhos relacionados com a avaliação dos impactes das alterações climáticas na produção das culturas. Os estudos existentes apresentam muitas vezes resultados contraditórios conforme as metodologias e as perspectivas utilizadas, sendo notória a necessidade de aprofundar a investigação relativa aos impactes das alterações climáticas no regadio e realizar uma sistematização das várias abordagens e metodologias utilizadas. (Fischer et al., 2007; Melo-Abreu e Pereira, 2010; Turrall e Faurés, 2011). Para realizar o estudo do impacte das alterações climáticas na agricultura têm sido desenvolvidas diversas metodologias que são enumeradas em Parry et al. (1998) e em Braga e Pinto (2009).

2.6.2.2. Modelos de simulação das culturas

Considerações gerais

Os modelos são geralmente definidos como simplificações ou abstrações de um sistema real (Steduto et al., 2006). Os modelos de simulação das culturas descrevem o funcionamento de um dado sistema em função das variações dos fluxos e dos armazenamentos de massa, energia ou de outras grandezas físicas. Estes modelos são constituídos por um conjunto de relações matemáticas que representam as interações que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera (Brandão, 2006).

Nos sistemas biológicos, como as culturas, a realidade é composta por um grande número de componentes e processos que interagem em vários níveis de organização (Steduto et al., 2006). Um modelo de cultura pode ser descrito como um método quantitativo, para prever o crescimento, desenvolvimento, e a produção de uma cultura, dado um conjunto de características da cultura e de variáveis meteorológicas relevantes (Steduto et al., 2006). As

simulações produzidas pelos modelos devem ser qualitativamente e quantitativamente idênticas às respostas observadas nos sistemas. (Melo-Abreu, 1994).

O processo de modelação consiste nas seguintes fases: i) compreensão do sistema e das suas componentes; ii) construção de um modelo que permita simular o comportamento dos sistemas; iii) validação e calibração; iv) utilização do modelo para a definição e avaliação de práticas de gestão das culturas ou da rega (Brandão, 2006).

Entre outras utilizações, os modelos podem ser utilizados como ferramentas de apoio à decisão, para a gestão e o planeamento dos sistemas agrícolas. Assim, os modelos podem ser utilizados para avaliar e definir práticas optimizadas de gestão das culturas, tais como as datas de plantação, a selecção de cultivares, a fertilização, a aplicação de pesticidas e a gestão da água, apoiando a decisão tanto em tempo real (curto prazo) como a nível de planeamento (longo prazo) (Steduto et al., 2006). Como exemplos de modelos de cultura podem-se referir os modelos CERES (Jones e Kiniry, 1986), EPIC (Williams et al., 1989), CropSyst (Stockle et al., 2003) e o sistema de apoio à decisão DSSAT (Jones et al., 2003). Na secção 3.1, apresentam-se os principais modelos utilizados na modelação da rega, incluindo modelos de simulação do balanço hídrico e de simulação dos sistemas de rega.

Dependendo do objectivo do modelo, podem-se distinguir duas abordagens na modelação das culturas: a científica e a da engenharia. A abordagem científica visa melhorar o conhecimento do comportamento das culturas e da sua resposta a mudanças ambientais. A abordagem da engenharia tem como objectivos fornecer aconselhamento aos agricultores e apoiar o processo de tomada de decisão. A modelação científica tem um maior enfoque nas teorias e leis explicativas do funcionamento do sistema, enquanto que a modelação numa óptica da engenharia tende a ser mais funcional, baseada na combinação de teorias e de relações empíricas bem estabelecidas (Steduto et al., 2006).

Utilização de modelos de simulação na avaliação dos impactes na agricultura

A avaliação dos impactes das alterações climáticas sobre a agricultura e o regadio é realizada na maioria dos estudos através da utilização de modelos de simulação em combinação com cenários climáticos futuros produzidos por modelos climáticos (GCM e RCM). Os modelos de crescimento das culturas podem ser utilizados para avaliar os efeitos nas culturas do aumento da concentração atmosférica de CO₂, do aumento da temperatura do ar e das alterações nos padrões de precipitação, de acordo com as projecções climáticas futuras. Os efeitos são avaliados através da comparação da situação de referência com os diversos cenários de alteração climática (Parry et al., 1998; Brandão, 2006; Pinto et al.,

2006; Droogers et al., 2008; Braga e Pinto, 2009; Melo-Abreu e Pereira, 2010; Turrall e Faurés, 2011).

Segundo Droogers et al. (2008), o procedimento geralmente utilizado para avaliar os impactes das alterações climáticas no ciclo hidrológico ou na produção de culturas compreende os seguintes passos: i) selecção de um modelo numérico apropriado; ii) calibração e validação do modelo para a situação actual; iii) obtenção de dados regionalizados de projecções de alterações climáticas; iv) aplicação do modelo calibrado com os dados dos cenários de alteração climática; v) avaliação dos impactes das alterações climáticas (diferença entre a situação actual e os cenários futuros). Este procedimento poderá ser seguido pela definição e avaliação de medidas de adaptação.

É de salientar que Paustian et al. (2000) referem que a utilização de modelos de culturas constitui uma importante fonte adicional de incerteza na quantificação dos impactes das alterações climáticas. Apesar dos resultados dos diferentes modelos serem, normalmente, consistentes quanto ao sinal dos impactes sobre as culturas, a gama de variação dos resultados é elevada. Droogers et al. (2008) referem igualmente a necessidade de se avaliar a incerteza introduzida pelos modelos de simulação do crescimento das culturas, em estudos de impacto das alterações climáticas. Segundo estes autores, os modelos de simulação numérica são frequentemente aplicados para avaliar os impactes das alterações climáticas na hidrologia ou na agricultura, existindo um elevado número de modelos, com diferentes formulações, que poderão dar origem a resultados bastante diversos para os mesmos cenários de alteração climática. Assim, a exactidão dos resultados dos modelos é um factor importante em estudos de avaliação dos impactes das alterações climáticas. Neste tipo de estudos, é comum assumir-se que os erros produzidos pelos modelos se reflectem de igual modo tanto na situação de referência, como no cenário de alteração climática, de modo que, quando se realiza a comparação dos resultados da referência com o cenário de mudança climática, os erros do modelo se anulam. No entanto, segundo Droogers et al. (2008), é necessário avaliar e quantificar a incerteza produzida pelos modelos de simulação das culturas ou do balanço hídrico do solo, e quais as suas implicações em estudos de avaliação dos impactes das alterações climáticas.

A maioria dos estudos na agricultura, quer sejam através da utilização de modelos de crescimento das culturas ou do balanço hídrico do solo, geralmente apenas consideram os cenários produzidos por um modelo climático, e regra geral não consideram a análise de frequência dos resultados, realizando a avaliação dos impactes apenas para um ano “médio” que é considerado representativo. Os estudos no domínio dos recursos hídricos fazem um grande enfoque no tratamento estatístico de séries temporais e na consideração da incerteza através da utilização de diversos modelos climáticos (Cunha et al, 2006;

Graham et al., 2007; Mourato, 2009). Assim, em estudos sobre as alterações climáticas no domínio da agricultura e mais especificamente do regadio, é necessário considerar um conjunto alargado de cenários climáticos, incluindo dados observados e um conjunto de diferentes modelos RCM. O trabalho de Daccache et al. (2010) constitui um exemplo de um estudo em que é considerada a análise de frequência dos caudais de ponta para realizar o dimensionamento e a gestão de redes de rega.

Turrall e Faurés (2011) sublinham a necessidade de as metodologias de avaliação dos impactes das alterações climáticas considerarem séries temporais com um passo de tempo diário, uma vez que os impactes nas culturas são mais complexos do que os relacionados apenas com as alterações na precipitação e temperatura médias, sendo necessário considerar os efeitos da sazonalidade do clima, da variabilidade climática e da frequência de ocorrência de eventos extremos. O aumento da variabilidade do clima pode ter fortes impactes na produção, principalmente devido ao aumento dos períodos de temperatura elevada e à ocorrência de períodos secos mais prolongados entre os episódios de precipitação, durante o período de desenvolvimento das culturas. Mesmo mantendo a precipitação média anual inalterada podem-se verificar reduções na produção das culturas devido à ocorrência de stress hídrico durante curtos períodos em fases críticas do desenvolvimento das culturas. Assim, as análises baseadas em médias anuais ou sazonais não capturam esta variabilidade, sendo necessário que os modelos trabalhem com uma resolução temporal diária. A baixa resolução temporal e espacial utilizada em muitos estudos podem também originar erros importantes no balanço hídrico do solo, pois podem-se estar a subestimar o escoamento superficial e a sobrestimar a infiltração (Turrall e Faurés, 2011).

Utilização de modelos de simulação na avaliação de impactes no regadio

Os estudos de avaliação dos impactes das alterações climáticas no regadio estão ainda numa fase inicial, sendo necessário melhorar e padronizar as metodologias para avaliação dos impactes. Os modelos de culturas, ou do balanço hídrico do solo, deverão realizar as simulações com base em dados regionalizados, e deverão ter em conta tanto as tendências de longo prazo, através da utilização de séries longas de dados meteorológicos (e.g. 30 anos), como os efeitos que são sentidos à escala de poucos dias, sendo necessário por isso a utilização de dados meteorológicos regionalizados com passo de tempo diário. Para além de avaliar os impactes para as condições médias também tem grande importância a consideração do aumento da frequência de ocorrência de eventos extremos, e um aumento da variabilidade climática. Os modelos de simulação também deverão tomar em

consideração em simultâneo os diversos efeitos das alterações climáticas sobre as culturas (Turral e Faurés, 2011).

A UNFCCC (2009) no seu compêndio de métodos e ferramentas para avaliação dos impactes e vulnerabilidades, e definição de medidas de adaptação às alterações climáticas, recomenda a utilização do modelo AquaCrop (Raes et al., 2009). Este é um modelo de cultura que simula a produção das culturas em função das disponibilidades hídricas. Este modelo permite simular tanto as culturas de sequeiro como as de regadio. Assim, o modelo AquaCrop é uma ferramenta computacional que permite prever a produção das culturas sob diferentes condições de gestão da água (e.g. sequeiro, rega de complemento, rega deficitária e rega plena) e avaliar diferentes estratégias de gestão, para as condições actuais e para os cenários de alteração climática. O AquaCrop é particularmente adequado para estudos das alterações climáticas, uma vez que no cálculo da produção e da evapotranspiração das culturas considera a concentração atmosférica de CO₂, e o ajustamento das fases do ciclo da cultura em função dos graus de crescimento dia (GDD – Growing Degree Days).

Outro modelo igualmente referido pela UNFCCC (2009) é o CROPWAT (Smith, 1998) que é um modelo de simulação do balanço hídrico do solo, que permite estimar as necessidades hídricas e de rega das culturas. Este modelo permite o desenvolvimento de recomendações para a melhoria das práticas de rega, a calendarização da rega sob diferentes condições de disponibilidades de água para a rega, e a avaliação da produção sob condições de sequeiro ou de rega deficitária. Permite, assim, avaliar os impactes das alterações climáticas no regadio, e avaliar o desempenho de diferentes estratégias de rega para os cenários de alteração climática. No entanto, este modelo, ao contrário do AquaCrop, não permite simular os efeitos do aumento da concentração atmosférica de CO₂ sobre o uso da água por parte das culturas. O modelo ISAREG (Teixeira e Pereira, 1992) é um modelo semelhante ao CROPWAT, podendo igualmente ser utilizado em estudos de avaliação dos impactes das alterações climáticas.

Uma alternativa apresentada neste trabalho consiste na utilização do modelo de simulação do balanço hídrico do solo IrrigRotation (Rolim e Teixeira, 2008) em estudos de avaliação dos impactes das alterações climáticas no regadio e na definição de medidas de adaptação. Este modelo foi desenvolvido com o objectivo de realizar a simulação do balanço hídrico do solo para rotações de culturas. As rotações de culturas são uma técnica central na agricultura sustentável, permitindo diminuir o risco dos sistemas de produção agrícola e apresentando vantagens na gestão da água do solo, sendo muito interessante, por isso, a sua consideração no desenvolvimento de medidas de adaptação. Na secção 6.2.3. descreve-se o modelo IrrigRotation de forma detalhada.

2.6.2.3. Outras metodologias

Ensaio em câmaras de crescimento

Os ensaios em câmaras de crescimento, incluindo estufas, avaliam os efeitos do aumento de concentração atmosférica de CO₂ e da temperatura do ar no desenvolvimento das plantas. Nestes ensaios, a temperatura do ar, a concentração de CO₂ e as disponibilidades hídricas das culturas são controladas, de modo a simularem as futuras condições climáticas que se pretendem estudar. Esta metodologia é muito exigente em tempo e recursos, não sendo exequível a sua utilização em estudos à escala nacional (Parry et al., 1998; Brandão, 2006; Braga e Pinto, 2009).

Analogias temporais e espaciais

A **analogia temporal** consiste em utilizar um período observado no passado como uma imagem representativa de um cenário futuro de alterações climáticas. Assim, pode-se avaliar o comportamento de uma cultura para um ano particularmente quente e/ou seco de modo a estimar os possíveis impactos futuros das alterações climáticas. A **analogia espacial** consiste em considerar uma região que apresente no presente um clima semelhante ao cenário futuro de alterações climáticas projectado para a região que se pretende estudar. Contudo, é necessário ter em conta que as restantes características da região poderão ser bastante diferentes das da região em estudo, nomeadamente quanto aos solos, recursos hídricos, padrões de culturas, tecnologias utilizadas, etc. Os estudos baseados em analogias têm como vantagem o facto de avaliarem as respostas das culturas, que ocorreram na realidade, em função de condições meteorológicas observadas (Parry et al., 1998; Brandão, 2006; Braga e Pinto, 2009).

Modelos estatísticos

Os modelos estatísticos estabelecem uma relação, com o recurso a técnicas estatísticas, entre um conjunto de dados observados da produção das culturas e as variáveis meteorológicas. A análise de regressão múltipla é um exemplo dos métodos estatísticos que poderão ser utilizados. Estes modelos são definidos para uma dada condição climática não sendo válidos para condições diferentes daquelas para as quais foram definidos. Outra limitação prende-se com o facto de que as relações estatísticas estabelecidas nos modelos não têm em conta o funcionamento dos processos. A vantagem dos modelos estatísticos é a sua simplicidade de aplicação e o facto de serem menos exigentes do ponto de vista dos

dados de entrada do que os modelos de culturas, que são bastante mais complexos (Parry et al., 1998; Brandão, 2006; Braga e Pinto, 2009).

2.6.3. Principais impactes das alterações climáticas no regadio

As variáveis agrometeorológicas mais importantes para o desenvolvimento das culturas e para a produção de biomassa vegetal, são segundo Abreu et al. (2010), a radiação solar, a temperatura, a precipitação e a evapotranspiração. Para Turrall e Faurés (2011) as principais mudanças no clima que terão efeitos sobre o sector agrícola são: o aumento da temperatura do ar, as alterações nos padrões de precipitação, a alteração da frequência e magnitude de eventos extremos (cheias, secas, ondas de calor, etc.), a subida do nível do mar e o aumento da concentração de CO₂.

Do ponto de vista da engenharia da rega, os principais efeitos das alterações climáticas prendem-se com os impactes na produtividade das culturas de regadio, nas necessidades hídricas das culturas, na procura de água para rega, na revisão dos parâmetros de projecto (caudal de ponta e necessidades de rega anuais) com implicações no dimensionamento dos sistemas de rega e nas práticas de gestão da água de rega. Assim, segundo Turrall e Faurés (2011) os principais impactes esperados no regadio são:

- Redução na produtividade das culturas em regiões onde os aumentos de temperatura limitem o desenvolvimento das culturas.
- Redução na disponibilidade de água em regiões afectadas pelo declínio da precipitação, de que é exemplo a região Mediterrânica.
- Aumento da variabilidade climática em regiões em que esta actualmente já é elevada, de que resultará uma maior frequência de ocorrência de eventos extremos (secas, cheias, ondas de calor, etc.);
- Aumento da evapotranspiração das culturas como resultado do aumento da temperatura.

O aumento da temperatura do ar e da concentração atmosférica de CO₂ produzem efeitos antagónicos sobre as culturas. O aumento da temperatura encurta a duração do ciclo das culturas e aumenta a taxa respiratória reduzindo a produtividade das culturas. O aumento da concentração do CO₂ provoca um aumento da taxa fotossintética o que conduz a um aumento da produtividade das culturas. A combinação destes dois factores, para um dado cenário climático futuro, poderá resultar na quebra de produtividade das culturas ou no seu aumento consoante o efeito prevalecente. O resultado final do balanço entre estes dois

factores depende igualmente de outras variáveis, em especial do conforto hídrico da cultura (Braga e Pinto, 2009). Na avaliação dos impactes futuros, também é necessário ter em conta a evolução do padrão das culturas, tanto como resposta às alterações climáticas, como a outros factores tais como a evolução dos mercados, sendo incerto o seu impacto sobre a gestão da água na agricultura.

2.6.3.1. O efeito do aumento do CO₂ na evapotranspiração cultural

O aumento de concentração atmosférica de CO₂ afecta directamente a fisiologia e consequentemente a produtividade das culturas. Os principais efeitos do aumento do CO₂ sobre as plantas são o aumento da sua taxa fotossintética, redução da fotorrespiração, redução da condutância estomática e um aumento da eficiência no uso da água (Lovelli et al., 2010).

A eficiência do uso da água (kg/m³) (WUE – Water use efficiency) é definida como a relação entre o total da biomassa vegetal produzida pela cultura (kg) e a quantidade de água evapotranspirada durante o seu ciclo de desenvolvimento (m³) (Hunsaker et al., 2000; Brandão, 2006; Castell, 2006; Pereira et al., 2006).

Concentrações mais elevadas de CO₂ na atmosfera levam a um aumento da produtividade das culturas e à redução da sua transpiração devido ao fecho parcial dos estomas. Em geral, a resposta da produtividade das plantas ao aumento do CO₂, sem se considerar as alterações climáticas, é positiva, sendo este efeito mais notório nas culturas sujeitas a stress hídrico onde um aumento do CO₂ ajuda a minimizar a quebra de produção. Contudo, as expectativas iniciais de aumento da produtividade e de redução das necessidades hídricas devido ao efeito do CO₂, observado em câmaras de crescimento, acabaram por não se verificar no terreno, uma vez que a resposta das culturas no campo foi muito mais modesta. (Hunsaker et al., 2000; Turrall e Faurés, 2011).

O fecho parcial dos estomas, devido ao aumento do CO₂, provoca uma redução da transpiração da planta. No entanto, à medida que a transpiração diminui, perde-se o seu efeito termorregulador aumentando a temperatura da folha. O factor responsável pela perda de água através da transpiração é o gradiente de pressão de vapor entre a parte interna e externa da folha. Este gradiente está directamente relacionado com a temperatura, sendo que se esta aumentar a transpiração também aumenta. Os dois efeitos actuam em sentidos opostos, podendo compensar-se o que manteria inalterada a transpiração da planta quando as concentrações de CO₂ aumentam (Lovelli et al., 2010).

O efeito fertilizante do CO₂ provoca um maior crescimento das plantas, com folhas maiores e mais numerosas, o que também pode anular o efeito da redução da condutância estomática observado em folhas individuais (Lovelli et al., 2010).

O fecho parcial dos estomas terá como efeitos um menor arrefecimento evaporativo, o que fará com que a temperatura das folhas da planta aumente, o que aumentará a taxa de fotorrespiração reduzindo a produção. Assim, grande parte do efeito fertilizante do CO₂ no aumento de produção será anulado pelo aumento da taxa de fotorrespiração provocado pelo aumento de temperatura (Turrall e Faurés, 2011).

A maioria da informação sobre o efeito da concentração de CO₂ na transpiração das culturas vem de estudos fisiológicos efectuados em ambientes controlados em câmaras de crescimento, em que os factores temperatura e humidade relativa são controlados e mantidos a níveis constantes (Lovelli et al., 2010). No entanto, ao nível das culturas instaladas no terreno o número de variáveis envolvidas aumenta, o que torna os estudos mais complexos. Assim, para avaliar o efeito do aumento do CO₂ nas culturas, em condições reais de produção, têm sido realizados estudos com o recurso ao sistema FACE (*Free Air CO₂ Enrichment*) (Hunsaker et al., 2000). Estes estudos mostram que, ao nível das culturas, a diminuição da evapotranspiração é muito menor do que seria de esperar face à redução na condutância estomática, tendo-se observado, no entanto, um aumento da eficiência do uso da água devido a uma maior produtividade das culturas (Hunsaker et al., 2000; Lovelli et al., 2010). A metodologia FACE permite investigar os efeitos do aumento da concentração de CO₂ em culturas instaladas no campo, em condições de céu aberto. O trabalho desenvolvido por Hunsaker et al. (2000) mostra o reduzido efeito do aumento de concentração de CO₂ na redução das necessidades hídricas das culturas, uma vez que o maior índice de área foliar (LAI), tende a compensar o efeito do fecho parcial dos estomas. Estes autores verificaram que existe uma tendência de aumento da produção mas apenas se se aumentarem os níveis de fertilização aplicada (Hunsaker et al., 2000). Caso se mantenham os actuais níveis de adubação, o efeito do aumento de CO₂ no aumento de produção das culturas é relativamente diminuto. É de realçar que estes autores também verificaram que um aumento de CO₂ ajuda a atenuar a quebra de produção em condições de stress hídrico. Diversos estudos FACE realizados para as culturas do arroz, trigo, milho e soja mostram menores aumentos de produção do que seria expectável a partir dos resultados obtidos nas câmaras de crescimento (Turrall e Faurés, 2011).

2.6.3.2. O efeito do aumento da temperatura nas culturas

Os efeitos do aumento de temperatura nas plantas reflectem-se em alterações na fenologia das culturas e na calendarização das actividades agrícolas. As culturas iniciam o seu ciclo de crescimento mais cedo e as durações das diferentes fases fenológicas tornam-se mais curtas (Abreu et al., 2010; Lovelli et al., 2010). Também influencia os padrões de distribuição geográfica das culturas, com uma expectável deslocação para Norte das áreas de cultivo de algumas culturas. À medida que a temperatura aumenta o início do período de crescimento é antecipado e a taxa de crescimento das culturas será maior, o que resultará numa antecipação da data de colheita (Lovelli et al., 2010).

O aumento da temperatura provoca igualmente um aumento da evapotranspiração das culturas (ET_c), o que associado à redução da precipitação projectada para Portugal faz prever um aumento das necessidades de rega das culturas (Cunha et al., 2006; Melo-Abreu e Pereira, 2010). No entanto, a relação entre o aumento da temperatura e a evolução futura das necessidades hídricas e de rega das culturas não é totalmente claro, uma vez que depende do balanço entre o efeito do aumento da concentração atmosférica de CO_2 na redução da transpiração e o efeito do aumento da temperatura na fenologia das culturas, que terão tendência em acelerar o seu ciclo, encurtando a duração das fases fenológicas, o que poderá conduzir a uma redução das necessidades de rega (Abreu et al., 2010). Foi observado que a temperatura do ar em zonas de regadio, em regiões semi-áridas, pode ser vários graus mais baixa do que o ambiente envolvente sem rega (Hatfield et al., 2008), o que tem implicações nas necessidades de rega futuras de culturas de sequeiro que passem a ser regadas. (Turrall e Faurés, 2011).

De um modo geral o efeito benéfico na fotossíntese de uma atmosfera enriquecida em CO_2 será provavelmente ultrapassado pelo aumento de temperatura e redução da precipitação. De forma resumida, nas latitudes elevadas é esperado um aumento das produções das culturas com aumentos de temperatura entre 1 a 3 °C. No entanto, acima de um aumento de 3 °C prevê-se que produtividade diminua. Nas baixas latitudes, as produções das culturas deverão diminuir mesmo com pequenos aumentos de temperatura, tais como 1 ou 2 °C. (Turrall e Faurés, 2011 Easterling et al., 2007; Melo-Abreu e Pereira, 2010).

2.6.4. Estudos de impactes na agricultura de regadio

Existe um elevado número de estudos sobre o efeito das alterações climáticas na agricultura, focando-se principalmente sobre o impacte na produtividade das culturas. Relativamente à avaliação dos impactes sobre o regadio o número de estudos reduz-se, sendo notórias as diferentes abordagens e uma falta de padronização dos métodos de

análise, que resultam em muitos casos em resultados bastante discrepantes e que tornam difícil a sua comparação, existindo a necessidade de uniformizar estas metodologias (Turrall e Faurés, 2011). A maioria dos estudos sobre o regadio analisa os impactes das alterações climáticas na produtividade das culturas e nas suas necessidades hídricas e de rega (Döll, 2002; Fischer et al., 2007; Rodriguez Díaz et al. 2007; Lovelli et al., 2010; Xiong et al., 2010; De Lorenzi et al., 2012), sendo praticamente inexistentes os estudos sobre o impacte nos sistemas de rega (Daccache et al., 2010).

Estudos de avaliação dos impactes na agricultura de regadio

Jones (2000) refere que o grau de incerteza associado à avaliação dos impactes das alterações climática nas necessidades de rega é bastante elevado e que apenas se pode projectar uma gama de variações admissíveis, com os seus valores máximos e mínimos a definir os possíveis impactes. No entanto esta abordagem pode trazer dificuldades na escolha dos valores a adoptar no planeamento de medidas de adaptação ou de mitigação. Assim, Jones (2000) desenvolveu uma metodologia de análise de risco, em que utiliza um modelo de balanço hídrico, para avaliar a probabilidade de excedência das necessidades de rega anuais relativamente a um dado limiar. Considera que os agricultores não se conseguem adaptar às novas condições climáticas quando esta probabilidade é superior a um valor crítico

A produção agrícola depende tanto das disponibilidades de água como da sua procura. Assim, Döll (2002) desenvolveu um modelo global para o cálculo das necessidades de rega com o objectivo de simular a distribuição global dos impactes das alterações climáticas na procura de água para a rega. Avaliou a forma como as necessidades de rega médias poderão evoluir em função das alterações climáticas, tendo para o efeito considerado os dados de dois modelos climáticos globais (ECHAM4 e HadCM3). Os seus resultados apontam para um aumento das necessidades de rega na maioria das regiões estudadas.

Para a região do Mediterrâneo têm sido realizados diversos estudos de avaliação dos impactes de alterações climáticas no regadio, sendo de referir o trabalho de Rodriguez Díaz et al. (2007) que desenvolveram uma metodologia para a bacia do Guadalquivir, que visa avaliar os principais impactes das alterações climáticas na procura de água para a rega e produzir os respectivos mapas de alterações nas necessidades de rega. A metodologia considerada consistiu em utilizar o modelo de simulação do balanço hídrico CROPWAT (Smith, 1998) para calcular as necessidades hídricas das culturas para os cenários climáticos A2 e B2 produzidos pelo modelo global HadCM3. As variáveis meteorológicas consideradas, com um passo de tempo mensal, foram a temperatura, a precipitação, a

radiação solar, a velocidade do vento e a humidade relativa. Os resultados obtidos apontam para um aumento das necessidades hídricas das culturas em cerca de 9%, por volta de 2050, enquanto que projectam um aumento de cerca de 16% a 20% para as necessidades de rega anuais. As necessidades de rega relativas ao período de ponta apresentam aumentos médios de 11% a 12%, o que irá trazer problemas aos sistemas de rega e redes de rega actuais, que foram dimensionados para valores de caudais de ponta mais baixos, sendo portanto necessário adoptar novas estratégias de gestão da água de rega. Estes autores referem que os aumentos das necessidades de rega coincidirão com reduções significativas das disponibilidades de água para rega, o que implicará uma redução inevitável das áreas regadas da bacia do Guadalquivir.

Outro estudo, também baseado na utilização do modelo CROPWAT para avaliar os impactes das alterações climáticas nas necessidades de rega, para o Sul de Itália, é o de Lovelli et al. (2010). Para considerar o efeito do fecho parcial dos estomas, devido ao aumento da concentração atmosférica de CO₂, na ET₀ aumentaram o valor da resistência de superfície da equação FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Utilizaram a metodologia dos graus dia para ajustar a duração das diferentes fases de desenvolvimento das culturas à temperatura dos diferentes cenários climáticos. Com base nos dados das culturas ajustados às condições climáticas foi realizada a simulação do balanço hídrico com o *software* CROPWAT. Os dados climáticos utilizados, foram os dados observados relativos aos anos de 1985 e 2006 da estação de Metaponto, no Sul de Itália, e o ano de 2071 do cenário A2 do modelo HadRM3P. As séries climáticas têm um passo de tempo diário e foram consideradas as variáveis temperatura, precipitação, velocidade do vento, radiação solar e humidade relativa. Os resultados obtidos apontam para uma redução das necessidades de rega das culturas de Outono-Inverno, tais como o trigo. Para as culturas de Primavera-Verão, de que é exemplo o tomate, é estimado um aumento das necessidades de rega em cerca de 7%.

Também para a Itália De Lorenzi et al. (2012) avaliaram os impactes das alterações climáticas sobre a cultura do tomate. A metodologia utilizada consistiu na utilização do modelo SWAP, de simulação do balanço hídrico, para avaliar as necessidades de rega e o deficit hídrico das culturas. Os dados climáticos considerados foram os dados observados para o período de referência (1961-90) e os dados do cenário de alteração climática (2021-2050) obtidos através da média de seis modelos de circulação geral (AOGCM) que foram regionalizados estatisticamente. As séries de dados diários consideradas são relativas aos dados de temperatura máxima e mínima e de precipitação. Os resultados obtidos apontam para um aumento de 11% nas necessidades de rega do tomate. Também concluíram que a

utilização de cultivares mais resistentes ao stress hídrico constitui uma medida de adaptação relevante.

Huinink e Droogers (2011) utilizaram o modelo AquaCrop para avaliar os impactes das alterações climáticas na produtividade e nas necessidades de rega das culturas para o Uzbequistão. Utilizaram quatro cenários climáticos, a referência (2000-2010) e três cenários de alteração (2010-2050): um menos gravoso, um intermédio e um mais gravoso. Os resultados mostram que apenas para o cenário climático mais desfavorável se observou um considerável aumento das necessidades de rega, tendo os cenários menos gravosos apresentado apenas pequenas alterações.

Como exemplo dos ainda escassos estudos de avaliação dos impactes das alterações climáticas sobre os equipamentos e sistemas de rega refere-se o trabalho de Daccache et al. (2010) no qual são analisados os impactes e as medidas de adaptação para redes de rega sob pressão. Estes autores avaliaram os impactes sobre uma rede existentes na região de Apulia, no sul de Itália, em função dos aumentos da procura de água para rega projectados para os cenários climáticos futuros. Os dados climáticos dizem respeito aos dados observados para o período de controlo (1970-90) e aos cenários de alteração climática para a década de 2050. O modelo climático considerado foi o modelo HadCM3, tendo sido realizada a regionalização estatística das variáveis meteorológicas, relativas aos cenários A1 e B1. Foi utilizado o modelo de simulação do balanço hídrico WaSim (Graves et al, 2002) para realizar a determinação do caudal de ponta da rede para cada um dos cenários climáticos considerados. Foi utilizado, posteriormente, um modelo estocástico, COPAM (Lamaddalena e Sagardoy, 2000), para avaliar a fiabilidade dos hidrantes para cada um dos cenários climáticos. Os resultados apontam para aumentos consideráveis nas necessidades de rega das culturas, com os anos mais secos do período de controlo (1970-90) a corresponderem aos valores médios ou mesmo aos anos húmidos da década de 2050. Estes autores estimam que para as futuras condições climáticas a rede de rega avaliada terá problemas de operação durante o período de ponta, sendo necessário implementar medidas de adaptação.

Estudos de avaliação dos impactes na agricultura realizados em Portugal

Relativamente a Portugal são ainda escassos os estudos sobre o impacto das alterações climáticas especificamente no sector do regadio (Melo-Abreu e Pereira; 2010; Pereira, 2011). No entanto, no domínio da agricultura destacam-se os trabalhos de Pinto et al. (2006) e Brandão (2006) realizados no âmbito do projecto SIAM (*Climate Change in Portugal*.

Scenarios, Impacts and Adaptation Measures) e que constituem uma referência para estudos futuros sobre o impacto das alterações climáticas sobre a agricultura em Portugal.

O estudo desenvolvido por Brandão (2006) utilizou os modelos da família CERES (Jones et al., 2003), pertencentes ao sistema de apoio à decisão DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) (Hoogenboom et al., 2004), para avaliar os impactos das alterações climáticas nas culturas do trigo e do milho em Portugal. Foram utilizados os dados climáticos do modelo HadRM3, relativos ao período de referência (1961-90) e aos cenários SRES A2 e B2 (2071-2100), com um passo de tempo diário. As variáveis meteorológicas consideradas foram a radiação solar, a temperatura máxima e mínima, e a precipitação. Os resultados apresentados mostram uma quebra na produtividade média das culturas entre -23% a -3% e um aumento das necessidades de rega do Milho para os cenários futuros de 4% a 5% na região de Santarém e de 44% a 59% em Braga. Testou a antecipação das datas de sementeira como medida de adaptação tendo os resultados das simulações mostrado uma redução das quebras de produtividade e das necessidades de rega quando comparados com os resultados sem antecipação. Pinto et al. (2006) utilizaram a mesma metodologia com os dados climáticos dos modelos HadRM2 (cenário IS92; 2080-2098) e HadRM3 (cenários A2 e B2; 2071-2100). Para além das culturas do trigo e do milho também consideraram o arroz e as pastagens e forragens. Verificaram que com excepção das pastagens e forragens todas as culturas apresentaram uma diminuição da produtividade, sendo as quebras de produção maiores no cenário A2 do que no B2 (Pinto et al., 2006).

Outro trabalho muito interessante foi desenvolvido por Abreu et al. (2010). Nele os autores analisaram séries de 80 anos de dados meteorológicos da estação da Tapada da Ajuda em Lisboa. Avaliaram as tendências das séries observadas da temperatura do ar, da precipitação (P), da evapotranspiração de referência (ET_0) e da disponibilidade hídrica climática definida como a diferença entre P e ET_0 . Os seus resultados mostram que se tem assistido a uma diminuição da disponibilidade hídrica climática nos meses de Fevereiro e Março, reduzindo a água disponível no solo para o crescimento das culturas na Primavera e Verão. No clima Mediterrânico, os períodos térmicos e hídricos de crescimento das culturas encontram-se desfasados, assistindo-se a uma redução do período hídrico de crescimento durante o período térmico de crescimento vegetativo. Verifica-se, assim, um aumento da duração da estação seca durante o ano agrícola.

A produção das culturas anuais de sequeiro depende da água armazenada no solo no fim do Inverno e no início da Primavera. Face a uma redução da precipitação em Fevereiro e Março (encurtamento do período de crescimento sem deficiência hídrica) e a um aumento da temperatura, Abreu et al. (2010) recomendam a antecipação das datas de sementeira e a

utilização de culturas ou cultivares com um ciclo mais curto de modo a permitir que as plantas disponham de água suficiente durante os períodos críticos do seu desenvolvimento. Deste modo, reduz-se o efeito do deficit hídrico na produtividade das culturas provocado pela diminuição da precipitação. A antecipação das datas de sementeira é favorecida pelo aumento da temperatura que torna os Invernos mais amenos, aumentando a duração do período térmico de crescimento vegetativo. A utilização de cultivares mais resistentes ao stress hídrico, e com um sistema radicular mais profundo também ajudará a minimizar os efeitos da redução da precipitação. Nas culturas de regadio, a antecipação das datas de sementeira e a utilização de cultivares com um ciclo mais longo permitirá reduzir o efeito negativo do aumento de temperatura na redução do ciclo de desenvolvimento da cultura (Abreu et al, 2010).

É também de referir o trabalho Melo-Abreu e Pereira (2010) em que realizaram o estudo do impacto de três cenários climáticos na evapotranspiração de referência. Um dos cenários climáticos corresponde ao clima presente, tendo sido utilizados os dados meteorológicos da estação de Évora, relativos a um período de 36 anos, com um passo de tempo diário. Para produzir os dois cenários futuros as séries da temperatura média foram aumentadas em 3 °C e em 5 °C. Os resultados obtidos projectam um aumento de pelo menos 15% nas necessidades hídricas das culturas até ao final do século.

Estudos de avaliação dos impactes nos recursos hídricos em Portugal

Conforme referido em Turrall e Faurés (2010) em estudos de avaliação dos impactes das alterações climáticas no regadio seria vantajoso considerar também os impactes nos recursos hídricos, sobretudo nas disponibilidades de água para rega e as suas implicações na produção agrícola. Nesta linha, existem em Portugal dois estudos sobre os impactes nos recursos hídricos muito relevantes, Cunha et al. (2006) para Portugal continental, e Mourato (2009) para a região do Alentejo.

Cunha et al. (2006) realizaram o estudo dos impactes das alterações climáticas nos recursos hídricos em Portugal. Foram avaliados os impactes no regime de escoamento superficial, na recarga de aquíferos e nos níveis piezométricos dos aquíferos, assim como uma avaliação do regime de ocorrência de cheias. A metodologia utilizada consistiu na utilização do modelo hidrológico Temez (Temez, 1977) que utiliza como dados de entrada as séries mensais de precipitação e de evapotranspiração de referência. Utilizaram os cenários climáticos produzidos pelo modelo climático global HadCM3 e pelo modelo climático regional HadRM2. As séries de dados futuras foram produzidas através da perturbação das séries históricas com as anomalias médias projectadas pelos modelos

climáticos para os diferentes cenários. Os resultados obtidos sugerem que não existe um sinal claro da variação do escoamento anual, apesar de se notar uma maior tendência de redução do que de aumento. A tendência de redução da disponibilidade é mais marcada nos aquíferos superficiais, em resultado da redução da recarga e do aumento da evapotranspiração. Os resultados mostram, também, uma tendência de aumento da assimetria regional da disponibilidade de água, com uma redução mais acentuada do escoamento e da recarga no Sul do país. A assimetria sazonal também deverá aumentar, com uma maior concentração da disponibilidade hídrica, escoamento e recarga, no Inverno e uma redução nas restantes estações do ano, seguindo o padrão de alteração do regime de precipitação. Existe, assim, uma elevada probabilidade de diminuição das disponibilidades hídricas, principalmente no Sul de Portugal. Referem ainda um aumento generalizado da frequência de chuvadas intensas, aumentando a frequência e a magnitude dos episódios de cheia, principalmente na região Norte.

Cunha et al. (2006) referem que na gestão dos recursos hídricos para além de avaliação dos impactes nas disponibilidades hídricas também é necessário considerar os impactes das alterações climáticas sobre a procura de água. Assim, apesar dos impactes projectados apontarem para um considerável aumento das necessidades de rega, não é fácil prever a evolução da procura da água para a rega, uma vez que esta depende da evolução das áreas regadas, do padrão de culturas adoptado e das tecnologias de rega utilizadas, cuja evolução não é de fácil previsão.

Mourato (2009) avaliou os impactes das alterações climáticas sobre os recursos hídricos nas bacias hidrográficas do Alentejo. A metodologia utilizada consistiu na aplicação do modelo hidrológico SHETRAN (Ewen et al., 2000) para avaliar os impactes combinados de diferentes cenários de alterações climáticas e de alterações no uso do solo. As séries de dados climáticos dizem respeito a séries de dados diários observados em estações meteorológicas (1961-90) e a séries de dados de cenários de alteração climática (2071-2100) relativos a diversos modelos RCM, considerando o cenário SRES A2. Foram utilizados diferentes métodos de correcção dos desvios dos modelos climáticos, para produzir as séries climáticas futuras. As variáveis meteorológicas consideradas foram a temperatura do ar e a precipitação, tendo sido utilizado o método de Blaney-Criddle (1950) para estimar a ET_0 para os cenários futuros. Os resultados obtidos apontam para a diminuição do escoamento superficial, principalmente no Outono e Primavera, e para uma diminuição dos volumes de água armazenados para os diferentes usos, incluindo a rega. Esta diminuição dos volumes de água armazenados varia bastante entre barragens, sendo projectadas reduções bastante expressivas para algumas delas. É projectado igualmente um aumento dos caudais diários máximos e do risco de cheias.

Os resultados destes estudos de avaliação dos impactes das alterações climáticas sobre os recursos hídricos projectam uma redução das disponibilidades de água para o regadio. Assim, é necessário realizar a avaliação dos impactes das alterações climáticas sobre os sistemas de regadio de forma a se identificarem as principais vulnerabilidades e a se definirem medidas de adaptação que permitam adequar as necessidade de água para rega às disponibilidades hídricas, nomeadamente através da utilização de novas culturas e/ou variedades, da antecipação das datas de sementeira, da utilização de práticas de conservação do solo e da água, do aumento da eficiência da rega, etc. (Brandão, 2006; Braga e Pinto, 2009; Melo-Abreu e Pereira, 2010).

3. Sistemas de informação e modelos de inferência espacial

3.1. Sistemas de informação e de apoio à decisão ambientais

3.1.1. Conceitos e definições

A metodologia proposta neste trabalho assenta no desenvolvimento de um conjunto de ferramentas informáticas (modelos, bases de dados e sistemas de informação geográfica) que permitam processar o grande volume de dados, incluindo dados espacialmente distribuídos, necessários ao estudo do impacto das alterações climáticas sobre as necessidades de rega das culturas e sobre os sistemas de rega.

A modelação da rega pode ser encarada numa perspectiva mais alargada da modelação ambiental, e do desenvolvimento de sistemas de informação e de apoio à decisão para o estudo de questões ambientais. Assim, os Sistemas de Informação Ambientais (SIA) e os Sistemas de Apoio à Decisão Ambientais (SADA) constituem hoje em dia um importante tema de investigação na área do ambiente (Denzer, 2005). Os Sistemas de Informação e de Apoio à Decisão Ambientais, SIADA (SIA + SADA), possuem características que os distinguem dos sistemas de informação *standard*, e das quais se podem destacar a complexidade da informação, no tempo e no espaço, e o facto de que muitas vezes os dados para análise são incompletos ou possuem uma elevada incerteza. No desenvolvimento de SIADA, podem ser adoptadas diferentes metodologias, como por exemplo: a modelação numérica, a teoria da decisão, a inteligência artificial, a análise espacial de dados geográficos, a análise estatística, etc. Em estudos ambientais é frequente terem que se integrar estas diferentes metodologias (Denzer, 2005).

As características principais que permitem caracterizar os SIADA que geralmente se encontram descritas na bibliografia são (Denzer, 2005):

- Manipulação de informação complexa, em que os dados se encontram relacionados espacial e temporalmente, e são muitas vezes incompletos, afectados por incerteza ou fornecidos numa escala desadequada;
- Algoritmos complexos que se traduzem em ferramentas informáticas complicadas as quais podem ser provenientes de qualquer domínio das tecnologias da informação (modelos de simulação, bases de dados, sistemas de informação geográfica, inteligência artificial, etc.);
- Problemas complexos de gestão dos dados devido à variedade de diferentes fontes de informação;
- A ausência para muitos domínios de normas para os dados e metadados;

- Em muitos casos, a necessidade de juntar diferentes ferramentas informáticas, com diferentes algoritmos ou estratégias de gestão dos dados, numa solução holística.

Quando em estudos ambientais não seja possível analisar o problema com uma única aplicação informática, torna-se necessário realizar a integração de várias ferramentas de *software*. A questão da gestão dos dados também tem que ser tida em conta na integração de diferentes ferramentas informáticas, uma vez que estas não podem ser separadas dos seus sistemas de gestão de dados (Denzer, 2005). De facto, Neto et al., (2005) identificam a informação como um importante factor de produção na agricultura, sendo que um dos maiores desafios que se coloca ao regadio e à gestão dos recursos hídricos na agricultura é a real capacidade de gerir a informação necessária, de modo a obter os adequados desempenhos técnicos, produtivos, económicos, ambientais, etc. Neste contexto, os SIADA desempenham um papel determinante uma vez que obrigam à modelação dos dados e a uma gestão mais eficiente da informação. Também permitem a integração tanto de modelos como de informação proveniente de várias fontes, e.g. dados de estações meteorológicas, informação cartográfica de solos, dados de detecção remota, bases de dados, etc.

3.1.2. Componentes dos sistemas de informação e de apoio à decisão ambientais

Denzer (2005) considera que existem tipicamente quatro tipos principais de ferramentas ou componentes (*building blocks*) utilizados nos Sistemas de Informação e de Apoio à Decisão Ambientais (SIADA). Esses quatro tipos de componentes são os que se apresentam na Figura 3.1 (Denzer, 2005):

- Modelos – modelos numéricos isolados (*stand-alone*);
- SIG – ferramentas informáticas correspondentes aos Sistemas de Informação Geográfica;
- SAD – Sistemas de Apoio à Decisão que correspondem a ferramentas informáticas baseadas em inteligência artificial e em técnicas de cenários;
- SGBD – Sistemas de Gestão de Bases de Dados.

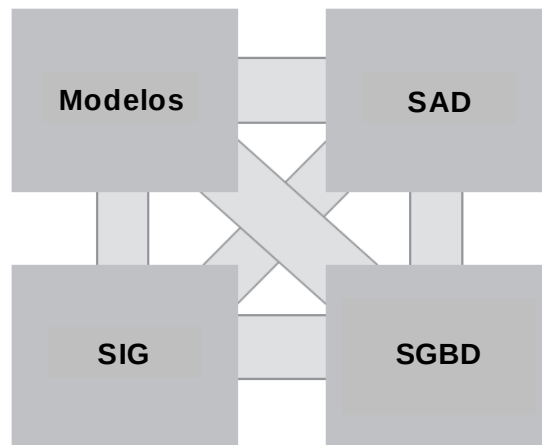


Figura 3.1 – Componentes de construção dos Sistemas de Informação e de Apoio à Decisão Ambientais (adaptado de Denzer, 2005).

Tipicamente os SIADA são constituídos por pelo menos dois destes componentes. No entanto, existem muitos SIADA que são constituídos apenas por um componente (modelos, SIG ou SAD), mas que acabam geralmente por possuir também um sistema de gestão de base de dados. Existem também SIADA que são constituídos apenas por um sistema de gestão da informação (e.g. bases de dados ambientais para inventário) (Denzer, 2005).

Os quatro componentes principais que se podem encontrar num SIADA correspondem às quatro abordagens que geralmente se podem utilizar para realizar um estudo ambiental e que são (Denzer, 2005): i) abordagem numérica (modelos); ii) abordagem baseada em informação geográfica (SIG); iii) abordagem baseada em inteligência artificial (SAD); iv) abordagem baseada na gestão dos dados (SGBD).

3.1.3. Modelação da rega

Um grande número de ferramentas informáticas tem sido desenvolvido para apoiar a rega (Santa Olalla *et al.*, 1999; Tarjuelo e Juan, 1999; Pereira, 2004; Ortega *et al.*, 2005, Bastiaanssen *et al.*, 2007; Steduto *et al.*, 2009). Estas ferramentas incluem modelos de simulação, sistemas de gestão de dados, sistemas de informação geográfica e sistemas de apoio à decisão. Um dos maiores interesses em utilizar modelos resulta da sua capacidade para simular diferentes alternativas tanto quanto à gestão da rega como quanto ao projecto dos sistemas de rega, permitindo deste modo lidar com diferentes cenários de disponibilidade *versus* necessidades de água para rega.

A maior parte do esforço que tem sido desenvolvido ao nível da modelação na área da engenharia da rega e da gestão dos recursos hídricos em agricultura tem-se focado

essencialmente ao nível da parcela, quer seja ao nível da estimação dos consumos hídricos das culturas, quer ao nível do dimensionamento e desempenho dos sistemas de rega, quer ainda ao nível dos impactes ambientais (erosão, salinização dos solos, contaminação de aquíferos, etc.). De facto, pode-se realçar o facto de que ao longo dos anos se tem vindo a acumular um vasto número de modelos e de conhecimento que permitem simular muitos dos principais processos envolvidos na agricultura de regadio (Bastiaanssen *et al.*, 2007). No entanto, a maior parte destes modelos só focam uma pequena parte dos problemas envolvidos (programação da rega, simulação dos sistemas de rega, modelos de crescimento, lixiviação de agroquímicos, hidrológicos, etc.) e são regra geral não distribuídos (aplicados ao nível de uma unidade de simulação, tipicamente a parcela) (Bastiaanssen *et al.*, 2007). Contudo, assiste-se a uma evolução no sentido da integração dos diversos modelos de simulação com SIG e com sistemas de apoio à decisão (SAD). (vd. Denzer, 2005; Musy *et al.*, 1999; Tarjuelo *et al.*, 2005).

De particular interesse na modelação da rega tem sido o desenvolvimento de diversos sistemas de apoio à decisão baseados em modelos de simulação e em metodologias de análise multicritério. Como exemplo dos SAD desenvolvidos na área da rega pode-se apontar o *software* MIRRIG (Pedras e Pereira, 2005; Pedras *et al.*, 2009) que é um SAD para a microrrega, sendo composto por modelos e por uma base de dados. Dos modelos fazem parte: o dimensionamento, que constrói as alternativas; a simulação, que calcula os critérios hidráulicos, económicos e ambientais; a análise multicritério, que compara e selecciona as alternativas; e a avaliação dos sistemas de rega. Gonçalves *et al.* (2005; 2006) desenvolveram um SAD para o projecto da rega por gravidade designado SADREG, que efectua a modelação matemática da rega em sulcos, canteiros e faixas, e o dimensionamento dos respectivos sistemas de alimentação. Foi desenvolvido através de componentes modulares e inclui uma base de dados, modelos de simulação e um modelo de análise multicritério. Têm sido desenvolvidos outros SADs para a rega, como é exemplo o SIMIS (Mateos *et al.*, 2002) que é um SAD para a gestão de aproveitamentos hidroagrícolas, o DSIRR (Bazzani, 2005) que é um SAD para a análise económica da rega a diferentes escalas e o mDSS (Mysiak *et al.*, 2005) para a gestão de recursos hídricos.

Como exemplos do vasto número de modelos produzidos, indicam-se os principais modelos desenvolvidos para a simulação do balanço hídrico do solo e para a simulação da rega por aspersão, que são as áreas sobre as quais incide este trabalho.

Relativamente aos modelos de simulação para a gestão da rega, podem-se apontar os modelos ISAREG (Teixeira e Pereira, 1992) e CROPWAT (Smith, 1998), que são modelos do balanço hídrico baseados na aproximação dos coeficientes culturais médios de acordo com a metodologia proposta por Doorenbos e Pruitt (1977) e Allen *et al.* (1998). O modelo

ISAREG efectua a análise de frequência do caudal de ponta e do volume anual das necessidades de rega fornecendo directamente os critérios de base de um projecto de rega. O modelo PILOTE (Mailhol et al., 1997; Mailhol et al., 2004; Khaledian et al., 2008) é um modelo de simulação das culturas que realiza a simulação do balanço hídrico do solo e a simulação do índice de área foliar (LAI) da cultura, produzindo estimativas de produção. O modelo SIMDualKc (Rolim et al., 2006) é um modelo de simulação do balanço hídrico baseado na metodologia dos coeficientes culturais de base (Allen et al., 1998; Allen et al., 2007). Mais recentemente foi desenvolvido o modelo AquaCrop (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009) com o objectivo de estimar a produção das culturas em função da água disponível para estas. Este modelo combina um modelo do balanço hídrico, baseado nos coeficientes culturais basais, com um modelo de produtividade da cultura.

Quanto à rega por aspersão com sistemas de cobertura total, pode-se referir o modelo ISADIM (Abreu e Pereira., 2002) que permite o projecto e a simulação de sistemas de rega por aspersão fixa. Os modelos ASPER 97 (Correia, 1997) e AVASPER (Jorge e Pereira, 2003) constituem outra alternativa para o projecto de sistemas de cobertura total, dimensionando e avaliando os sistemas de rega através de um processo de optimização hidráulica das condutas em função dos critérios de projecto previamente definidos. Para o projecto e avaliação de sistemas de rega com rampas pivotantes Valín e Pereira (2005) desenvolveram o modelo de simulação DEPIVOT. Le Gat e Molle (2000) desenvolveram um modelo de simulação da aplicação de água em rampas pivotantes que considera a acção do vento. Relativamente a sistemas de rega com enrolador, destacam-se os modelos IRRIPARC (Granier et al., 2003) e TRAVGUN (Smith et al., 2008) que simulam diferentes regulações efectuadas aos equipamentos de forma a estimar os seus desempenhos, tendo em vista a melhoria da eficiência dos sistemas. Tanto o modelo IRRIPARC como TRAVGUN (Smith et al., 2008) efectuem a modelação do efeito do vento.

A utilização interactiva de modelos de gestão da rega com modelos de simulação dos sistemas de rega pode ser encontrada em Granier et al. (2003) para os canhões de rega e em Mailhol et al. (2004) para rega por sulcos. Quanto à realização de estudos a diferentes escalas, Victoria et al. (2005) desenvolveram modelos para gestão e planeamento a múltipla-escala dos recursos hídricos em bacias hidrográficas.

A disponibilidade e a gestão dos dados são uma questão central no desenvolvimento e utilização de modelos de simulação da rega, sendo que geralmente estes modelos estão associados a uma base de dados. As bases de dados consistem numa colecção de dados relativas a um dado sistema, que são geralmente geridos e mantidos através de um Sistema de Gestão de Base de Dados (SGBD). A alternativa à utilização de um SGBD é o armazenamento dos dados em ficheiros de texto e desenvolver uma aplicação ou módulo de *software* para

realizar a sua gestão. Existem diversos tipos de SGBD, mas o tipo de SGBD dominante hoje em dia são os sistemas de bases de dados relacionais (Ramakrishnan e Gehrke, 2003).

Como exemplo dos sistemas de informação desenvolvidos na área da rega salienta-se o CLIMWAT 2.0 (FAO, 2011a) que é uma base de dados climática desenvolvida pela FAO para ser utilizada em combinação com a aplicação informática CROPWAT (Smith, 1998). Esta base de dados disponibiliza dados observados de variáveis agrometeorológicas de mais de 5000 estações meteorológicas distribuídas por todo o planeta. Outro exemplo é o sistema de informação AQUASTAT (FAO, 2011b). Este *software* armazena, analisa e disponibiliza informação relativa aos recursos hídricos, aos usos da água e à gestão da água na agricultura ao nível global, regional e nacional.

3.1.4. Modelação espacial com SIG

Os problemas de modelação em ambiente SIG consistem frequentemente na implementação de modelos físicos em suporte SIG, possuindo na generalidade dos casos uma estrutura matricial. Parte da dificuldade neste tipo de modelos está principalmente na teoria subjacente, na disponibilidade dos dados necessários e em menor grau na forma como as expressões matemáticas são espacializadas (Matos, 2001).

Os modelos para a análise espacial são desenvolvidos com diferentes objectivos, desde a simulação de um dado processo, ao planeamento e avaliação de cenários e à criação de indicadores de adequação e vulnerabilidade (Longley *et al.*, 2005; Heywood *et al.*, 2002). Possuem a capacidade de manipular informação geográfica que pode ser efectuada em diferentes graus, desde uma simples análise para um único momento no tempo criando um único *output*, até à simulação do comportamento do sistema modelado no tempo através de iterações sucessivas. Estes modelos podem incluir modelos de simulação dinâmicos de processos naturais tais como a erosão do solo ou o movimento das correntes oceânicas; modelos de processos sociais ou humanos, tais como o trânsito ou a localização de lojas; e finalmente também podem incluir o cálculo de simples indicadores ou de previsões, tal como acontece quando *layers* de informação geográfica são combinados para obter por exemplo medidas da vulnerabilidade de um aquífero à poluição (Longley *et al.*, 2005).

Para que um modelo possa ser considerado um modelo espacial existem duas condições essenciais a que têm que obedecer (Longley *et al.*, 2005):

- Existe a variação ao longo do espaço de uma grandeza que é manipulada pelo modelo;

- Os resultados do modelo variam quando a localização dos objectos muda, ou seja para estes modelos a localização deve *contar*.

O SIG fornece uma estrutura de suporte para a construção de modelos, podendo ser efectivamente integrado com os modelos dum ponto de vista da programação, ou pode simplesmente disponibilizar dados de entrada e de saída, servindo de apoio a outras aplicações informática (Longley *et al.*, 2005; Heywood *et al.*, 2002).

A utilização do SIG na modelação permite fornecer uma base de dados espacial para armazenar as variáveis dos modelos, permitindo também a integração de informação de várias fontes necessária ao funcionamento dos modelos. O SIG é ainda utilizado para espacializar os *outputs* dos modelos sobre o espaço geográfico. (Heywood *et al.*, 2002).

A integração de modelos numéricos com SIG possibilita a visualização tanto dos dados de entrada como de saída dos modelos. Deste modo, permite efectuar uma análise visual dos resultados, o que torna muito mais fácil e rápida a compressão dos resultados obtidos (Heywood *et al.*, 2002).

Os problemas que se levantam à utilização dos SIG para a realização de análises com base em modelos prendem-se com o desenvolvimento e disponibilidade de bases de dados espaciais com a escala, resolução e o detalhe de informação apropriado para os modelos. Por outro lado, muitos dos modelos actualmente existentes têm um carácter não espacial, e não são por isso facilmente adaptáveis a um contexto espacial. Outra das maiores dificuldades na utilização dos SIG actuais prende-se com a sua incapacidade para lidar de um modo eficiente com dados (séries) temporais, obrigando muitas vezes ao processamento desse tipo de informação fora do SIG, recorrendo-se a linguagens de programação como o Fortran, C++ ou Visual Basic.net para lidar com esse tipo de informação (Longley *et al.*, 2005; Heywood *et al.*, 2002).

3.1.4.1. A aplicação dos SIG na engenharia da rega

A gestão eficiente dos recursos hídricos no domínio da agricultura de regadio requer a utilização de grandes quantidades de informação relativa ao clima, ao solo, às culturas, às disponibilidades de água, às características das redes de distribuição de água, etc. Grande parte desta informação é distribuída espacialmente e a sua utilização no planeamento e gestão da rega tem fomentado a utilização do SIG e de outras tecnologias da informação. As de bases de dados georreferenciadas permitem uma integração mais eficiente de informação proveniente de diferentes fontes, facilitando a aplicação de modelos numéricos ou de sistemas de apoio à decisão em estudos regionais (Todorovic e Steduto, 2003).

Devido às grandes áreas do território ocupadas pela actividade agrícola torna-se bastante relevante aumentar a escala de análise dos modelos de simulação da rega, da escala da parcela para a escala regional. O SIG permite integrar a diversa informação no espaço, para além de permitir integrar a um nível espacial os efeitos das acções desenvolvidas individualmente em cada parcela. Esta questão é especialmente relevante nos casos em que se pretendem realizar estudos sobre os recursos hídricos e os impactes ambientais da agricultura de regadio, uma vez que os impactes ambientais das actividades agrícolas afectam uma área que vai para muito além da dimensão da parcela. Deste modo, a integração de modelos de simulação da rega em plataformas SIG permite a gestão racional da água ao nível de um aproveitamento hidroagrícola, de uma bacia hidrográfica ou de uma região.

O aumento da escala de análise do nível da parcela para o nível da região pode ser realizado através da identificação de áreas que sejam “homogéneas” no que diz respeito ao solo e às propriedades hidrológicas. Os efeitos da heterogeneidade espacial podem ser analisados correndo um modelo à escala da “parcela” para todas as combinações de solo-água-cultura-clima, i.e. as “unidades de simulação” para a área a ser estudada. A definição das várias unidades de simulação pode ser efectuada num ambiente SIG através da sobreposição (*overlay*) dos mapas temáticos das variáveis espaciais tais como, o clima, uso do solo, rega, nível da toalha freática, qualidade da água, etc. (Todorovic e Steduto, 2003; Fortes et al., 2005).

No domínio específico da engenharia da rega e da gestão dos recursos hídricos têm sido desenvolvidos diversos sistemas de informação geográfica, de modo a permitir não só uma melhor gestão da rega como a realização de estudos ambientais. As aplicações do SIG nesta área incluem o cálculo regional da evapotranspiração (Hashmi et al., 1995; Ray e Dadhwal, 2001), estimativas regionais das produtividades das culturas (Qing e Linvill, 2002), a análise das redes de distribuição de água aos regantes (Rowshon et al., 2003) a gestão de redes de distribuição de água de rega (Ojeda-Bustamante et al., 2007), ou a avaliação da recarga dos aquíferos a partir de parcelas de regadio (Chowdary et al., 2003). Muitas outras aplicações podem ser encontradas na bibliografia, sendo que algumas das aplicações mais interessantes relativas à integração de modelos de simulação da rega com o SIG são descritas por Todorovic e Steduto (2003) que desenvolveram um SIG para gestão e planeamento da rega a diferentes escalas. A aplicação informática GISAREG (Fortes et al., 2005) foi desenvolvida para calcular as necessidades de rega à escala de um aproveitamento hidroagrícola, seguindo a linha de trabalho de San-Payo (1994) e Carreira (1997) correspondente ao uso conjunto de modelos do balanço hídrico com SIG. Por outro lado, foram desenvolvidos trabalhos que focam o carácter integrador do SIG, em que este

constitui uma plataforma de integração de diferentes fontes de informação e de modelos (Santa Olalla et al., 2003).

No entanto, a utilização do SIG para a modelação da rega para além das vantagens enunciadas também possui algumas dificuldades, que se prendem com a dificuldade em lidar com séries temporais, com a dificuldade em arranjar informação espacialmente distribuída, e eventualmente com a necessidade de realizar adaptações ou melhoramentos em alguns modelos (Longley *et al.*, 2005; Matos, 2001; Heywood *et al.*, 2002). De facto, os modelos de simulação matemática da rega e drenagem são frequentemente desenvolvidos para pequenos talhões experimentais em que se considera geralmente o solo como uma coluna vertical. Estes modelos são geralmente desenvolvidos e validados com dados detalhados medidos localmente, o que lhes permite alcançar elevadas precisões (Grayson *et al.*, 1993; San-Payo, 1994; Bastiaanssen et al., 2007). Assim, a maior parte destes modelos são modelos não espaciais e quando se pretenda realizar a sua integração com SIG poderá ser necessário modificá-los de modo a que consigam ter em conta a variabilidade e as interacções espaciais das suas variáveis.

3.2. Modelos de interpolação espacial. Bases teóricas para o desenvolvimento do programa Interpolador.

3.2.1. Considerações gerais

Na metodologia proposta neste trabalho foi desenvolveu-se o programa Interpolador (Rolim et al., 2011) para realizar a interpolação espacial de variáveis agrometeorológicas. Assim, apresentam-se as bases teóricas relativas aos métodos de interpolação espacial implementados no programa Interpolador.

Os modelos de simulação da rega têm-se tornado mais complexos com o objectivo de aumentar a exactidão da estimativa das necessidades de rega (Bastiaanssen et al., 2007). Contudo, enquanto se verificam estes desenvolvimentos significativos na modelação da rega, o método dos polígonos de Thiessen (Thiessen, 1911) continua no presente a ser utilizado como o procedimento mais comum para interpolar espacialmente os dados meteorológicos correspondentes aos dados de entrada dos modelos (Chow, et al., 1988; Fortes et al., 2005). Bastiaanssen et al. (2007) identificaram a necessidade de realizar investigação relativamente à exactidão e fiabilidade dos dados utilizados para alimentar estes modelos. Também foi identificado por Harcum e Loftis (1987a, b) a necessidade de fornecer valores de evapotranspiração de referência (ET_o) interpolados espacialmente, como dados de entrada em modelos de balanço hídrico, em regiões que são servidas por redes de estações meteorológicas, de forma a aumentar a exactidão das simulações realizadas para calendarização da rega. A questão da exactidão dos dados de entrada dos modelos de simulação do balanço hídrico é um assunto bastante relevante, uma vez que se tem assistido à sua integração em SIG, nos quais se incluem os trabalhos de Todorovic e Steduto (2003), Fortes et al. (2005) e Rolim e Teixeira (2008), para permitir aumentar a escala de aplicação dos modelos para o nível regional. A aplicação destes modelos a vastos domínios espaciais requer geralmente como dados de entrada séries temporais de dados meteorológicos interpoladas espacialmente, porque os modelos são geralmente desenvolvidos e parametrizados ao nível da parcela com medições detalhadas e locais. Outra questão relativa à aplicação de modelos à escala regional diz respeito à resolução espacial das simulações, devido à grande variabilidade e heterogeneidade das variáveis agrometeorológicas, especialmente da precipitação, ao longo do espaço. Com este propósito, é recomendado por Spadavecchia e Williams (2009) a adopção de dados meteorológicos de alta resolução para realizar as simulações com os modelos.

De modo a disponibilizar aos modelos dados meteorológicos interpolados espacialmente, são geralmente construídas grelhas densas de dados interpolados, regionalizadas a partir de uma rede de estações meteorológicas através da utilização de métodos de interpolação

que convertem dados pontuais em superfícies contínuas (Todorovic e Steduto, 2003; Zhao et al., 2005; Spadavecchia e Williams, 2009). Em particular, o trabalho de Spadavecchia e Williams (2009) focou-se na produção de grelhas de alta resolução de dados meteorológicos com o objectivo de aumentar a exactidão das estimativas produzidas pelos modelos. O sistema de informação CIMIS (*California Irrigation Management Information System*) constitui um exemplo de uma rede de estações meteorológicas, contando com mais de 130 estações meteorológicas automáticas, que utilizam métodos de interpolação para produzir dados espacialmente interpolados; o CIMIS utiliza dois métodos de interpolação, o *DayMet* e o *Spline*, para produzir mapas diários da ET_o (Lehner et al., 2006; Hart et al., 2008).

Existem diversos métodos disponíveis para interpolar espacialmente os dados meteorológicos fornecidos por uma rede de estações meteorológicas. O método mais simples é o do vizinho mais próximo ou dos polígonos de Thiessen (Thiessen, 1911). Este método é fácil de implementar, mas é bastante grosseiro e ignora a variação espacial local das variáveis climáticas. Apesar da sua inexactidão, este método continua a ser bastante utilizado. Têm sido propostas abordagens baseadas na regressão linear para a interpolação de observações meteorológicas, utilizando as coordenadas geográficas e modelos digitais do terreno para realizar a análise de regressão (Zhao et al., 2005). A utilização de médias ponderadas, tais como o inverso do quadrado da distância, fornecem resultados aceitáveis, mas esta abordagem não é ótima em termos do erro mínimo quadrático (Spadavecchia e Williams, 2009). Métodos que são baseados na optimização dos mínimos quadrados incluem algoritmos geoestatísticos tais como o kriging (Mardikis et al., 2005; Sarangi et al., 2005; Spadavecchia e Williams, 2009), a colocação por mínimos quadrados (Moritz, 1980; Reguzzoni et al., 2005; Yang et al., 2009) ou o filtro de Kalman (Harcum e Loftis, 1987.a). Estes métodos são “*data-driven*”, quantificando a estrutura espacial da variável em estudo, e são mais objectivos (Spadavecchia e Williams, 2009). Os métodos geoestatísticos são considerados como sendo mais exactos, mas na prática, frequentemente apresentam resultados muito próximos daqueles produzidos por métodos determinísticos simples, tais como o inverso do quadrado da distância (Thornton et al., 1997; Camargo et al., 2004; Mardikis et al., 2005; Spadavecchia e Williams, 2009). Contudo, o método da colocação por mínimos quadrados fornece a melhor estimativa linear não enviesada (BLUE – *Best Linear Unbiased Estimator*), onde o termo “melhor” é definido como dando o menor erro quadrático médio da estimativa. Esta importante propriedade e a estimativa não enviesada não são partilhadas por nenhum dos outros métodos mais simples. Outra vantagem dos métodos geoestatísticos é a de que fornecem uma estimativa da precisão da quantidade estimada (Soares, 2006). Métodos de interpolação determinísticos incluem a abordagem proposta por Li e Reves (2002), que poderá ser uma metodologia bastante interessante para o

preenchimento de falhas em séries climáticas. Outros métodos de interpolação incluem a utilização de redes neurais artificiais, tal como é proposto por Li et al. (2004), para estimar variáveis meteorológicas com um passo de tempo diário para um determinado local baseado em dados diários medidos por uma rede de monitorização meteorológica ou na utilização do filtro Gaussiano truncado tal como descrito por Thornton et al., 1997. A utilização de métodos de interpolação combinados com dados do modelo digital do terreno (MDT), para aumentar a exactidão dos dados interpolados, encontra-se descrita em Mardikis et al. (2006) e Lehner et al. (2006).

3.2.2. Métodos de interpolação

Os métodos de interpolação espacial considerados no desenvolvimento do programa Interpolador foram o vizinho mais próximo (VMP), o inverso do quadrado da distância (IQD), e colocação por mínimos quadrados (CMQ). O VMP e IQD são métodos determinísticos, em que a interpolação espacial é realizada apenas como função da distância entre o ponto a estimar e os pontos das observações, sem considerar processos estocásticos. O método da CMQ é um método estatístico que toma em consideração a estrutura de covariância dos dados a interpolar.

Estes métodos foram escolhidos com base nas seguintes considerações: a) o VMP foi escolhido devido à sua simplicidade e porque é o método normalmente utilizado em estudos da rega e dos recursos hídricos; b) o IQD foi escolhido porque é um método simples que permite uma melhoria na qualidade da interpolação e fornece, com algumas excepções, resultados bastante próximos dos métodos geoestatísticos (Thornton et al., 1997; Camargo et al., 2004; Spadavecchia e Williams, 2009); a CMQ foi escolhida porque é um método geoestatístico relativamente simples de implementar numa aplicação informática e em teoria é equivalente ao kriging (Reguzzoni et al., 2005; Yang et al., 2009).

Estes métodos requerem o cálculo da norma do vector entre dois ou mais pontos, neste caso entre o ponto a interpolar e as observações. A norma deste vector pode ser calculada numa aproximação planar (distância euclidiana), mas obtêm-se melhores resultados quando se calcula a distância esférica. A distância esférica é calculada pela equação da lei do co-seno (Gaspar, 2000):

$$d = \text{Arc cos} [\sin \varphi_A \sin \varphi_B + \cos \varphi_A \cos \varphi_B \cos (\lambda_A - \lambda_B)] R_T \quad (3.1)$$

onde: d é a distância [km]; φ é a latitude [radianos]; λ é a longitude [radianos]; e R_T é o raio médio da terra (6371.2 km).

3.2.2.1. Vizinho mais próximo (VMP)

O método do vizinho mais próximo (VMP) é um método determinístico que é definido pela selecção de apenas uma observação vizinha (a mais próxima) para a interpolação espacial de um dado ponto. Este interpolador deverá ser utilizado quando se pretende manter os valores das observações na grelha sem gerar valores intermédios. O método do VMP corresponde ao método dos polígonos de Thiessen (Thiessen, 1911), um método muito popular no campo da hidrologia e dos recursos hídricos. Neste método, o espaço é discretizado em polígonos centrados em cada observação (Fig. 3.2). A dimensão dos polígonos é determinada pela distância entre as observações e é uma medida da área de influência de cada observação. Qualquer ponto no espaço tem um valor igual ao valor da observação mais próxima, que é o centro do polígono no qual está contido (Soares, 2006). Uma vez que este método só leva em consideração o valor da observação no centro do polígono, apenas deverá ser aplicado numa grelha bastante densa de observações ou para estimativas de valores globais utilizando médias ponderadas proporcionais às áreas dos polígonos (Soares, 2006).

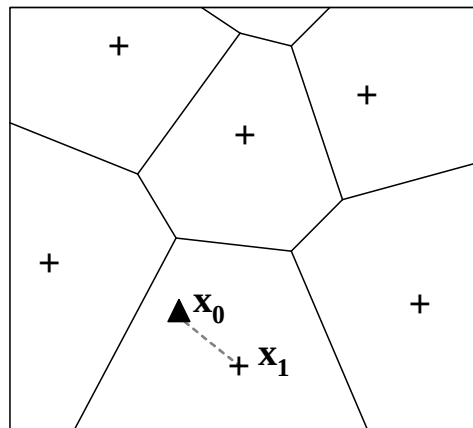


Figura 3.2 – Representação do método do vizinho mais próximo (polígonos de Thiessen), em que o valor interpolado de x_0 é igual à observação mais próxima x_1 (adaptado de Soares, 2006).

3.2.2.2. Inverso do quadrado da distância (IQD)

No método do inverso do quadrado da distância (IQD) o valor interpolado para um dado ponto x_0 é uma média ponderada das N observações vizinhas. Este método é um modelo determinístico (Camargo et al., 2004; Soares, 2006).

A influência de cada observação no valor estimado para um dado ponto é determinada pelo inverso da distância da observação ao ponto, elevada a uma potência, que geralmente é a potência de 2 (a qual foi adoptada no *software* desenvolvido neste trabalho). Quanto maior a potência, maior será a influência da observação mais próxima, e quando a potência é zero

os pesos são iguais para todas as observações consideradas (Soares, 2006). O inverso do quadrado da distância para a potência de 2 é dado por (Camargo et al., 2004):

$$\hat{z} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^2} \ell_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^2}} \quad (3.2)$$

onde: $\hat{z}$ é o valor estimado para o ponto x_0 ; d_i é a distância entre a observação x_i e o ponto a estimar x_0 ; e ℓ_i é o valor da observação no ponto x_i (Figura 3.3), N é o número de observações usadas no cálculo de z .

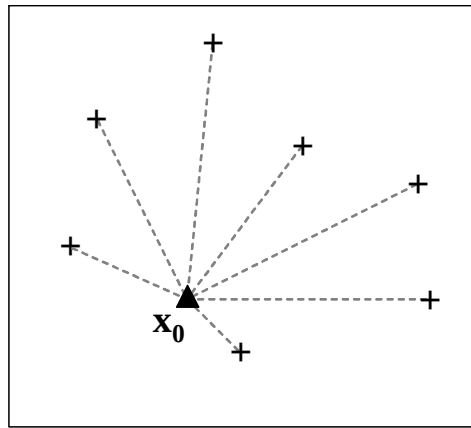


Figura 3.3 – Representação do método do inverso do quadrado da distância em que o valor interpolado x_0 é uma média ponderada das N observações vizinhas (adaptado de Soares, 2006).

3.2.2.3. Colocação por mínimos quadrados (CMQ)

O método da Colocação por Mínimos Quadrados (CMQ) é um método estatístico que realiza a interpolação espacial de uma dada variável considerando dois conjuntos de quantidades aleatórias, designadas de ℓ (o vector das observações) e $\hat{z}$ (o vector dos valores estimados), respectivamente. O vector ℓ é conhecido, sendo composto de quantidades arbitrárias de uma variável agrometeorológica, tal como a precipitação. O vector $\hat{z}$ representa os valores a serem estimados. Uma estimação linear do vector $\hat{z}$, baseada no conjunto das ℓ observações, é calculada pela equação 3.3 (Catalão, 2000):

$$\hat{z} = H\ell \quad (3.3)$$

Em que H é uma matriz onde cada componente do vector $\hat{z}$ é aproximada por uma combinação linear das observações do vector ℓ . A melhor estimativa de $\hat{z}$ em termos de ℓ é definida como uma estimação linear centrada de variância mínima. Então, a matriz H deve

ser construída de tal forma que as variâncias dos erros sejam minimizadas de acordo com a seguinte expressão (Moritz, 1980):

$$H = C_{z\ell} C_{\ell\ell}^{-1} \quad (3.4)$$

onde as matrizes $C_{z\ell}$ e $C_{\ell\ell}$ são a matriz da covariância cruzada entre os vectores ℓ e $\hat{z}$ e a matriz de covariância do vector ℓ , respectivamente. A expressão (Eq. 3.3), referida como estimação por mínimos quadrados, fornece a melhor estimativa linear (não enviesada e com variância mínima) para os valores do vector $\hat{z}$ com base nos dados do vector ℓ . As matrizes são construídas utilizando a função de covariância $C(d)$ (Eq. 3.5). Neste estudo adoptamos a seguinte função de covariância $C(d)$ utilizada em Catalão (2006):

$$C(d) = C_0 \left(1 + \frac{d}{\alpha} \right) e^{-\frac{d}{\alpha}} \quad (3.5)$$

sendo d é a distância entre dois pontos (tanto os pontos das observações como os pontos a serem estimados); C_0 é variância dos dados; e α é a distância de correlação.

De um ponto de vista estatístico, a função de covariância caracteriza a correlação estatística de duas quantidades de uma dada variável situadas em dois diferentes pontos, separada pela distância d . A determinação da função de covariância é realizada, para cada região, através da estimação dos coeficientes de um modelo paramétrico, através do ajustamento da função de covariância aos dados empíricos (Catalão, 2000). Moritz (1980) define dois parâmetros que permitem caracterizar a função de covariância, a variância dos dados (C_0) e a distância de correlação (α), os quais podem ser vistos na representação esquemática de uma dada variável na Figura 3.4.

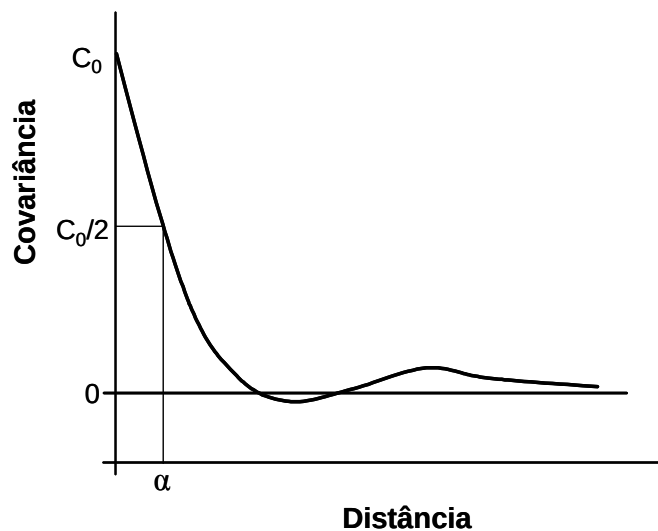


Figura 3.4 – Representação esquemática dos parâmetros essenciais da função de covariância: variância C_0 e distância de correlação α (adaptado de Catalão, 2000).

A variância C_0 é o valor da função de covariância quando a distância é zero ($d=0$) e é dada pela variância dos dados (Catalão, 2000):

$$C_0 = C(0) \quad (3.6)$$

A distância de correlação, α , é a distância para a qual a covariância é metade de C_0 :

$$C(\alpha) = C_0/2 \quad (3.7)$$

A interpretação estatística da CMQ é baseada na suposição de que as observações da variável agrometeorológica de interesse são a realização de um processo estocástico com variáveis centradas. Tendo isto em conta, a função covariância é o elemento central no processo da CMQ contendo toda a informação sobre o comportamento espacial da variável agrometeorológica, incluindo a sua variabilidade, a distância de correlação e anisotropia. A aplicação do método da CMQ para a estimativa de uma determinada variável exige sempre o conhecimento da função de covariância que contém e expressa a relação entre as observações (ℓ) e a relação entre as observações e as quantidades estimadas ($\hat{Z}$) (Catalão, 2000). Numa interpolação espácio-temporal, a função de covariância deve ser determinada para cada conjunto de dados, resultando numa série temporal de funções de covariância. Para uma série temporal de medições diárias, é necessário o cálculo de um elevado número de funções de covariância (uma para cada dia). Contudo, se for possível determinar parâmetros mensais ou mesmo anuais que sejam representativos da variabilidade espacial de uma dada variável, a estimação através da utilização da CMQ não será mais exigente ao nível do tempo dispendido do que qualquer outro método. Portanto, neste estudo, os parâmetros da função de covariância foram determinados para cada variável como uma função mensal.

Detalhes de uma aplicação prática do método da CMQ

Para ilustrar a aplicação do método da CMQ na interpolação espacial de uma variável agrometeorológica, apresenta-se um exemplo com a evapotranspiração de referência (ET_0) (Equações 3.8-3.11). O procedimento consiste em estimar os valores do vector $\hat{Z}$ para pontos desconhecidos no terreno, com base num conjunto de valores de ET_0 (vector ℓ) determinados em vários pontos (x_i , $i = 1, 2, \dots, n$) correspondentes às posições das estações. O vector ℓ é dado pela seguinte expressão:

$$\ell = [ET_{O_1}, ET_{O_2}, \dots, ET_{O_n}]^T \quad (3.8)$$

A colocação por mínimos quadrados necessita que se comece por calcular os parâmetros da função de covariância (Eq. 3.5), C_0 e α , para a variável considerada, neste caso a ET_0 . Para obter estes parâmetros é necessário construir um gráfico como se mostra na Figura 3.4.

Com base no vector ℓ da ET_0 (Eq. 3.8) é calculada a variância dos dados, C_0 , que corresponde à ordenada na origem da função de covariância (vd. Fig. 3.4). De seguida, os pares de estações são agrupadas por classes de distâncias e estima-se a covariância dos dados para cada subconjunto.

Depois de se obterem todos estes valores é desenhada a função de covariância e é determinada a distância de correlação, α , que corresponde ao ponto em que a função de covariância apresenta o valor $C_0/2$ (Fig. 3.4). Uma vez calibrada a equação 3.5, com os valores estimados de C_0 e α , esta função será utilizada para criar as matrizes $C_{z\ell}$ e $C_{\ell\ell}$ de acordo com as seguintes expressões.

$$C_{z\ell} = (C_{x_0, x_1}, C_{x_0, x_2}, \dots, C_{x_0, x_n}) \quad (3.9)$$

$$C_{\ell\ell} = \begin{bmatrix} C_{x_\ell, x_\ell} & \dots & C_{x_\ell, x_n} \\ \dots & & \\ C_{x_n, x_\ell} & \dots & C_{x_n, x_n} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Daqui, a formula dos mínimos quadrados para estimar a ET_0 é dada por:

$$\hat{z} = [C_{x_0, x_1}, \dots, C_{x_0, x_n}] \begin{bmatrix} C_{x_\ell, x_\ell} & \dots & C_{x_\ell, x_n} \\ \dots & & \\ C_{x_n, x_\ell} & \dots & C_{x_n, x_n} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} ET_{01} \\ \dots \\ ET_{0n} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

sendo a função de covariância, $C(d)$, calculada com a expressão 3.5.

4. Simulação das necessidades de rega. Bases teóricas para o desenvolvimento do programa IrrigRotation.

A metodologia desenvolvida para a determinação das necessidades de rega incluiu o desenvolvimento de um modelo de balanço hídrico capaz de determinar as necessidades de rega de uma rotação cultural. Neste capítulo apresentam-se os fundamentos teóricos do cálculo das necessidades de rega das culturas que serviram de base ao desenvolvimento do modelo IrrigRotation (Rolim e Teixeira, 2008) e a caracterização das rotações de culturas de um ponto de vista da gestão da água para rega.

As **necessidades hídricas das culturas** (NH) são definidas por Doorenbos e Pruitt (1977) como a quantidade de água, expressa em altura de água (mm), necessária para fazer face à água perdida através da evapotranspiração de uma cultura (ET_c) isenta de doenças, crescendo numa parcela extensa sem restrições relativas às condições do solo, incluindo a disponibilidade de água no solo e a fertilidade, e atingindo a produção potencial para o ambiente em que se encontra.

Para as culturas de regadio Pereira e Allen (1999) definem as **necessidades de rega das culturas**¹ (NRg) como a quantidade de água, expressa em altura de água [mm], que é necessário fornecer às culturas para satisfazer completamente as suas necessidades hídricas (NH). As necessidades de rega correspondem à fracção das necessidades hídricas que não são satisfeitas pela precipitação, pela reserva de água no solo e pela ascensão capilar. Nem sempre é possível aplicar a quantidade de água necessária para fornecer completamente as necessidades hídricas da cultura, como acontece na rega deficitária. Neste caso, definem-se as **necessidades de rega deficitária** como a quantidade de água (mm), aplicada às culturas cultivadas em condições sub-óptimas, não atingido o seu pleno potencial produtivo, em que se adopta um determinado limiar de deficit no fornecimento de água à cultura (Pereira e Allen, 1999).

As **necessidades totais de rega das culturas**¹ (NRg_T) correspondem à quantidade total de água, expressa em altura de água (mm), a ser fornecida às culturas para satisfazer completamente as suas necessidades de rega (NRg), adicionada da quantidade de água necessária para compensar todas as perdas do sistema de rega e a sua falta de eficiência. Quando seja necessário adicionar uma fracção de lavagem (FL) para remover os sais em

¹ No projecto de rega é muito comum a utilização dos termos necessidades líquidas e brutas de rega (Keller e Bliesner, 1990; Pereira, 2004; Tarjuelo, 2005; Allen et al., 2007), sendo necessário estabelecer a correspondência entre estes termos e a terminologia adoptada neste trabalho. Assim, as **necessidades de rega das culturas** correspondem às **necessidades líquidas de rega** e as **necessidades totais de rega das culturas** correspondem às **necessidades brutas de rega**.

excesso acumulados na zona de enraizamento da cultura, esta quantidade de água também deverá ser contabilizada nas necessidades totais de rega (Doorenbos e Pruitt, 1977; Pereira e Allen, 1999; Allen et al., 2007).

Relativamente ao conceito de necessidades de rega, interessa ainda distinguir entre as necessidades de rega anuais e as necessidades de rega relativas ao período de ponta, que são dois dos principais parâmetros a considerar no projecto de rega. As **necessidades de rega anuais** correspondem ao somatório das várias dotações de rega aplicadas à cultura ao longo de toda a campanha de rega (Raposo, 1996). As **necessidades de rega relativas ao período de ponta** (R_{gp}) são as 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 R_{gp} que se define o caudal de projecto utilizado no dimensionamento dos sistemas de rega (Burman et al., 1983; Raposo, 1996; James, 1998; Allen et al., 2007).

Numa rotação de culturas o cálculo das necessidades de rega, para uma dada condição edafo-climática, deverá ser realizado através da simulação do balanço hídrico do solo continuamente no tempo, uma vez que é necessário estimar o valor da reserva de água no solo ao longo do tempo, considerando as sucessivas culturas que compõem a rotação e os períodos sem cultura entre elas. Desta forma, o volume de água armazenado no solo no final de uma cultura e durante o período sem cultura é contabilizado no cálculo das necessidades de rega da cultura subsequente.

4.1. Evapotranspiração

4.1.1. Evapotranspiração de referência

Allen et al., (1998) definem a evapotranspiração de referência (ET_o) como a taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência hipotética, para a qual se assume uma altura de 0.12 m, uma resistência de superfície constante de 70 s m^{-1} e um albedo de 0.23, semelhante à evapotranspiração de um extenso coberto de relva verde de altura uniforme, em crescimento activo, cobrindo totalmente o solo e bem abastecido em água.

Para o cálculo da evapotranspiração de referência a FAO (*Food and Agriculture Organization*) recomenda a utilização do método FAO Penman-Monteith (FAO-PM) como sendo o mais preciso (Allen et al., 1998). Assim, a evapotranspiração de referência (ET_o) é calculada neste trabalho utilizando o método da FAO-PM (Allen et al., 1998), de acordo com a seguinte expressão:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4.1)$$

onde:

ET_o	evapotranspiração de referência [mm dia^{-1}];
R_n	radiação líquida à superfície da cultura [$\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$];
G	densidade do fluxo de calor do solo [$\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$];
T	temperatura média diária do ar a 2 m de altura [$^{\circ}\text{C}$];
U_2	velocidade média diária do vento a 2 m de altura [m s^{-1}];
e_s	pressão de vapor de saturação [kPa];
e_a	pressão actual de vapor [kPa];
$(e_s - e_a)$	deficit da pressão de vapor [kPa];
Δ	declive da curva de pressão de vapor [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$];
γ	constante psicrométrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$];

Os dados meteorológicos necessários para o cálculo da ET_o com a Equação 4.1 são: a temperatura máxima do ar ($T_{\max}$) [$^{\circ}\text{C}$], temperatura mínima do ar ($T_{\min}$) [$^{\circ}\text{C}$], a humidade relativa máxima ($RH_{\max}$) [%], a humidade relativa mínima ($RH_{\min}$) [%], a velocidade do vento a 2m acima do solo (U_2) [ms^{-1}] e a radiação solar (R_s) [$\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$] (Allen et al., 1998).

Quando não estão disponíveis todos os parâmetros climáticos necessários para utilizar o método FAO Penman-Monteith, Allen et al. (1998) propõem um conjunto de procedimentos que permitem estimar os dados de radiação, humidade e velocidade do vento. Nestas condições, também é possível a utilização de métodos bastante mais simples do que o FAO-PM, de que são exemplos os métodos de Hargreaves, Jensen-Haise, Makkink, Priestley-Taylor e Turc que calculam a ET_o baseados apenas nos parâmetros meteorológicos temperatura e radiação solar, e o método de Hargreaves-Samani que apenas necessita de dados de temperatura. Para a região do Alentejo, Teixeira et al. (2008) realizaram um estudo em que compararam os resultados obtidos por estes métodos mais simples com o método de referência FAO Penman-Monteith. Os resultados obtidos mostram que o método de Hargreaves-Samani apresenta resultados bastante aproximados do FAO-PM, mostrando ser um método fiável para as condições do Alentejo. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Droogers e Allen (2002), Hargreaves e Allen (2003), Gavilán et al. (2005) e Wang et al. (2007) que comprovam que o método de Hargreaves-Samani apresenta resultados bastante próximos aos do método FAO Penman-Monteith.

O método de Hargreaves-Samani permite estimar a ET_o medindo apenas dados de temperatura, uma vez que radiação extraterrestre (R_a) é calculada em função da latitude e do dia do ano. O método de Hargreaves-Samani foi proposto em 1982 (Hargreaves e Samani, 1982) e actualizado em 1985 (Hargreaves e Samani, 1985), representando uma melhoria relativamente à equação original de 1975 (Hargreaves, 1975). O modelo de Hargreaves-Samani é expresso pela seguinte equação:

$$ET_o = \alpha(T + 17.78)(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} R_a \quad (4.2)$$

onde:

$T_{\max}$ – temperatura máxima do ar [$^{\circ}\text{C}$];

$T_{\min}$ – temperatura mínima do ar [$^{\circ}\text{C}$];

R_a – radiação extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$];

$\alpha = 0.0023$.

4.1.2. Evapotranspiração cultural

4.1.2.1. Introdução

A evapotranspiração cultural (ET_c), em condições padrão, é definida por Allen et al. (1998) como a evapotranspiração de uma cultura livre de doenças e bem fertilizada, que cresce numa área extensa, sem restrições de água no solo e atingido o seu pleno potencial produtivo para umas dadas condições climáticas. O cálculo da evapotranspiração cultural é realizado multiplicando a evapotranspiração de referência pelo coeficiente cultural (Allen et al, 1998):

$$ET_c = K_c ET_o \quad (4.3)$$

onde:

ET_c – evapotranspiração cultural [mm dia^{-1}];

K_c – coeficiente cultural;

ET_o – evapotranspiração de referência [mm dia^{-1}].

A evapotranspiração de referência (ET_o) traduz a influência das diferentes condições climáticas na evapotranspiração enquanto os efeitos devidos à diferença entre as características da cultura e as características da superfície de referência são integrados através do coeficiente cultural (K_c). Uma vez que coeficiente cultural varia

predominantemente com as características das culturas e em menor escala com os factores climáticos, é possível a transferência de valores padrão dos K_C para diferentes locais e climas (Allen et al, 1998; Pereira, 2004).

A equação 4.3 calcula a ET_C para as condições padrão em que não são colocadas limitações ao desenvolvimento e à evapotranspiração das culturas. Quando as culturas sejam cultivadas em condições diferentes das condições padrão, tais como a baixa fertilidade do solo, a presença de pragas e doenças, salinidade do solo, deficit hídrico ou encharcamento do solo é necessário ajustar o valor da ET_C às condições prevalecentes (Allen et al., 1998). Neste trabalho, apenas se realiza o ajustamento da ET_C quando ocorre stress hídrico recorrendo-se ao coeficiente de stress hídrico (K_s). Na secção 4.2.5.2 descreve-se o ajustamento da ET_C em função do volume de água armazenado no solo.

4.1.2.2. Coeficiente cultural

O coeficiente cultural, K_C , expressa a relação entre a evapotranspiração de uma dada cultura e a da cultura de referência. O coeficiente cultural representa a integração dos efeitos de quatro características que distinguem a evapotranspiração cultural da evapotranspiração da cultura de referência (Allen et al., 1998, Pereira, 2004):

- Altura da cultura (h), que afecta a rugosidade e a resistência aerodinâmica;
- Albedo da superfície cultura-solo, que é influenciado pela fracção de solo coberto pela vegetação e pelo teor de humidade à superfície do solo. O albedo influencia a radiação líquida disponível à superfície (R_n) que é a principal fonte de energia para as trocas de calor e de massa no processo de evaporação.
- Resistência de superfície relativa ao par cultura-solo, que é afectada pela área foliar (número de estomas), pela fracção do solo coberto pela vegetação, pela idade e condição das folhas e pelo teor de humidade à superfície do solo;
- Evaporação do solo, particularmente da fracção de solo exposto.

Os coeficientes culturais podem ser estimados através da aproximação dos coeficientes culturais médios ou da aproximação dos coeficientes culturais de base. Nos coeficientes culturais médios a transpiração da cultura e a evaporação do solo são combinadas num único coeficiente cultural K_C . Este valor de K_C corresponde à média temporal dos efeitos conjugados da transpiração da cultura e da evaporação do solo (Allen et al., 1998; Pereira, 2004; Allen et al., 2007):

$$K_C = \overline{K_{cb}} + K_e \quad (4.4)$$

Na aproximação dos coeficientes culturais de base, ou basais, a transpiração da cultura e a evaporação do solo são determinadas separadamente. São utilizados dois coeficientes, o coeficiente cultural basal (K_{cb}) que descreve a transpiração das plantas e o coeficiente de evaporação do solo (K_e) que descreve a evaporação a partir da superfície do solo. O valor do K_c é então estimado pela seguinte equação (Allen et al, 1998):

$$K_C = K_S K_{cb} + K_e \quad (4.5)$$

onde:

K_{cb} - coeficiente cultural basal;

K_e - coeficiente de evaporação do solo;

K_S – coeficiente de stress hídrico do solo.

O coeficiente cultural basal (K_{cb}) é definido como a razão entre a evapotranspiração cultural e a evapotranspiração de referência quando a superfície do solo se encontra seca mas em que o conteúdo médio de água no solo na zona radicular é adequado para que a transpiração ocorra à sua taxa potencial. O K_{cb} representa o limite inferior do K_c quando se lhe subtraem os efeitos do humedecimento da superfície do solo pela rega ou precipitação. O coeficiente de evaporação do solo (K_e) atinge um valor máximo a seguir a uma rega ou chuva quando a superfície do solo se encontra húmida. À medida que a camada superficial do solo vai secando, o valor de K_e diminui e atinge o valor zero quando não exista mais água para evaporar. Assim, a estimação do valor de K_e requer a realização de um balanço hídrico diário para a camada evaporativa, de modo a determinar o teor de água nessa camada (Allen et al., 1998, Pereira, 2004).

O método dos K_c de base incorpora os efeitos da frequência e padrões de humedecimento da superfície do solo, que podem ser específicos para uma dada parcela, devido à variabilidade espacial da precipitação e da gestão da rega efectuada por cada agricultor, e assim este método pode fornecer uma estimativa mais precisa da componente de evaporação, K_e , e consequentemente da ET_c ao nível de uma parcela individual (Allen et al., 2007). É de realçar que este método é particularmente adequado para estimar a ET_c para regas de alta-frequência e para culturas que cubram parcialmente o solo, assim como para regiões com precipitação frequente (Allen et al., 1998; Pereira, 2010).

A metodologia adoptada no programa IrrigRotation para calcular a ET_c (Eq. 4.3) segue a aproximação dos K_c de base. (Allen et al., 1998). Optou-se pela aproximação dos K_c de base por estes serem recomendados para cálculos com um passo de tempo diário, e porque nas rotações de culturas tem interesse a contabilização da evaporação do solo durante o período sem cultura “nongrowing season” em que muitas vezes o solo é mantido sem vegetação, sendo neste caso a ET_c essencialmente comandada pela evaporação do solo (Allen et al., 1998, 2007). Têm sido realizados vários estudos que aplicam a metodologia dos coeficientes culturais duais na estimação das necessidades de rega para diferentes culturas (Rolim et al., 2007; Bodner et al., 2007; Zhao et al., 2010; Liu e Luo, 2010; Paço et al., 2011).

Como exemplos de outros modelos que utilizam a metodologia dos coeficientes culturais de base para estimar a evapotranspiração das culturas, pode-se apontar o modelo AquaCrop (Raes et al., 2009) e o modelo SIMDualKc (Rolim et al., 2006).

4.1.2.3. A curva dos coeficientes culturais.

O valor do K_c varia ao longo do ciclo da cultura, crescendo à medida que a cultura se desenvolve e diminuindo o seu valor à medida que as plantas envelhecem e atingem a senescência, sendo função da altura, da fracção de solo coberta pela cultura e respectiva área foliar. Este facto implica variações na evapotranspiração cultural e no valor do coeficiente cultural para os diversos períodos da cultura. O ciclo vegetativo pode ser dividido em 4 períodos de desenvolvimento: período inicial, período de crescimento rápido, período intermédio e período final (vd. Fig. 4.1). Estes quatro períodos correspondem tipicamente a uma cultura anual e são definidos do seguinte modo (Allen et al., 1998, Pereira, 2004):

- **Período inicial** corresponde ao intervalo de tempo que vai desde a sementeira ou plantação até cerca de 10% de cobertura do solo;
- **Período de crescimento rápido** que vai desde que a planta atinge 10% de cobertura do solo até que se estabelece a cobertura total do solo;
- **Período intermédio** que ocorre desde que se estabelece a cobertura total do solo até ao início da maturação ou senescência;
- **Período final** que vai desde o início da maturação até à colheita ou até que se atinge a senescência total.

A curva dos coeficientes culturais (Fig. 4.1) representa tipicamente a evolução do coeficiente cultural ao longo do ciclo vegetativo de uma cultura anual (Pereira, 2004). A forma da curva representa as mudanças na vegetação e na fracção do solo coberto durante o ciclo da cultura e que afectam o valor do K_c . Esta curva é construída identificando a duração dos períodos da cultura e os valores correspondentes do coeficiente cultural. Apenas são necessários três valores de K_c para construir esta curva: o valor para o período inicial ($K_{c\text{ ini}}$), o valor para o período intermédio ($K_{c\text{ mid}}$) e o valor para a data da colheita ou para o último dia do período final ($K_{c\text{ end}}$). A partir desta curva, o K_c pode ser estimado para qualquer dia dentro do ciclo da cultura (Allen et al., 1998; Pereira, 2004).

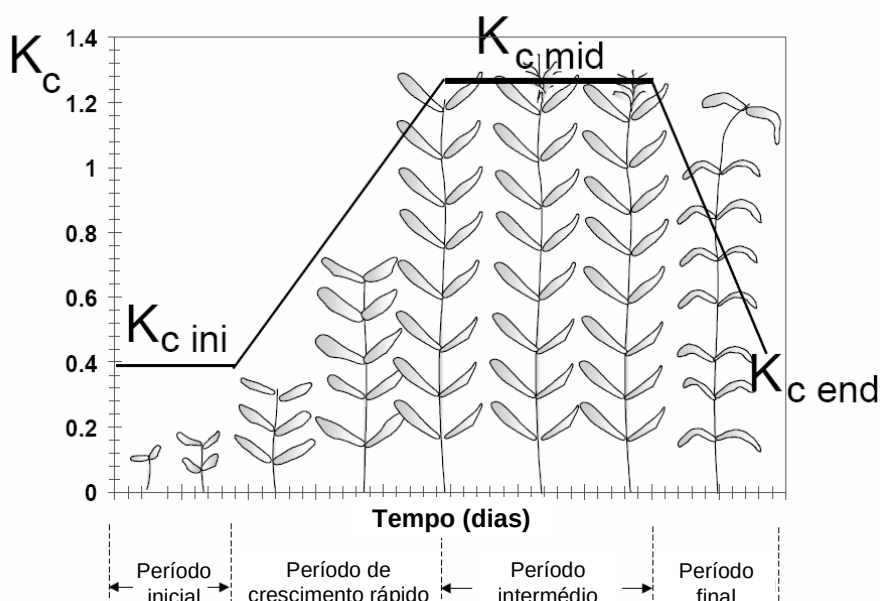


Figura 4.1 – Representação da curva dos coeficientes culturais e dos períodos de desenvolvimento da cultura para a aproximação coeficientes culturais médios (adaptado de Allen et al., 1998).

A Figura 4.2 apresenta as curvas típicas do K_{cb} , K_e e do K_c médio. O valor do K_c médio inclui a média dos efeitos da evaporação do solo ao passo que a curva do K_{cb} apenas descreve a transpiração da cultura e por isso o valor deste último situa-se abaixo do valor do K_c médio. Assim, a curva do K_{cb} corresponde ao valor mínimo da ET_c para condições adequadas de humidade do solo. Os “picos” do K_e representados na Figura 4.2 representam o aumento temporário no valor da ET_c devido à evaporação do solo após a precipitação ou a rega terem humedecido a superfície do solo. A soma dos valores médios de K_{cb} e K_e representa o coeficiente cultural médio (K_c) como se mostra na curva a tracejado da Figura 4.2 (Allen et al., 1998; Pereira, 2004).

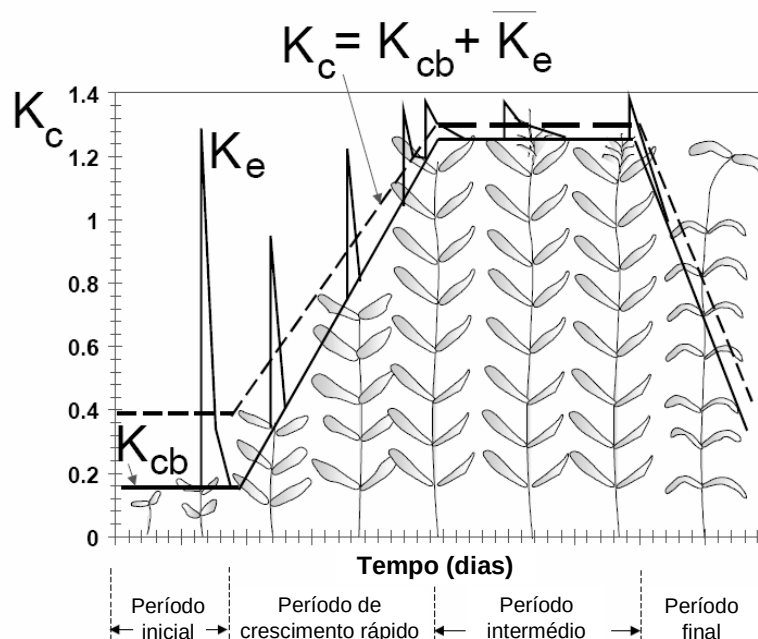


Figura 4.2 – Curva dos coeficientes culturais de base em que se mostra a evolução do coeficiente cultural basal K_{cb} e do coeficiente de evaporação do solo K_e ao longo das várias fases da cultura. A linha a tracejado representa a curva dos coeficientes culturais médios $K_c = K_{cb} + K_e$ (Adaptado de Allen et al., 1998).

4.2. Balanço hídrico do solo

4.2.1. Considerações gerais

As necessidades de rega das culturas podem ser estimadas através da modelação do balanço hídrico do solo (Doorenbos e Pruitt, 1977; Teixeira, 1989; Fernando, 1998; Pereira, 2004; Luc, 2006; Allen et al., 2007; Raes et al., 2009). A determinação das necessidades de rega das culturas depende não só da evapotranspiração da cultura (ET_c) e da precipitação ocorridas durante um dado intervalo de tempo, mas também do volume de água armazenado no solo e da forma como este se distribui ao longo do perfil do solo, incluindo a possibilidade de ocorrer ascensão capilar a partir de uma toalha freática eventualmente existente, assim como da eventual ocorrência de percolação profunda e de escoamento à superfície do solo. Assim, o rigor na determinação das dotações de rega a aplicar à cultura e do instante em que a rega deverá ser efectuada dependem do grau de conhecimento dos termos do balanço hídrico do solo na zona de enraizamento (Fernando, 1998; Pereira, 2004).

Independentemente do grau de complexidade de um modelo de balanço hídrico do solo existem duas funções que este deverá realizar (Choisnel, 2006):

- O acompanhamento da evolução ao longo do tempo da reserva de água no solo;

- O ajustamento da evapotranspiração cultural (ET_c), em relação ao seu valor máximo, em função do teor de humidade do solo.

Tendo em conta o volume máximo de água que o solo pode armazenar e o valor da reserva de água no solo para um dado instante é possível determinar a dotação de rega máxima que poderá ser aplicada sem que ocorra drenagem profunda (Teixeira, 1989). Nos casos de regas de alta-frequência e com pequenas dotações, de que é exemplo a rega localizada, o papel do solo como reservatório de água perde importância, uma vez que as dotações de rega tendem a fornecer a água às plantas à medida que elas a utilizam (Fernando, 1998). Portanto, para a gestão da rega e para o seu melhoramento e optimização é necessário a realização do balanço hídrico do solo, com a respectiva quantificação dos termos que o constituem (Fernando, 1998; Pereira, 2004).

O modelo de balanço hídrico IrrigRotation, desenvolvido no âmbito deste trabalho, segue a abordagem dos coeficientes culturais de base proposta por Allen et al. (1998, 2007) que requer a utilização de dois balanços hídricos em simultâneo, com um passo de tempo diário. É necessário a realização de um balanço hídrico para a camada evaporativa do solo, de modo a determinar o valor de K_e que permite obter uma estimativa do valor da evaporação do solo. O segundo balanço hídrico refere-se à zona de enraizamento, e permite o cálculo do coeficiente de stress hídrico do solo (K_s) que permite ajustar a ET_c quando o teor de humidade do solo é insuficiente para manter a cultura em condições de conforto hídrico. A modelação do balanço hídrico proposta por Allen et al. (1998, 2007) utiliza o conceito de deficit de água do solo, que corresponde à diferença entre o valor da reserva de água no solo num dado instante e o valor da capacidade de campo. No modelo desenvolvido, em vez de deficit utiliza-se o conceito de reserva de água no solo que corresponde ao volume de água armazenado no solo acima do coeficiente de emurchecimento, de acordo com a metodologia proposta por Teixeira (1989), Fernando (1998), Choisnel (2006) e Luc (2006). No modelo IrrigRotation para além dos dois reservatórios descritos anteriormente, incluiu-se um terceiro que se situa na zona compreendida entre a profundidade radicular para um dado instante e a profundidade de enraizamento máxima atingida durante a rotação cultural. Este último balanço tem como finalidade estimar a contribuição, em termos de reserva, adicionada ao balanço hídrico da região explorada pelas raízes devido ao aumento da profundidade da raiz (ΔZ_r) para um dado intervalo de tempo (Δt). Este terceiro reservatório permite, ainda, que só se considere como percolação profunda a água que drena depois de preenchida a reserva utilizável deste reservatório, uma vez que esse volume de água será posteriormente extraído pelas raízes das plantas.

4.2.2. O solo como reservatório de água

Dada a complexidade dos processos de transferência de água no sistema solo-planta, na gestão da rega utilizam-se normalmente modelos simplificados em que se considera um prisma de solo de área unitária (Fig. 4.3) e cuja altura é em cada instante igual à profundidade do sistema radicular. Este prisma é encarado como um reservatório que recebe ou perde água em função das entradas (precipitação, rega e ascensão capilar) ou das saídas (evapotranspiração, drenagem profunda e escoamento superficial). O reservatório é composto por diferentes compartimentos correspondentes aos horizontes do solo que possuem diferentes capacidades de retenção de água, e é limitado superiormente pela superfície do solo e inferiormente pela profundidade de enraizamento (Teixeira, 1989; Allen et al., 1998; Fernando, 1998, Pereira, 2004).

O valor deste reservatório para uma cultura anual é variável ao longo do tempo em função do crescimento das raízes, sendo o seu valor máximo atingido no final do período de crescimento da cultura, altura em que se atinge a profundidade máxima de enraizamento (Luc, 2006).

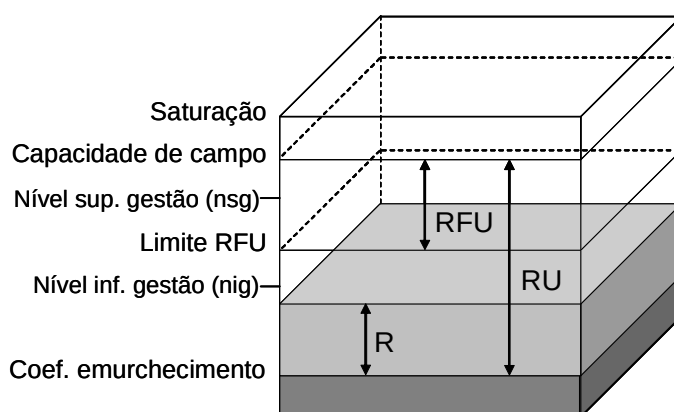


Figura 4.3 - Esquema do modelo de reservatório do solo (simplificado) (adaptado de Allen et al., 1998).

As raízes das plantas só conseguem extrair água do solo entre a capacidade de campo (θ_{CC}) e o coeficiente de emurchecimento (θ_{CE}). Assim, a capacidade utilizável de um solo (U) define-se como o volume de água armazenado no solo entre a capacidade de campo (CC) e o coeficiente de emurchecimento (CE), para um metro de altura de solo (Costa, 1952, Teixeira, 1989, Raposo, 1996), sendo calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$U = 1000(\theta_{CC} - \theta_{CE}) \quad (4.6)$$

onde:

U – capacidade utilizável do solo [mm/m];

θ_{CC} – teor de água do solo à capacidade de campo [m^3/m^3];

θ_{CE} – teor de água do solo ao coeficiente de emurchecimento [m^3/m^3].

A Reserva Utilizável do Solo (RU) é o volume de água utilizável armazenado até uma profundidade Z_r , cujo valor em mm, para um solo homogéneo se calcula pela expressão (Teixeira, 1989):

$$RU = U \times Z_r \quad (4.7)$$

onde:

RU – reserva utilizável do solo [mm];

Z_r – profundidade radicular [m].

No modelo de balanço hídrico considerado assume-se que o solo é um reservatório com características homogéneas ao longo de toda a zona de enraizamento da cultura. Uma vez que os vários horizontes do solo possuem diferentes capacidades de retenção para a água (θ_{CC} e θ_{CE}), o valor da RU para uma dada profundidade de enraizamento (Z_r) é calculado segundo a expressão (Fernando, 1998):

$$RU = 1000 \left[\sum_{i=1}^{n_h-1} (\theta_{CC_i} - \theta_{CE_i}) \Delta Z_i + \left(Z_r - \sum_{i=1}^{n_h-1} \Delta Z_i \right) (\theta_{CC_n} - \theta_{CE_n}) \right] \quad (4.8)$$

sendo:

n_h – número de horizontes do solo até à profundidade radicular;

ΔZ_i – espessura de cada horizonte [m];

θ_{CC_i} – teor de água do solo à capacidade de campo para o horizonte i [m^3/m^3];

θ_{CE_i} – teor de água do solo ao coeficiente de emurchecimento para o horizonte i [m^3/m^3];

Z_r – profundidade radicular

Existe um valor para a reserva de água no solo a partir do qual a cultura entra em stress hídrico ocorrendo a redução da evapotranspiração cultural. Teixeira (1989) define o conceito de Reserva Facilmente Utilizável (RFU) como a fracção da reserva utilizável do solo que pode ser extraída pelas plantas em conforto hídrico. O valor da reserva facilmente utilizável pode ser calculado de acordo com a seguinte expressão (Teixeira, 1989):

$$RFU = pRU \quad (4.9)$$

onde:

RFU – reserva facilmente utilizável [mm];

p - fracção de água facilmente utilizável, i.e. fracção da RU que pode ser extraída da zona radicular sem que ocorra stress hídrico.

A noção de RFU está directamente relacionada com a fracção de água no solo facilmente utilizável (p) que representa expressa em percentagem da RU, o volume de água utilizável abaixo do qual a planta entra em stress hídrico. Assim, o objectivo da gestão da rega será o de manter o valor da reserva num determinado dia t, $R(t)$, entre a capacidade de campo e o valor da reserva mínima (R_{min}), correspondente ao limite da reserva facilmente utilizável (LRFU). Assim, o volume de água armazenado no solo deverá manter-se dentro da RFU de modo a que a evapotranspiração cultural (ET_C) atinja o seu nível máximo e não ocorram perdas de produção, devendo a rega ser desencadeada mal se atinja o limite da reserva facilmente utilizável (RFU) (Teixeira, 1989; Fernando, 1998).

$$LRFU = RU - RFU = (1 - p)RU \quad (4.10)$$

Os valores de p variam de cultura para cultura e podem ser obtidos através dos valores tabelados disponíveis em Allen et al. (1998). Os valores tabelados da fracção p correspondem a uma $ET_C = 5 \text{ mm d}^{-1}$ sendo necessário ajustar os seus valores às condições de procura climática. Assim, deve-se ajustar o valor de p para os valores de ET_C locais de acordo com a expressão (Allen et al., 1998; Pereira, 2004):

$$0.1 \leq p = p_{\text{Tabelado}} + 0.04(5 - ET_C) \leq 0.8 \quad (4.11)$$

onde:

p_{Tabelado} – valor tabelado da fracção de água facilmente utilizável;

ET_C – evapotranspiração cultural [mm dia^{-1}].

4.2.2.1. Profundidade de enraizamento

A profundidade da zona de enraizamento de uma dada cultura depende das características das plantas, do solo e de factores ambientais. Para as culturas anuais o sistema radicular desenvolve-se ao longo do seu ciclo vegetativo, conforme se encontra representado da Figura 4.4. A profundidade efectiva máxima de enraizamento é normalmente menor que a

profundidade máxima das raízes e consiste na profundidade do solo que possui uma densidade de raízes suficiente para a extracção de água (Fernando, 1998). Assim, a profundidade radicular varia desde um valor mínimo à sementeira ou plantação, $Z_{r\ min}$, até uma profundidade máxima, $Z_{r\ max}$, que se considera que é atingida no final do período de crescimento rápido (Fig. 4.1 e 4.4) (Teixeira, 1989; Fernando, 1998; Allen et al., 2007).

É de salientar que a diferença $Z_{r\ max} - Z_r$ representa a espessura do solo que será explorada pelo sistema radicular e que constitui uma reserva de água que será utilizada futuramente pela cultura. No caso particular do modelo IrrigRotation, como se modela o balanço hídrico para uma rotação de culturas define-se também o conceito de $Z_{r\ max\_rot}$ que corresponde à profundidade máxima do solo explorada pela cultura que apresenta a raiz mais profunda de toda a rotação. Esta profundidade $Z_{r\ max\_rot}$ define assim um reservatório de água que é armazenada durante as culturas com as raízes menos profundas sendo utilizada posteriormente pelas culturas com as raízes mais profundas.

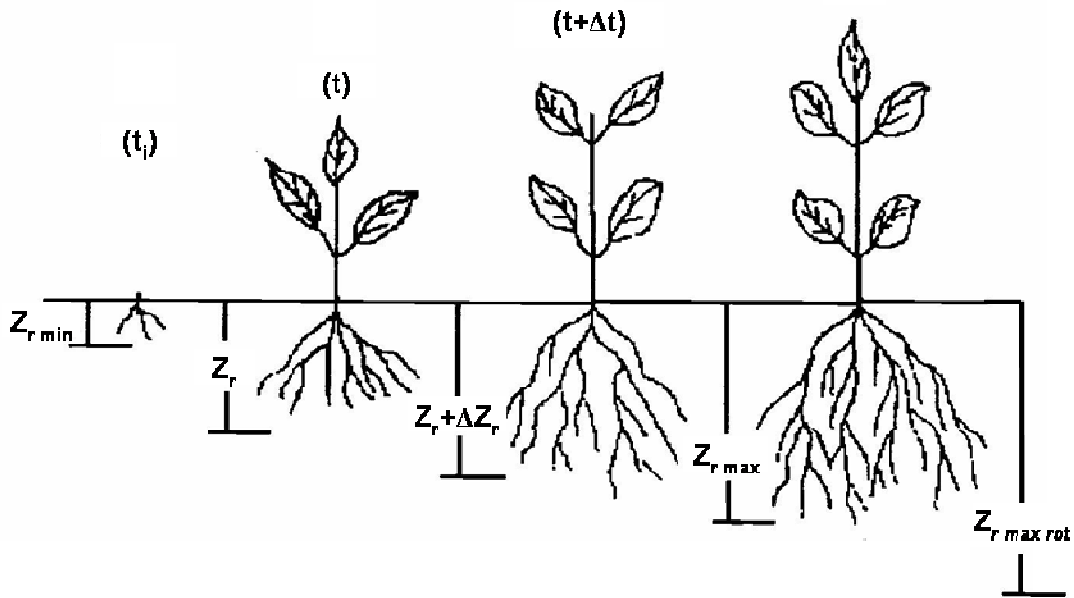


Figura 4.4 - Variação da profundidade do balanço hídrico ao longo do tempo de acordo com o desenvolvimento da cultura (adaptado de Teixeira, 1989).

A profundidade efectiva das raízes, para o dia i , pode ser estimada como (Fernando, 1998):

$$Z_{ri} = Z_{r\ min} + (Z_{r\ max} - Z_{r\ min})Z_f \quad (4.12)$$

onde:

Z_{ri} – profundidade efectiva de enraizamento no dia i [m];

$Z_{r \min}$ - profundidade efectiva inicial de enraizamento [m];

$Z_{r \max}$ - profundidade efectiva máxima de enraizamento [m];

Z_f – factor de aprofundamento das raízes.

Normalmente considera-se que $Z_{r \min}$ corresponde à profundidade de sementeira ou plantação. Quando se considere um modelo linear de crescimento das raízes o factor de aprofundamento das raízes assume a seguinte forma (Fernando, 1998):

$$Z_f = \frac{D_{aic}}{D_{tm}} \quad (4.13)$$

em que D_{aic} é o número de dias após o início do crescimento da raiz e D_{tm} é o número total de dias do período de crescimento da raiz, desde a profundidade de sementeira até atingir a profundidade efectiva máxima.

4.2.3. Equação do balanço hídrico do solo

A quantidade de água contida no solo, que pode ser mais ou menos facilmente extraída pelas plantas, constitui uma reserva de água variável ao longo do tempo, em função das entradas de água, devidas maioritariamente à precipitação e à rega, e às saídas, devidas principalmente à evapotranspiração cultural do coberto vegetal. A Figura 4.5 apresenta os principais termos que compõem o balanço hídrico do solo para uma cultura de regadio. O acompanhamento do valor da reserva de água no solo $R(t)$ no instante t é o objectivo do cálculo do balanço hídrico do solo (Choisnel, 2006).

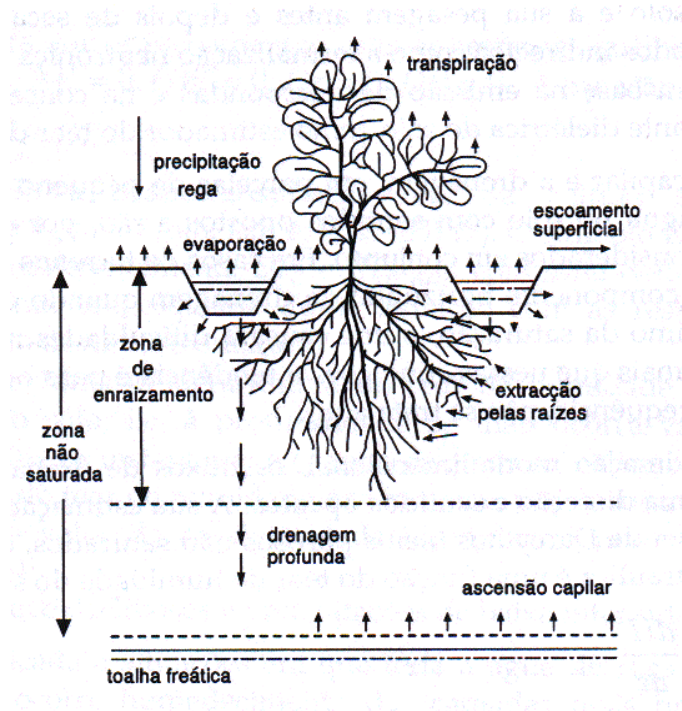


Figura 4.5 - Esquema dos termos do balanço hídrico da zona de enraizamento em regadio (adaptado de Fernando,1998).

A equação de balanço hídrico do solo adoptada no modelo desenvolvido segue a formulação definida por Teixeira (1989):

$$\Delta R = (P - ET_c + Rg - Es + Ac - Dr)\Delta t \quad (4.14)$$

sendo:

ΔR – variação do volume de água armazenado no solo [mm];

Δt - intervalo de tempo [dia];

Os volumes afluentes são:

P – precipitação [mm dia⁻¹];

Rg – rega [mm dia⁻¹];

Ac – ascensão capilar [mm dia⁻¹];

e os volumes efluentes são:

ET_c – evapotranspiração cultural [mm dia⁻¹];

Es – escoamento superficial [mm dia⁻¹];

Dr – drenagem e percolação profunda [mm dia⁻¹];

Esta equação (4.14) é aplicada à zona do solo compreendida entre a superfície e a profundidade de enraizamento Z_r (Fig. 4.7). Teixeira (1989) define a precipitação efectiva (Pe) do seguinte modo:

$$Pe = P - Es \quad (4.15)$$

Tomando a equação 4.14 a seguinte forma:

$$\Delta R = (Pe - ET_c + Rg + Ac - Dr)\Delta t \quad (4.16)$$

A percolação (Dr) corresponde ao volume de água, até à profundidade Z_r , que se encontra acima da RU e que portanto drena para horizontes mais profundos. Se o solo não se encontrar saturado nessas camadas inferiores, este volume de água ou parte dele poderá ser aí armazenado. Durante o período em que ocorre o crescimento radicular o volume Dr , ou parte dele, poderá ficar armazenado até à profundidade $Z_{r \max}$, estando disponível para ser utilizado posteriormente, não podendo por isso ser considerado como uma saída de água para fora da zona de enraizamento. Para um intervalo de tempo Δt a profundidade da raiz sofrerá um aumento de ΔZ_r que lhe permitirá extrair o volume de água armazenado na espessura de solo ΔZ_r , e que não estava disponível para a cultura no início do intervalo de simulação. Assim deverá acrescentar-se à equação 4.16 o termo V_r , que corresponde à quantidade de água que é adicionada à zona explorada pelas raízes devido ao seu crescimento (Teixeira, 1989). A equação 4.16 assume assim a forma:

$$\Delta R = (Pe + Vr - ET_c + Rg + Ac - Dr)\Delta t \quad (4.17)$$

O cálculo do valor de V_r obriga à realização de dois balanços hídricos em simultâneo. O primeiro é realizado para a zona de enraizamento (Z_r), sendo aplicada a equação 4.17. O segundo balanço corresponde aos horizontes inferiores do solo, situados entre Z_r e $Z_{r \max}$. No caso do modelo IrrigRotation como se considera evolução da reserva de água no solo ao longo de uma rotação cultural, em vez de $Z_{r \max}$ considera-se $Z_{r \max\_rot}$ correspondente ao valor da raiz mais profunda da rotação. O balanço hídrico das camadas inferiores é dado por (Teixeira, 1989):

$$\Delta V = (Dr - Vr - Drp)\Delta t \quad (4.18)$$

em que ΔV [mm] é a variação do volume de água armazenado na camada do solo situada entre Z_r e $Z_{r \max\_rot}$, V_r [mm dia⁻¹] é o volume de água adicionado à zona radicular devido ao crescimento das raízes, Dr [mm dia⁻¹] é o volume de água que drena a partir da zona radicular e Drp [mm dia⁻¹] é o volume de água correspondente à percolação profunda para profundidades abaixo da profundidade $Z_{r \max\_rot}$.

Adoptou-se a simplificação de $Ac = 0$ enquanto não é incorporado neste modelo um modelo de contribuição da toalha freática, tal como na metodologia proposta por Teixeira (1989) ou por Liu et al. (2006). A forma final da equação implementada no modelo IrrigRotation apresenta-se na seguinte expressão:

$$\Delta R = (Pe + Vr - ET_c + Rg - Dr)\Delta t \quad (4.19)$$

O modelo de balanço hídrico implementado no modelo IrrigRotation apresenta 3 diferentes horizontes, como se mostra na Figura 4.6. A camada evaporativa R_{evap} , corresponde à camada do solo onde ocorre a evaporação do solo, a camada $R1(t)$ corresponde à porção do solo ocupada pelas raízes onde a água é retirada apenas pela extracção das raízes (transpiração) e a sua espessura aumenta durante o ciclo de crescimento da cultura, o horizonte mais profundo $R2(t)$ é a região do solo que se situa entre a profundidade da raiz num dado instante $Z_r(t)$ e a profundidade máxima das raízes alcançada ao longo da rotação ($Z_{r\ max\_rot}$). Este horizonte $R2(t)$, tal como o anterior $R1(t)$, apresenta uma espessura variável em função do ciclo de crescimento das culturas, e da alternância entre os períodos com cultura e sem cultura ao longo da rotação. A decisão da rega é tomada com base nos valores da reserva de água no solo do horizonte $R2(t)$.

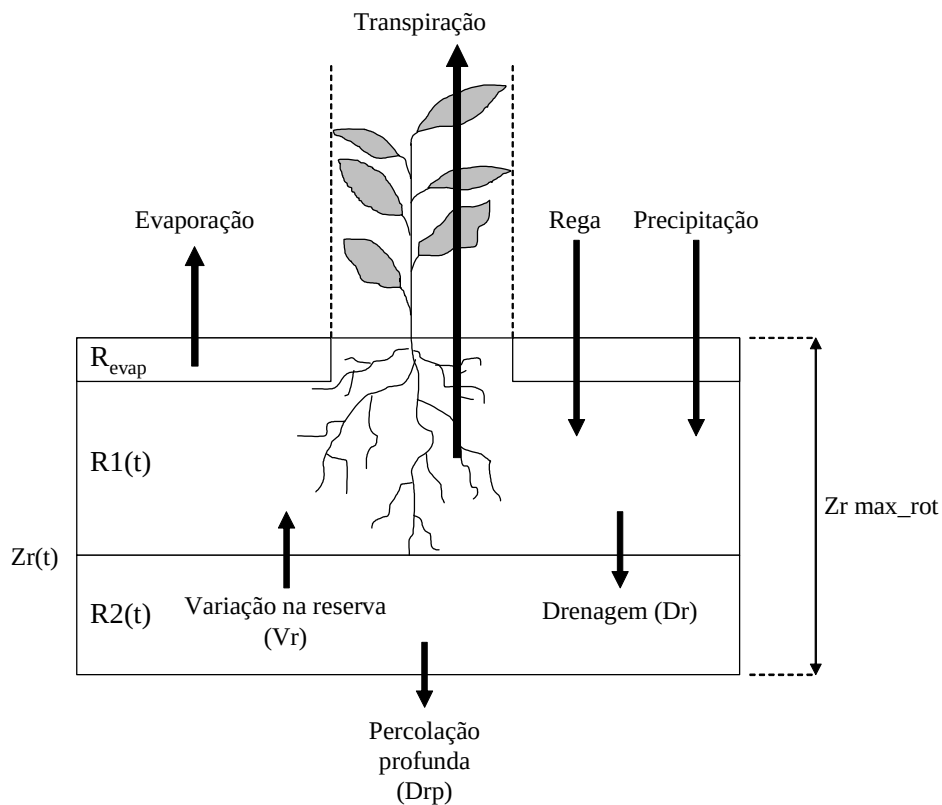


Figura 4.6 – Balanço hídrico do solo considerando a cultura com a raiz mais profunda da rotação.

4.2.4. Zonas de conforto hídrico e de carência hídrica

Segundo Teixeira (1989) durante a realização do balanço hídrico do solo a gama de variação dos valores do teor de humidade do solo pode ser dividida em três zonas (Fig. 4.7).

- A **zona de saturação** (zona 1) em que o teor de humidade do solo (θ) se encontra acima da capacidade de campo (CC). Esta zona é delimitada superiormente pela curva da saturação do solo e inferiormente pela curva da reserva utilizável (RU).

- A **zona de conforto hídrico** (zona 2) tem em cada instante um volume de água armazenado que permite ter a cultura em conforto hídrico, correspondendo, portanto, à reserva facilmente utilizável (RFU). Esta zona é delimitada superiormente pela curva da reserva utilizável (RU) e inferiormente pela curva do limite da reserva facilmente utilizável (LRFU).

- A **zona de carência hídrica** (zona 3) onde o teor de humidade do solo se encontra abaixo do limite da reserva facilmente utilizável (LRFU), correspondendo a forças de retenção de água no solo que a tornam dificilmente utilizável pelas culturas. Esta zona é delimitada superiormente pela curva do limite da reserva facilmente utilizável (LRFU) e tem como limite inferior $R=0$ em que o teor de humidade do solo atinge o coeficiente de emurchecimento permanente (θ_{CE}).

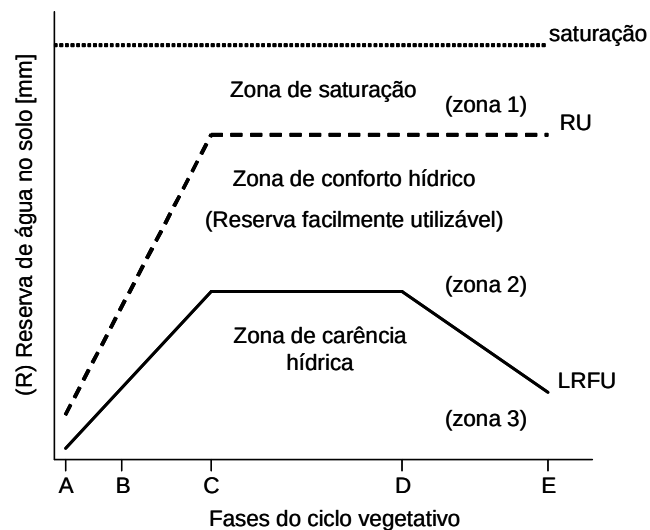


Figura 4.7 - Delimitação das zonas de conforto hídrico e de carência hídrica (adaptado de Teixeira,1989).

4.2.5. Cálculo da evapotranspiração cultural

4.2.5.1. O método dos coeficientes culturais de base

O método dos coeficientes culturais de base divide o K_c em dois coeficientes separados, o coeficiente cultural basal (K_{cb}) que descreve a transpiração da cultura, e o coeficiente de evaporação do solo (K_e) (Allen et al., 1998).

Componente de transpiração ($K_{cb}ET_o$)

O valor do coeficiente cultural basal (K_{cb}) encontra-se tabelado para uma grande variedade de culturas em Allen et al. (1998). Os valores de K_{cb} referem-se a condições climáticas padrão definidas para um clima sub-húmido, com uma humidade relativa mínima diária (RH_{min}) de 45% e com uma velocidade média do vento de $U_2 = 2 \text{ ms}^{-1}$. Para condições climáticas que difiram das condições padrão os valores tabelados de $K_{cb \text{ mid}}$ e de $K_{cb \text{ end}}$ maiores que 0.45, deverão ser ajustados recorrendo à seguinte equação (Allen et al., 1998):

$$K_{cb} = K_{cb(Tab)} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \quad (4.20)$$

onde:

$K_{cb(Tab)}$ – valor tabelado de $K_{cb \text{ mid}}$ ou $K_{cb \text{ end}}$ (se ≥ 0.45);

U_2 – valor médio da velocidade do vento a 2 metros de altura durante o período intermédio ou final [ms^{-1}];

RH_{min} – valor médio da humidade relativa mínima durante o período intermédio ou final [%];

h – altura média da planta durante o período intermédio ou final [m].

Para a construção da curva dos coeficientes culturais basais é necessária a selecção e ajustamento de três valores de K_{cb} ($K_{cb \text{ ini}}$, $K_{cb \text{ mid}}$ e $K_{cb \text{ end}}$). Com base nestes valores e na caracterização dos quatro períodos de desenvolvimento da cultura (vd. secção 4.1.2.3.), é desenhada a curva dos coeficientes culturais que permite a obtenção dos valores de K_{cb} para cada dia durante todo o ciclo vegetativo (Allen et al., 1998).

Componente de evaporação (K_eET_o)

O coeficiente de evaporação do solo K_e descreve a componente de evaporação da ET_c . O valor máximo de K_e é atingido quando a superfície do solo se encontra humedecida, após

uma rega ou precipitação. Quando a superfície do solo se encontra seca, devido à evaporação, K_e apresenta um valor diminuto, chegando a atingir o valor zero quando não exista água no solo disponível para a evaporação. O valor do coeficiente cultural (K_c) está limitado por um valor máximo ($K_{c\ max}$) determinado pela energia disponível para a evapotranspiração à superfície do solo. Será então $K_{cb} + K_e \leq K_{c\ max}$ ou $K_e \leq (K_{c\ max} - K_{cb})$. Assim, o valor de K_e é estimado da seguinte forma (Allen et al., 1998):

$$K_e = K_r (K_{c\ max} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{c\ max} \quad (4.21)$$

onde:

$K_{c\ max}$ – valor máximo do K_c imediatamente a seguir a uma chuva ou a uma rega;

K_r – coeficiente de redução da evaporação [0-1];

f_{ew} – fracção do solo humedecida e exposta à radiação solar directa.

O valor de K_r é dependente do teor de humidade da camada evaporativa, e será definido mais à frente. A taxa de evaporação do solo é limitada pela quantidade de energia disponível na fracção de solo exposto, ou seja K_e não pode exceder $f_{ew} K_{c\ max}$. O valor de $K_{c\ max}$ pode variar entre 1.05 e 1.30 e é dado por (Allen et al., 1998):

$$K_{c\ max} = \max \left\{ \left[1.2 + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right], \{K_{cb} + 0.05\} \right\} \quad (4.22)$$

onde h é a altura média da planta durante o período de cálculo (inicial, desenvolvimento rápido, intermédio e final) [m] (Allen et al., 1998).

A quantidade total de água que pode ser evaporada da camada superficial do solo, quando esta camada tenha sido previamente humedecida na sua totalidade, é estimada como (Allen et al., 1998):

$$TEW = 1000(\theta_{cc} - 0.5\theta_{ce})Z_e \quad (4.23)$$

onde:

TEW – água evaporável total [mm];

θ_{cc} – teor de água do solo à capacidade de campo [m^3/m^3];

θ_{ce} – teor de água do solo ao coeficiente de emurchecimento [m^3/m^3];

Z_e – profundidade da superfície do solo que está sujeita a secagem devido à evaporação [m].

A profundidade Z_e varia entre 0.10 e 0.15 m, com o valor de 0.10 para solos de textura grosseira e 0.15 para solos de textura fina.

O coeficiente de redução da evaporação K_r , referido anteriormente na equação 4.21, é estimado assumindo que o processo de secagem se dá em duas etapas (Allen et al., 1998):

$$K_r = 1.0 \quad \text{para} \quad R_e \geq LRFE \quad (4.24a)$$

$$K_r = \frac{R_e}{TEW - REW} \quad \text{para} \quad R_e < LRFE \quad (4.24b)$$

onde:

R_e – reserva de água na camada evaporativa do solo [mm];

REW – água facilmente evaporável [mm].

$LRFE$ – limite da reserva facilmente evaporável [mm];

Em Allen et al. (1998) encontram-se tabelados os valores de referência para a água facilmente evaporável (REW) para os diferentes tipos de solo. O limite da reserva facilmente evaporável representa o valor da reserva evaporativa (R_e) a partir do qual a taxa de evaporação do solo se reduz devido a limitações na quantidade de água disponível. A água facilmente evaporável (REW) corresponde ao volume de água evaporado do solo durante a fase 1 (Fig. 4.8) em que a evaporação ocorre à sua taxa potencial, limitada apenas pela energia disponível na superfície do solo. Na fase 2 (Fig. 4.8), quando o valor da reserva evaporativa (R_e) desce abaixo do limite da reserva facilmente evaporável ($LRFE$) a taxa de evaporação decresce proporcionalmente com a quantidade de água remanescente no solo (Allen et al., 1998, 2007; Pereira, 2004). O limite da reserva facilmente evaporável [mm] é calculada de acordo com:

$$LRFE = TEW - REW \quad (4.25)$$

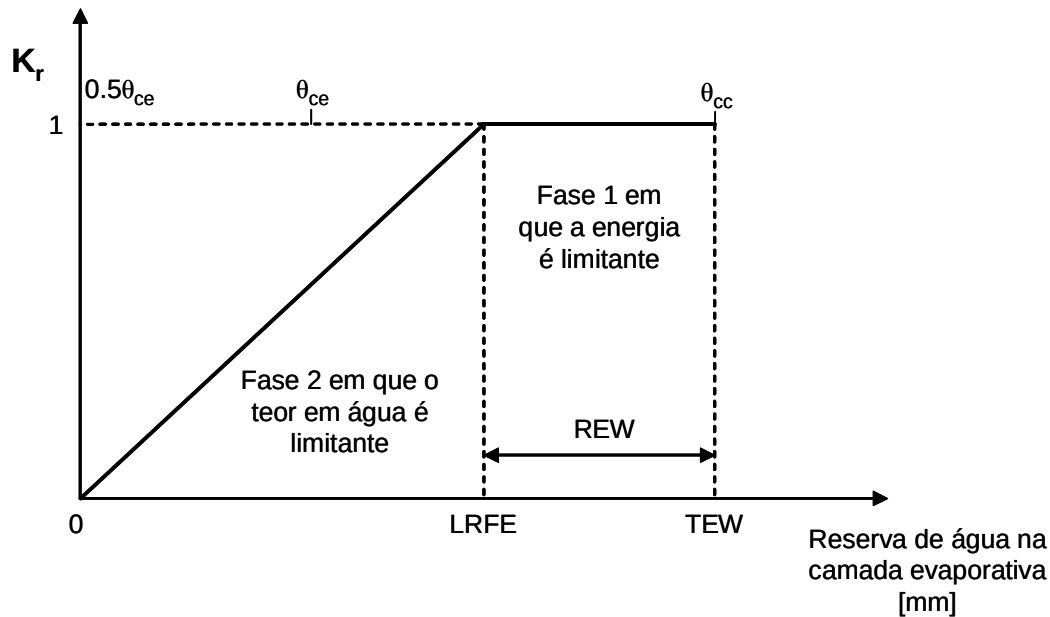


Figura 4.8 - Coeficiente de redução da evaporação K_r (adaptado de Allen et al., 1998).

A fracção de solo humedecido pela rega ou precipitação (f_w) define a extensão espacial da superfície do solo em que potencialmente poderá ocorrer a evaporação (Fig. 4.9), sendo disponibilizado por Allen et al. (1998) valores tabelados de f_w para os diferentes tipos de sistemas de rega.

Quando toda a superfície do solo se encontra humedecida, como no caso da ocorrência de precipitação ou quando se utilize rega por aspersão, a fracção de solo humedecida e exposta, f_{ew} , iguala $(1-f_c)$, em que f_c é a fracção da superfície do solo efectivamente coberta pela vegetação. Para sistemas de rega em que apenas uma fracção da superfície do solo é humedecida o valor de f_{ew} encontra-se limitado por f_w . (Fig. 4.9) A fracção do solo humedecido exposto à radiação solar directa (f_{ew}) é dada por (Allen et al., 1998):

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w) \quad (4.26)$$

onde:

$1-f_c$ – fracção do solo exposta à radiação solar directa [0.01-1];

f_w – fracção do solo humedecida pela rega ou precipitação [0.01-1].

No caso da rega localizada a maioria do solo humedecido pela rega encontra-se sombreado pela copa da cultura. O valor de f_w tem que ser reduzido para cerca de metade ou de um terço em relação aos valores de referência tabelados em Allen et al. (1998, 2007). Assim,

para a rega localizada é recomendado que f_w seja calculada de acordo com a seguintes expressão:

$$f_{ew} = f_w \left[1 - \left(\frac{2}{3} \right) f_c \right] \quad (4.27)$$

O valor da fracção de cobertura f_c pode ser estimado a partir do K_{cb} através das seguinte relação (Allen et al., 1998):

$$f_c = \left(\frac{K_{cb} - K_{cmin}}{K_{cmax} - K_{cmin}} \right)^{(1+0.5h)} \quad (4.28)$$

onde:

f_c – fracção efectiva da superfície do solo coberta pela vegetação [0-0.99];

K_{cmin} – valor de K_c para solo seco e nu [$\approx 0.15-0.20$];

h – altura média da planta [m].

O valor de K_{cb} refere-se ao valor ajustado para o dia em que se realiza o cálculo. A diferença $K_{cb} - K_{cmin}$ deve ser limitada a ≥ 0.01 , por razões de estabilidade numérica. O valor de f_c aumenta à medida que o valor de K_{cb} cresce até atingir o seu valor máximo, decrescendo depois durante o período final à medida que o valor de K_{cb} se reduz durante a senescência (Allen et al., 1998, 2007).

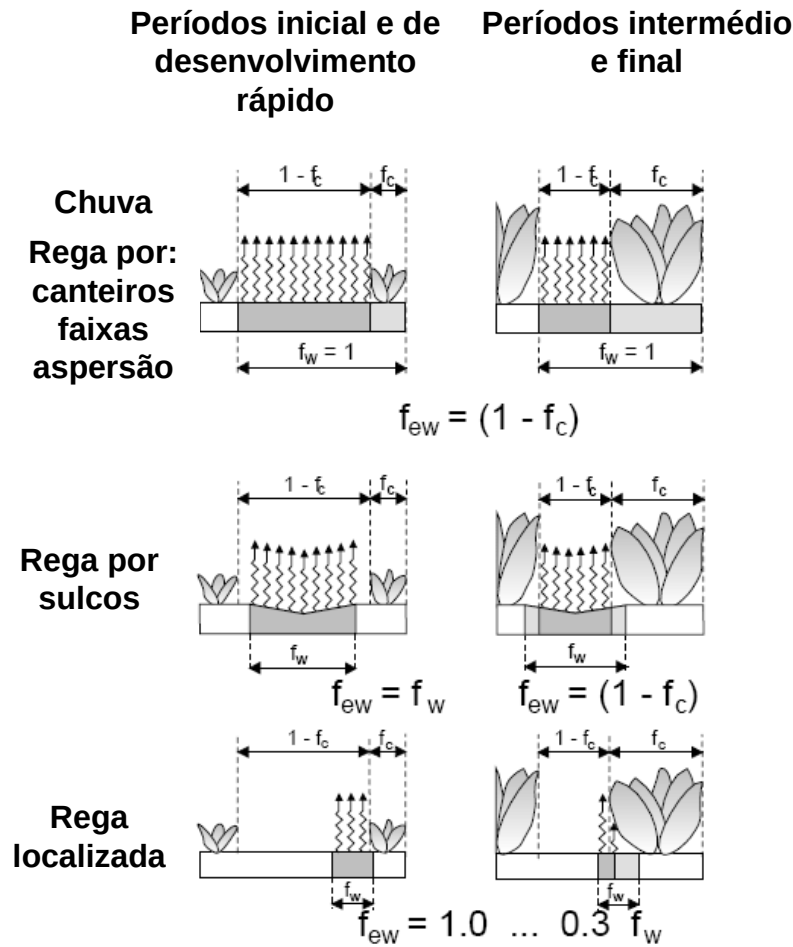


Figura 4.9 - Representação esquemática da determinação da fracção de solo humedecido exposto à radiação solar (f_{ew}) como função da fracção de cobertura (f_c), da fracção humedecida (f_w) e do tipo de sistema de rega. (adaptado de Allen et al., 1998).

Balanço hídrico da camada superficial do solo

A estimação do K_e requer a realização de um balanço hídrico diário da camada superficial do solo para a fracção f_{ew} (Fig. 4.10). Allen et al. (1998) propõem uma equação para o cálculo do balanço hídrico na camada superficial do solo em que o volume de água armazenado é expresso em termos de extracção (D_e - *depletion*). No entanto, no modelo IrrigRotation, o volume de água armazenado no solo é expresso em termos de reserva de água no solo (Teixeira, 1989; Choisnel, 2006). Substituindo a extracção pela reserva na equação posposta por Allen et al. (1998) obtém-se:

$$R_{e,i} = R_{e,i-1} + (P_i - Es_i) + \frac{Rg_i}{f_w} - \frac{E_i}{f_{ew}} - T_{ew,i} - Dr_{e,i} \quad (4.29)$$

onde:

$R_{e,i}$ – reserva de água armazenada na fracção f_{ew} da camada superior do solo no dia i [mm];

$R_{e,i-1}$ – reserva de água armazenada na fracção f_{ew} da camada superior do solo no dia $i-1$ [mm];

P_i – precipitação no dia i [mm];

Rg_i – rega, lâmina média de água aplicada considerando a totalidade da área da parcela [mm];

Es_i – escoamento superficial no dia i [mm];

E_i – evaporação ($E_i = K_e ET_o$) [mm dia⁻¹];

$T_{ew,i}$ – transpiração a partir da fracção f_{ew} no dia i [mm];

$Dr_{e,i}$ – drenagem a partir da camada superficial no dia i [mm];

O valor de R_e varia entre $0 \leq R_e \leq TEW$. A dotação de rega Rg_i (mm) é dividida por f_w para ajustar a altura de água infiltrada à fracção da superfície do solo humedecida pela rega. De modo idêntico, E_i é dividida por f_{ew} porque se assume que toda a evaporação ocorre a partir da fracção f_{ew} do solo. A quantidade de água retirada pela transpiração a partir da camada evaporativa do solo é muito pequena, excepto para culturas com raízes pouco profundas, e pode ser ignorada, ficando $T_{EW} = 0$ (Allen et al., 1998).

Na implementação do método dos K_c de base numa aplicação informática os procedimentos de cálculo de $K_{cb} + K_e$ devem ser executados segundo a seguinte ordem definida por Allen et al. (1998): K_{cb} , h , $K_{c\ max}$, f_c , f_w , f_{ew} , K_r , K_e , E , Dr_e , R_e , Rg , K_c e ET_c .

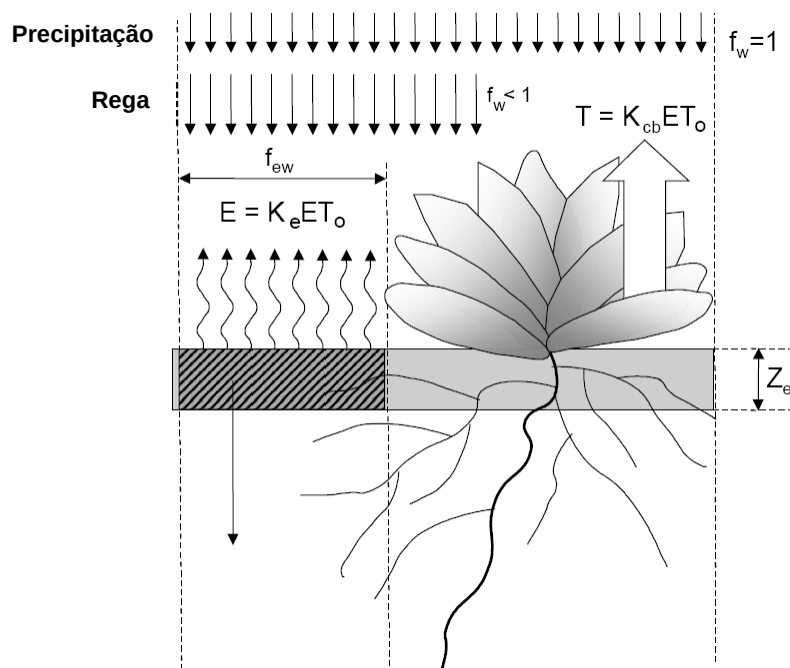


Figura 4.10 - Balanço hídrico da camada evaporativa do solo (adaptado de Allen et al., 1998)

4.2.5.2. Ajustamento da evapotranspiração cultural

O termo evapotranspiração cultural (ET_c) corresponde, no âmbito deste trabalho, à evapotranspiração da cultura, nas condições hídricas prevaletentes, dependendo o seu valor da reserva de água no solo na zona radicular. Assim, a ET_c é utilizada tanto com o significado de ET_c como de ET_c ajustada, tal como descrito em Allen et al. (1998).

Quando o valor da reserva (R) se situa na zona de conforto hídrico (Fig. 4.7), não existem restrições de água e a ET_c ocorre à sua taxa máxima, atingindo-se a produção máxima da cultura. Quando a reserva de água no solo atinge valores inferiores a um determinado limiar (LRFU) entra-se na zona de carência hídrica, onde a ET_c é inferior ao valor máximo, diminuindo à medida que o solo perde água. O limiar LRFU corresponde ao valor da reserva, R_{min} , que representa o volume de água no solo abaixo do qual a ET_c se reduz devido ao stress hídrico (Fig. 4.11) (Teixeira, 1989; Allen et al., 1998; Fernando, 1998; Pereira, 2004).

A influência do stress hídrico sobre a evapotranspiração das culturas é descrita através da redução do valor do coeficiente cultural basal (K_{cb}) multiplicando-o pelo coeficiente de stress hídrico (K_s) de acordo com a equação 4.5, já referida (Allen et al., 1998).

No modelo IrrigRotation, assume-se a hipótese de linearidade para a variação da ET_c em função da reserva de água no solo tal como descrito por Teixeira (1989) e Allen et al. (1998, 2007) e que se encontra representada na Figura 4.11.

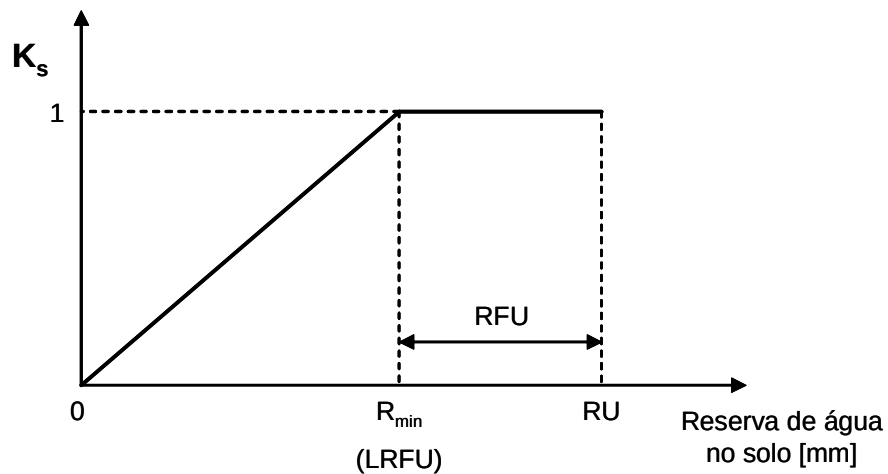


Figura 4.11 - Coeficiente de stress hídrico e o ajustamento da ET_c em função da reserva de água no solo (adaptado de Fernando, 1998).

O cálculo do valor de K_s é efectuado de acordo com o valor da reserva de água no solo (Teixeira, 1989; Allen et al., 1998), segundo as seguintes expressões:

$$K_s = 1 \quad \text{para } R \geq R_{min} \quad (4.30a)$$

$$K_s = \frac{R}{R_{min}} = \frac{R}{(1-p)RU} \quad \text{para } R < R_{min} \quad (4.30b)$$

onde:

K_s – coeficiente de stress hídrico do solo;

R - reserva de água no solo no dia considerado [mm];

R_{min} – reserva correspondente ao limite da reserva facilmente utilizável (LRFU). [mm];

RU - reserva utilizável do solo [mm];

p - fracção de água facilmente utilizável.

4.2.5.3. Procedimento de cálculo da ET_c implementado

O procedimento de cálculo utilizado no modelo IrrigRotation para calcular a ET_c com base na metodologia dos coeficientes culturais de base, é representado na Figura 4.12 tal como proposto por Allen et al. (1998), e pode ser descrito em sete fases.

1. Aquisição e recolha dos dados do solo, clima, cultura e sistema de rega. Os dados climáticos incluem a estimativa da ET_o , e os dados da cultura incluem a identificação da duração dos 4 períodos de desenvolvimento das culturas e a selecção do K_{cb} tabelado correspondente;
2. Ajustamento do K_{cb} tabelado às condições climáticas locais. Este ajustamento é efectuado em função da média da velocidade do vento (U_2) e da média da humidade relativa mínima (RH_{min}) para o período de desenvolvimento da cultura considerado (período intermédio e período final) utilizando a equação 4.20.
4. Construção da curva do coeficiente cultural basal, de modo a permitir a determinação dos valores diários do K_{cb} para qualquer período da cultura;
5. Cálculo dos valores diários de K_e para estimar a evaporação do solo (E). Para cada dia é necessário calcular o limite superior do K_c ($K_{c\ max}$) e estimar as fracções de cobertura do solo (f_c), de solo molhado (f_w) e de solo molhado e exposto (f_{ew}). É realizado um balanço hídrico diário na camada evaporativa do solo de modo a determinar o coeficiente de redução da evaporação (K_r) que permitirá obter o valor do coeficiente de evaporação K_e ;
6. Simulação do balanço hídrico do solo para a zona de enraizamento, com um passo de tempo diário, de modo a estimar o valor do coeficiente de stress hídrico (K_s). Cálculo do valor do K_c utilizando a equação 4.4;
7. Cálculo da ET_c diária, multiplicando o valor da ET_o pelo K_c (Eq. 4.3).

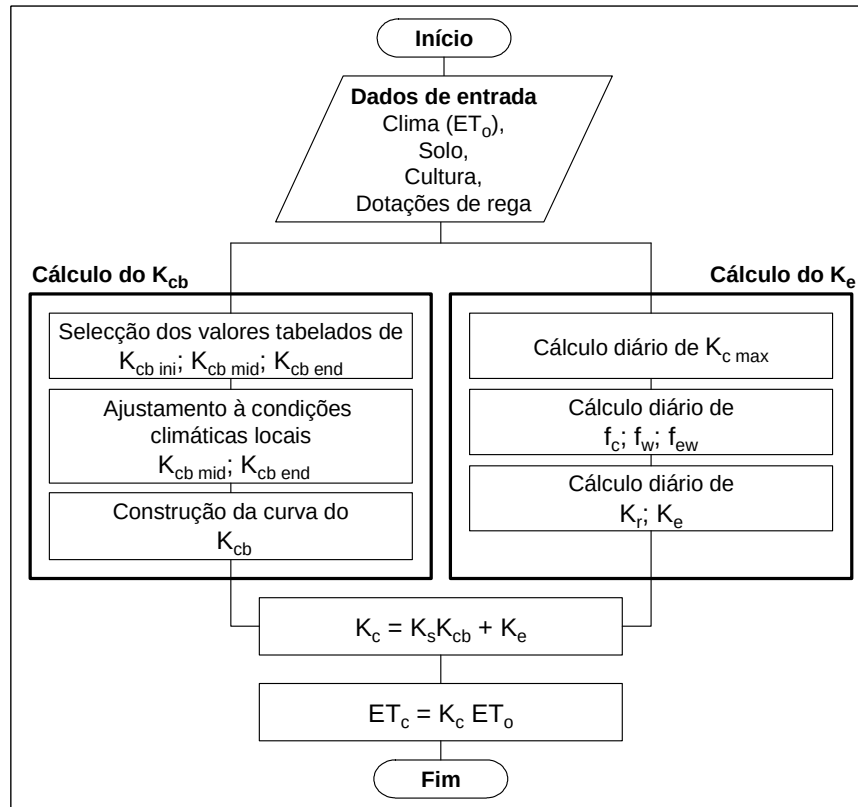


Figura 4.12 – Algoritmo de cálculo da ET_c implementado no *software* IrrigRotation, de acordo com a metodologia dos K_c de base proposta por Allen et al. (1998).

4.2.6. A utilização do balanço hídrico na gestão da rega

4.2.6.1. Determinação das necessidades de rega

O modelo de simulação do balanço hídrico desenvolvido tem como objectivos a estimação das necessidades de rega das culturas. Assim, nesta secção descrevem-se os procedimentos de cálculo das necessidades de rega. Quando se pretenda calcular as necessidades de rega a equação do balanço hídrico (4.19) apresentada anteriormente assume a seguinte forma (Teixeira, 1989):

$$R_i = R_{i-1} + Pe + Vr - ET_c + Rg - Dr \quad (4.31)$$

todos os termos desta equação têm a mesma unidade [mm] e referem-se à profundidade radicular Z_r . Quando o valor da reserva, para o dia i , (R_i) atinge um dado limiar é aplicada uma dotação de rega que irá repor o volume de água no solo num determinado nível, eventualmente à capacidade campo (CC). A selecção do limiar da reserva de água no solo que desencadeia a rega assim como o volume de água a aplicar são definidos pelo esquema de rega que se descreve mais à frente na secção 4.2.6.2.

Integrando os valores de Rg_i ao longo de todo o ciclo cultural obtêm-se as necessidades de rega de uma determinada cultura (NRg) (vd. início do capítulo 4):

$$NRg = ET_c - Pe - Vr - \Delta R + Dr \quad (4.32)$$

As necessidades totais de rega (Rg_T) obtêm-se adicionando às necessidades de rega NRg as quantidades de água necessárias à lavagem de sais (FL) e para compensar as perdas relativas à eficiência global da rega (E_f). Assim Rg_T é calculada através da seguinte equação (Pereira, 2004; Allen et al., 2007):

$$NRg_T = \frac{NRg}{(1 - FL)E_f} \quad (4.33)$$

sendo:

NRg_T – necessidades totais de rega [mm];

NRg - necessidades de rega [mm];

FL – fracção de lavagem [fracção];

E_f – eficiência global da rega [fracção].

A fracção de lavagem corresponde ao volume de água que deve ser adicionado às necessidades líquidas de rega, de modo a que os sais acumulados no perfil do solo sejam arrastados pela percolação profunda para fora da zona de enraizamento (Pereira, 2004). Geralmente a fracção de lavagem (FL) é considerada apenas quando a uniformidade de aplicação é elevada. Em condições de baixa a média uniformidade, a percolação que ocorre acidentalmente devido à falta de uniformidade é suficiente para preencher a FL (Allen et al., 2007).

Eficiência global da rega (E_f) caracteriza as perdas de água que ocorrem no sistema de transporte e distribuição (rede de rega) e no sistema de rega instalado na parcela. As perdas no sistema de distribuição incluem fugas e infiltração ao longo da rede de rega. As perdas no sistema de rega incluem escoamento superficial e percolação profunda (Allen et al., 2007). À escala de uma rede de rega, E_f é composto pela eficiência de aplicação (E_a), pela eficiência de distribuição (E_d) e pela eficiência de transporte (E_t), sendo $E_f = E_a E_d E_t$, em que Rg_T representa as necessidades totais de água que devem ser satisfeitas na origem. Ao nível da parcela E_f corresponde apenas à eficiência de aplicação do sistema de rega ($E_f = E_a$).

Neste caso Rg_T corresponde ao volume de água que o agricultor deverá aplicar com o seu sistema de rega para satisfazer as necessidades hídricas da cultura (Pereira, 2004).

4.2.6.2. Condução da rega

Para além da determinação das necessidades de rega ao longo da campanha de rega a simulação do balanço hídrico pode ser utilizada para determinar a data da rega e a respectiva dotação (Fernando, 1998). A utilização do balanço hídrico para condução da rega requer a selecção de um determinado esquema de rega. Segundo Teixeira (1989), o esquema de rega define-se como o conjunto de informações referentes ao objectivo da rega, à oportunidade de aplicação e ao volume de rega que é fornecido ao solo. Para a caracterização do esquema de rega é necessária a consideração das variáveis oportunidade de rega (Or) que determina o instante em que a rega deverá ser iniciada e a dotação de rega (DRg), que define qual o volume de água a ser fornecido à cultura (Teixeira, 1989).

No modelo IrrigRotation consideraram-se os seguintes esquemas de rega: i) não regar; ii) regar visando o conforto hídrico das culturas; iii) regar entre dois limites seleccionados, o nível superior de gestão (nsg) e o nível inferior de gestão (nig); iv) regar com restrições (intervalo mínimo de dias entre regas, intervalo de dias entre regas constante, volume máximo de rega e dotação de rega constante) (ver secção 6.2.3.2). Estas opções de rega podem dividir-se genericamente em três esquemas de rega principais, consoante os valores da reserva de água no solo considerados para a definição da oportunidade de rega e para o cálculo da dotação de rega a aplicar.

I) Condução da rega visando o conforto hídrico das culturas.

No esquema de rega visando o conforto hídrico das culturas, a condução da rega é realizada de forma a evitar que ocorra stress hídrico. A oportunidade de rega (Or) é definida pelo valor da reserva de água no solo correspondente ao limite da reserva facilmente utilizável ($LRFU$), devendo iniciar-se a rega sempre que o teor de água no solo atinja este limite (Teixeira, 1989). Assim, o valor de R_i para o qual a rega deverá ser desencadeada é dado por:

$$R_i = LRFU = RU(1 - p) \quad (4.34)$$

sendo p a fracção da RU que pode ser extraída da zona radicular sem que ocorra stress hídrico.

A dotação de rega (DRg), expressa em altura de água [mm], para este esquema de rega corresponde ao volume de água necessário para preencher totalmente a reserva utilizável do solo (RU) (Teixeira, 1989). Assim, a dotação de rega (DRg) a aplicar para repor o solo à capacidade de campo é dada por:

$$DRg = RU - LRFU \quad (4.35)$$

A dotação de rega calculada deste modo corresponde ao maior volume de água que é possível aplicar no solo, preenchendo totalmente a reserva utilizável até à profundidade Z_r , sem que ocorra percolação profunda. No entanto poderão definir-se dotações de rega mais pequenas impondo um limite superior de água no solo inferior à capacidade de campo, como no caso do esquema de rega descrito no próximo ponto (Teixeira, 1989; Pereira, 2004).

II) Condução da rega com fixação da oportunidade e quantidade de rega.

Conforme os objectivos de gestão da rega, esta poderá ser conduzida fixando dois limiares de gestão definidos pelo utilizador, entre os quais se pretende que o volume de água armazenando no solo varie. A oportunidade de rega (Or) é assim fixada como uma fracção da reserva utilizável (RU), definindo-se o nível inferior de gestão (nig). O nível inferior de gestão² (nig) define o limite inferior para a reserva de água no solo (R) a partir do qual se inicia a rega, devendo ser aplicada uma dotação de rega até ao nível superior de gestão (nsg) (vd. Fig. 4.3) (Teixeira, 1989). Recorrendo ao nig, o momento em quem se deverá aplicar a dotação de rega é determinado quando se atinge o valor da reserva R_i dado por:

$$R_i = nig \quad (4.36)$$

onde:

nig –nível inferior de gestão [mm];

Para determinados sistemas de rega, como as rampa pivotantes ou os sistemas de rega localizada, a rega deverá ser conduzida de forma a que se apliquem pequenas dotações de rega de alta frequência, podendo fixar-se um nível superior de gestão (nsg) abaixo da capacidade de campo e um nível inferior de gestão (nig) que permitam calcular pequenas

² O nível inferior de gestão (nig) relaciona-se com o deficit permitido em termos de gestão (MAD - *management allowed depletion*) definido por Martin et al. (1990) segundo a equação $nig = RU - MAD$ (Pereira, 2004).

dotações. A determinação da dotação de rega a aplicar (DRg) de modo a preencher o volume da reserva de água no solo definida pelos dois limites de gestão nig e nsg é realizada do seguinte modo:

$$DRg = nsg - nig \quad (4.37)$$

em que:

DRg – dotação de rega [mm];

nsg – nível superior de gestão [mm];

nig – nível inferior de gestão [mm].

III) Condução da rega deficitária.

A condução da rega deficitária é semelhante ao esquema de rega descrito anteriormente no ponto II) mas em que se adopta um nível inferior de gestão (nig) inferior ao LRFU. Neste esquema de rega sujeita-se a cultura a um determinado nível de carência hídrica, com prejuízo na sua produção, sendo necessário ajustar a evapotranspiração cultural (ET_c) em função da reserva de água no solo de acordo com a metodologia descrita no ponto 4.2.5.2.

De facto, o nível inferior de gestão (nig) pode ser definido para um limiar diferente do LRFU consoante os objectivos de gestão da rega. Se o objectivo da rega é o de reduzir o risco de ocorrência de stress hídrico então $nig > LRFU$, caso que acontece normalmente para culturas de elevado rendimento, em que se pretende evitar a ocorrência de stress hídrico. Quando as disponibilidades em recursos hídricos sejam insuficientes para satisfazer a totalidade das necessidades hídricas da cultura ou quando se pretenda intencionalmente provocar stress hídrico num determinado período da cultura então $nig < LRFU$ (Pereira, 2004). Sendo de salientar que a rega deficitária resulta na redução das necessidades de rega das culturas através da imposição de um determinado nível de stress hídrico.

4.2.7. Balanço hídrico do solo contínuo no tempo

A simulação do balanço hídrico do solo de forma contínua no tempo permite reduzir a incerteza relativamente ao valor da reserva de água no solo (R) no início da simulação da campanha de rega. Possibilita, também, efectuar a quantificação das necessidades de rega das culturas ao longo de uma rotação de culturas, contabilizando a quantidade de água que é armazenada abaixo da zona radicular durante as culturas com raízes menos profundas e

que será mobilizada pela cultura com a raiz mais profunda da rotação, o que não acontece se o balanço tiver sido feito apenas para uma cultura.

Uma das maiores fontes de incerteza na utilização de modelos de cálculo de balanço hídrico prende-se com a dificuldade em estimar o volume de água armazenada no solo no início da simulação. Por exemplo, nos solos argilosos de Beja com uma reserva utilizável (RU) de cerca de 200 mm/m (Cardoso, 1965), e para a cultura de milho com uma necessidade de rega de cerca de 650 mm (COTR, 2010), esta incerteza pode representar num caso extremo até 30% das necessidades de rega, por cada campanha de rega. Assim, com esta simulação contínua no tempo o erro inicial é diluído ao longo da série temporal de dados, perdendo a sua relevância. Deve notar-se que a magnitude deste erro cresce com o valor da RU, e portanto a redução do erro é mais relevante quanto maior for o valor da RU.

Um modelo de balanço hídrico contínuo no tempo é particularmente adequado em estudos de alterações climáticas. O cálculo do balanço hídrico após a colheita de uma dada cultura, durante o período sem cultura (*nongrowing season*), permite avaliar a contribuição das chuvas de Outono, Inverno e Primavera sobre a reserva de água no solo, R, potencialmente disponível no início da campanha de rega. Assim, é possível verificar se existe um efeito de “secura” do ano anterior, que transita para a presente campanha de rega e que possa fazer com que não se atinja a capacidade de campo no final do Inverno, especialmente nos solos com maior reserva utilizável como é o caso dos solos argilosos. O conhecimento do nível da reserva de água no solo no início da campanha de rega permite ainda evitar a ocorrência de drenagem profunda após as primeiras regas (Choisnel, 2006).

A modelação do balanço hídrico do solo de uma forma contínua no tempo torna necessário estimar a ET_c tanto para as diferentes culturas da rotação como para o período sem cultura entre elas. Allen et al. (1998) define o período sem cultura (*nongrowing season*) como o intervalo de tempo durante o qual não existe qualquer cultura semeada ou plantada no terreno.

A gama de valores que ET_c pode tomar durante o período sem cultura depende do tipo e das características da cobertura do solo. Em condições de solo nu o valor do K_c é bastante influenciado pela quantidade e frequência da precipitação. Neste caso a metodologia dos coeficientes culturais de base é mais indicada para estimar a ET_c uma vez que permite estimar com exactidão a evaporação da superfície do solo (Allen et al., 1998, 2007). A utilização dos coeficientes culturais de base requer a realização de um balanço hídrico do solo com um passo de tempo diário. Nas condições de solo nu, a camada evaporativa do solo poderá atingir teores de humidade muito baixos (até $0.5\theta_{CE}$), durante longos períodos em que não ocorra precipitação (Allen et al., 1998).

Quando a superfície do solo se encontra coberta por resíduos da cultura, ou por vegetação seca, o seu comportamento será semelhante ao de uma superfície coberta por *mulch*. A evaporação a partir da vegetação morta, quando esta se encontre humedecida após a ocorrência de precipitação, pode ser substancial durante alguns dias após a ocorrência do episódio de humedecimento. O valor de f_c deverá ser igual a zero para reflectir a falta de cobertura vegetal activa (a não existência de transpiração) e f_w deverá ser igual a 1 para reflectir o humedecimento de toda a superfície do terreno. A vegetação morta ou o *mulch* produzem um efeito de redução da evaporação do solo. Nestas condições o volume máximo de água que a evaporação consegue extrair será inferior ao total de água evaporável do solo (TEW). É assim necessário reduzir o valor de TEW em 5% por cada 10% de superfície do solo que se encontra coberta pela vegetação morta (Allen et al., 1998).

A superfície do solo, após a colheita, pode encontrar-se coberta por vegetação espontânea, ou infestantes que entretanto germinaram. Neste caso o valor do K_c poderá ser estimado de acordo com o índice de área foliar (LAI) ou com a fracção de cobertura do solo pela vegetação (f_c). O grau de cobertura do solo pela vegetação dependerá do grau de infestação, da densidade da vegetação, de frequência da mobilização do solo e aplicação de herbicidas, da ocorrência de geadas e das disponibilidades de água no solo. O valor do K_{cb} durante o período sem cultura pode ser calculado, de acordo com a estimativa da fracção da superfície do solo coberta pela vegetação, através da seguinte equação (Allen et al., 1998):

$$K_{cbmid} = K_{cmin} + (K_{cbfull} - K_{cmin}) \left(\min \left(1, 2f_c, (f_{ceff})^{\left(\frac{1}{1+h}\right)} \right) \right) \quad (4.38)$$

onde:

$K_{cb mid}$ – valor estimado para o K_{cb} durante o período intermédio quando a densidade das plantas ou LAI são inferiores aos valores atingidos nas condições de pleno desenvolvimento;

$K_{cb full}$ – valor estimado para o K_{cb} no período intermédio (quando as plantas atingem o pleno desenvolvimento ou a altura máxima) para vegetação que cubra totalmente o solo ou em que $LAI > 3$;

$K_{c min}$ – valor mínimo do K_c para solo nu ($K_{c min} \approx 0.15-0.20$);

f_c – fracção do solo coberta pela vegetação, observada na vertical [0.01-1];

$f_{c eff}$ – fracção efectiva do solo sombreada pela vegetação [0.01-1];

h – altura das plantas [m].

A superfície do solo poderá também estar coberta por gelo ou neve, conforme descrito em Allen et al. (1998, 2007), no entanto a sua descrição fica fora do âmbito desta tese uma vez que essas condições não se aplicam à região do Alentejo.

4.3. Rotação de culturas e a gestão da água no solo

4.3.1. Introdução

O modelo IrrigRotation desenvolvido neste trabalho realiza a simulação do balanço hídrico para uma rotação de culturas. Assim, é pertinente descrever as principais características da rotação de culturas numa perspectiva da gestão da água do solo e da sua influência sobre o conforto hídrico das culturas e as necessidades de rega.

A rotação de culturas consiste na sucessão de culturas numa dada área, segundo uma determinada ordem que se repete de forma cíclica no tempo (Sheng, 1989; Carvalho e Azevedo, 1991; Wibberley, 1996; Duarte Júnior e Coelho, 2010). O conceito de rotação encontra-se ligado ao conceito de afolhamento, consistindo o afolhamento na divisão do terreno em diversas folhas. O número de folhas é geralmente igual ao número de anos da rotação, de modo a que em cada ano se possam cultivar as várias culturas que compõem a rotação (Carvalho e Azevedo, 1991).

A técnica da rotação de culturas foi desenvolvida como a única forma de manter a fertilidade dos solos numa época em que ainda não existiam adubos nem pesticidas (Carvalho e Azevedo, 1991). Nestas condições, a produção continuada da mesma cultura ao longo do tempo, no mesmo terreno, leva à redução do potencial produtivo do solo e à quebra da produção da cultura. Esta diminuição deve-se ao esgotamento dos nutrientes disponíveis no solo e à dificuldade em controlar as pragas e doenças bem como em controlar o desenvolvimento das infestantes (Carvalho e Azevedo, 1991).

A rotação de culturas é uma forma eficaz de gerir o nível de fertilidade do solo, permitindo melhorar o teor de matéria orgânica e a estrutura do solo, reduzir a incidência de pragas e doenças e controlar o desenvolvimento das infestantes. Contribuindo, assim, para a conservação do solo e para o aumento das produções, reduzindo o impacte ambiental da actividade agrícola. (Sheng, 1989; Coelho, 2008).

Carvalho e Azevedo (1991) referem que quando as condições ambientais são desfavoráveis os agricultores nas zonas de menor potencial produtivo tendem a aumentar a heterogeneidade dos sistemas agrícolas, através da diversificação das culturas utilizadas, para reduzir os custos, compensando assim os baixos rendimento das culturas. A estratégia de diversificação das culturas em que se utiliza um sistema produtivo composto por um

conjunto de culturas com diferentes épocas de crescimento e sensibilidades ao deficit hídrico permite distribuir para um dado ano o risco de falha total da cultura e de perda de rendimento (Sheng, 1989; Lockie et al., 1995; Castellazzi et al., 2008).

Em Portugal as condições ambientais impõem limitações à produção de um grande número de culturas em regime de sequeiro, prendendo-se estas limitações com a distribuição anual da precipitação e da temperatura e com o baixo potencial produtivo que a maioria dos nossos solos apresenta (Carvalho e Azevedo, 1991). Os diferentes cenários de alterações climáticas apontam para um agravamento das limitações já existentes para o Sul de Portugal, sendo por isso bastante oportuno a utilização da rotação de culturas para minimizar os riscos associados à mudança climática.

Têm sido desenvolvidos diversos modelos e representações matemáticas das rotações de culturas com o objectivo de apoiar a criação e a selecção da melhor combinação de culturas. Estes modelos permitem a criação de rotações, a partir de uma lista predefinida de culturas, através da utilização de um conjunto de regras e de algoritmos que permitem criar diferentes alternativas, rejeitando as que são inviáveis (Dogliotti, et al., 2003; Detlefsen e Jensen, 2007; Castellazzi et al., 2008).

4.3.2. Principais regras na definição de rotações.

Na definição da sequência de culturas que compõem uma rotação é necessário ter em conta diversos parâmetros, sendo que se podem apontar os seguintes como os mais importantes (Lopes Aleixo, 1986):

- Período de recorrência das culturas;
- Data de entrada e de saída das culturas do terreno;
- Relações entre precedente e sequente cultural;
- Características do sistema radicular.

O primeiro parâmetro é o período de recorrência das culturas que indica a periodicidade da rotação. Esta restrição é devida à necessidade de quebrar o ciclo das pragas e doenças, de modo a evitar que estas disponham de condições para se desenvolverem e reproduzirem. Para a generalidade das culturas considera-se normalmente um período de recorrência de quatro anos (Lopes Aleixo, 1986; Castellazzi et al., 2008).

O segundo parâmetro relaciona-se com o ciclo de desenvolvimento das culturas ao longo do ano, sendo que este ciclo é dependente das interacções entre a cultura e o clima (Castellazzi et al., 2008). Entre a data de saída do terreno de uma determinada cultura e a

data de entrada da seguinte tem que existir um intervalo de tempo suficiente para que se possam realizar os trabalhos para a instalação da nova cultura, e para que o atraso na colheita de uma cultura não vá comprometer a sementeira da seguinte (Lopes Aleixo, 1986).

O terceiro parâmetro diz respeito ao precedente e sequente entre duas culturas consecutivas na rotação, ou seja com os benefícios ou riscos associados com uma cultura ser cultivada imediatamente a seguir a outra (Lopes Aleixo, 1986; Castellazzi et al., 2008). Assim, na definição de uma rotação deve-se ter o cuidado de que entre duas culturas consecutivas não exista afinidade para pragas e doenças; não se facilite a disseminação de infestantes devido uso de herbicidas com a mesma selectividade e que o precedente cultural não deixe no solo substâncias tóxicas que possam afectar a próxima cultura (Lopes Aleixo, 1986). Os benefícios do precedente cultural podem ser um aumento da disponibilidade de azoto no solo, um maior teor de matéria orgânica, maior disponibilidade de água no solo, redução de pragas e doenças e redução na competição das infestantes (Castellazzi et al., 2008).

O quarto parâmetro corresponde às características do sistema radicular das culturas, sendo que as operações de mobilização do solo e de fertilização devem ser definidas para o conjunto da rotação, tendo em conta as diferenças existentes entre o sistema radicular das diversas culturas que a compõem (Lopes Aleixo, 1986). Na preparação do solo deve-se colocar em primeiro lugar a cultura que precise de um trabalho mais cuidado ou que apresente a menor capacidade de penetração. Em segundo lugar virá uma cultura com um sistema radicular profundante e com poder de penetração que permita aproveitar a preparação solo realizada anteriormente. Por último deve utilizar-se uma cultura com sistema radicular mais superficial em que apenas seja necessário realizar um trabalho superficial de mobilização do solo, tal como a escarificação ou a gradagem. Assim, nas rotações devem-se realizar trabalhos de mobilização profunda do solo para a primeira cultura e para as restantes apenas trabalho superficial (Lopes Aleixo, 1986). Relativamente à fertilização deve iniciar-se a rotação com uma cultura que deixe no solo uma grande quantidade de resíduos, restituindo assim nutrientes ao solo, de modo a que as culturas seguintes possam beneficiar da adubação realizada para a primeira cultura. Devem-se alternar leguminosas com outras culturas uma vez que as leguminosas ao fixarem o azoto atmosférico permitem que este elemento esteja disponível para as outras culturas (Lopes Aleixo, 1986; Carvalho e Azevedo, 1991). Também se deverá alternar culturas com raízes mais superficiais com culturas com raízes mais profundas de modo a recuperar os nutrientes que se encontrem em camadas mais profundas do solo (Lopes Aleixo, 1986).

Relativamente ao controlo de infestantes deve-se escolher a sequência de culturas de modo a que os trabalhos de mobilização do solo ao longo da rotação sejam realizados em

diferentes épocas do ano, alternando culturas de Outono/Inverno com culturas de Primavera/Verão (Lopes Aleixo, 1986).

Pode-se ainda referir que os agricultores apresentam geralmente uma quantidade limitada de maquinaria e de mão-de-obra e por isso procuram distribuir o trabalho ao longo do ano através do cultivo de um conjunto de culturas, de modo a reduzir os períodos mortos e outros em que existem picos de trabalho. Assim, é necessário ter em conta as disponibilidades em equipamento e mão-de-obra na selecção do tipo e proporção das culturas utilizadas (Lockie et al., 1995; Castellazzi, 2008).

De uma forma resumida, pode afirmar-se que no estabelecimento de uma rotação deve-se procurar aumentar a heterogeneidade do sistema agrícola alternando culturas de diferentes famílias, com diferentes exigências nutricionais e susceptibilidades a pragas e doenças, e cujas épocas de sementeira ou plantação ocorram em diferentes alturas do ano (Coelho, 2008).

4.3.3. Exemplos de rotações para a região do Alentejo

O trabalho realizado incide sobre a região do Alentejo e assim sendo apresentam-se dois exemplos de rotações de culturas utilizadas nesta região. Em primeiro lugar apresenta-se a rotação típica que é praticada nos Barros de Beja e que consiste na sucessão das seguintes culturas (Carvalho e Azevedo, 1991):

(Alqueive de Verão – Girassol) – Trigo – Cevada.

O alqueive consiste num conjunto de operações de mobilização do solo que têm como objectivo o controlo das infestantes (Carvalho e Azevedo, 1991). Esta é uma rotação tradicionalmente de sequeiro, apesar de actualmente a cultura do girassol ser muitas vezes regada.

As rotações de sequeiro na região mediterrânica começam com uma cultura de Primavera cujo ciclo cultural se desenvolve durante um período caracterizado por uma precipitação reduzida e por elevados valores de evapotranspiração, ficando deste modo a cultura sujeita a condições de deficit hídrico. Assim, no caso do sequeiro a única forma de atenuar, o stress hídrico a que cultura estará sujeita é a preparação do solo de uma forma mais cuidada e com uma certa antecedência relativamente à data de sementeira de modo a permitir o armazenamento de água no solo, durante o Inverno e início da primavera, e a favorecer o desenvolvimento da raiz em profundidade (Lopes Aleixo, 1986).

Uma rotação de regadio com muito interesse para região do Alentejo é a seguinte (Coelho, 2008):

Beterraba sacarina – Milho – Tomate – Trigo.

Esta é uma rotação que permite aos agricultores obter elevados rendimentos. No entanto, a cultura da beterraba sacarina não se produz neste momento em Portugal, apesar de num passado recente ter sido bastante cultivada no Alentejo com bons resultados para os agricultores. Em alternativa à cultura da beterraba pode-se utilizar nesta rotação a cultura do melão (comunicação oral, Lopes Aleixo, 2011). Nas rotações de regadio é bastante vantajosa a introdução da cultura do trigo visto que é uma cultura que pode atingir produções elevadas com uma ou duas regas de complemento, com a vantagem adicional de quebrar o ciclo cultural da rotação (Lopes Aleixo, 1986). O tomate é uma cultura de regadio que possui uma profundidade de enraizamento inferior à do trigo o que permite armazenar água no solo nos horizontes compreendidos entre as duas profundidades das raízes. Em solos relativamente profundos e com uma boa reserva utilizável como os Barros Pretos de Beja (Cardoso, 1965) a cultura do trigo ao ter uma raiz mais profunda passa assim a dispor de uma reserva de água no solo nos horizontes mais profundos, o que lhe permite reduzir as necessidades de rega de complemento ou as perdas de produção no caso de o trigo ser produzido em sequeiro.

4.3.4. As rotações e a gestão da reserva de água no solo

Como exemplo da utilização de rotações de culturas com o objectivo de gerir a água no solo destaca-se o *Dry Farming*, que é um sistema agrícola praticado nas grandes planícies dos Estados Unidos da América, região caracterizada por um clima semi-árido (Carvalho e Azevedo, 1991; Nielsen et al., 2005). Nesta região a precipitação média anual é de cerca de 400 mm, com uma distribuição desigual ao longo do ano, em que cerca de 80% da precipitação anual ocorre durante os meses de Abril a Setembro. Assim, nesta região a disponibilidade de água é o factor mais limitante para a produção de culturas de sequeiro, (Nielsen, 2003; Nielsen et al., 2005).

Como a precipitação anual é normalmente insuficiente para garantir a produção do trigo foi necessário desenvolver um sistema de agricultura (*Dry Farming*) em que se semeia a cultura do trigo ano sim ano não para permitir a recarga da reserva de água no solo durante o pousio trabalhado, o que levou a um aumento da estabilidade das produções (Carvalho e Azevedo, 1991; Nielsen et al., 2005). O sistema tradicional de *Dry Farming* foi desenvolvido nos anos 30 do século XX, como uma estratégia para minimizar o número de anos em que a

cultura do trigo falha devido à escassez da precipitação, consistindo na seguinte rotação (Carvalho e Azevedo, 1991; Nielsen et al., 2002):

Pousio trabalhado – Trigo

No sistema tradicional do *Dry Farming* o crescimento da vegetação espontânea é controlado através do pousio trabalhado (Nielsen, 2003). O pousio trabalhado consiste num conjunto de operações de mobilização do solo que têm como objectivo armazenar no solo a água proveniente da precipitação que ocorre durante um ano. Assim, a água armazenada no solo durante o pousio juntamente com a precipitação do ano seguinte permitem à cultura do trigo dispor da água suficiente para satisfazer as suas necessidades hídricas (Carvalho e Azevedo, 1991; Nielsen, 2003). O solo é mobilizado várias vezes ao longo do ano, sendo os trabalhos de mobilização apenas superficiais para reduzir a espessura do solo sujeita à evaporação (Carvalho e Azevedo, 1991).

Este sistema utiliza tradicionalmente a mobilização do solo para controlar o crescimento das infestantes durante o pousio. No entanto a mobilização do solo degrada os resíduos das culturas da superfície do solo, impedindo que estes reduzam a evaporação do solo e deixando o solo mais vulnerável à erosão do vento. O armazenamento de água no solo durante o pousio é influenciado pelo método de controlo das infestantes e da quantidade de resíduos deixados na superfície do solo. A utilização de herbicidas para controlar as infestantes durante o período de pousio reduziu a mobilização do solo o que permitiu reduzir muitos dos impactes negativos do *Dry Farming*. A utilização dos herbicidas aumentou a eficiência no armazenamento da água da precipitação no solo e permitiu aumentar a intensidade do sistema cultural, tornando possível utilizar rotações em que se cultivam duas culturas em cada três anos e de que são exemplos as rotações Pousio-Trigo-Milho e Pousio-Trigo-Milho painço (Nielsen et al., 2002; 2005).

Nielsen (2003) verificou que as produções do trigo estão relacionadas com o valor da reserva de água no solo na altura da sementeira. A produção aumenta linearmente em função da água armazenada no solo, existindo dois tipos de reposta em função do valor da precipitação anual. Para os anos com precipitações acima da média até ligeiramente abaixo da média, o trigo aumenta significativamente a sua produção em função da água armazenada inicialmente no solo. Quando ocorrem anos muito secos a quantidade de água armazenada no solo não é suficiente para assegurar as necessidades da cultura o que conduz a baixas produções (Nielsen et al., 2002; Nielsen, 2003).

Ainda relativamente à influência do valor da reserva de água no solo imediatamente antes da sementeira sobre a produção das culturas, Lyon et al. (1995) compararam, para as condições das grandes planícies (EUA), a reposta de cinco culturas de Primavera (feijão,

milho painço, girassol, milho e sorgo) para diferentes níveis da reserva de água no solo no ano seguinte à colheita do trigo. Os resultados que obtiveram mostram que o valor da reserva de água no solo no início da cultura está correlacionado com as produções alcançadas pelas culturas do feijão e do milho painço que são culturas com um ciclo curto. Para as culturas com um ciclo mais longo (milho, girassol, e sorgo) existe uma fraca correlação entre a produção das culturas e a quantidade de água armazenada no solo na altura da sementeira. Este resultado é explicado pelo facto de que as culturas com um ciclo curto têm mais água disponível no solo na altura da floração do que as culturas de ciclo longo, o que faz com que para estas ultimas a precipitação ocorrida durante o período da floração seja um factor mais importante na determinação da produção destas culturas, do que valor da reserva de água no solo na altura da sementeira.

O sistema *Dry Farming* é totalmente desaconselhado em regiões com um elevado risco de erosão, a não ser que se utilizem práticas de controlo de erosão, de que é exemplo o *Stubble-Mulch* que consiste em manter a palha dos cereais permanentemente à superfície do terreno para o proteger. Esta técnica é utilizada na região das grandes planícies dos Estados Unidos da América (Carvalho e Azevedo, 1991; Nielsen, 2003). A utilização de herbicidas e da sementeira directa são outras das técnicas utilizadas para prevenir a ocorrência de erosão e permitir aumentar a eficiência do armazenamento no solo, da água proveniente da precipitação (Nielsen et al., 2002; 2005).

Segundo Carvalho e Azevedo (1991) o sistema *Dry Farming* apresenta vários inconvenientes para as condições do Alentejo. O *Dry Farming* exige solos profundos, com uma elevada reserva utilizável, visto que a água armazenada nos primeiros 15 cm do solo sofre perdas por evaporação. A generalidade dos solos desta região são pouco profundos o que leva a que apenas seja possível armazenar uma quantidade muito limitada de água durante o pousio, sendo a maior parte da precipitação perdida por percolação profunda e evaporação do solo. De acordo com Carvalho e Azevedo (1991) não é necessário, nem recomendável, o armazenamento da água da precipitação no solo de um ano para o outro uma vez que a precipitação que ocorre normalmente durante o período de Outono-Inverno é suficiente para repor o teor de humidade do solo à capacidade de campo podendo até provocar encharcamento. Assim, o armazenamento de água no solo de um ano para o outro apenas iria agravar o encharcamento, durante o Inverno, sem qualquer benefício para a cultura. Obviamente que para anos muito secos, o armazenamento de água no solo do ano anterior seria vantajoso para a cultura do trigo, mas no clima mediterrânico não é possível prever com antecedência se o ano será seco ou húmido (Carvalho e Azevedo, 1991). No entanto, num contexto de alterações climáticas em que se aponta para o Sul de Portugal um aumento de temperatura e uma redução da precipitação (Miranda et al., 2006), a

consideração do armazenamento de água no solo, em solos com uma elevada reserva utilizável, tais como os Barros Pretos de Beja, poderá constituir uma interessante ferramenta de adaptação.

4.4. Análise frequencial das necessidades de rega

O projecto de rega é realizado em função das necessidades de rega anuais e das necessidades de rega para o período de ponta, que são os critérios de base de um projecto de rega, sendo necessário associar-lhes uma determinada probabilidade de não excedência (Teixeira, 1989). As necessidades de rega anuais influenciam o tempo anual de operação do sistema e os correspondentes custos do trabalho, água e energia. As necessidades de rega para o período de ponta ditam a capacidade mínima das tubagens e sistemas de bombagem (Allen et al., 2007). Os valores das necessidades de rega anuais e das necessidades de rega para o período de ponta variam de ano para ano em função da variabilidade climática. 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).

Os projectos de rega devem ser calculados com base na simulação do balanço hídrico sequencialmente para uma série de anos, evitando que o dimensionamento dos sistemas de rega seja realizado com base no balanço hídrico do solo em ano médio, ou num ano fictício, em que se utilizam valores da precipitação e da evapotranspiração com uma dada frequência. Esta hipótese não é rigorosa uma vez que geralmente os valores de igual frequência da precipitação e evapotranspiração não ocorrem no mesmo ano (Teixeira, 1989).

Para realizar a análise frequencial é necessário em primeiro lugar calcular os valores das necessidades de rega anuais e das necessidades de rega para o período de ponta, para cada um dos anos considerados (James, 1998). As necessidades de rega anuais calculam-se somando todas as dotações de rega ao longo da campanha de rega. As necessidades de rega para o período de ponta (R_{gp}) são calculadas para cada ano de acordo com a expressão (Teixeira, 1989; Raposo, 1996; James, 1998):

$$R_{gp} = \max\left(\frac{DRg}{I}\right) \quad (4.39)$$

onde:

R_{gp} – necessidades de rega para o período de ponta [mm dia^{-1}];

DRg – dotação de rega [mm];

I – intervalo entre regas [dias].

Após a obtenção de uma série de N anos, de necessidades de rega anuais ou de necessidades de rega para o período de ponta, ordenam-se os seus valores por ordem crescente. A frequência de não ser excedido o acontecimento de ordem n , de uma série de N anos, pode ser estimada através da função empírica (Chow et al., 1988; James, 1998; Lencastre e Franco, 2003). A função de distribuição empírica, $F(x)$, é dada por (Lencastre e Franco, 2003):

$$F(X) = P(X \leq x_n) = \frac{n}{N + 1} \quad (4.40)$$

sendo:

$P(x_n)$ – probabilidade de um dado valor (x_n) não ser excedido;

N – número de valores;

n – número de ordem de um dado acontecimento, em que os valores se encontram ordenados por ordem crescente;

X – variável aleatória.

Com base no valor das necessidades de rega para o período de ponta, correspondente ao valor da probabilidade de não excedência pretendida, é efectuado o cálculo do caudal de projecto (Raposo, 1996), tal como se descreve na secção 5.3.

5. Simulação da rega com canhões com enrolador. Bases teóricas para o desenvolvimento do programa Enrolador.

Os sistemas de rega com canhões móveis dividem-se principalmente em dois tipos, os sistemas com canhão puxado por tubo com enrolador, vulgarmente designados por *enroladores*, e os sistemas com canhão com tracção por cabo. Os enroladores são predominantes na Europa, sendo mais simples de operar e necessitando de menos mão-de-obra. Os canhões com tracção por cabo são utilizados principalmente nos Estados Unidos da América, razão pela qual neste trabalho apenas se considerou os enroladores (Keller e Bliesner, 1990; Pereira, 2004; Tarjuelo, 2005).

Em Portugal, e principalmente no Alentejo, os cenários de alteração climática apontam para uma redução da precipitação associada com o aumento da temperatura (Miranda et al., 2006), o que a acontecer fará com que as culturas de Outono-Inverno, tais como o trigo, que são efectuadas em regime de sequeiro venham a necessitar de regas de complemento ou de socorro em anos mais secos. A utilização de canhões de rega quando exista disponibilidade de água para 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 deficit hídrico, regularizando as produções e diminuindo o risco climático.

Desenvolveu-se o *software* Enrolador para o dimensionamento e avaliação de canhões de rega com enrolador, com o objectivo de exemplificar a avaliação dos impactes das alterações climáticas no projecto de sistemas de rega. Seleccionou-se este tipo de sistemas de rega pois são bastante indicados para regas de complemento ou de socorro (Raposo, 1996; Tarjuelo, 2005).

5.1. Características gerais dos enroladores

Os sistemas de rega com enrolador são baseados na utilização de um aspersor de grande dimensão, designado por canhão, que aplica a dotação de rega à medida que se desloca ao longo da parcela. Os canhões consistem em aspersores rotativos de grande tamanho que trabalham normalmente a pressões de 400 a 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). Estes 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. O tubo flexível é enrolado num tambor que é accionado pelo fluxo de água fornecido ao canhão, através de um mecanismo de turbina ou de fole hidráulico (Pereira, 2004; Tarjuelo, 2005; Tiercelin e Granier, 2006).

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 5.1 apresenta-se uma disposição típica destes sistemas de rega (Tarjuelo, 2005).

Para efectuar a rega desenrola-se o tubo flexível puxando o carro porta-canhão com a ajuda de um tractor, posicionando-o junto à extremidade da parcela. Uma vez colocado o canhão em posição inicia-se a rega sendo o canhão puxado lentamente em direcção ao enrolador. Terminado o enrolamento da mangueira, e finalizada a rega dessa faixa, a máquina é rodada 180° e repete-se a operação para a outra metade da faixa. No final da rega de uma faixa, o enrolador é deslocado para a próxima faixa, adjacente à primeira, e com a qual se sobrepõe. Estas máquinas podem deslocar-se a velocidades entre 10 a 50 m/h, diminuindo a dotação de rega conforme aumenta a velocidade. Para mudar a posição da máquina e do tubo flexível uma pessoa com um tractor leva cerca de 1 h (Tarjuelo, 2005).

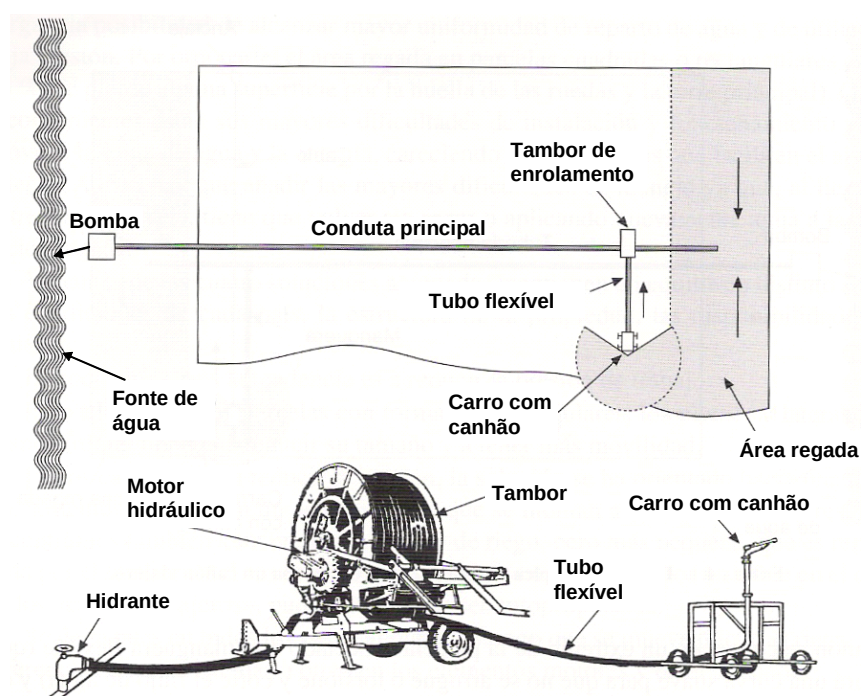


Figura 5.1 - Esquema típico de um sistema de rega com enrolador (adaptado de: Tarjuelo, 2005).

Os canhões permitem regar uma grande diversidade de culturas, apesar de o sistema não ser recomendado em culturas mais frágeis, em especial durante a germinação ou floração. 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).

Dada a grande mobilidade e flexibilidade de utilização destes sistemas tornam-se bastante adequados para explorações pequenas que possuam parcelas dispersas e de formato irregular. 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), tendo sido estas as razões para a sua grande difusão em Portugal (Raposo, 1996).

O principal inconveniente dos enroladores é a sua elevada pressão de trabalho, 400 a 1000 kPa (4 a 10 bar), 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 afectado pelo vento que provoca uma distribuição irregular da água (Granier et al., 2003; Tiercelin e Granier, 2006).

Considerando a máquina de rega propriamente dita, esta pode ser dividida em quatro componentes essenciais:

- **Canhão**

Os canhões são aspersores giratórios de construção robusta que funcionam com valores elevados de caudal e pressão, e podem ser de braço oscilante ou de turbina. Normalmente os canhões regam apenas um sector do círculo molhado, sendo o ângulo de sector compreendido normalmente entre os 200° e 220° (Pereira, 2004; Tarjuelo, 2005).

Os bocais que equipam os canhões podem ser cónicos ou anelares, produzindo estes últimos uma maior dispersão do jacto, originando uma melhor quebra do jacto e diminuindo o seu alcance. Os diâmetros dos bocais variam normalmente entre os 12 e os 40 mm. Os bocais cónicos permitem ao jacto de água atingir um maior alcance e ser mais resistente ao efeito de distorção provocado pelo vento do que os anelares (Pereira, 2004; Tiercelin e Granier, 2006). Os ângulos da trajectória do jacto com a horizontal variam entre 15° e 32°, apesar dos mais recomendados serem entre os 21° e os 25°, existindo também canhões nos quais este ângulo pode ser regulado. Os ângulos com um valor mais baixo possuem um menor alcance enquanto que os com um valor mais elevado são mais afectados pelo vento (Pereira, 2004; Tarjuelo, 2005).

- ***Tubo flexível***

Os tubos flexíveis são de polietileno e têm diâmetros que variam normalmente entre os 50 e os 125 mm, com comprimentos que variam os 120 e os 500 m, com uma vida útil de 6 a 8 anos. São concebidos de modo a suportarem altas pressões e as forças de tracção originadas ao serem arrastadas pelo solo (CEMAGREF, 1992; Tarjuelo, 2005).

- ***Mecanismo de propulsão***

O tambor dos enroladores é geralmente accionado através de um motor hidráulico que é alimentado pelo fluxo de água fornecido ao canhão, existindo dois tipos de variantes relativas ao tipo de motor hidráulico utilizado: de pistão ou fole e de turbina. Os mecanismos de pistão ou fole consomem uma pequena parte do caudal fornecido, mas não introduzem perda de carga ou diminuição de pressão significativas (Tarjuelo, 2005). Este consumo varia em função da dotação de rega a ser aplicada podendo ser estimado de acordo com o Quadro 5.1, disponibilizado pelo CEMAGREF (1992).

Quadro 5.1 – Percentagem de água perdida pelo fole em função da dotação aplicada (CEMAGREF, 1992).

Dotação bruta (mm)	Percentagem de água consumida pelo mecanismo de fole
20	4 a 5%
30	3 a 4%
40	2 a 3%

Os mecanismos de turbina são os mais comuns nos enroladores. As turbinas não consomem água no seu funcionamento, mas produzem uma perda de carga de 50 a 100 kPa (0.5 a 1 bar) (CEMAGREF, 1992; Tarjuelo, 2005).

- ***Mecanismos de controlo e regulação***

Os enroladores possuem dispositivos de controlo que lhes permitem regular a velocidade de deslocação do canhão assim como os tempos de rega parado. Nestes sistemas a regulação da velocidade de deslocação do canhão é a regulação mais importante, pois a dotação aplicada é função da velocidade de deslocação do canhão. Para a obtenção de um bom desempenho é essencial que a velocidade de deslocação do canhão se mantenha constante ao longo do trajecto para garantir uma boa uniformidade de distribuição (Pereira, 2004; Tarjuelo, 2005).

5.2. Critérios de projecto e condições de funcionamento

Os sistemas de rega com canhões móveis são muito criticados por apresentarem elevadas pressões de trabalho, baixas eficiências de aplicação, baixas uniformidade de distribuição, grande tamanho das gotas (que pode danificar a estrutura do solo e a cultura), elevadas pluviometrias, escoamento superficial e erosão, etc. No entanto, Tarjuelo (2005) e Tiercelin e Granier (2006) referem que a experiência demonstra que se podem resolver estes problemas se o projecto e a operação dos sistemas de rega com canhão forem efectuados de uma forma cuidada, nomeadamente através da correcta selecção da pressão de funcionamento, do diâmetro e tipo do bocal, e do espaçamento (sobreposição) entre as faixas regadas. Assim, durante o processo de dimensionamento dos enroladores é necessário ter em conta uma série de critérios de projecto e de regulações que visam garantir a qualidade da rega efectuada pelo sistema projectado.

5.2.1. Qualidade da rega

No dimensionamento dos sistemas de rega é importante obter uma estimativa da qualidade da rega realizada pelos futuros sistemas, sendo esta qualidade estimada por diferentes indicadores de desempenho. Os modelos computacionais ao simularem o funcionamento dos sistemas de rega permitem utilizar os indicadores de desempenho durante o projecto de rega para definir critérios de projecto que os sistemas de rega terão que cumprir (Pereira, 2004). Assim, no programa Enrolador desenvolveu-se um módulo de análise de desempenho, que permite obter uma estimativa da qualidade da rega. Esta avaliação é realizada através do cálculo de indicadores de desempenho, com base nos dados recolhidos em avaliações de campo para sistemas já existentes, ou nos dados produzidos pelo módulo de simulação da distribuição espacial das alturas de água (secção 5.4) para os canhões a serem projectados.

Os diferentes indicadores de desempenho que permitem a caracterização da qualidade da rega podem dividir-se em dois grupos principais (Keller e Bliesner, 1990; Tarjuelo, 2005):

- 1 – Medidas de **Uniformidade**: dão informação sobre o modo como a água de rega é repartida pelos diferentes pontos da parcela;
- 2 – Medidas de **Eficiência**: dão uma estimativa das perdas de água que ocorrem no sistema de rega.

A metodologia implementada no modelo Enrolador para o cálculo dos indicadores da qualidade da rega é baseada na metodologia proposta por Keller e Bliesner (1990), Pereira

(2002, 2004) e Tarjuelo (2005). De entre os vários indicadores que permitem caracterizar a qualidade da rega optou-se por incluir no modelo os indicadores que se descrevem de seguida por serem os mais utilizados e para os quais se conhece uma melhor interpretação dos seus resultados (Keller e Bliesner, 1990; Pereira, 2004; Tarjuelo, 2005; Tiercelin e Granier, 2006):

5.2.1.1. Uniformidade

Os principais indicadores de uniformidade são a uniformidade de distribuição (DU) e o coeficiente de uniformidade (CU) (Pereira, 2004; Tarjuelo, 2005).

A uniformidade é um dos critérios mais importantes no projecto de sistemas de rega (Keller e Bliesner, 1990). Baixos valores de uniformidade indicam a possibilidade de existirem zonas sub e sobre-regadas que poderão originar perdas de produção devido ao deficit hídrico nas zonas sub-regadas e excesso de água no solo nas zonas sobre-regadas, originando perdas de água e fertilizantes devido a percolação profunda e a perdas de produção por má drenagem (Pereira, 2004).

1) Uniformidade de distribuição, DU

$$DU = 100 \left(\frac{Z_{lq}}{Z_{avg}} \right) \quad (5.1)$$

onde:

DU - uniformidade de distribuição [%];

Z_{lq} – altura média de água infiltrada no primeiro quartil da área menos regada [mm];

Z_{avg} – altura média infiltrada na parcela [mm].

Para estimar a altura de água infiltrada utilizam-se pluviómetros, colocados de acordo com as normas aplicáveis a cada situação (Keller e Bliesner, 1990; Pereira, 2002; Nunes, 2003; Tarjuelo, 2005). A uniformidade de distribuição é calculada com base nos dados recolhidos nos pluviómetros e é um indicador da uniformidade da altura de água infiltrada na parcela (Pereira, 2004; Tarjuelo, 2005).

2) Coeficiente uniformidade, CU

$$CU = 100 \left(1 - \frac{\sum X_i}{n.m} \right) \quad \text{com } X_i = |Zrec_i - m| \quad (5.2)$$

em que:

CU – coeficiente de uniformidade [%];

Zrec_i – altura de água recolhida em cada pluviómetro [mm];

n – número de observações;

m – média das observações Zrec_i [mm].

O coeficiente de uniformidade (CU) ou coeficiente de uniformidade de Christiansen é uma representação estatística da uniformidade e é utilizado principalmente nos sistemas de aspersão (Keller e Bliesner, 1990; Tarjuelo, 2005).

5.2.1.2. Eficiência

A eficiência de rega é tradicionalmente definida como a razão entre a altura média de água infiltrada na espessura do solo correspondente à zona radicular, correspondendo ao volume de água que é utilizada pelas culturas, e a altura média de água aplicada à parcela (Raposo, 1996; James, 1998). Uma vez que os sistemas de rega não conseguem aplicar uma altura de água uniforme ao longo de toda a parcela é necessário considerar a uniformidade da rega na definição dos indicadores de eficiência, tendo sido definidas a eficiência de aplicação relativa ao primeiro quartil das observações mais desfavoráveis (E_a) e a Eficiência Potencial do Quartil Mínimo (PELQ) (Pereira, 2004; Tarjuelo, 2005). Para efeitos de projecto pode ser utilizado o valor da PELQ, que corresponde ao desempenho que o sistema pode atingir quando a dotação de rega é aplicada na quantidade e momento oportuno, maximizando a produção. Baixos valores de PELQ indicam que parte da água aplicada pelo sistema de rega não é utilizada para a produção da cultura (Pereira, 2004). Para um sistema de canhão com enrolador, bem projectado e mantido, Pereira (2004) refere como valor indicativo para a eficiência de aplicação E_a = 55-70%.

1) *Eficiência de aplicação* relativa ao primeiro quartil das observações mais desfavoráveis, E_a

$$E_a = 100 \left(\frac{Z_{r,lq}}{D} \right) \quad (5.3)$$

onde:

E_a - eficiência de aplicação relativa ao primeiro quartil das observações mais desfavoráveis [%];

$Z_{r,lq}$ – média da altura de água infiltrada e armazenada na zona radicular no primeiro quartil das observações mais desfavoráveis [mm];

D – altura média de água aplicada ao solo [mm].

O valor de $Z_{r,lq}$ tem como limite superior o valor da reserva utilizável (RU) definida anteriormente na secção 3.2.2. A eficiência de aplicação, E_a , implica uma medida de uniformidade, mas não indica a adequação da rega. O seu valor pode ser alto para uma boa uniformidade de distribuição mas pode corresponder a uma dotação muito pequena que não cobre as necessidades da cultura. Por outro lado um baixo valor de E_a pode ser devido tanto a uma má uniformidade de distribuição como a dotação excessivas que provocam percolação profunda (Tarjuelo, 2005).

2) *Eficiência potencial de aplicação* relativa ao primeiro quartil das observações mais desfavoráveis, PELQ

$$PELQ = 100 \left(\frac{Z_{lq,MAD}}{D_{MAD}} \right) \quad (5.4)$$

onde:

PELQ - eficiência potencial de aplicação relativa ao primeiro quartil das observações mais desfavoráveis [%];

$Z_{lq,MAD}$ – altura média infiltrada no primeiro quartil das observações mais desfavoráveis quando é igual ao MAD [mm];

D_{MAD} - altura média de água aplicada ao solo para satisfazer o MAD [mm];

MAD – deficit permitido em termos de gestão (“*management allowed depletion*”) [mm].

A eficiência potencial do quartil mínimo, PELQ, indica a qualidade do projecto de um sistema de rega, alvo de uma boa gestão em que se aplica a dotação de rega pretendida no momento adequado. Um baixo valor de PELQ indica projectos de rega ineficientes. Um baixo valor de E_a indica apenas a possível existência de problemas na gestão da rega. Assim sendo, a diferença entre PELQ e E_a é uma medida dos problemas de gestão da rega (Pereira, 2004; Tarjuelo, 2005).

5.2.2. Critérios de dimensionamento e uniformidade de distribuição

A uniformidade da rega é um critério que deve ser fixado para um dado projecto. O objectivo é alcançar um determinado valor de PELQ que se obtém com uma boa uniformidade que depende das características do equipamento. A uniformidade de distribuição da água com os canhões de rega com enrolador depende principalmente da variação da velocidade de deslocação, das características do canhão e das suas condições de trabalho (pressão, bocal, ângulo de descarga, etc.), assim como da correcta selecção das condições de funcionamento do equipamento de rega (ângulo de sector molhado e sobreposição das faixas regadas), bem como da distorção provocada pelo vento (Granier et al., 2003; Tarjuelo, 2005).

O ângulo de trajectória do jacto com a horizontal mais recomendado varia entre 21° a 23° de modo a se obter um bom alcance mas sem que seja demasiado afectado pelo vento. Quando a velocidade média do vento seja superior a 4 m/s deverão utilizar-se canhões com um ângulo de 20° a 21° (Pereira, 2004; Tarjuelo, 2005).

Os perfis pluviométricos dos canhões de rega dependem do ângulo de sector, sendo que os ângulos de sector recomendados variam entre 200° e 220° (CEMAGREF, 1992; Tarjuelo, 2005). Na Figura 5.2 encontram-se representados os perfis pluviométricos obtidos para diferentes ângulos de sector, que variam entre os 180° (360) e os 330°, relativos a um canhão que se movimenta de forma contínua sobre uma linha de pluviómetros que são colocados segundo uma linha perpendicular à direcção de avanço do canhão. A altura média de água aplicada é igual em todos os perfis (Fig. 5.2) podendo-se observar que o perfil correspondente ao ângulo de 210° é o mais uniforme tendo em conta a sobreposição entre faixas adjacentes, sendo aquele que mais se aproxima do perfil hipotético de uniformidade completa, a linha horizontal. Verifica-se igualmente que os ângulos de sector de 240° e 270° possuem uma boa uniformidade, sendo que a partir deste ultimo valor a uniformidade reduz-se à medida que o ângulo aumenta (Keller e Bliesner, 1990).

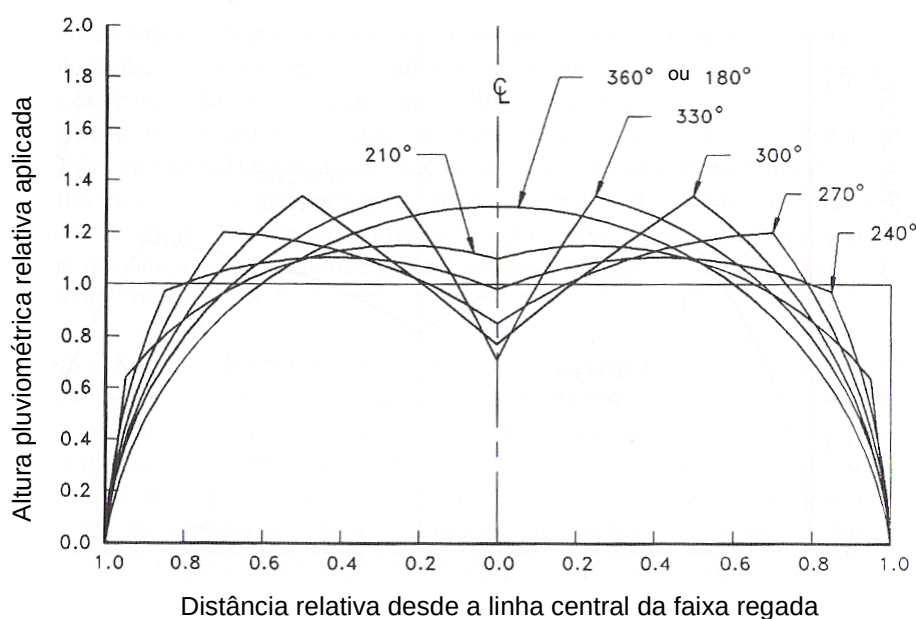


Figura 5.2 – Perfis pluviómetros aplicados por um canhão em movimento para ângulos de sector compreendidos entre os 180° (ou 360°) e os 330° (adaptado de Keller e Bliesner, 1990).

Tarjuelo (2005) fornece o Quadro 5.2 que indica os valores de espaçamento entre faixas recomendados em função da velocidade do vento. Os valores mais elevados de espaçamento correspondem a bocais cónicos enquanto que os mais baixos correspondem a bocais anelares. Os valores de espaçamento a adoptar serão aqueles que mais se aproximarem do valor tabelado, depois de se dividir a parcela num número inteiro de faixas regadas.

A trajectória de deslocação do canhão deverá ser orientada, tanto quanto possível, perpendicularmente aos ventos dominantes para diminuir a distorção no jacto do canhão provocada pelo vento (Tarjuelo, 2005).

Quadro 5.2 – Largura recomendada das faixas regadas em função da velocidade do vento (Tarjuelo, 2005).

	Velocidade do vento (m/s)			
	0 - 1	1 - 2.5	2.5 - 5	> 5
Largura da faixa regada (%) do diâmetro molhado	80	75 - 70	65 - 60	55 - 50

Keller e Bliesner (1990) disponibilizam valores indicativos do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CU) e da eficiência de aplicação (Ea), que se podem alcançar quando o sistema seja bem projectado e gerido (Quadro 5.3).

Quadro 5.3 – Valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CU) e da eficiência de aplicação (E_a) que se podem alcançar para sistemas de rega com canhão móvel quando bem projectados e geridos (Keller e Bliesner, 1990; Tarjuelo, 2005).

Velocidade do vento (m/s)	CU (%)	E_a (%)
0 - 2	82	77
2 - 4	70	65

Os canhões aplicam uma menor dotação de rega no início e no fim das faixas regadas. Quando se inicia a rega, a faixa molhada, recebe uma dotação de rega crescente, desde zero à cabeceira da faixa até ao valor desejado. O mesmo irá acontecer no final da faixa regada, embora de um modo menos acentuado. Para garantir a uniformidade nestas zonas, embora as áreas afectadas sejam relativamente pequenas, os enroladores podem ser equipados com temporizadores que permitam ao canhão regar em posição estacionária durante algum tempo no início e no fim da rega (Keller e Bliesner, 1990; Tarjuelo, 2005).

Relativamente às posições iniciais e tempos iniciais e finais de rega Keller e Bliesner (1990) recomendam que o canhão deverá ser colocado no início da rega a uma distância inicial (d_i) da extremidade da parcela calculada por:

$$d_i = \frac{2}{3} R \quad (5.5)$$

em que R é o alcance do canhão [m].

O tempo durante o qual o canhão deve regar sem se mover no início (T_i), deve ser aproximadamente igual ao tempo que o canhão levaria a percorrer a distância que o separa da extremidade da parcela, estimando-se de acordo com a seguinte equação (Keller e Bliesner, 1990):

$$T_i = \frac{2}{3} \frac{\alpha_{sr}}{360} \frac{R}{V} \quad (5.6)$$

onde:

V - velocidade de deslocação do canhão ao longo da faixa regada [m/h];

R - alcance do canhão [m];

α_{sr} - ângulo do sector circular regado pelo canhão que varia entre 180° e 360° [°].

O tempo de rega parado no final T_f é dado segundo a expressão (Keller e Bliesner, 1990):

$$T_f = \frac{2}{3} \left(1 - \frac{\alpha}{360} \right) \frac{R}{V} \quad (5.7)$$

Colocando o canhão à distância d_i da extremidade da parcela e utilizando o tempo de rega ao início T_i , ou quando o canhão inicia a rega na extremidade da parcela, a dotação de rega aplicada na extremidade da parcela é igual a 0.5 DR_g aumentando até DR_g quando se atinge a distância R (alcance do canhão), permanecendo constante a partir dessa distância (Keller e Bliesner, 1990).

5.2.3. Critérios de dimensionamento hidráulico

Os canhões devem funcionar dentro de uma gama de valores de pressão para se obter um tamanho de gota adequado e uma boa distribuição do perfil pluviométrico (Fig. 5.3). Um excesso de pressão produz uma maior proporção de gotas pequenas que são mais susceptíveis à acção do vento. Uma pressão insuficiente resulta em gotas muito grossas que poderão danificar a estrutura do solo, e leva a uma redução no alcance do canhão, e a uma má uniformidade de aplicação. Na Figura 5.3 apresentam-se os intervalos de pressão recomendados para o funcionamento do canhão em função do caudal debitado, e que devem ser tidos em conta na selecção do canhão (CEMAGREF, 1992; Tarjuelo, 2005).

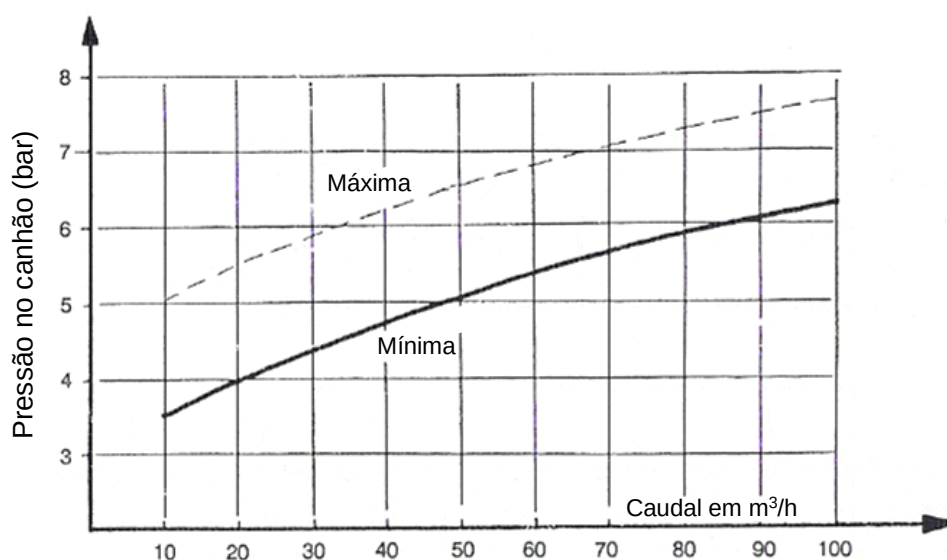


Figura 5.3 – Intervalo de pressões recomendado à saída do canhão em função do caudal debitado (CEMAGREF, 1992).

A pressão de funcionamento do canhão não deve variar mais de 20% da sua pressão nominal em nenhum ponto da parcela para que o caudal debitado pelo canhão não varie

mais de 10%. Assim, o dimensionamento deverá ser realizado para o ponto da parcela mais desfavorável ($H_{\min}$) e para o mais favorável ($H_{\max}$). Nos casos em que $H_{\max} > 1.2H_{\min}$ deverá colocar-se um regulador de pressão à entrada do canhão (Tarjuelo, 2005).

No dimensionamento do enrolador é conveniente adicionar às necessidades de rega calculadas para o período de ponta uma margem de segurança de cerca de 20%. Esta margem de segurança permitirá interromper a rega durante períodos de vento muito forte, assim como compensar interrupções devido a avarias ou fornecer as necessidades de rega a culturas com maiores exigências do que aquelas para as quais o caudal foi calculado.

Ao realizar o dimensionamento do tubo flexível, deve-se ter em conta que quanto maior for a sua dimensão maior será o custo de investimento do enrolador e maiores serão as perdas de carga. Assim, no caso de faixas de maior comprimento deverão efectuar-se duas posições de modo a reduzir para metade o comprimento do tubo, colocando-se uma conduta principal ao longo do centro da parcela, tal como representado na Figura 5.1.

A determinação das perdas de carga nos tubos flexíveis de polietileno pode ser feita através dos ábacos construídos pelo CEMAGREF (1992) que se apresentam na Figura 5.4. A esta perda de carga adiciona-se as perdas de carga na mangueira de alimentação do enrolador e nos mecanismos de enrolamento e demais acessórios, e que é de aproximadamente 50 kPa (0.5 kg/cm²) nos enroladores de fole e de 100 kPa (0.5 kg/cm²) nos enroladores de turbina (Tarjuelo, 2005).



Figura 5.4 – Ábaco das perdas de carga nos tubos semi-rígidos de polietileno (série de 800 kPa) dos enroladores (adaptado de CEMAGREF, 1992).

5.3. Procedimento de cálculo para o projecto de canhões com enrolador

O dimensionamento de sistemas de rega de canhões com enrolador compreende um conjunto de etapas que se descrevem de seguida, de acordo com a metodologia proposta por Tarjuelo (2005).

1- O projecto inicia-se pela recolha dos dados de base e que são constituídos por:

- a. **Parcela:** Área (ha), comprimento (m), largura (m) e declive (%);
- b. **Cultura:** profundidade radicular Z_r (m), necessidades de rega no período de ponta Rgp (mm/dia), e deficit permitido em termos de gestão (MAD);
- c. **Solo:** capacidade utilizável U (mm/m), e taxa de infiltração (mm/h);
- d. **Dados da rega:** Eficiência de aplicação (Ea) e o tempo útil diário de rega (Trd);
- e. **Vento:** velocidade média do vento (m/s)

Quadro 5.4 – Taxa de infiltração do solo, em função da textura e da cobertura do solo (Tarjuelo, 2005).

Textura do solo	Velocidade de infiltração (mm/h)	
	Solo nu	Solo coberto
Arenoso	25	50
Franco-arenoso	18	36
Franco	12	25
Franco-argiloso	6	12
Argiloso	2	5

2- Cálculo dos parâmetros de rega:

O dimensionamento propriamente dito inicia-se com o cálculo dos parâmetros de rega, Dotação líquida (DI), Dotação bruta (Db), número de dias de intervalo entre regas (I). A dotação líquida DI [mm] é calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$DI = RU \times MAD \quad (5.8)$$

onde:

RU – reserva utilizável do solo [mm].

MAD - deficit permitido em termos de gestão da rega dado como fracção da RU [fracção];

O intervalo de entre regas (I) é calculado pela expressão:

$$I = \text{int}\left(\frac{DI}{R_{gp}}\right) \quad (5.9)$$

sendo:

I – intervalo entre regas [dias];

DI – dotação líquida de rega [mm];

Rgp – necessidades de rega do período de ponta [mm/dia];

O valor da dotação líquida a aplicar (DI_{ajust}) é então ajustado com base nos valores de I e de Rgp do seguinte modo:

$$DI_{ajust} = I \times Rgp \quad (5.10)$$

sendo de seguida calculada a dotação bruta, Db [mm], com base no valor da dotação líquida ajustada, através da seguinte expressão;

$$Db = \frac{DI_{ajust}}{E_a} \quad (5.11)$$

em que:

DI_{ajust} – Dotação líquida de rega ajustada para o intervalo entre regas [mm];

E_a – eficiência de aplicação do sistema de rega [fracção].

3- Caudal de projecto:

O caudal de projecto é calculado de acordo com a seguinte expressão (Raposo, 1996; Tarjuelo, 2005):

$$Q = \frac{10 \times Db \times A}{Trd \times I} \quad (5.12)$$

onde:

Q – caudal de projecto [m^3/h];

Trd – tempo útil diário de rega [h/dia];

A – área a regar [ha];

O tempo necessário para colocar os canhões em posição de rega é de cerca de 0.5 hora, estimando-se que para mudar a máquina de posição para a faixa adjacente requeira cerca de 1 hora. Os tempos de rega recomendados variam entre 22 a 23 horas no caso em que o enrolador regue uma posição por dia, ou de 10 a 11 horas quando o enrolador rega duas posições por dia (Tiercelin e Granier, 2006).

Se é provável que ocorram, durante a campanha de rega, dias com vento forte ($> 4 \text{ m/s}$) em que é conveniente deixar de regar, é recomendável aumentar o caudal de projecto de 15% a

20% criando uma margem de segurança, que também permitirá fazer face a culturas com maiores necessidades hídricas ou a casos de avaria. Na definição das margens de segurança deve-se atender ao facto de que, se se estiver a utilizar um tempo de rega diário (Trd) inferior a 24h, se está a aumentar o valor do caudal, criando indirectamente uma “margem de segurança” e portanto este efeito deverá ser contabilizado.

4- Seleccção do canhão

A selecção do canhão faz-se com base no valor do caudal de projecto (Q), lendo-se na Figura 5.3 qual o intervalo de pressões de trabalho recomendado para o caudal calculado. Com base no par de valores caudal e pressão, realiza-se a selecção do canhão a partir do catálogo de um fabricante, seleccionando o bocal que tenha o caudal mais próximo do caudal de projecto, e obtendo-se também o valor do alcance do canhão. Na Figura 5.5 apresenta-se um exemplo de um catálogo fornecido pelos fabricantes.

Após a selecção do canhão é necessário verificar se a pluviometria média, ou taxa média de aplicação, do canhão é inferior à taxa de infiltração do solo. No Quadro 5.4 podem-se consultar valores indicativos da taxa de infiltração para diferentes tipos de solo. A taxa de aplicação de um canhão cujo ângulo de sector é α_{sr} é dada pela seguinte expressão:

$$I_t = 1000 \frac{Q}{\pi(0.9R)^2} \frac{360}{\alpha_{sr}} \quad (5.13)$$

onde:

I_t – taxa média de aplicação [mm/h;]

Q – caudal do canhão [m³/h;]

R – alcance do canhão [mm];

α_{sr} – ângulo do sector regado [graus].

O ângulo de sector recomendado oscila entre os 200° e 220°, conforme se referiu anteriormente. Na equação 5.13 considera-se 90 % do raio molhado para estimar aproximadamente a pluviometria que cai na maior parte da área molhada, cujo valor é mais elevado do que o valor médio sobre toda a área molhada, uma vez que é muito reduzida a quantidade água que cai para além dos 90% do raio molhado (Keller e Bliesner, 1990; Pereira, 2004).

Twin 101 Boquilla cônica / Bocal cônico Trayectoria / Trajetória de 24°										
Presión Pressão bar	Boquilla / Bocal 12 mm - 0.47"		Boquilla / Bocal 14 mm - 0.55"		Boquilla / Bocal 16 mm - 0.63"		Boquilla / Bocal 18 mm - 0.71"			
	Caudal Vazão m³/h	Radio Raio m	Caudal Vazão m³/h	Radio Raio m	Caudal Vazão m³/h	Radio Raio m	Caudal Vazão m³/h	Radio Raio m	Caudal Vazão m³/h	Radio Raio m
2,0			10,6	2,96	26,0	13,9	3,86	27,9	17,6	4,89
2,5			11,9	3,31	28,3	15,5	4,32	30,4	19,7	5,47
3,0	9,6	2,66	27,9	13,0	3,62	30,3	17,0	4,73	32,6	21,6
3,5	10,4	2,87	29,5	14,1	3,91	32,1	18,4	5,11	34,5	23,3
4,0	11,1	3,07	31,1	15,1	4,18	33,8	19,7	5,46	36,3	24,9
4,5	11,7	3,26	32,5	16,0	4,44	35,3	20,9	5,80	38,0	26,4
5,0	12,4	3,44	33,8	16,8	4,68	36,8	22,0	6,11	39,5	27,8
5,5	13,0	3,60	35,1	17,7	4,91	38,1	23,1	6,41	41,0	29,2
6,0	13,6	3,76	36,3	18,4	5,12	39,4	24,1	6,69	42,4	30,5
6,5	14,1	3,92	37,4	19,2	5,33	40,6	25,1	6,96	43,6	31,7

Figura 5.5 – Exemplo dos dados característicos de um canhão disponibilizados pelo fabricante (adaptado de Komet, 2011).

5- Largura das faixas regadas

A determinação do número de faixas a regar é realizada tendo em conta os valores recomendados da largura das faixas em função da velocidade do vento, apresentados no Quadro 5.2, e colocando o equipamento segundo a menor dimensão da parcela de modo a reduzir o comprimento do tubo flexível, minimizando-se assim as perdas de carga. A largura das faixas regadas é calculada, numa primeira aproximação, segundo a expressão:

$$E_{FR} = 2R \times E_{rec} \quad (5.14)$$

onde:

E_{FR} – largura de faixa regada [m];

R – alcance do canhão [m];

E_{rec} – largura de faixa recomendada (Quadro 5.2), em percentagem do diâmetro molhado, em função da velocidade do vento [%];

O valor da maior dimensão da parcela é dividido pelo valor da largura de faixa (E_{FR}) de forma a determinar-se o número de faixas a regar de acordo com a seguinte expressão:

$$nf = \text{int} \left(\frac{L_{\text{maior}}}{E_{FR}} \right) \quad (5.15)$$

em que:

nf – número de faixas a regar;

L_{maior} – comprimento da maior dimensão da parcela.

Com base no valor do número de faixas e na maior dimensão da parcela, recalcula-se o valor do espaçamento:

$$E_{\text{ajust}} = \frac{L_{\text{maior}}}{nf} \quad (5.16)$$

em que E_{ajust} é a largura de faixa regada ajustada em função do número de faixas a regar [m].

Finalmente divide-se este novo valor de largura de faixa pelo valor do diâmetro molhado e verifica-se se o seu valor está de acordo com o valor recomendado da largura de faixa (Quadro 5.2). Caso o valor final da largura de faixa seja significativamente maior do que o valor recomendado é necessário aumentar o número de faixas regadas. Na prática recomenda-se que o número de faixas a regar coincida com o valor do intervalo entre regas (I), de modo a que para cada posição do canhão se consiga respeitar o tempo útil de rega diário (Trd).

6- Velocidade de deslocação

A velocidade de deslocação do canhão é calculada em função da dotação a aplicar sendo dada pela seguinte expressão:

$$V_c = \frac{Q}{Db \times E_{FR}} \quad (5.17)$$

onde:

V_c – velocidade linear de deslocação do canhão [m/h];

Q – caudal do canhão [m³/h];

Db – Dotação bruta de rega [mm];

E_{FR} – largura da faixa regada [m].

O valor da velocidade de deslocação do canhão deverá estar dentro do intervalo de velocidades em que a máquina pode funcionar e que se situa entre os 5 e os 50 m/h. Para que a dotação aplicada à parcela seja uniforme ao longo do trajecto do canhão, a velocidade de deslocação da máquina tem que ser constante. Assim, se os mecanismos de regulação se encontrarem a funcionar correctamente não deverão permitir uma variação de velocidade maior do que 10 a 15% (Pereira, 2004; Tarjuelo, 2005).

7- Comprimento do tubo flexível.

O comprimento do tubo flexível (L_t) é determinado tendo em conta a menor dimensão da parcela. Considerando o valor do comprimento da faixa a regar, o projectista deve decidir se divide a faixa ao meio tal como representado na Figura 5.1, ou se opta por considerar o

comprimento total da faixa. Como recomendação prática são desaconselhados comprimentos do tubo superiores a 200m. Tendo sido determinado o comprimento da faixa a regar (L_f), é necessário descontar a esse valor da distância inicial d_i (Eq. 5.5) para obter o valor do comprimento do tubo flexível:

$$L_t = L_f - d_i \quad (5.18)$$

8- Tempo de rega em cada faixa:

O tempo necessário para realizar a rega para uma dada posição do enrolador, depende da distância a percorrer pelo canhão, da velocidade de deslocação e dos tempos de rega sem se deslocar no início, T_i (Eq. 5.6), e no final T_f (Eq. 5.7) da rega, assim como da conveniência de se efectuar duas posições por dia. O tempo de rega é assim dado pela seguinte expressão:

$$T_r = \left(\frac{L_t}{V} \right) + T_i + T_f \quad (5.19)$$

9- Cálculo da pressão necessária no hidrante

A pressão necessária no hidrante é calculada somando a pressão necessária no canhão, com a altura deste sobre o terreno, com as perdas de carga no tubo flexível, com as perdas de carga nos mecanismos de propulsão e regulação. Quando o enrolador não seja ligado directamente ao hidrante também se deverão considerar as perdas de carga na conduta principal. No mecanismo de turbina o valor das perdas de carga a considerar serão de 50 a 100 kPa. No caso dos mecanismos de fole não se consideram perdas de carga mas é necessário contabilizar o caudal adicional que é consumido pelo fole, e que corresponde entre 1.5% a 5% do caudal total (CEMAGREF, 1992; Tarjuelo, 2005). A pressão necessária no hidrante é dada por:

$$P_{\text{hydr}} = P_c + 9.81 \times (H_t + H_{\text{es}} + H_{\text{ac}} + H_{\text{cp}} + \Delta H_{\text{rel}}) \quad (5.20)$$

onde:

P_{hydr} – pressão necessária no hidrante [kPa];

P_c – pressão necessária ao canhão [kPa];

H_t – perda de carga no tubo flexível [m];

H_{es} – perda de carga no enrolador, nos mecanismos de propulsão e de controlo e outras singularidades [m];

H_{ac} – perda de carga devido à altura do canhão ao solo [m];

H_{cp} – perda de carga na conduta principal [m];

ΔH_{rel} – diferença de carga devida ao desnível do terreno entre o hidrante e a posição inicial do canhão. Apresenta sinal positivo quando o declive é a subir e negativo no caso contrário [m].

O cálculo da perda de carga total no tubo flexível (H_t) e da perda total de carga na conduta principal (H_{cp}) requer o cálculo das perdas de carga contínuas ao longo destas condutas. Para calcular a perda de carga total numa conduta (H_t) é necessário estimar a perda de carga contínua (H_c) e a perda de carga nas singularidades (H_s) tal que $H_t = H_c + H_s$. As perdas de carga nas singularidades são normalmente estimadas como uma percentagem das perdas de carga contínuas $H_s = \% H_c$ (Raposo, 1996; Tarjuelo, 2005).

a) perda de carga no tubo flexível

O valor da perda de carga contínua no tubo flexível é calculado segundo a seguinte expressão (CEMAGREF, 1992; Tarjuelo, 2005):

$$H_c = J_t \times L_t \quad (5.21)$$

onde:

H_c - perda de carga contínua [m];

J_t – perda de carga unitária no tubo flexível, estimada em m por m de tubo [m/m];

L_t - comprimento do tubo flexível [m];

O valor de J_t é obtido através da Figura 5.4 com base no valor do caudal debitado pelo canhão e no diâmetro do tubo flexível.

A selecção do tubo flexível mais adequado, no programa enrolador, é feita com base no valor do caudal (Q) que mais se aproxima do valor médio da gama de valores de caudais admitidos por cada conduta (Fig. 5.4).

b) Perda de carga na conduta principal

Opcionalmente nos casos em que o sistema de rega inclua uma conduta principal, tal como representado na Figura 5.1, é necessário adicionar o valor das perdas de cargas nessa conduta (H_{cp}). A fórmula normalmente utilizada para estimar a perda de carga unitária é a equação de Hazen-Williams. Segundo Tarjuelo (2005) a equação de Hazen-Williams aplica-se para diâmetros de condutas iguais ou superiores a 50 mm, referindo Keller e Bliesner (1990) que esta equação foi desenvolvida para sistemas que utilizam condutas iguais ou superiores a 75 mm. Estes dois valores estão de acordo com os diâmetros das condutas

principais normalmente utilizados em sistemas de rega com enrolador. A expressão da equação de Hazen-Williams é dado por (Tarjuelo, 2005):

$$J = 10.62 \left(\frac{Q}{C} \right)^{1.85} D_{nc}^{-4.87} \quad (5.22)$$

onde:

J – perda de carga unitária [m/m];

Q – caudal na conduta [m³/s];

C – coeficiente de atrito que é função das características do material da conduta;

D_{nc} – diâmetro nominal da conduta [mm].

O valor do coeficiente de atrito depende do material da conduta sendo apresentado em Keller e Bliesner (1990) um Quadro com os valores típicos de C.

Quadro 5.5 – Valores típicos para o coeficiente de atrito (C) da equação de Hazen-Williams (Keller e Bliesner, 1990).

Material da conduta	C
Plástico	150
Aço revestido a epoxi	145
Fibrocimento	140
Aço galvanizado	135
Alumínio	130
Aço (novo)	130
Aço (15 anos) ou betão	100

Multiplicando valor da perda de carga unitária (J) pelo valor do comprimento da conduta (Lc), obtém-se o valor da perda de carga continua hc:

$$H_c = J \times Lc \quad (5.23)$$

sendo:

H_c – perda de carga continua na conduta [m];

J – perda de carga unitária [m/m];

Lc – comprimento da conduta principal [m].

O valor da perda de carga na conduta principal (H_{cp}) é obtido somando ao valor de H_c as perdas de carga nas singularidades H_s , que são geralmente estimadas como uma percentagem das perdas de carga contínuas.

A selecção do diâmetro da conduta principal efectua-se com base na velocidade de escoamento dentro desta. É recomendado que velocidade de escoamento dentro das condutas se situe entre 1 m/s e os 2 m/s. No caso do programa Enrolador, estabeleceu-se como critério de selecção a conduta cuja velocidade de escoamento mais se aproxime de 1.5 m/s, não sendo admitidos diâmetros de conduta que conduzam a velocidades superiores a 2.5 m/s. O cálculo da velocidade de escoamento dentro da conduta é dada por:

$$V_{esc} = \frac{\frac{Q}{3600}}{\pi \left(\frac{\frac{D_{nc}}{1000}}{2} \right)^2} \quad (5.24)$$

sendo:

V_{esc} – velocidade de escoamento [m/s];

D_{nc} – diâmetro nominal da conduta [mm];

Q – caudal na conduta [m³/h].

Na Figura 5.6 apresenta-se o fluxograma do módulo de dimensionamento do *software* Enrolador que sintetiza o procedimento de cálculo utilizado para dimensionar sistemas de canhão com enrolador.

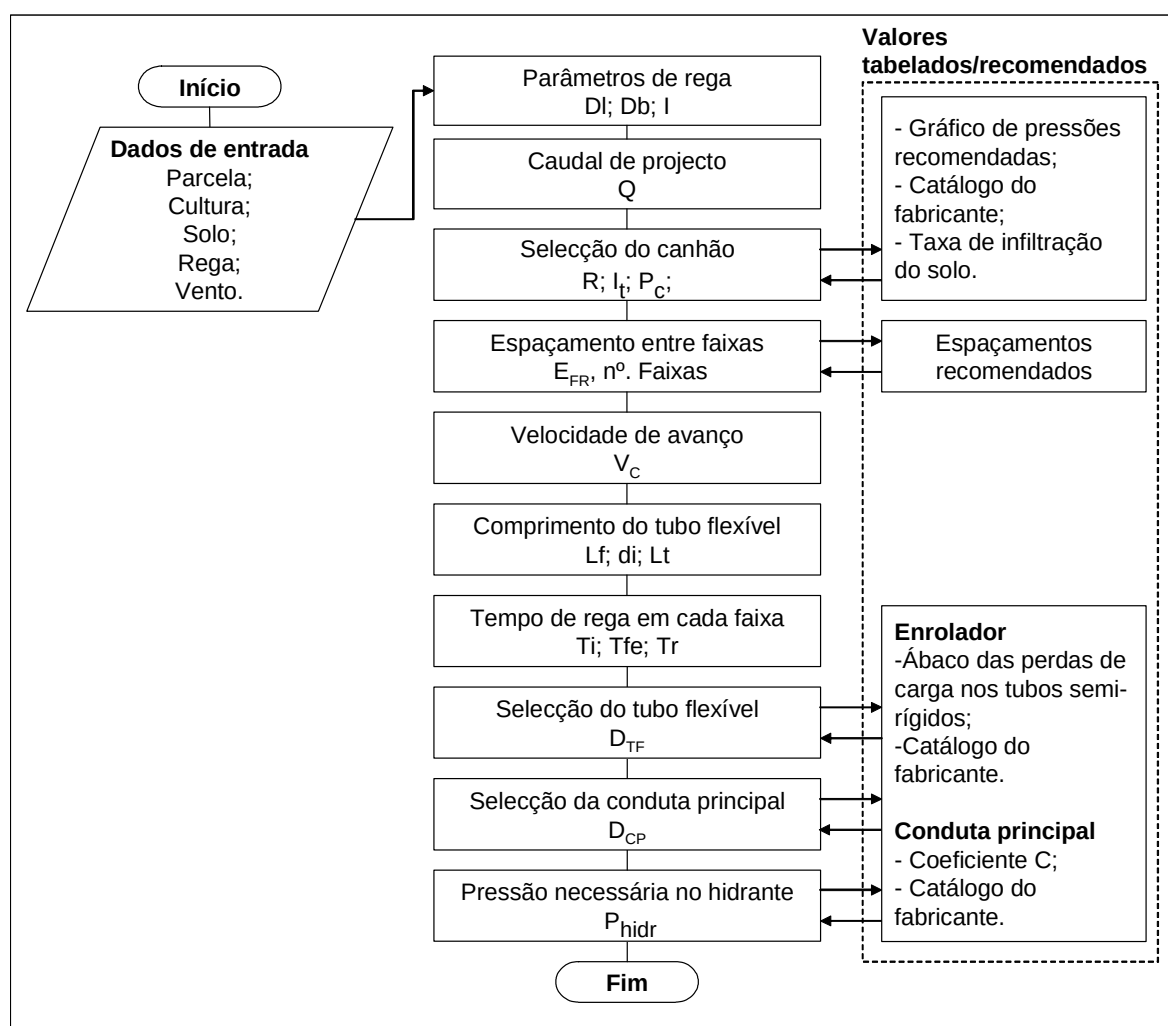


Figura 5.6 – Fluxograma do procedimento de cálculo utilizado para dimensionar sistemas de canhão com enrolador.

5.4. Simulação da distribuição espacial da pluviometria

Para o correcto dimensionamento de um sistema de rega com enrolador, é importante tentar obter uma estimativa do desempenho potencial do sistema. Os modelos de dimensionamento de sistemas de rega ao simularem o funcionamento do equipamento de rega permitem estimar o seu desempenho futuro avaliando se este obedece aos critérios de dimensionamento (Correia, 1997; Gonçalves, 1997; Pedras, 2009).

Para realizar o cálculo dos indicadores de desempenho que se apresentaram na secção 5.2.1, é necessário simular o perfil pluviométrico aplicado pelo canhão sobre o solo. Assim, no programa Enrolador desenvolveu-se um módulo de simulação da pluviometria do canhão.

A metodologia utilizada neste programa para simular a altura de água aplicada ao longo da faixa regada, consiste na simulação de uma avaliação de campo de um canhão com

enrolador, em que se dispõem colectores ou pluviómetros ao longo de uma linha perpendicular à direcção de deslocação do canhão (Keller e Bliesner, 1990; Pereira, 2002; Nunes et al., 2003; Tarjuelo, 2005). A simulação das alturas de água recolhidas dentro dos pluviómetros fictícios é feita simulando a passagem do canhão pela linha de pluviómetros. Assim, para cada instante calcula-se a distância de cada um dos pluviómetros ao canhão. Conhecendo estas distâncias e o padrão pluviométrico do canhão é possível estimar a quantidade de água que atinge esses pontos num intervalo de tempo Δt e acumular esses valores ao longo do tempo, obtendo-se a altura total de água aplicada pela passagem do canhão num dado pluviómetro (Bremond e Molle, 1995; Granier et al., 2003)

Richards e Weatherhead (1993) desenvolveram um modelo empírico que permite simular a distorção provocada pelo vento na distribuição das alturas pluviométricas de um canhão. Este modelo foi posteriormente melhorado por Al-Naeem (1993) permitindo a consideração de ângulos de sector diferentes de 360° , tendo sido estes modelos adoptados nos programas desenvolvidos por Granier et al. (2003) e Smith et al. (2008). Como exemplos de outros modelos de simulação da distribuição da água aplicada por sistemas de rega por aspersão, refere-se o modelo semi-empírico desenvolvido por Le Gat e Molle (2000) que simula a distribuição espacial da água aplicada por rampas pivotantes e o modelo SIRIAS desenvolvido por Carrión et al., (2001) que utiliza uma aproximação balística para simular sistemas estacionários de rega por aspersão. No caso do modelo Enrolador realizou-se a modelação da distribuição espacial da pluviometria do canhão para condições sem vento, uma vez que não se possuem dados de padrões de aplicação para condições de vento. Em Correia (1997) é descrito um modelo de simulação da distribuição espacial da pluviometria para sistemas de aspersão de cobertura total em condições de ausência de vento. O padrão pluviométrico dos aspersores é aproximado através de funções calculadas com base no caudal do aspersor e do seu alcance, assumindo dois tipos de padrões pluviométricos: triangular e elíptico.

De seguida, descreve-se o algoritmo de cálculo desenvolvido para realizar a simulação da distribuição espacial das alturas pluviométricas do canhão, com base nas características e regulações do equipamento seleccionado no módulo de dimensionamento. Os dados de entrada para a simulação das alturas pluviométricas consistem no alcance do canhão [m], caudal debitado [m^3/h], ângulo de sector [$^\circ$], velocidade de deslocação [m/h], tipo de padrão de aplicação do canhão (triangular ou elíptico), espaçamento entre os colectores [m], diâmetros dos colectores [m] e no passo de simulação pretendido para o avanço do canhão [m]. O módulo de simulação da pluviometria produz como dados de saída os volumes de água recolhidos nos pluviómetros fictícios [ml] e as respectivas alturas de água [mm].

1 - Estimação do padrão de pluviometria do canhão

O padrão de pluviometria de um aspersor, ou canhão, caracteriza a forma como o caudal debitado é distribuído pela área molhada pelo aspersor. Keller e Bliesner (1990) apresentam várias formas de perfis de pluviometria de aspersores. A estimação dos padrões de pluviometria é efectuada no modelo Enrolador de acordo com a abordagem proposta por Correia (1997). Assim, os padrões de aplicação considerados podem ser triangulares ou elípticos em que se considera que o caudal debitado pelo canhão corresponde a um volume de água, em forma de cone ou de elipsóide, consoante a função de aplicação seja linear ou elíptica, respectivamente. Como o canhão geralmente rega apenas um sector do círculo é necessário que o volume do cone ou do elipsóide corresponda apenas ao sector do círculo que é molhado. Assim, com base nos valores do caudal, alcance e ângulo molhado do canhão, e nas equações que definem o volume do cone ou elipsóide é possível determinar os parâmetros de uma função para o padrão de distribuição, que calcule a pluviometria [mm/h] em função da distância de um ponto ao canhão.

a) Padrão de pluviometria triangular

A determinação da equação do padrão de pluviometria triangular consiste em determinar os parâmetros de uma equação linear, em que a ordenada na origem corresponde à máxima altura de água aplicada, Z_{max} , por unidade de tempo, Δt , que ocorre junto ao canhão. O declive é obtido dividindo Z_{max} [mm/h] pelo alcance do canhão R [m] (Correia, 1997). Assim a pluviometria aplicada num dado pluviómetro, Z_{pl} , [mm/h] localizado a uma distância D_{pl} [m] do canhão, é calculada da seguinte forma:

$$Z_{pl} = -\frac{Z_{max}}{R} D_{pl} + Z_{max} \quad (5.25)$$

O valor de Z_{max} é calculado admitindo que o caudal debitado pelo canhão, Q [m³/h], corresponde ao volume de um cone hipotético de altura, Z_{max} , e de raio igual ao alcance do canhão, R [m], segundo a seguinte expressão (Correia, 1997):

$$Vol_{cone} = Q \cdot \Delta t \quad (5.26)$$

substituindo o volume do cone Vol_{cone} pela sua expressão de cálculo e corrigindo a área do círculo molhado para um dado ângulo de sector α_{sr} , obtém-se Z_{max} [mm/h]:

$$\frac{1}{3} \pi R^2 \cdot Z_{max} = Q \cdot \Delta t \Leftrightarrow Z_{max} = K \cdot \frac{360}{\alpha_{sr}} \cdot \frac{3Q}{\pi R^2} \Delta t \quad (5.27)$$

onde $K = 1000$ é a constante de conversão para se obter Z_{max} expresso em mm/h.

b) Padrão de pluviometria elíptico

A equação do padrão de pluviometria elíptico é definida de acordo com a equação da elipse, em que $Z_{\max}$ corresponde ao semi-eixo que se dispõe segundo o eixo das ordenadas e R corresponde ao semi-eixo disposto no eixo das abcissas. Deste modo, a pluviometria aplicada num dado pluviómetro, Z_{pl} , [mm/h] localizado a uma distância D_{pl} [m] do canhão, é dada pela seguinte expressão (Correia, 1997):

$$\frac{D_{pl}^2}{R^2} + \frac{Z_{pl}^2}{Z_{\max}^2} = 1 \Leftrightarrow Z_{pl} = Z_{\max} \sqrt{\left(1 - \frac{D_{pl}^2}{R^2}\right)} \quad (5.28)$$

Considerando que o caudal do canhão, Q [m³/h], corresponde a metade do volume de um elipsóide hipotético em que os dois semi-eixos sobre o plano horizontal são iguais ao valor do alcance do canhão, R, sendo o semi-eixo relativo ao eixo das cotas igual a $Z_{\max}$, obtém-se (Correia, 1997):

$$\frac{1}{2} \text{Vol}_{\text{elipsóide}} = Q \cdot \Delta t \quad (5.29)$$

Substituindo o volume do elipsóide $\text{Vol}_{\text{elipsóide}}$ pela sua expressão de cálculo e corrigindo a área do círculo molhado para um dado ângulo de sector α_{sr} , obtém-se $Z_{\max}$ [mm/h]:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \pi R^2 \cdot Z_{\max} \right) = Q \cdot \Delta t \Leftrightarrow Z_{\max} = K \cdot \frac{360}{\alpha_{sr}} \cdot \frac{3Q}{2\pi R^2} \Delta t \quad (5.30)$$

onde $K = 1000$ é a constante de conversão para se obter $Z_{\max}$ expresso em mm/h.

2 - Determinação das posições do canhão ao longo da sua trajectória

A origem do referencial (x,y) é colocada na posição inicial do canhão. O canhão parte da posição inicial (0,0) e desloca-se n posições até atingir a posição final que corresponde ao primeiro ponto sobre a trajectória do canhão cuja distância à origem seja igual ou superior ao diâmetro molhado (D_{mc}). O movimento do canhão é discretizado em n posições dadas em função de um dado espaçamento (E_{pc}) definido pelo utilizador. Na Figura 5.7 é apresentado de forma esquemática as posições do canhão assim como as dos pluviómetros fictícios, que são descritos no próximo ponto.

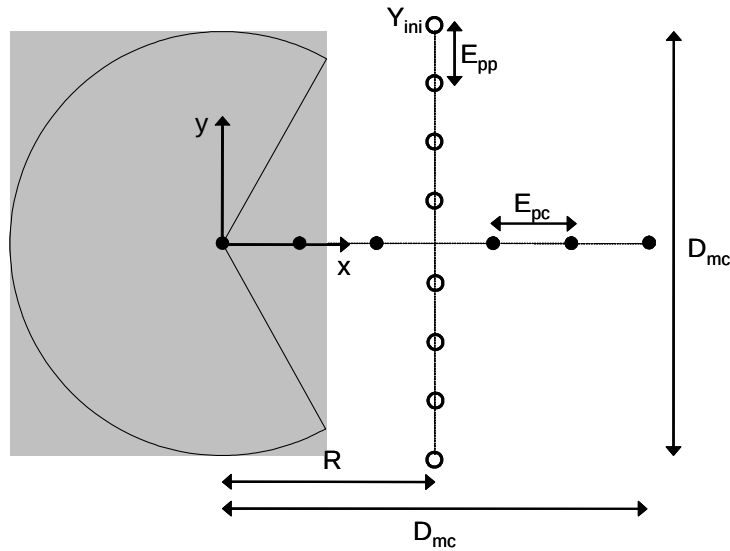


Figura 5.7 – Representação esquemática das posições do canhão e das posições dos pluviômetros consideradas na simulação do funcionamento do canhão.

3 - Determinação das posições dos pluviômetros.

Dividindo o valor de diâmetro molhado do canhão pelo valor do espaçamento entre os pluviômetros obtém-se o número de pluviômetros fictícios. A linha dos pluviômetros é colocada a uma distância da origem igual ao valor do alcance do canhão. Os valores das ordenadas dos pluviômetros variam de acordo com a seguinte equação:

$$Y_i = Y_{ini} - (i \times E_{pp}) \quad (5.31)$$

onde:

Y_i – é o valor da ordenada para o pluviômetro i [m];

Y_{ini} – é o valor da ordenada inicial para o pluviômetro $i=0$;

i – é o número de ordem do pluviômetro, que começa no valor zero;

E_{pp} – é o espaçamento entre as posições dos pluviômetros [m];

A ordenada inicial Y_{ini} é dada pela seguinte expressão:

$$Y_{ini} = \left[\left(\frac{np}{2} - 1 \right) + 0.5 \right] E_{pp} \quad (5.32)$$

sendo np o número de pluviômetros.

4 - Cálculo da matriz das distâncias dos pluviómetros ao canhão

Para simular as alturas pluviométricas teoricamente caídas em pluviómetros fictícios dispostos ao longo de uma linha perpendicular ao avanço do canhão é necessário calcular as distâncias entre esses pontos e o canhão ao longo do tempo. Com base nas posições dos pluviómetros e nas posições que o canhão vai ocupando à medida que se desloca na parcela é construída uma matriz das distâncias dos pluviómetros às várias posições do canhão. Cada linha desta matriz corresponde às diferentes distâncias de um dado pluviómetro para cada uma das posições do canhão. As colunas representam as distâncias dos diferentes colectores relativamente a uma dada posição ocupada pelo canhão.

5 - Cálculo da matriz das alturas pluviométricas

Para cada elemento da matriz das distâncias é calculada a pluviometria aplicada durante o intervalo de tempo Δt , através da função do padrão de aplicação do canhão (Eq. 5.25 ou Eq. 2.28), criando-se assim a matriz das pluviometrias. Somando todos os valores da mesma linha desta matriz, obtém-se o valor do volume total de água aplicada nesse pluviómetro, obtendo-se deste modo o vector dos pluviómetros fictícios, que simula os dados recolhidos num ensaio de campo.

6 – Sobreposição das faixas molhadas

Para se calcular os indicadores de desempenho de um sistema de rega com enrolador é necessário realizar a sobreposição existente entre os diâmetros molhados de faixas adjacentes. Este procedimento consiste em seleccionar os colectores que ficam dentro da faixa molhada e somar a estes a contribuição proveniente da passagem do canhão nas faixas adjacentes. Optou-se por incluir este procedimento no módulo de avaliação, uma vez que nas avaliações de campo é necessário calcular a sobreposição entre os colectores antes de se realizar o cálculo dos indicadores de desempenho.

A Figura 5.8 sintetiza o algoritmo de cálculo desenvolvido para a simulação da distribuição espacial da pluviometria do canhão, que é função do caudal debitado, do alcance, do ângulo de sector e do padrão pluviométrico do canhão.

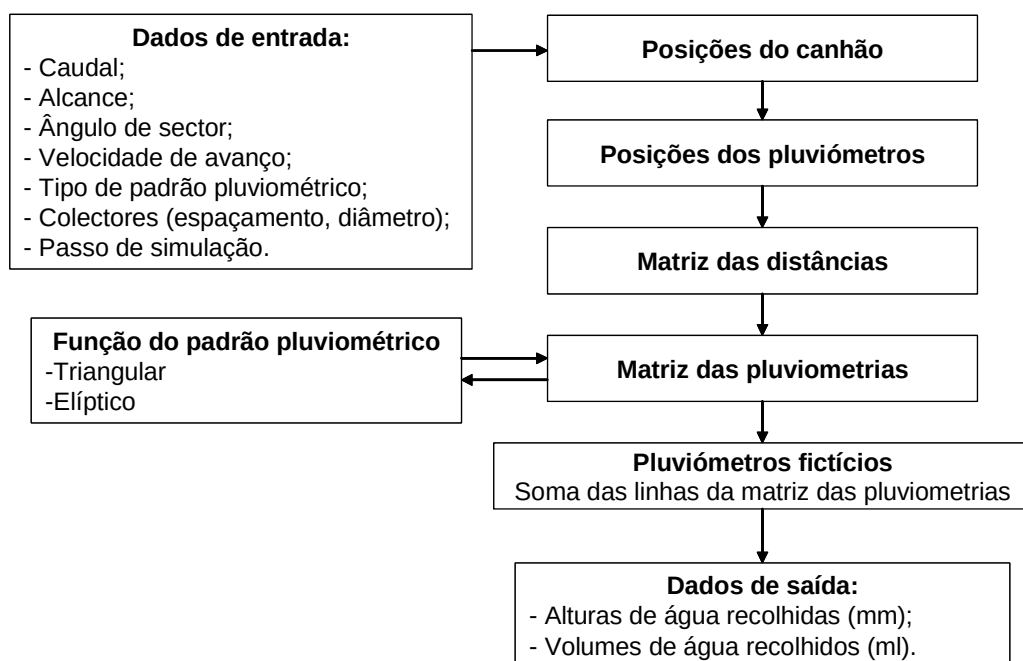


Figura 5.8 - Fluxograma do módulo de simulação da distribuição de água à parcela pelo canhão.

6. Metodologia e ferramentas informáticas desenvolvidas

6.1. Metodologia desenvolvida

A metodologia proposta neste trabalho tem como objectivo permitir avaliar os impactes das alterações climáticas sobre o regadio, nomeadamente sobre as necessidades de rega das culturas e sobre o projecto de sistemas de rega. Para alcançar estes objectivos foi necessário que esta metodologia incluísse todos os passos necessários ao projecto e à gestão dos sistemas de rega: recolha dos dados de base (clima, solos, culturas, sistemas de rega, etc.) incluindo os dados climáticos relativos aos cenários de alteração climática; determinação das necessidades de rega anuais e do caudal de projecto com o recurso a um modelo de balanço hídrico do solo; e dimensionamento de um dado sistema de rega para uma determinada probabilidade de não excedência do caudal de projecto. Para a implementação desta metodologia foi desenvolvido um conjunto de ferramentas informáticas, que combina modelos de simulação do balanço hídrico, com modelos de simulação de sistemas de rega, bases de dados, sistemas de informação geográfica e métodos geoestatísticos de análise espacial (Rolim et al., 2010b). Foram desenvolvidas as aplicações informáticas: IrrigRotation, Interpolador, Enrolador e o sistema de informação IScenarios. O programa IrrigRotation (Rolim e Teixeira, 2008) é um modelo de simulação do balanço hídrico do solo, contínuo no tempo, que permite a consideração de rotações de culturas. O programa Interpolador realiza a interpolação espacial das variáveis agrometeorológicas que alimentam o modelo IrrigRotation (Rolim et al., 2010a, 2011). O Enrolador é um modelo de dimensionamento e de simulação de sistemas de rega de canhão com enrolador, que permite realizar o seu dimensionamento otimizado, simular a forma como realiza a distribuição de água ao longo da parcela e avaliar o seu desempenho. O sistema de informação IScenarios fornece os dados dos cenários de alteração climática ao programa IrrigRotation, permitindo gerir a grande quantidade de informação relativa aos cenários de alteração climática.

O desenvolvimento destas ferramentas informáticas foi realizado de forma a que cada *software* possa funcionar de forma independente e possa ser utilizado de forma isolada, o que permite utilizar cada uma destas ferramentas noutros estudos e que no futuro seja possível adicionar ou substituir outros programas nesta metodologia. A integração entre os modelos realiza-se ao nível dos dados de entrada dos modelos.

Durante o processo de desenvolvimento destas aplicações reduziu-se ao mínimo o trabalho nas interfaces gráficas dando-se especial atenção à modelação e à construção dos módulos de cálculo. Estas ferramentas informáticas encontram-se concluídas e operacionais, apresentando-se no Anexo I os testes e a validação realizada ao modelo IrrigRotation e no

Anexo II a validação realizada ao programa Interpolador. Após o desenvolvimento dos modelos e a fase de testes procedeu-se à sua aplicação experimental a dois casos de estudo na região do Alentejo, sendo essa aplicação apresentada no capítulo 7.

Na Figura 6.1 apresenta-se de forma esquemática a metodologia desenvolvida mostrando-se o modo como os diferentes componentes se combinam.

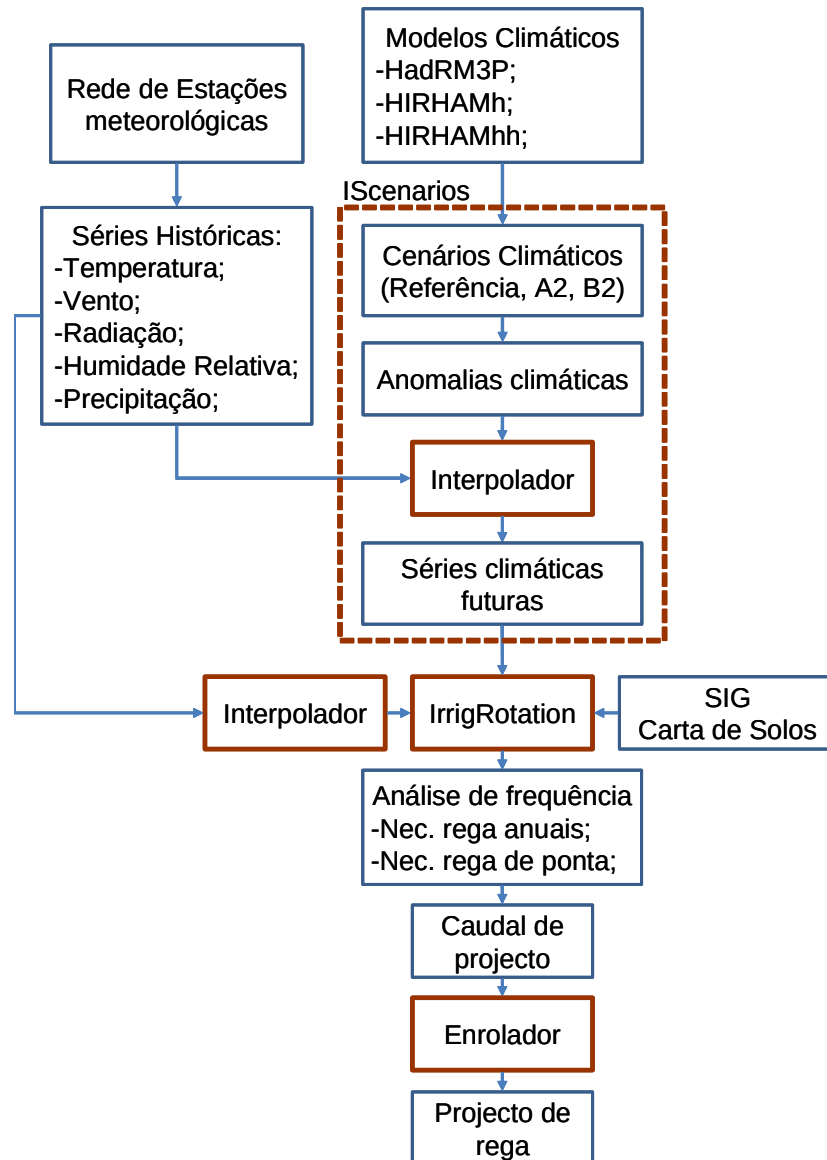


Figura 6.1 – Metodologia desenvolvida para a avaliação dos impactes dos cenários de alteração climática na agricultura de regadio e nos sistemas de rega.

De uma forma sintética a metodologia desenvolvida consiste na realização encadeada dos seguintes passos (Fig. 6.1):

- i. Selecção e recolha dos cenários de alteração climática disponíveis para uma dada região. Estes dados podem ser obtidos através do IPCC *data distribution center* ou através de projectos de investigação tais como o PRUDENCE (Christensen, 2005), o ENSEMBLES

(Hewitt e Griggs, 2004) ou o CORDEX (Bøssing Christensen, 2012). No caso de estudos sectoriais sobre a agricultura ou os recursos hídricos é conveniente utilizar dados produzidos por modelos climáticos regionais.

ii. Recolha dos dados climáticos observados por uma rede de estações meteorológicas existente na região onde se realiza o estudo. Os dados observados são utilizados para definir as condições actuais estabelecendo o cenário de referência e também para criar as séries climáticas perturbadas de forma a corrigir os desvios dos resultados dos modelos climáticos de acordo com o método *Delta Change* (Cunha et al., 2006; Graham et al., 2007; Mourato, 2009).

iii. Desenvolvimento de um SIG com o recurso ao *software* GeoMedia 6.0 contendo os pontos das simulações dos modelos climáticos, os pontos das estações meteorológicas e a carta de solos para os locais de simulação. Neste SIG utiliza-se a *land/sea mask* dos modelos RCM e o mapa da região do Alentejo para seleccionar os pontos das grelhas dos modelos climáticos.

iv. Utilização do sistema de informação IScenarios para a gestão dos dados dos cenários de alteração climática. Este sistema de informação permite calcular as anomalias para cada um dos cenários, modelos e variáveis meteorológicas consideradas. Estas anomalias são utilizadas em conjunto com os dados observados para criar as séries climáticas futuras.

Este sistema de informação é composto por módulos de *software*, por uma base de dados e por um SIG que permitem gerir o elevado volume de dados espacialmente distribuídos que são produzidos pelos modelos climáticos regionais (RCM). Estes dados são espacialmente distribuídos e são disponibilizados num formato que os torna de difícil utilização, tendo sido necessário na construção desta metodologia o desenvolvimento de uma ferramenta informática que permitisse a leitura dos ficheiros de saída dos modelos climáticos e a sua conversão num formato que permita a sua utilização no projecto e gestão da rega, nomeadamente como dados de entrada dos modelos de simulação da rega.

O *software* Interpolador é utilizado neste sistema de informação como forma de permitir combinar dados climáticos provenientes de diferentes fontes e com diferentes distribuições espaciais. Assim, o programa Interpolador utiliza como dados de entrada as anomalias climáticas e os dados observados nas estações meteorológicas, e interpola para cada ponto do terreno tanto os dados das anomalias como as séries observadas, sendo as séries climáticas observadas perturbadas com os valores das anomalias. Como *output* o sistema IScenarios fornece as séries climáticas futuras relativas aos cenários de alteração climática que serão utilizados pelo modelo IrrigRotation.

v. Utilização do modelo IrrigRotation para o cálculo das necessidades de rega anuais das culturas e das necessidades de rega para o período de ponta. Cada simulação é realizada combinando uma rotação cultural, com um solo e com um cenário climático. A avaliação dos impactes das alterações climáticas requer que para cada parcela se realize para o mesmo par rotação de culturas-solo um conjunto de simulações em que se consideram os dados climáticos observados, e os diferentes cenários de alteração climática de forma a obtermos uma gama de valores para as necessidades de rega das culturas. Esta gama de valores permite ter em conta o grau de incerteza associado às projecções de alteração climática. Com base nos resultados das simulações realiza-se uma análise de frequência, para cada um dos cenários climáticos, determinando-se as probabilidades de não excedência associadas às necessidades de rega anuais e às necessidades de rega relativas ao período de ponta.

vi. Dimensionamento de sistemas de rega com canhão com enrolador com o recurso ao programa Enrolador. Este programa realiza o dimensionamento optimizado dos diversos componentes dos sistemas de rega com canhão para um dado valor de probabilidade de não excedência do caudal de projecto. Os sistemas de rega com enrolador poderão constituir uma importante ferramenta de adaptação às alterações climáticas no caso das culturas de sequeiro, quando exista disponibilidades de água para rega, pois é um sistema de rega bastante indicado para regas de complemento e de socorro. O programa Enrolador possui um conjunto de ficheiros de dados que contêm dados de canhões, enroladores e tubagens de alumínio, que permitem seleccionar de forma automática o equipamento que mais se aproxima dos critérios de projecto. Nesta metodologia poderão incorporar-se outros programas de dimensionamento de sistemas de rega consoante o tipo de sistema de rega que se pretende dimensionar, como por exemplo o MIRRIG (Pedras et al., 2009) que permite o dimensionamento de sistemas de rega localizada. Na próxima secção (6.2) descrevem-se de forma pormenorizada as ferramentas informáticas desenvolvidas (IScenarios, Interpolador, IrrigRotation e Enrolador).

6.2. Ferramentas informáticas desenvolvidas

6.2.1. Sistema de informação IScenarios

6.2.1.1. Considerações gerais

A metodologia desenvolvida 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 impacto das alterações climáticas sobre o regadio. No Anexo III apresenta-se como exemplo um dos ficheiros produzidos pelos modelos climáticos RCM e que foi utilizado neste trabalho. Para conseguir a sua fácil disponibilização 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. As anomalias climáticas são posteriormente utilizadas para perturbar os dados climáticos observados em estações meteorológicas de modo a se obterem as séries climáticas correspondentes a cada cenário de alteração climática. Esta perturbação foi efectuada de acordo com o método *Delta Change* (Cunha et al., 2006; Graham et al., 2007; Mourato, 2009) descrito na secção 2.5.3.1.

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

- Um programa para a extracção e formatação dos dados climáticos produzidos pelos modelos RCM de uma forma automatizada. Este programa foi desenvolvido em Visual Basic 2005, consistindo num módulo de cálculo que 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 objectivo de permitir a visualização e posterior selecção 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.
- Uma base de dados para gerar, para cada variável climática, um vector com os valores diários das anomalias climáticas. Estes valores das anomalias serão posteriormente utilizados para perturbar as 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 permitem executar alguns dos passos intermédios no cálculo das anomalias e na construção das séries climáticas futuras.

Na Figura 6.2 apresenta-se uma representação esquemática do sistema IScenarios em que é possível observar o modo como diversos os componentes deste sistema se articulam.

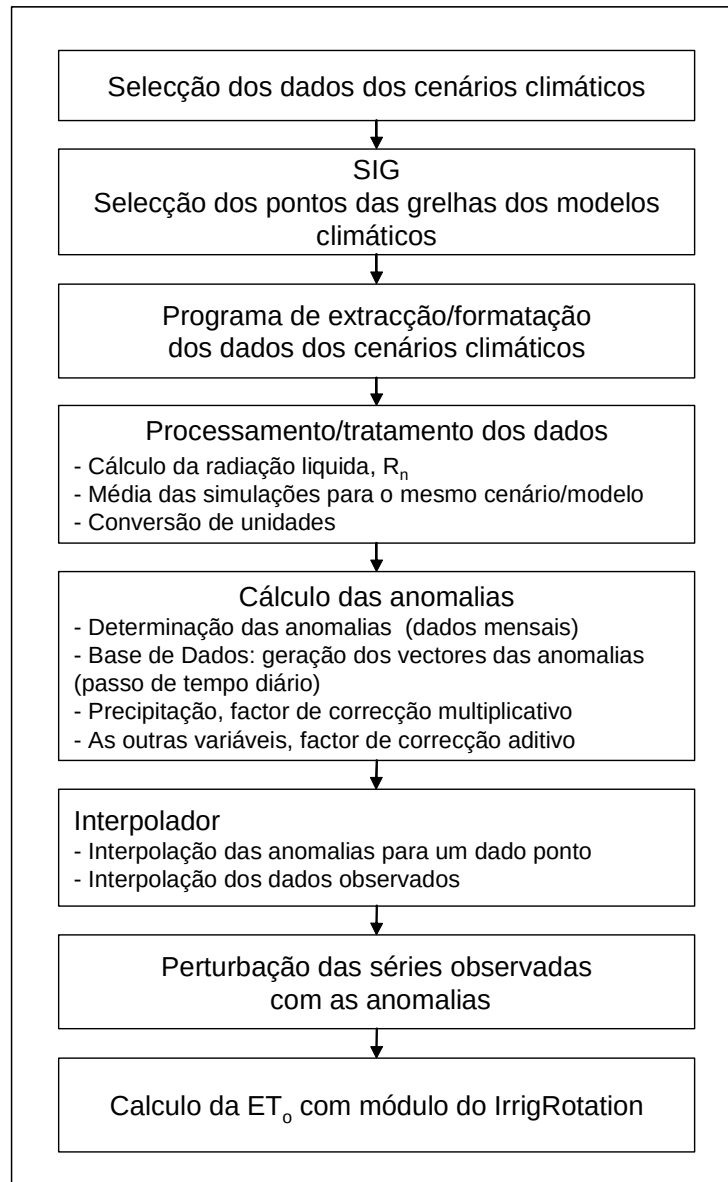


Figura 6.2 – Representação esquemática do sistema IScenarios.

A realização de um estudo para a avaliação dos impactes das alterações climáticas sobre a agricultura, e em particular sobre o regadio, está muito dependente dos dados disponíveis. Assim, na descrição deste sistema opta-se por descrever a sua aplicação à região do Alentejo, pois muitas das opções de desenvolvimento foram efectuadas com base nos dados disponíveis para esta região.

6.2.1.2. Sistema IScenarios desenvolvido para a região do Alentejo

O desenvolvimento do sistema de informação IScenarios consistiu na implementação para a região do Alentejo das diversas etapas apresentadas na Figura 6.2. Descrevendo-se de seguida, em detalhe, cada um dos passos efectuados:

Seleccção dos dados dos cenários climáticos

A aplicação deste sistema de informação inicia-se com a recolha dos dados climáticos, tanto observados como de alteração climática, para uma dada região. Neste trabalho optou-se por utilizar os dados dos cenários de alteração climática produzidos por modelos regionais climáticos (RCM). Os dados dos modelos RCM foram obtidos através do arquivo de dados do projecto PRUDENCE (Christensen, 2005), disponível em <http://www.prudence.dmi.dk/>. Os ficheiros de dados foram extraídos em formato ASCII com o recurso à ferramenta DODS (*Distributed Oceanographic Data System*) (NOAA, 2011) que permite seleccionar subáreas das grelhas dos modelos climáticos e escolher apenas uma parte da série temporal, através da definição de uma data de início e de fim, reduzindo assim a dimensão dos ficheiros a extrair.

Os modelos climáticos considerados foram o modelo HadRM3P (Jones et al., 2004) desenvolvido pelo *Hadley Centre* (HC), e os modelos HIRHAMh e HIRHAMhh (Bøssing Christensen, et al., 2007) do *Danish Meteorological Institute* (DMI). Para cada um dos modelos consideram-se todos os cenários SRES disponibilizados no projecto PRUDENCE (Christensen, 2005) e adoptaram-se as séries de dados com um passo de tempo mensal. Para o modelo HadRM3P consideraram-se os cenários A2, B2 (2071-2100) e de controlo (1961/90) e para os modelos HIRHAMh e HIRHAMhh consideraram-se o cenário A2 (2071-2100) e o de controlo (1961/90). Considerou-se o modelo HadRM3P, por já terem sido realizados em Portugal estudos em que se utilizaram os modelos HadRM3 (Miranda et al., 2006; Brandão, 2006) e HadRM3P (Mourato, 2009) o que permite ter um termo de comparação para os resultados obtidos neste trabalho. Os modelos HIRHAMh e HIRHAMhh, com uma resolução espacial de 25 Km e 12 Km, respectivamente, foram adoptados no sentido de avaliar se a utilização de modelos com uma maior resolução espacial permite obter dados com menores desvios, principalmente no caso da precipitação.

a) Dados climáticos dos cenários de alteração climática (2071-2100):

Os dados fornecidos pelos modelos são espacialmente distribuídos com uma resolução espacial de 0.44 graus, para o modelo HadRM3P (≈ 50 km), 0.22 graus (≈ 25 km) para o modelo HIRHAMh e 0.11 graus (≈ 12 km) para o modelo HIRHAMhh. Na Figura 6.3 pode-se visualizar a distribuição geográfica de cada uma das grelhas dos pontos de simulação dos modelos. No Anexo IV apresenta-se a listagem completa dos ficheiros extraídos do projecto PRUDENCE. Para cada um dos modelos as variáveis climáticas extraídas do projecto PRUDENCE foram:

- t2m – temperatura média diária a 2 metros de altura [K];
- t2max – temperatura máxima diária a 2 metros de altura [K];

- t2min – temperatura mínima diária a 2 metros de altura [K];
- precip – precipitação [mm/dia];
- w10m – velocidade do vento a 10 metros de altura 10 [m/s];
- SWnet – radiação líquida de curto comprimento de onda [W/m²];
- LWnet – radiação líquida de longo comprimento de onda [W/m²];
- rh2m – humidade relativa a 2 metros de altura [%] (para o HadRM3P);
- td2m – temperatura do ponto de orvalho a 2 metros de altura [K] (para o HIRHAMh e HIRHAMhh).

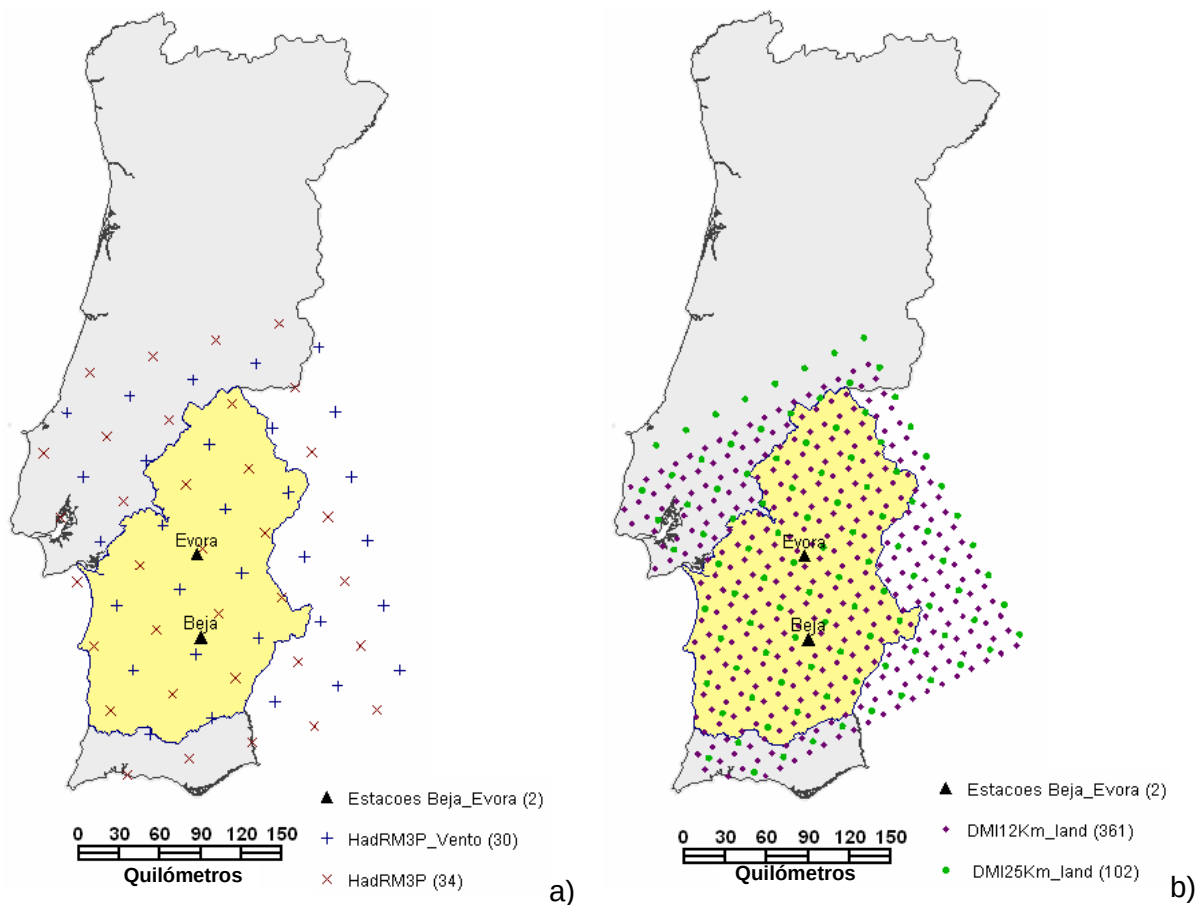


Figura 6.3 - Região do Alentejo com a localização das estações de Beja e Évora (▲) e dos pontos a) das grelhas do modelo climático HadRM3P relativas ao vento (+) e a todas as outras variáveis (x); e b) das grelhas dos modelos HIRHAMh (◆) e HIRHAMhh (●).

b) Dados climáticos observados para o período de referência (1961-90):

Relativamente aos dados observados em estações meteorológicas utilizaram-se as estações meteorológicas de Évora e de Beja, do Instituto de Meteorologia, para o período de 1961-1990, que é o período de referência normalmente utilizado em estudos de alterações climáticas, com um passo de tempo diário. Os dados observados são utilizados para definir

o cenário de referência com o qual se compararão os cenários de alteração climática. 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) [$\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$], temperatura máxima do ar (T_{max}) [$^{\circ}\text{C}$], temperatura mínima do ar (T_{min}) [$^{\circ}\text{C}$], 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}].

Desenvolvimento do SIG

Os dados dos modelos RCM são espacialmente distribuídos, sendo necessário a utilização de um SIG para seleccionar os pontos a considerar para uma dada região. Assim desenvolveu-se um SIG em GeoMedia 6.0 com o objectivo de permitir a visualização e posterior selecção dos pontos das grelhas dos modelos.

Os ficheiros produzidos pelos modelos climáticos fornecem um cabeçalho que contém os dados latitude e longitude. É também fornecida uma máscara para os pontos das grelhas dos modelos, *land/sea mask* (lsm.HCw.nc.gz.ascii, lsm.DMI.25km.nc.gz.ascii, lsm.DMI.12km.nc.gz.ascii), que classifica os pontos de mar como 0 e os pontos de terra como 1. Acessoriamente é também disponibilizado um ficheiro com a orografia do terreno (oro.HC.nc.gz.ascii, oro.DMI.25km.nc.gz.ascii, oro.DMI.12km.nc.gz.ascii). A selecção dos pontos a serem considerados fez-se com base em dois critérios: o primeiro foi a exclusão dos pontos de mar e o segundo a consideração de todos os pontos de terra contidos dentro da região do Alentejo bem como os pontos contíguos a esta região de modo a permitir uma melhor interpolação espacial dos dados.

Na Figura 6.3a apresentam-se as grelhas do modelo HadRM3P. Este modelo fornece uma grelha de pontos para a velocidade do vento e outra para as restantes variáveis climáticas. A distribuição espacial dos pontos das grelhas dos modelos HIRHAMh e HIRHAMhh é apresentada na Figura 6.3b.

O SIG desenvolvido inclui ainda a Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP V6.0) (IGEO, 2010), a localização das estações de Beja e Évora, do Instituto de Meteorologia e a carta de solos, à escala 1:25000, do Instituto de Desenvolvimento Rural e Hidráulica (IDRHa, 2010).

Extracção/formatação dos dados dos cenários climáticos

Os dados dos cenários climáticos são fornecidos por ficheiros em formato ASCII, em que os dados estão organizados de um modo que os torna de difícil utilização. Os pontos das grelhas dos modelos estão organizados numa matriz de n colunas e de m linhas, em que cada posição da matriz corresponde um ponto de simulação do modelo. Esta matriz de pontos repete-se para cada um dos meses considerados na série climática, sendo o ficheiro constituído ao todo por 360 matrizes ($30 \text{ anos} \times 12 \text{ meses}$).

Para permitir o processamento destes ficheiros desenvolveu-se um programa de leitura e formatação dos dados, que permite extrair os dados destes ficheiros e criar um ficheiro de saída, para cada variável climática, em que cada coluna contém os dados climáticos para cada ponto da grelha. Este programa permite retirar automaticamente os pontos que se pretendem rejeitar, tais como os pontos classificados como “mar”.

Os dados de entrada são fornecidos ao programa através dos ficheiros *parametros.txt* e *variaveis.txt* que permitem parametrizar o programa de leitura dos dados, e pelos ficheiros ASCII dos modelos climáticos obtidos através do projecto PRUDENCE (Christensen, 2005). Opcionalmente podem-se incluir os ficheiros *lsm.ascii* e *oro.ascii* que contêm a máscara *land/sea* e a matriz da orografia, respectivamente. Estes dois ficheiros são utilizados durante a criação do SIG para a selecção dos pontos a utilizar. O ficheiro *parâmetros.txt* caracteriza os ficheiros dos modelos climáticos, contendo o número de meses, o número de colunas e linhas da matriz dos pontos de simulação, o código dos pontos a retirar e a opção de extrair as coordenadas dos pontos, os dados da *land/sea mask* e da orografia. O ficheiro *variáveis.txt* possui a listagem das variáveis climáticas. Os dados de saída são armazenados num ficheiro de texto, que é criado para cada uma das variáveis consideradas e opcionalmente pode ser criado um ficheiro *saida_Long_Lat.txt* contendo as coordenadas e os valores da *land/sea mask* e da orografia. Na Figura 6.4 apresenta-se a estrutura de ficheiros do programa, mostrando-se cada um destes ficheiros no Anexo V.

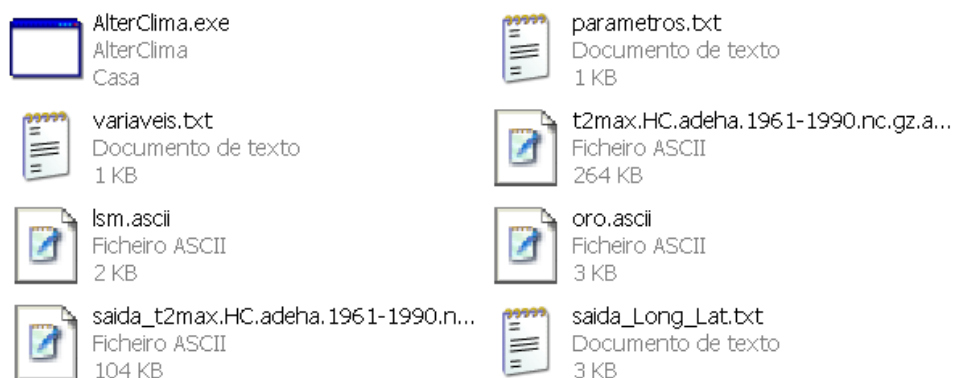


Figura 6.4 – Estrutura de ficheiros do programa de leitura e formatação dos dados dos modelos climáticos.

O programa de formatação (AlterClima.exe) funciona em duas fases. É utilizado em primeiro lugar durante a construção do SIG para criar um ficheiro que fornecerá as coordenadas geográficas dos pontos das grelhas dos modelos, bem como o valor da land/sea mask e da orografia. Após a visualização destas grelhas é possível identificar os pontos a retirar, introduzindo-se posteriormente no ficheiro parâmetros.txt o número de código dos pontos a retirar. Após a selecção dos pontos das grelhas dos modelos climáticos, realizou-se a formatação de 56 ficheiros do modelo HadRM3P, de 16 do HIRHAMh e de 16 do HIRHAMhh.

Tratamento dos dados

Após a extracção/formatação dos dados dos modelos climáticos foi necessário realizar o tratamento dos dados, o que incluiu o cálculo da média para as diferentes simulações do mesmo cenário e modelo e a conversão das unidades em que os dados são fornecidos para as unidades em que os modelos trabalham.

O modelo HadRM3P possui três simulações para o cenário de controlo (adeha, adehb, adehc), três para o cenário A2 (adhfa; adhfe; adhff) e apenas uma para o cenário B2 (adhfd). Optou-se por fazer a média das três simulações para o cenário de controlo e A2, de modo a se ficar com apenas uma série de dados para cada um dos cenários considerados.

Para os três modelos (HadRM3P, HIRHAMh e HIRHAMhh) realizou-se a conversão das unidades em que os dados são disponibilizados para as unidades utilizadas no modelo IrrigRotation. A temperatura que é dada em graus Kelvin [K] foi convertida em graus Celsius [°C]. A radiação é fornecida como radiação líquida de curto comprimento de onda (R_{ns}) [W/m^2] e radiação líquida de longo comprimento de onda (R_{nl}) [W/m^2], tendo-se calculado a radiação líquida (R_n) de acordo com a seguinte expressão (Allen et al., 1998):

$$R_n = (R_{ns} - R_{nl}) \times 0.0864 \quad (6.1)$$

onde:

R_n – Radiação líquida [$MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$];

R_{ns} – Radiação líquida de curto comprimento de onda [$W\ m^{-2}$];

R_{nl} – Radiação líquida de longo comprimento de onda [$W\ m^{-2}$];

0.0864 – factor de conversão de $W\ m^{-2}$ em $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$.

Os dados do vento são fornecidos a uma altura ao solo de 10 m e foi necessário utilizar a seguinte expressão (Allen et al., 1998) para estimar a velocidade do vento a 2 m de altura:

$$U_2 = U_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (6.2)$$

onde:

U_2 – velocidade média do vento a 2 m [m s^{-1}];

U_z – velocidade média do à altura z m [m s^{-1}];

z – Altura a que é medida a velocidade do vento [m].

No caso modelos HIRHAMh e HIRHAMhh os dados de humidade do ar são fornecidos através da temperatura do ponto de orvalho [K], tendo sido necessário converter estes dados em valores de humidade relativa máxima ($RH_{\max}$) e mínima ($RH_{\min}$). Para calcular $RH_{\max}$ e $RH_{\min}$ em primeiro lugar calculou-se a tensão de vapor real (e_a) e posteriormente estimou-se $RH_{\min}$, utilizando-se sucessivamente as equações descritas em Allen et al. (1998).

$$e_a = e^0(T_{\text{dew}}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{\text{dew}}}{T_{\text{dew}} + 237.3} \right] \quad (6.3)$$

onde:

e_a – pressão de vapor real [kPa];

$e^0(T)$ – pressão de vapor de saturação à temperatura T [kPa];

T_{dew} – temperatura do ponto de orvalho [$^{\circ}\text{C}$].

$$RH_{\max} = \frac{100e_a}{e^0(T_{\min})} \quad (6.4)$$

em que:

$RH_{\max}$ - humidade relativa máxima [%];

$T_{\min}$ – Temperatura mínima diária [$^{\circ}\text{C}$].

Para estimar $RH_{\min}$ utilizou-se a equação 6.4 tendo-se substituído $T_{\min}$ por $T_{\max}$ assumindo-se a simplificação de que a pressão de vapor real se mantém constante ao longo do dia. Para confirmar que esta simplificação não produzia valores demasiado baixos de $RH_{\min}$, compararam-se os resultados obtidos com esta equação, para o período de referência (10961-90), com os valores observados nas estações meteorológicas de Beja e Évora, para o mesmo período. Verificou-se que ambas as séries apresentavam resultados semelhantes

com desvios a variarem em média entre -2% (HIRHAMh) a -3.8% (HIRHAMhh) para Beja e entre -4.9% (HIRHAMh) a -7.2% (HIRHAMhh) para Évora.

Cálculo das anomalias climáticas

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* (vd. secção 2.5.3.1.). Este método de produzir as séries climáticas futuras tem a vantagem de permitir manter a estrutura espacial do clima, através da utilização de uma rede de estações meteorológicas, e permite também reduzir os desvios dos modelos climáticos. No entanto, o método *Delta Change* mantém a variabilidade actual do clima, o que pode corresponder a uma simplificação considerável. (Cunha et al., 2006; IPCC-TGICA, 2007; Mourato, 2009). Em virtude de se terem observado desvios consideráveis entre os dados dos modelos RCM para o período de controlo e os dados observados nas estações meteorológicas (vd. Secção 7.2.2) optou-se por utilizar o método de correcção *Delta Change*, que tem por base a série de dados observados, para evitar uma elevada incerteza nas séries climáticas futuras. Assim, com base nos cenários de referência (1961-90) e nos diferentes cenários de alteração climática (A2 e B2 para o modelo HadRM3P e A2 para os modelos HIRHAMh e HIRHAMhh) calcularam-se as anomalias para cada uma das variáveis consideradas.

Optou-se por calcular as anomalias com base nos dados com um passo de tempo mensal e não nos diários pois o grau de incerteza associado aos resultados dos modelos climáticos é elevado, sendo preferível utilizar os valores médios mensais pois dão uma melhor indicação da tendência e reduzem a ocorrência de valores extremos (comunicação pessoal Proença de Oliveira, 2009).

As anomalias são calculadas através da comparação das séries de cada um dos cenários (A2 e B2) com a série de referência do modelo RCM (1961-90). 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. 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 (vd. secção 2.5.3.1.).

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. Para a produção destas séries diárias desenvolveu-se uma base de dados em Access onde se construíram diversas *queries* que permitiram a sua geração.

Conforme referido anteriormente a precipitação teve que ser tratada de uma forma diferente das restantes variáveis meteorológicas. Assim, descreve-se isoladamente o cálculo das anomalias para a precipitação. 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, efectuou-se o cálculo das anomalias para a precipitação de acordo com a metodologia descrita em Miranda et al. (2006), em que se determinam os factores de correcção da precipitação com base em médias de 30 anos para cada um dos meses. Este método de correcção dos desvios permitiu que a percentagem de redução da precipitação nas séries perturbadas (A2 e B2) fosse 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 respectivos.

Assim, em primeiro lugar calcularam-se as médias mensais das 14 séries de dados de precipitação dos modelos climáticos: Évora (HadRM3P: *baseline*, A2, B2; HIRHAMh: *baseline*, A2; HIRHAMhh: *baseline*, A2); Beja (HadRM3P: *baseline*, A2, B2; HIRHAMh: *baseline*, A2; HIRHAMhh: *baseline*, A2). Com base nas médias de 30 anos, calculou-se para cada mês do ano as anomalias médias mensais, em percentagem, dividindo os cenários A2 e B2 pelos cenários de referência respectivos. Com base nos 12 valores das anomalias da precipitação, calculadas para cada cenário, gerou-se uma série de anomalias diárias. Nesta série os valores de um dado mês são iguais ao longo de toda a série.

Interpolação espacial das anomalias

Para produzir as séries climáticas futuras é necessário interpolar espacialmente as anomalias climáticas produzidas pelos modelos climáticos RCM para a localização das estações meteorológicas, uma vez que os pontos das grelhas dos modelos e os pontos das estações têm diferentes distribuições espaciais.

A interpolação realizou-se através da utilização do *software* Interpolador (vd. secção 6.2.2.). O método de interpolação considerado foi o inverso do quadrado da distância, uma vez que durante a validação do programa Interpolador (vd. Anexo II) se constatou que este método

apresenta resultados muito semelhantes ao método da colocação por mínimos quadrados, não se justificando a complexidade extra da calibração das funções de covariância.

Para a região do Alentejo como só se dispunha de duas estações meteorológicas com 30 anos de registos diários, as estações de Évora e Beja, optou-se por interpolar as anomalias para a localização destas duas estações.

Para o modelo HadRM3P foram interpolados 16 ficheiros para cada estação (Beja e Évora), oito para cada um dos dois cenários considerados (A2 e B2), com a particularidade do vento possuir uma grelha diferente das restantes variáveis. Para os modelos HIRHAMh e HIRHAMhh (cenário A2) interpolaram-se nove ficheiros para cada um dos modelos e para cada uma das estações.

Perturbação das séries históricas

Estas séries de anomalias interpoladas espacialmente foram posteriormente projectadas sobre os dados registados em Beja e Évora e calcularam-se as séries perturbadas para os diferentes cenários. Daqui resultaram 8 séries climáticas perturbadas Évora_A2_HadRM3P; Évora_B2_HadRM3P; Évora_A2_HIRHAMh; Évora_A2_HIRHAMhh; Beja_A2_HadRM3P; Beja_B2_HadRM3P; Beja_A2_HIRHAMh; Beja_A2_HIRHAMhh.

Para todas as variáveis climáticas à excepção da precipitação as anomalias são adicionadas aos dados registados. No caso da precipitação as anomalias são multiplicadas para manter o mesmo número de ocorrências de precipitação dentro do mesmo mês, alterando-se apenas o valor da precipitação ocorrida (Cunha et al., 2006). Após a obtenção das séries perturbadas realizou-se a validação dos dados e a correcção de erros, uma vez que a perturbação das séries registadas através das anomalias pode conduzir a algumas inconsistências nos dados. Para a precipitação comparam-se os valores de cada cenário de alteração climática com os dados registados nas estações meteorológicas, não tendo sido necessário realizar qualquer correcção.

Relativamente aos valores da velocidade do vento verificou-se que as séries perturbadas apresentavam valores negativos, tendo sido necessário corrigir esses valores. Para tal procedeu-se à determinação do valor mínimo da velocidade do vento nas séries observadas (1961-90) e obrigou-se a que nas séries perturbadas também fosse esse o seu valor mínimo.

No caso da humidade relativa como apenas se dispunha para o modelo HadRM3P dos valores da humidade relativa média decidiu-se assumir a simplificação de que a anomalia da humidade relativa média perturba de igual modo tanto a humidade relativa mínima como a

máxima. No caso dos modelos HIRHAMh e HIRHAMhh utilizaram-se as anomalias de $RH_{\max}$ e de $RH_{\min}$ para perturbar as respectivas séries observadas. Para a humidade relativa foi necessário corrigir alguns valores de $RH_{\max}$ de modo a que não ultrapassassem os 100% e foi necessário retirar os valores negativos de $RH_{\min}$. A correcção dos valores mínimos, foi realizada determinando-se o valor mínimo registado em cada uma das estações, tendo todos os valores inferiores a esse mínimo sido substituídos por esse valor.

Realizaram-se correcções aos valores mais baixos da radiação líquida (R_n) não deixando esta variável apresentar nas séries futuras valores mais baixos do que o menor valor registado nas estações respectivas. A temperatura apresentou valores plausíveis não tendo sido necessário efectuar correcções.

Para as variáveis $T_{\min}$ e $T_{\max}$ e $HR_{\min}$ e $HR_{\max}$ corrigiu-se os casos em que a $T_{\min}$ foi superior à $T_{\max}$ e em que a $HR_{\min}$ foi maior do que $HR_{\max}$. Corrigiu-se igualmente o valor mínimo da diferença entre estas variáveis. As diferenças mínimas entre a temperatura máxima e mínima e na humidade relativa máxima e mínima foram corrigidas de acordo com os valores históricos. Para realizar a correcção para um dado dia fez-se a média do mínimo e do máximo (para esse dia) e depois adicionou-se à média desse dia metade da diferença mínima para obter a temperatura ou humidade relativa máxima e retirou-se metade da diferença mínima para obter a temperatura ou humidade relativa mínima.

Para cada uma das séries climáticas realizou-se o cálculo da ET_o , com o módulo de cálculo da evapotranspiração do IrrigRotation. No final deste processo obtiveram-se as seguintes séries de dados:

- Évora
 - o Controlo, registados na estação meteorológica (1961-90);
 - o HadRM3P A2 (2071-2100);
 - o HadRM3P B2 (2071-2100);
 - o HIRHAMh A2 (2071-2100);
 - o HIRHAMhh A2 (2071-2100).
- Beja
 - o Controlo, registados na estação meteorológica (1961-90);
 - o HadRM3P A2 (2071-2100);
 - o HadRM3P B2 (2071-2100);
 - o HIRHAMh A2 (2071-2100);
 - o HIRHAMhh A2 (2071-2100).

6.2.2 Aplicação informática Interpolador

6.2.2.1. Considerações gerais

O *software* Interpolador (Rolim et al., 2011) foi desenvolvido com o objectivo de fornecer os dados climáticos de entrada ao modelo IrrigRotation (Rolim e Teixeira, 2008), interpolados espacialmente para o centróide de cada parcela onde se pretenda realizar a simulação do balanço hídrico do solo. Este programa permite combinar para um dado ponto do terreno dados climáticos provenientes de diferentes fontes. A localização geográfica dos pontos das grelhas dos modelos climáticos (RCM) varia com o modelo e é diferente da localização dos pontos de uma dada rede de estações meteorológicas sendo necessário utilizar um *software* de interpolação espacial para interpolar os valores das anomalias climáticas produzidas pelos diferentes cenários e modelos climáticos para o local das estações meteorológicas.

O desenvolvimento deste *software* justifica-se devido ao facto de os programas de análise espacial actualmente disponíveis no mercado só permitem realizar uma única interpolação espacial de cada vez. Esta limitação torna impraticável o cálculo de valores interpolados de séries de dados meteorológicos com um passo de tempo diário, relativas a vários anos e contendo diversas variáveis climáticas. Para resolver esta questão, desenvolveu-se este *software* que permite realizar automaticamente a interpolação espacial dos dados meteorológicos para o centro de cada parcela, de acordo com as suas coordenadas geográficas. Este *software* permite também aumentar a precisão no cálculo das necessidades de rega das culturas através do aumento da qualidade dos dados dos modelos de simulação da rega.

6.2.2.2. Descrição do programa

O *software* Interpolador foi desenvolvido em Visual Basic 2005, sendo composto por uma interface gráfica com o utilizador e um módulo de cálculo, sendo os dados entrada fornecidos ao programa através de ficheiros de texto. O *software* foi projectado para realizar a interpolação das quatro variáveis agrometeorológicas utilizadas na modelação das necessidades hídricas das culturas de acordo com a metodologia proposta por Allen et al. (1998, 2007), e que são a evapotranspiração de referência (ET_0), a humidade relativa mínima (RH_{min}), a velocidade média do vento a 2 metros de altura (U_2), e a precipitação (P). Os métodos de interpolação implementados neste *software* (vd. secção 3.2.2.) foram o vizinho mais próximo (VMP), o inverso do quadrado da distância (IQD) e a colocação por mínimos quadrados (CMQ).

Incluíram-se estes três métodos de interpolação para conferir ao programa flexibilidade de utilização uma vez que nem sempre é possível dispor de um número mínimo de pontos para utilizar o método da colocação dos mínimos quadrados. Se existir um número reduzido de estações disponíveis, poder-se-á utilizar o método do IQD ou o do VMP. Esta flexibilidade permite ultrapassar um dos mais importantes constrangimentos na utilização de modelos na rega, que são as restrições impostas pela disponibilidade dos dados que os modelos necessitam.

A estrutura conceptual do programa é apresentada na Figura 6.5 e inclui os dados de entrada, os métodos implementados e os dados de saída. Os dados de entrada são fornecidos por ficheiros de texto e devem incluir, para cada estação, a localização (latitude, longitude) e a série temporal dos dados meteorológicos observados (ET_o , RH_{min} , U_2 , e P). Também têm que ser fornecidas as coordenadas geográficas do ponto a interpolar e o método de interpolação seleccionado. Quando se pretenda utilizar o método da CMQ os parâmetros das funções de covariância também terão que ser fornecidos.

Na Figura 6.6 apresenta-se a estrutura de ficheiros do programa. Os dados de entrada são fornecidos ao programa Interpolador através da construção dos ficheiros: Estacoes.txt, ponto.txt, EToPM.txt, Precipitacao.txt, HR.txt, Vento.txt e CoAlfa.txt. Os dados interpolados são guardados no ficheiro "saida_Interpolacao.txt" que é criado automaticamente pelo programa. Todos os ficheiros de texto encontram-se na mesma pasta do executável, Interpolador.exe, uma vez que quando se corre o programa este procura automaticamente pelos ficheiros na pasta onde o executável se encontra. No Anexo VI apresenta-se um exemplo para cada um destes oito ficheiros. Para além desta opção de interpolar simultaneamente estas quatro variáveis meteorológicas (ET_o , RH_{min} , U_2 , e P) o programa Interpolador também possui uma versão que permite interpolar individualmente qualquer variável meteorológica para um conjunto de pontos.

O *software* está operacional e fornece séries climáticas interpoladas para cada ponto de interesse no terreno, com base nos dados registados por uma rede de estações meteorológicas.

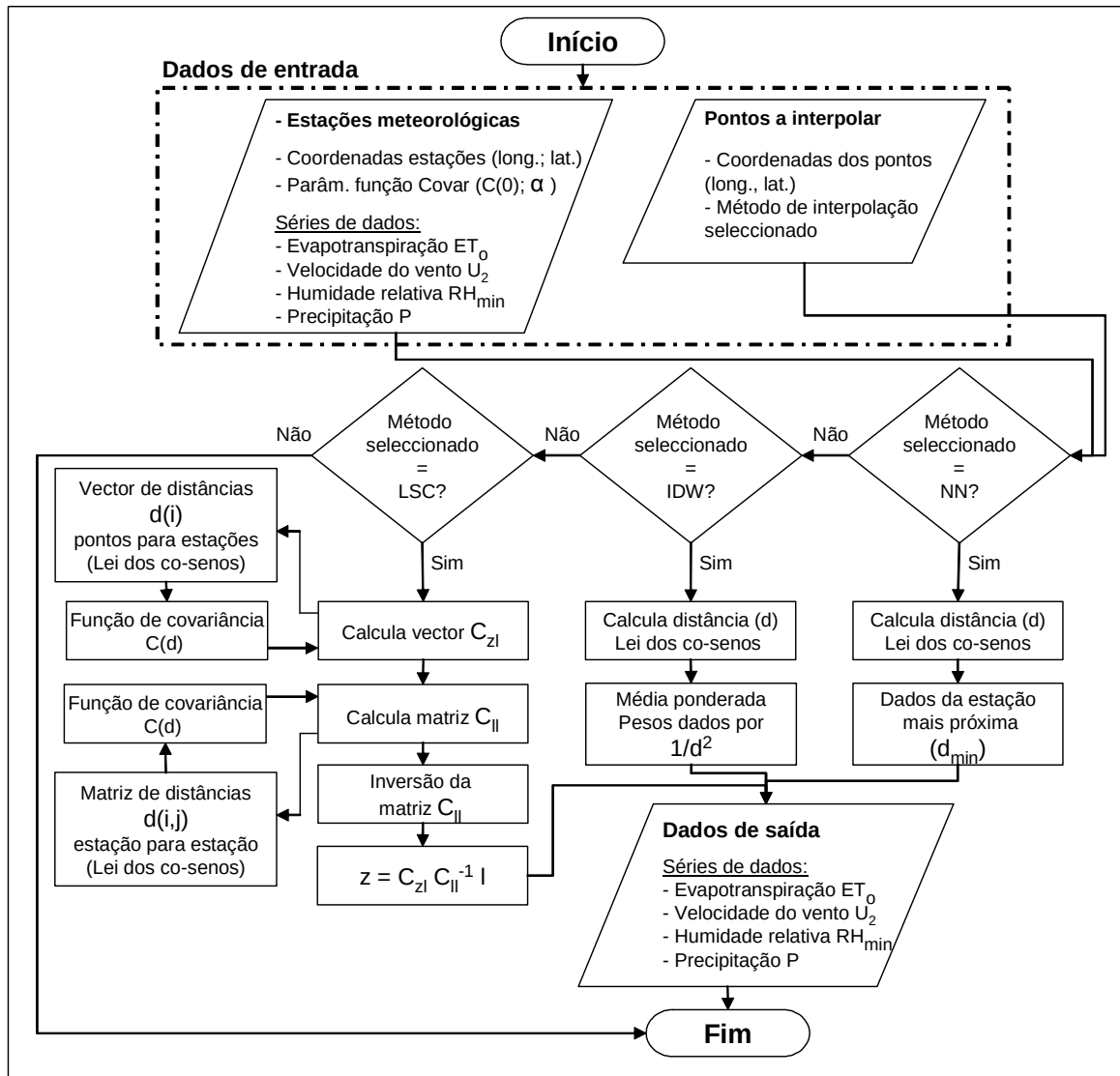


Figura 6.5 – Fluxograma dos elementos e da estrutura do *software* Interpolador.

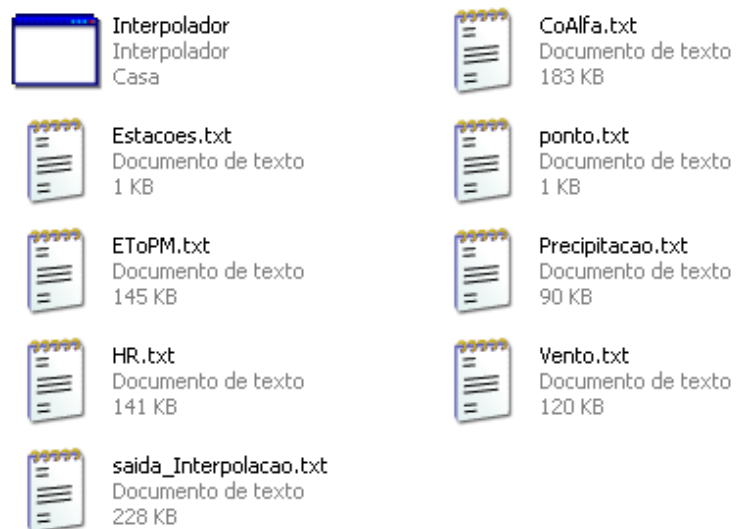


Figura 6.6 – Estrutura de ficheiros do programa Interpolador.

6.2.2.3. Teste e validação do programa

Uma vez terminado o desenvolvimento do programa interpolador, foi necessário testar e validar o programa. O *software* foi validado e realizou-se uma análise comparativa dos três métodos de interpolação para a região do Alentejo. Consideraram-se as variáveis climáticas evapotranspiração de referência (ET_o), humidade relativa mínima (RH_{min}), velocidade do vento a 2 metros de altura (U_2), e precipitação (P), tendo-se avaliado a incerteza introduzida pela utilização de diferentes métodos de interpolação no cálculo das necessidades de rega das culturas. No Anexo II, apresenta-se a metodologia utilizada para validar o programa assim como os resultados da avaliação de exactidão.

Os resultados alcançados demonstram que o VMP é o método que apresenta os piores resultados, apresentando os métodos CMQ e IQD resultados bastante semelhantes entre si. Apesar de ser um método muito mais simples o IQD apresentou resultados semelhantes ao método da CMQ, não se justificando assim o maior esforço requerido pela utilização deste método (calibração das funções de covariância – secção 3.2.2.3.), tendo-se seleccionado por isso o método do IQD para interpolar os dados dos cenários climáticos (secção 6.2.1).

6.2.3. Aplicação informática IrrigRotation

6.2.3.1. Considerações gerais

Com o objectivo de realizar a determinação das necessidades de rega das culturas desenvolveu-se o modelo de balanço hídrico do solo IrrigRotation (Rolim e Teixeira, 2008). Este programa permite apoiar o planeamento e a gestão da rega, num contexto de alterações climáticas, através da determinação das necessidades hídricas de uma rotação de culturas e dos calendários de rega para diferentes cenários climáticos.

O programa IrrigRotation é um modelo de simulação do balanço hídrico, baseado na metodologia dos coeficientes culturais de base (Allen et al., 1998; 2005a; 2007), que realiza o balanço hídrico do solo continuamente no tempo com um passo de tempo diário. Esta simulação contínua no tempo permite ultrapassar uma das maiores fontes de incerteza na utilização de modelos de balanço hídrico, que consiste na estimação do volume de água armazenado no perfil do solo no início da simulação. A simulação do balanço hídrico do solo continuamente no tempo permite considerar as necessidades hídricas de uma sequência de culturas ou rotação de culturas, tendo em consideração a água armazenada no perfil do solo não só durante o período em que as culturas estão instaladas no terreno como também durante os períodos sem cultura (*“nongrowing season”*), calculando a reserva de água no solo de acordo com a raiz mais profunda da sequência ou rotação de culturas. A

metodologia dos coeficientes culturais de base (secção 4.2.5.1.), implementada no programa, é especialmente adequada para contabilizar a evaporação da camada superficial do solo durante os períodos sem cultura ao longo da rotação. Este programa permite assim o cálculo das necessidades de rega o nível da rotação de culturas em oposição aos modelos de balanço hídrico actualmente disponíveis tais como o CROPWAT (Smith, 1998), ISAREG (Teixeira e Pereira, 1992), PILOTE (Mailhol et al., 1997), SIMDualKc (Rolim et al., 2006) ou mais recentemente AquaCrop (Raes, 2009) que realizam a simulação do balanço hídrico para uma campanha de rega e para uma única cultura.

Este modelo foi desenvolvido para ser o mais flexível possível, quanto aos períodos de tempo considerados, sendo capaz de simular intervalos de tempo a partir de alguns dias até vários anos, utilizando-se no caso deste trabalho um intervalo de 30 anos. O modelo foi integrado com o *software* SIG GeoMedia 6.0 de modo a possibilitar o cálculo das necessidades de rega tanto ao nível da parcela como ao nível da região, permitindo a análise regional das necessidades de rega.

6.2.3.2. Estrutura do programa

A aplicação informática IrrigRotation foi desenvolvida em Visual Basic 2005 e inclui uma base de dados em Access 2000. Esta aplicação é composta por módulos computacionais, uma interface gráfica com o utilizador e uma base de dados, apresentando-se na Figura 6.7 a estrutura conceptual do programa.

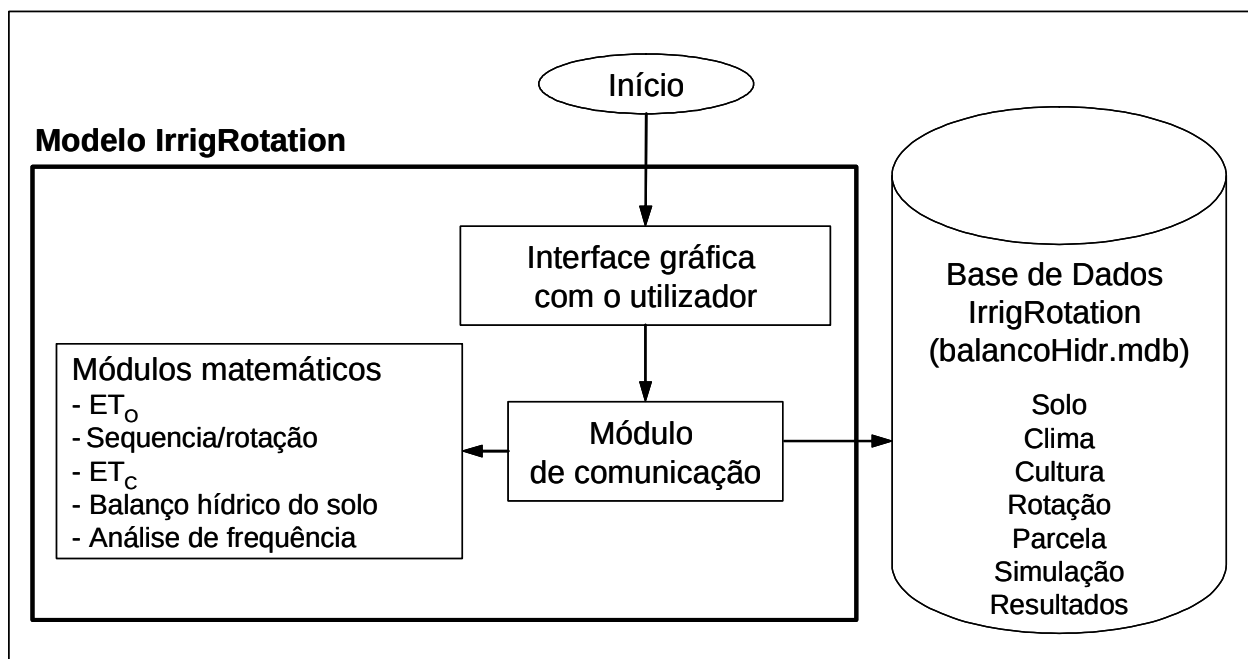


Figura 6.7 – Estrutura conceptual do modelo IrrigRotation.

Interface gráfica

Na Figura 6.8 apresenta-se a interface gráfica do programa IrrigRotation, que contém quatro botões de comando que executam as rotinas de cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o); do balanço hídrico, de exportação dos dados para o SIG e da análise de frequência.

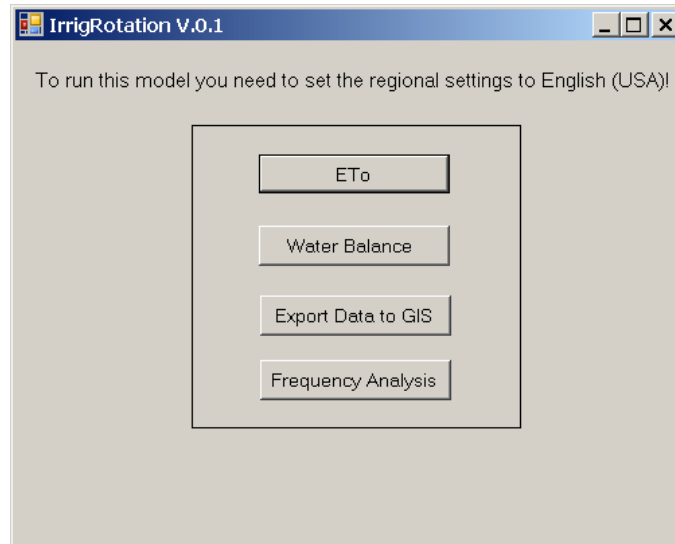


Figura 6.8 – Interface gráfica do modelo IrrigRotation.

Módulos de cálculo

Os principais módulos computacionais que compõem o programa são: cálculo da ET_o , geração da sequência de culturas, cálculo da ET_c , simulação do balanço hídrico do solo e a análise de frequência das necessidades de rega relativas ao período de ponta.

Na Figura 6.9 apresenta-se o algoritmo do modelo IrrigRotation, em que se podem ver os dados de entrada, o modo como se articulam os diferentes módulos computacionais e os principais dados de saída do programa.

O programa inicia a simulação através da leitura dos dados de entrada a partir da base de dados balançoHidr.mdb. Os dados de entrada consistem em dados climáticos, dados das culturas (que inclui os dados das rotações de culturas), dados do solo e informação relativa às opções de rega.

Caso o valor da ET_o não seja fornecida com os dados climáticos corre-se o módulo de cálculo respectivo para a sua determinação. O módulo da ET_o realiza os cálculos com um passo de tempo diário, utilizando o método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) quando existam todos os dados climáticos necessários e o método de Hargreaves-Samani (Hargreaves e Samani, 1985), que permite a estimação da ET_o quando apenas se disponha dos dados de temperatura máxima e mínima. A metodologia de cálculo da ET_o encontra-se descrita na secção 4.1.1.

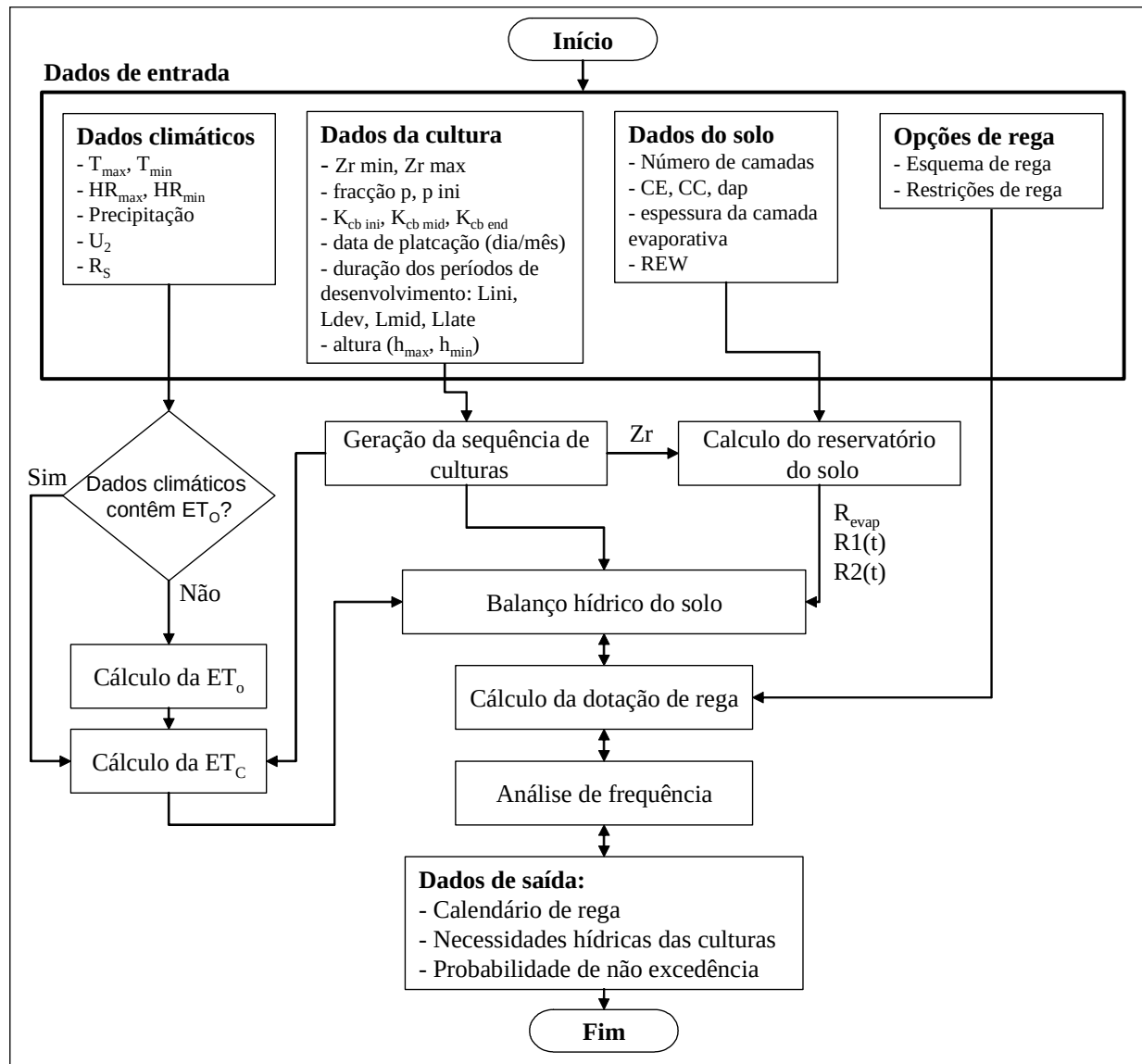


Figura 6.9 – Fluxograma do modelo de balanço hídrico contínuo no tempo IrrigRotation.

Após a leitura dos dados de entrada o módulo de geração da sequência das culturas cria uma série contendo os dados culturais para cada dia do período de simulação. A realização do balanço hídrico do solo continuamente no tempo aumenta a complexidade da simulação, tendo sido necessário desenvolver um módulo para gerar a sequência de culturas, que inclui os períodos sem cultura (*"nongrowing season"*). Este módulo constrói uma matriz com a sequência de culturas, como se pode ver de forma esquemática na Figura 6.10, em que a cada dia do período de simulação é atribuído uma dada cultura, o estágio de desenvolvimento, a altura da cultura, a profundidade de raiz e os valores dos coeficientes culturais tabelados. A capacidade em gerar a sequência de culturas permite simular as necessidades de rega de uma rotação de culturas.

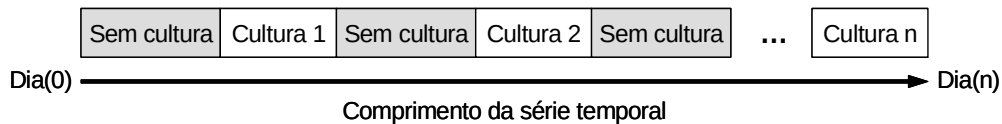


Figura 6.10 – Representação esquemática da construção da sequência de culturas com um passo de tempo diário.

Na Figura 6.11 apresenta-se o fluxograma do módulo de geração da sequência de culturas. Este módulo gera a sequência de culturas de acordo com a ordem estabelecida na tabela das rotações da base de dados (balancoHidr.mdb) do modelo IrrigRotation (Anexo VII). Para cada dia do período de simulação, este módulo verifica se esse dia está compreendido entre as datas de sementeira e de colheita da cultura que nesse momento se encontrar seleccionada. Caso se verifique que o dia está fora do período de crescimento da cultura, o programa selecciona os dados do período sem cultura. Quando o dia estiver dentro do período da cultura então são calculados os parâmetros da cultura em função da data e guardados na matriz da sequência de culturas. Quando é atingida a data da colheita é seleccionada a próxima cultura da rotação de acordo com o seu número de ordem na rotação.

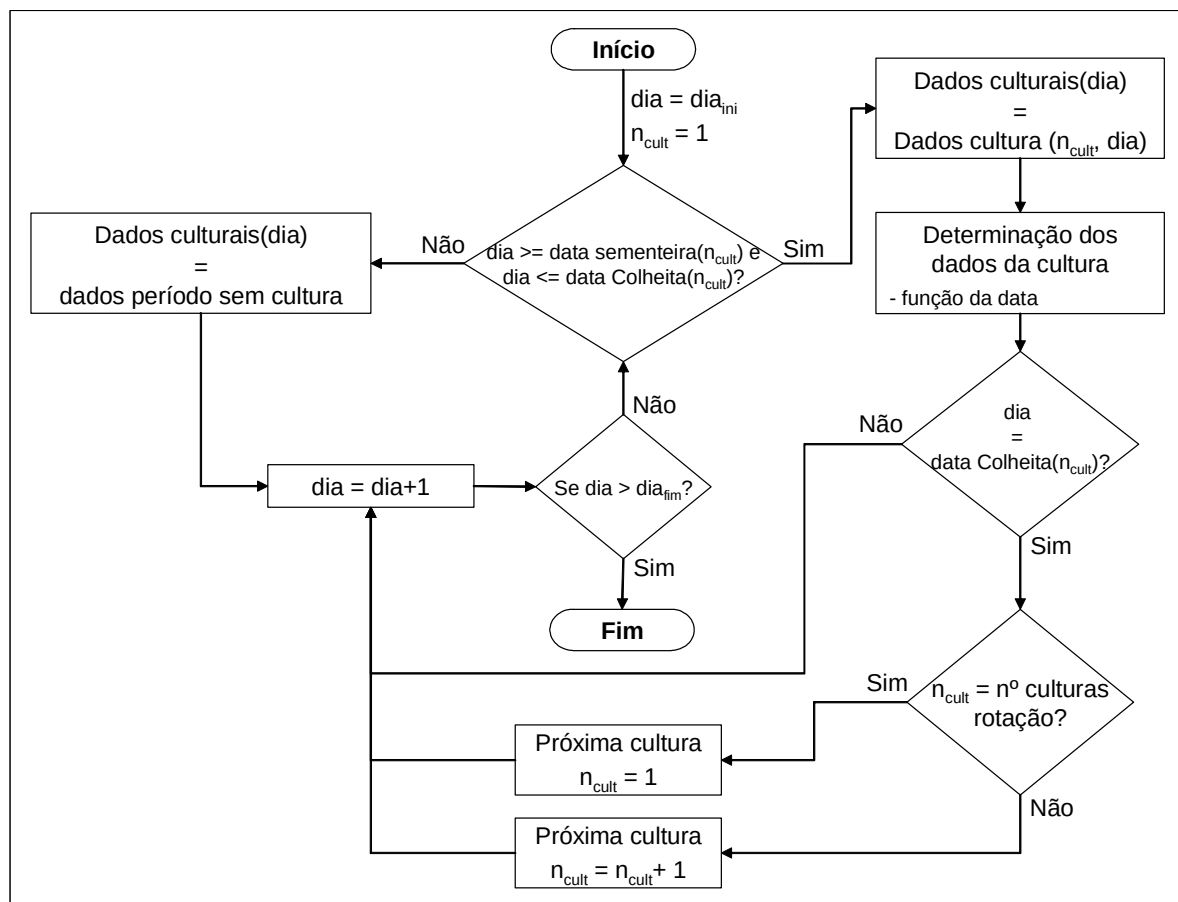


Figura 6.11 – Algoritmo responsável pela criação da matriz dos dados culturais que contém para cada dia da simulação os diferentes parâmetros da cultura.

O programa IrrigRotation apenas permite parametrizar um único período sem cultura por rotação, devendo-se escolher as características do período sem cultura que melhor caracterizem a situação média ao longo de toda a rotação.

Após a obtenção da matriz de dados diários com os valores dos dados culturais são calculados os 3 reservatórios de água no solo (R_{evap} , $R1(t)$, $R2(t)$) descritos anteriormente na secção 4.2.3 (ver Fig. 4.6). A determinação da ET_c (secção 4.1.2.) é realizada em paralelo com a simulação do balanço hídrico solo, uma vez que o valor da ET_c é condicionado pela reserva de água no solo na zona radicular e pela reserva de água na camada evaporativa do solo, que são determinadas através do balanço hídrico do solo de acordo com a metodologia apresentada na secção 4.2.5.3.

A rotina de simulação do balanço hídrico considera o solo dividido em três camadas (R_{evap} , $R1(t)$, $R2(t)$), cada uma equivalente a um reservatório de água no solo, sendo $R1(t)$ e $R2(t)$ variáveis no tempo em função da profundidade radicular (Z_r) (vd. Fig. 4.6). A simulação do balanço hídrico do solo é realizada de acordo com a metodologia exposta na secção 4.2.6, sendo as necessidades de rega determinadas em função do esquema de rega, definindo-se o limite de água no solo para o qual se inicia a rega e a dotação de rega (DR_g) a ser fornecido à cultura. A decisão da rega é tomada com base nos valores da reserva de água no horizonte $R1(t)$, que é a região do solo correspondente à profundidade de enraizamento (vd. 4.2.3.), e tendo em conta as seguintes opções de rega (vd. secção 4.2.6.2.):

- Não regar;
- Regar visando o conforto hídrico das culturas;
- Regar entre dois limites seleccionados, o nível superior de gestão (nsg) e o nível inferior de gestão (nig);
- Restrições:
 - o Intervalo mínimo de dias entre regas;
 - o Intervalo de dias entre regas constante;
 - o Volume máximo de rega;
 - o Dotação de rega constante.

Após a realização das simulações do balanço hídrico, é criada para cada uma das simulações uma tabela de resultados na qual são armazenados os dados relativos à rega (Fig. 6.12). Com base nesses valores é corrido o módulo da análise de frequência que determina as necessidades de ponta, para cada um dos anos das simulações, associando-lhes de seguida um dada probabilidade de não excedência. A probabilidade de não

excedência é determinada através da utilização da função empírica de acordo com a metodologia descrita na secção 4.4.

ID	ID Simulacao	Data	DiaJuliano	Cultura_ID	periodo_cultura	rega_Dot_liq	NumDias_IntervaloReg	Nec_Reg(mm_dia)	Prob_N_excedencia
1247	10	31/05/1964	152	5	dev	23.4	21	1.114286	0.00%
1248	10	01/06/1964	153	5	dev	0	1	0	0.00%
1249	10	02/06/1964	154	5	dev	0	2	0	0.00%
1250	10	03/06/1964	155	5	dev	0	3	0	0.00%
1251	10	04/06/1964	156	5	dev	0	4	0	0.00%
1252	10	05/06/1964	157	5	dev	0	5	0	0.00%
1253	10	06/06/1964	158	5	dev	0	6	0	0.00%
1254	10	07/06/1964	159	5	dev	0	7	0	0.00%
1255	10	08/06/1964	160	5	dev	0	8	0	0.00%
1256	10	09/06/1964	161	5	dev	30.37	9	3.374444	0.00%
1257	10	10/06/1964	162	5	dev	0	1	0	0.00%
1258	10	11/06/1964	163	5	dev	0	2	0	0.00%
1259	10	12/06/1964	164	5	dev	0	3	0	0.00%
1260	10	13/06/1964	165	5	dev	0	4	0	0.00%
1261	10	14/06/1964	166	5	dev	0	5	0	0.00%
1262	10	15/06/1964	167	5	dev	0	6	0	0.00%
1263	10	16/06/1964	168	5	dev	39.66	7	5.665714	0.00%
1264	10	17/06/1964	169	5	dev	0	1	0	0.00%
1265	10	18/06/1964	170	5	dev	0	2	0	0.00%
1266	10	19/06/1964	171	5	dev	0	3	0	0.00%
1267	10	20/06/1964	172	5	dev	0	4	0	0.00%
1268	10	21/06/1964	173	5	dev	0	5	0	0.00%
1269	10	22/06/1964	174	5	dev	0	6	0	0.00%
1270	10	23/06/1964	175	5	dev	0	7	0	0.00%
1271	10	24/06/1964	176	5	dev	0	8	0	0.00%
1272	10	25/06/1964	177	5	dev	0	9	0	0.00%
1273	10	26/06/1964	178	5	dev	52.89	10	5.289	0.00%
1274	10	27/06/1964	179	5	dev	0	1	0	0.00%
1275	10	28/06/1964	180	5	dev	0	2	0	0.00%
1276	10	29/06/1964	181	5	dev	0	3	0	0.00%
1277	10	30/06/1964	182	5	dev	0	4	0	0.00%
1278	10	01/07/1964	183	5	dev	0	5	0	0.00%
1279	10	02/07/1964	184	5	dev	0	6	0	0.00%
1280	10	03/07/1964	185	5	dev	0	7	0	0.00%
1281	10	04/07/1964	186	5	dev	0	8	0	0.00%
1282	10	05/07/1964	187	5	dev	0	9	0	0.00%
1283	10	06/07/1964	188	5	dev	65.06	10	6.506	0.00%
1284	10	07/07/1964	189	5	dev	0	1	0	0.00%
1285	10	08/07/1964	190	5	dev	0	2	0	0.00%
1286	10	09/07/1964	191	5	dev	0	3	0	0.00%
2708	10	31/05/1968	152	5	dev	26.42	16	1.65125	0.00%
2709	10	01/06/1968	153	5	dev	0	1	0	0.00%
2710	10	02/06/1968	154	5	dev	0	2	0	0.00%

Figura 6.12 – Exemplo de uma tabela de resultados, criada para cada uma das simulações, na qual são armazenados os dados das necessidades de rega calculadas pelo modelo IrrigRotation.

Base de dados

No desenvolvimento do programa IrrigRotation foi prestada particular atenção à modelação dos dados, tendo-se desenvolvido uma base de dados relacional em Access 2000. No Anexo VII apresenta-se o modelo relacional da base de dados balançoHidr.mdb. A base de dados é um dos elementos chave deste programa uma vez que o modelo necessita de uma grande quantidade de dados, armazenando informação relativa a dados meteorológicos, solo, culturas, rotação das culturas, sistemas de rega, da parcela e dados das simulações, que são uma combinação específica dos factores descritos anteriormente (Fig. 6.7 e Anexo VII).

A base de dados permite também realizar a análise dos dados através da utilização de *queries* sem a necessidade de desenvolver novo *software*, o que constitui uma vantagem importante num programa em desenvolvimento.

A base de dados encontra-se ligada a uma base de dados georeferenciada (SIG) permitindo produzir mapas das necessidades de rega das culturas ao nível de um aproveitamento hidroagrícola.

6.2.3.3. Integração com SIG

O programa IrrigRotation foi integrado num SIG, com o recurso ao *software* GeoMedia 6.0. A integração de um modelo de simulação rega com a tecnologia SIG permite expandir a sua escala de análise do nível da parcela para um nível regional. A integração deste modelo e da sua base de dados numa estrutura SIG é apresentada na Figura 6.13, sendo a ligação entre a base de dados *balancoHidr.mdb* do modelo IrrigRotation e a base de dados georeferenciada *solos_Beja.mdb* efectuada através da tabela *unidades solo*.

A interface gráfica com o utilizador (GUI), do programa IrrigRotation, é chamada a partir da GeoMedia *map window* através de uma barra de ferramentas que contém um comando que realiza a ligação ao modelo, como se pode observar na Figura 6.14. Este comando foi desenvolvido em Visual Basic 6.0, tendo-se utilizado o GeoMedia *command wizard* que permite criar automaticamente uma parte do código em Visual Basic 6.0.

A base de dados SIG armazena informação relativa aos solos, curvas de nível, declives e dados cartográficos, estando ligada à base de dados do IrrigRotation através da tabela *unidades solo*. A base de dados SIG foi desenvolvida em Access 2000, tendo sido gerada automaticamente pelo *software* GeoMedia 6.0, e posteriormente editada e adaptada para permitir a sua ligação com a base de dados do modelo IrrigRotation. O modelo IrrigRotation lê os dados a partir da sua base de dados e exporta os resultados das simulações para a base de dados SIG permitindo a geração de mapas de necessidades hídricas das culturas. Assim sendo, este SIG permite a análise espacial das necessidades hídricas das rotações de culturas.

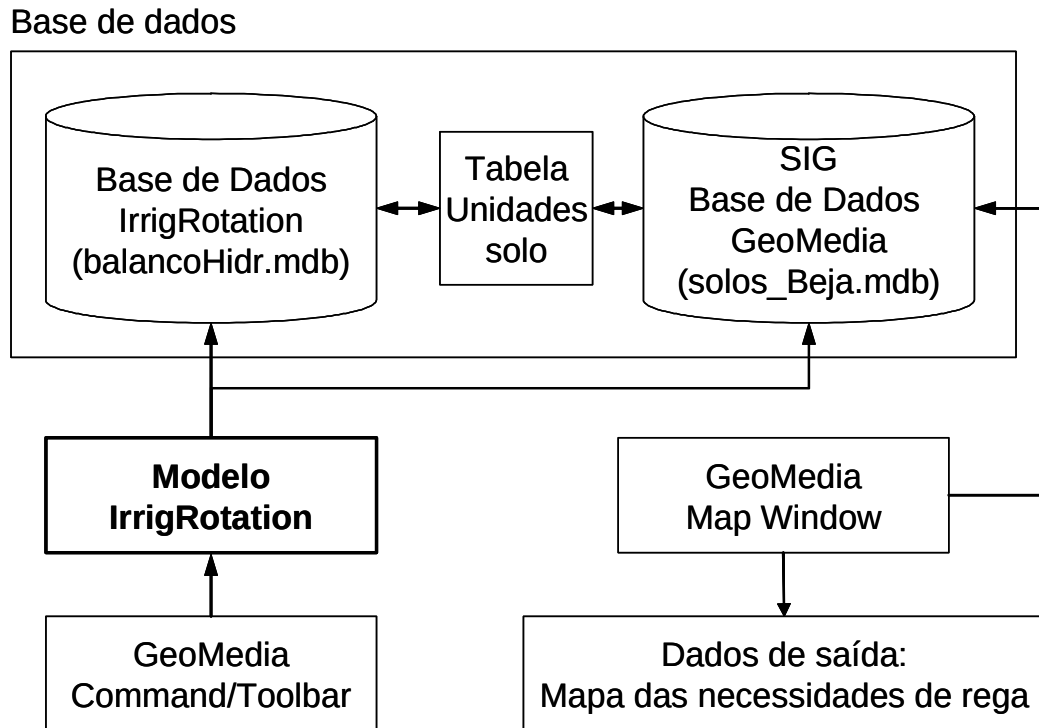


Figura 6.13 – Integração do modelo IrrigRotation num SIG.

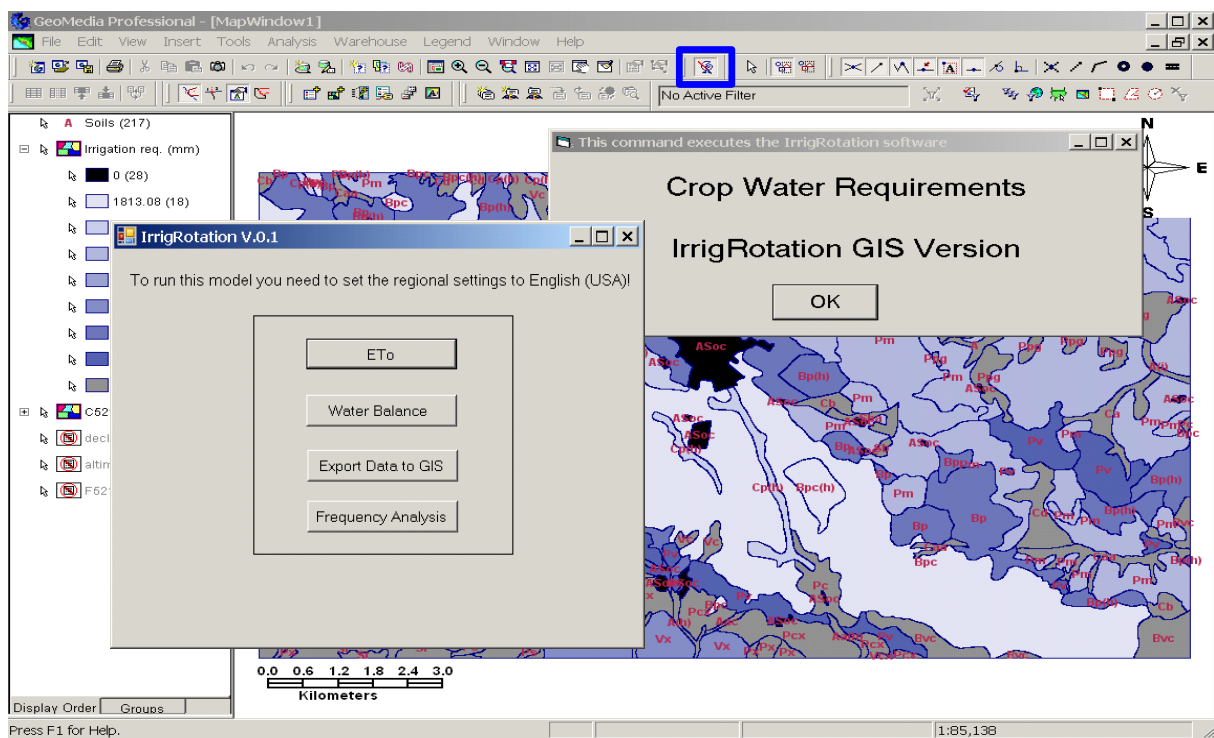


Figura 6.14 – Interface gráfica do modelo IrrigRotation e a sua ligação ao software GeoMedia através de uma barra de ferramentas (destacada a azul) que contém um comando responsável por correr o modelo IrrigRotation.

6.2.3.4. Operação do *software*

A utilização do modelo IrrigRotation requer que as “opções regionais e de idioma” do computador estejam configuradas para Inglês (Estados Unidos), uma vez que a função utilizada para leitura das datas funciona no formato mês-dia-ano, que é o formato utilizado nos Estados Unidos.

Os dados de entrada são fornecidos através da base de dados. Em primeiro lugar, o utilizador deve introduzir na base de dados os dados relativos ao solo, às rotações de culturas e dados climáticos (diários) da região, conjuntamente com a descrição da estação meteorológica. Quando introduz ou edita os dados o utilizador pode escolher entre importar a ET_0 juntamente com as outras variáveis climáticas, ou calcular os valores diários de ET_0 utilizando o módulo de cálculo do IrrigRotation.

Após a introdução dos dados de base o utilizador cria um registo na tabela de simulação combinando os dados da parcela (solo e série climática) com uma rotação cultural, com o tipo de sistema de rega e com as opções de gestão da rega para cada cultura.

Os resultados de cada simulação são armazenados numa tabela de resultados, que é criada para essa simulação. Com base nos valores das dotações de rega registados na tabela de resultados, corre-se o módulo de análise frequencial que calcula os valores das necessidades de rega para o período de ponta (vd. secção 4.4) associando para cada um dos valores anuais uma dada probabilidade de não excedência.

As tabelas de resultados são processadas através de *queries* predefinidas na base de dados, que permitem extrair as necessidades de rega anuais e as respectivas probabilidades de não excedência. Também é possível exportar os dados das tabelas de resultados directamente para uma folha de cálculo e aí analisá-los. As tabelas de resultados para além dos valores das necessidades de rega anuais e das necessidades de rega para o período de ponta, armazenam também os valores de grande parte das variáveis utilizadas na modelação do balanço hídrico do solo, de modo a permitir um maior detalhe e profundidade na análise dos resultados e facilitando também a detecção de erros que possam ocorrer.

Relativamente à ligação do modelo IrrigRotation ao SIG é necessário editar a tabela unidades solo (Fig. 6.13) fazendo corresponder as unidades de solo da carta de solos aos solos contidos na tabela de solos da base de dados do IrrigRotation, sendo os dados exportados para o SIG através do botão “*Export Data to GIS*” (Fig. 6.8 e Fig. 6.14). A interface gráfica pode ser chamada directamente através da barra de ferramentas do GeoMedia Map Window (Fig. 6.14).

6.2.3.5. Teste e validação do programa

O programa IrrigRotation encontra-se concluído e operacional tendo sido testado e validado para a região de Beja. No Anexo I apresenta-se a sua validação bem como os resultados obtidos. Após esta fase de testes o programa foi aplicado a dois casos de estudo na região do Alentejo (Évora e Beja), no âmbito da aplicação experimental da metodologia desenvolvida, apresentando-se no capítulo 7 os dados de base utilizados assim como os resultados obtidos.

6.2.4. Aplicação informática Enrolador

6.2.4.1. Considerações Gerais

Num contexto de alterações climáticas, em que é previsível que as culturas de Outono-Inverno, como por exemplo o trigo, venham a necessitar de regas de complemento para garantir a sua produção, os canhões de rega constituem uma opção com bastante interesse. Estes equipamentos possuem uma grande flexibilidade de utilização e com um investimento relativamente reduzido permitem regar áreas consideráveis. Assim, desenvolveu-se o modelo Enrolador com o objectivo de realizar o dimensionamento de sistemas de rega com canhão com enrolador. Este programa selecciona os equipamentos que mais se aproximam dos critérios de projecto, realiza a simulação do funcionamento dos equipamentos dimensionados, simulando o perfil de aplicação do canhão, e efectua a avaliação do desempenho tanto para os sistemas de rega em projecto como para sistemas em operação com base em dados das avaliações de campo. Os canhões de rega quando mal projectados e geridos costumam apresentar baixas uniformidades de distribuição e baixas eficiências de rega (Granier et al., 2003; Pereira 2004; Pereira, 2005; Tarjuelo, 2005), sendo importante dispor de um *software* de projecto que permita dimensionar correctamente os canhões de rega minimizando os seus aspectos negativos.

O modelo Enrolador foi desenvolvido tendo por base o modelo TRAVGUN (Rolim e Pereira, 2005). O modelo TRAVGUN está incompleto, sendo que apenas tem concluído e operacional o seu módulo de avaliação. Assim, procedeu-se à reformulação deste módulo, tendo-se migrado o seu código para *Visual Basic* 2005. A estrutura do programa Enrolador, a interface gráfica, e os módulos de dimensionamento hidráulico e de simulação da pluviometria foram construídos inteiramente de raiz.

6.2.4.2. Estrutura do programa

O programa Enrolador foi desenvolvido em *Visual Basic 2005*, sendo composto por uma interface gráfica e por três módulos de cálculo: dimensionamento, simulação da pluviometria e avaliação de desempenho. Os dados de entrada são fornecidos ao modelo através de ficheiros de texto. Na Figura 6.15 apresenta-se a estrutura conceptual do programa.

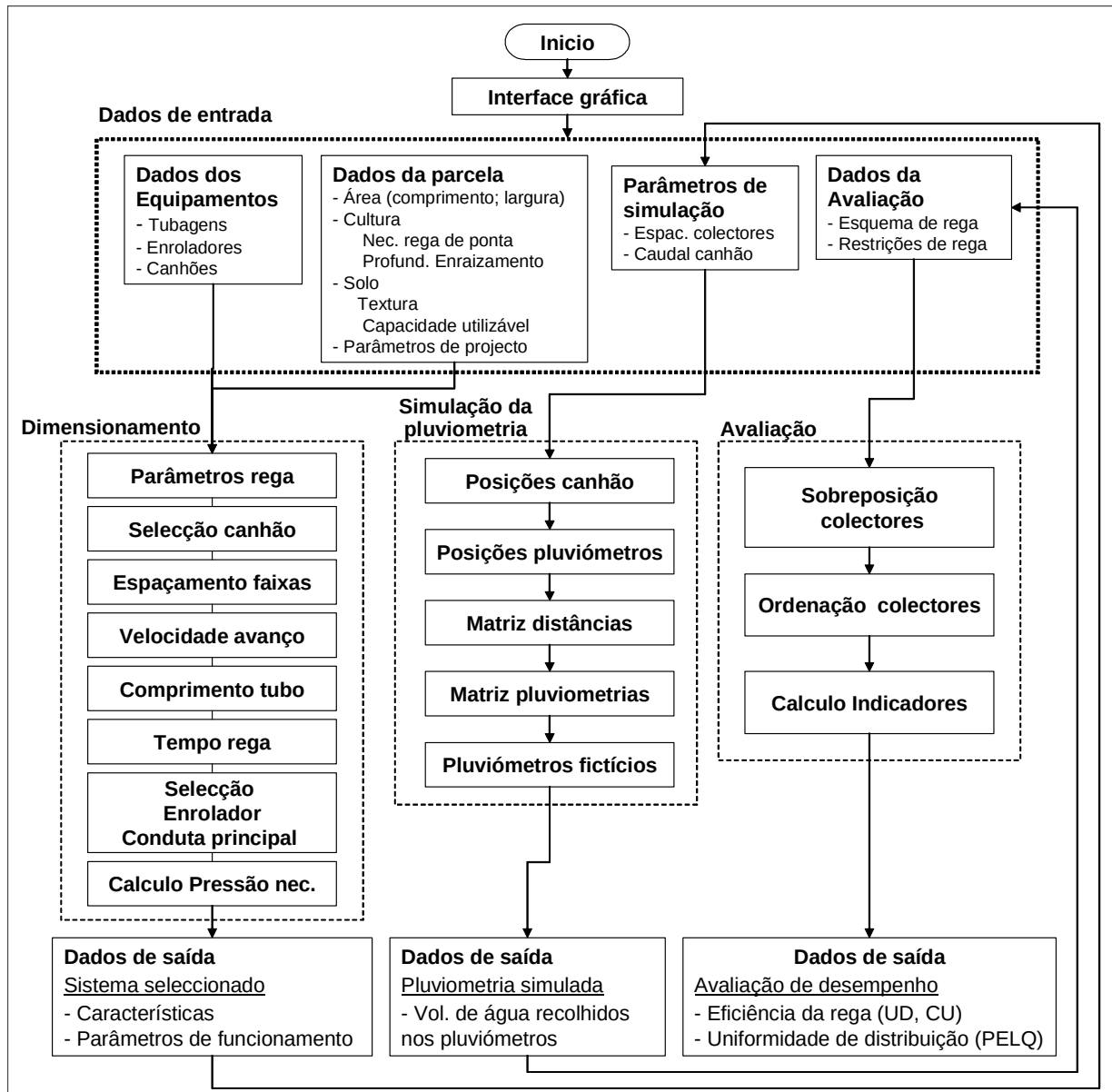


Figura 6.15 – Estrutura conceptual do modelo Enrolador.

A interface do programa é bastante simples consistindo apenas nos botões que executam cada um dos módulos do programa sendo os parâmetros e as opções de projecto introduzidas através dos ficheiros de texto de acordo com a estrutura de ficheiros que se apresenta na Figura 6.16.

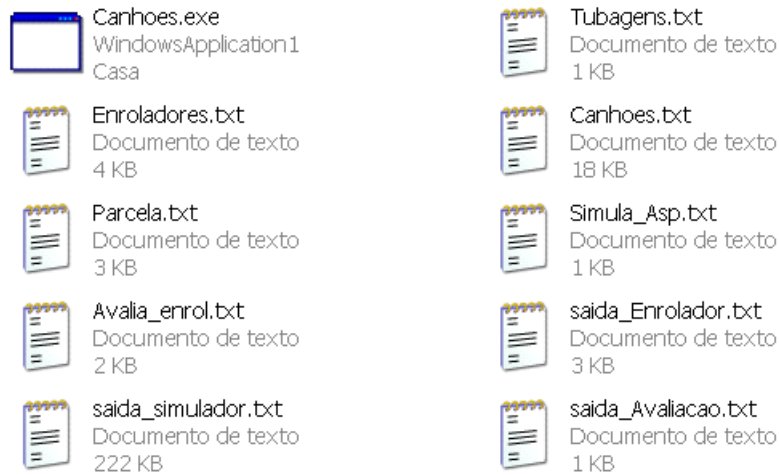


Figura 6.16 – Estrutura de ficheiros do programa Enrolador.

Módulo de dimensionamento: selecciona automaticamente o conjunto canhão, tubo flexível e enrolador, e opcionalmente a conduta principal, que mais se aproxima dos critérios de projecto. O processo de dimensionamento é realizado com base na metodologia descrita na secção 5.3 (vd. Fig. 5.6). Como resultado do dimensionamento é gerado um ficheiro contendo o sistema seleccionado e os seus parâmetros de funcionamento, sendo estes dados utilizados posteriormente na simulação do perfil pluviométrico do canhão.

Módulo de simulação do perfil pluviométrico: realiza a simulação do funcionamento do canhão alvo de projecto ao longo da sua trajectória. Simula, assim, o modo como o canhão efectua a distribuição espacial da água sobre o terreno em condições em que não ocorra vento, o que permite estimar a altura de água aplicada sobre um conjunto de pontos (pluviómetros fictícios) perpendiculares à direcção de deslocação do canhão, reproduzindo a colocação de pluviómetros no terreno durante uma avaliação de campo (vd. secção 5.4). Como resultado este módulo produz os vectores de alturas pluviométricas, que serão utilizados pelo módulo de avaliação para calcular os indicadores de desempenho.

Módulo de avaliação: calcula os indicadores de desempenho dos sistemas de rega com canhão de acordo com a metodologia apresentada na secção 5.2.1. Este módulo permite estimar o desempenho dos sistemas que estão a ser projectados, com base nos dados dos pluviómetros fictícios estimados através do módulo de simulação da pluviometria, assim como dos sistemas em operação, com base nos dados recolhidos em avaliações de campo.

6.2.4.3. Operação do *software*

A utilização deste *software* é realizada através da construção dos ficheiros de texto que contêm os dados de entrada que alimentam o programa. No Anexo VIII apresenta-se um exemplo para cada um dos ficheiros de entrada utilizados neste programa.

Para realizar o dimensionamento é necessário construir os ficheiros *parcela.txt*, *canhões.txt*, *enroladores.txt* e *tubagens.txt*. O ficheiro *parcela.txt* contém os dados relativos, às características da parcela, às necessidades de rega para o período de ponta, dados das características do solo e diversos parâmetros de projecto. O ficheiro *Canhones.txt*, *Enroladores.txt*, e *Tubagens.txt* consistem em listagens de modelos de canhões (Komet, 2011), enroladores e tubagens flexíveis (Irrifrance, 2011; Idrofoglia, 2011) e condutas de alumínio (RAESA, 2011), respectivamente, compiladas a partir de catálogos dos fabricantes. Com base nestes dados, o modelo dimensiona o equipamento através da selecção do conjunto de componentes que mais se aproxima dos critérios de projecto e produz como *output* o ficheiro *saida_Enrolador.txt* contendo a descrição, as características e as regulações do equipamento seleccionado.

Após o dimensionamento, é possível simular o funcionamento do sistema de rega em projecto, realizando-se uma simulação da distribuição espacial da pluviometria do canhão. Para realizar esta simulação é necessário construir o ficheiro *Simula_Asp.txt*, que contém as características do canhão e os seus parâmetros de funcionamento, sendo estes dados obtidos através do ficheiro *saida_Enrolador.txt*. Como resultado obtém-se o ficheiro *saída_simulador.txt* contendo as pluviometrias dos colectores fictícios tal como se se tivesse realizado uma avaliação de campo (vd. secção 5.4).

O módulo de avaliação de desempenho utiliza o ficheiro *Avalia_enrol.txt* contendo os dados correspondentes a uma avaliação de campo realizada de acordo com a metodologia proposta por Keller e Bliesner (1990), Pereira (2002), Nunes (2003) e Tarjuelo (2005).

Com base nestes valores calculam-se os indicadores de desempenho dos sistemas (vd. secção 5.2.1), produzindo-se como *output* o ficheiro *saída_Avaliacao.txt*. Este módulo efectua o cálculo dos indicadores de desempenho da mesma forma tanto para sistemas em funcionamento no campo, como para sistemas em projecto caso em que as alturas de água recolhidas nos pluviómetros são substituídas pelas alturas de água simuladas pelo módulo de simulação (*saída_simulador.txt*).

O modelo Enrolador encontra-se concluído e foi aplicado experimentalmente a dois casos de estudo na região do Alentejo para dimensionar os sistemas de rega em função dos diferentes cenários de alteração climática, descrevendo-se no capítulo 7 a sua utilização e os resultados obtidos.

7. Aplicação experimental da metodologia

7.1. Considerações gerais

A metodologia de análise dos impactes das alterações climáticas e as diferentes ferramentas informáticas que a compõem passaram por uma fase de testes com o objectivo de avaliar o seu desempenho e detectar a existência de possíveis erros.

Em primeiro lugar aplicou-se experimentalmente o modelo IrrigRotation à região de Beja com o objectivo de testar o programa e de realizar uma análise de sensibilidade, o que permitiu detectar e corrigir erros e realizar melhoramentos no programa. Adicionalmente avaliou-se a capacidade do programa IrrigRotation em gerar mapas de necessidades de rega para um dado local. No Anexo I apresenta-se a aplicação experimental do modelo IrrigRotation à região de Beja.

Em segundo lugar, aplicou-se o *software* Interpolador à rede SAGRA (Sistema Agrometeorológico para a Gestão da Rega no Alentejo) (COTR, 2009) com o objectivo de testar o programa, e de avaliar o grau de incerteza introduzido no cálculo das necessidades de rega das culturas devido aos diferentes métodos de interpolação espacial. A quantificação desta incerteza associada à variabilidade espacial das variáveis agrometeorológicas serve como termo de comparação para avaliar a importância relativa da incerteza climática produzida pelos modelos climáticos. No Anexo II descreve-se a aplicação do programa Interpolador à rede SAGRA.

Finalmente, a metodologia desenvolvida foi aplicada experimentalmente a dois casos de estudo na região do Alentejo, que é uma das zonas em Portugal identificadas como de maior vulnerabilidade face aos impactes das alterações climáticas (Miranda et al., 2006; Mourato, 2009), tendo-se realizado um estudo dos impactes das alterações climáticas sobre os sistemas agrícolas de regadio desta região. O objectivo desta aplicação experimental foi a de testar as suas capacidades, realizar uma análise de sensibilidade e levantar necessidades de investigação e de desenvolvimento desta metodologia.

A aplicação experimental consistiu na implementação da metodologia desenvolvida (vd. Figura 6.1) em função das características e dos dados disponíveis para a região. Na Figura 7.1 apresenta-se uma representação esquemática das diversas etapas e dos dados utilizados durante o processo de aplicação da metodologia desenvolvida.

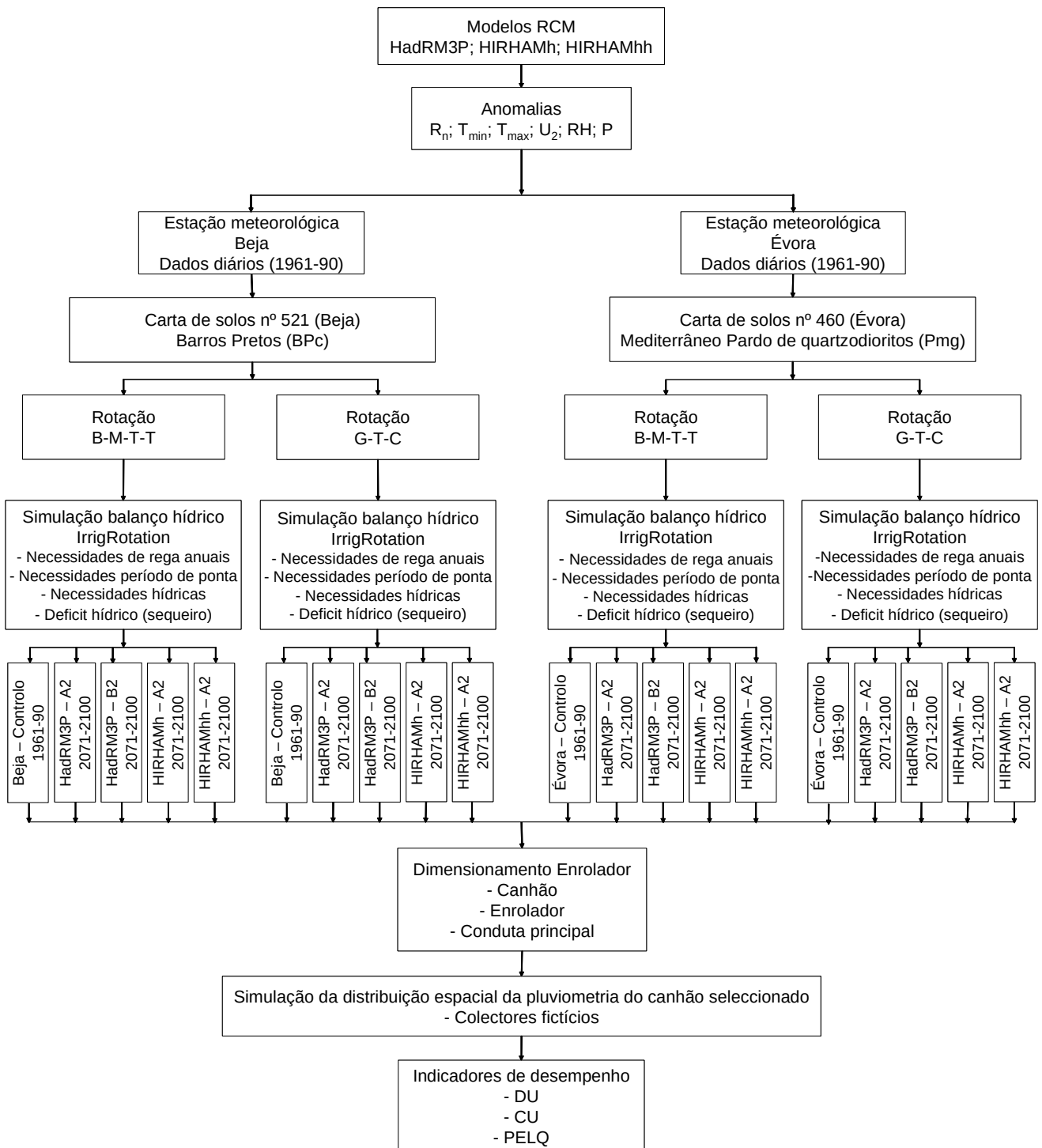


Figura 7.1 – Representação esquemática das diversas etapas e dados de base utilizados durante a aplicação experimental da metodologia desenvolvida a dois casos de estudo na região do Alentejo.

A aplicação experimental iniciou-se com a compilação dos dados dos modelos climáticos, o seu processamento e posterior cálculo das anomalias e a construção das séries climáticas perturbadas para Évora e Beja, de acordo com a metodologia descrita em 6.2.1.2. Na secção 7.2 descrevem-se os dados dos modelos RCM e faz-se uma análise comparativa com os dados observados de modo a se obter uma estimativa da incerteza associada às

simulações dos modelos RCM, e realizar uma caracterização das variáveis agrometeorológicas, tanto observadas como perturbadas.

Para realizar esta aplicação experimental consideraram-se as estações meteorológicas de Évora e de Beja, do Instituto de Meteorologia (IM), tendo-se utilizado séries meteorológicas com um passo de tempo diário relativas ao período de referência 1961-90. Foram identificados os solos predominantes nas imediações destas estações (Solos Mediterrâneos Pardos - Pmg para Évora e Barros Pretos – Bpc para Beja). Definiram-se, assim, dois casos de estudos: i) **Beja** – que corresponde à estação meteorológica de Beja com solos Barros Pretos (Beja/Bpc) e ii) **Évora** – que corresponde à estação meteorológica de Évora com solos Mediterrâneos Pardos (Évora/Pmg). Seleccionaram-se duas rotações de culturas características da região, uma de regadio Beterraba sacarina-Milho-Tomate-Trigo (B-M-T-T) e outra de sequeiro Girassol-Trigo-Cevada (G-T-C). Com a introdução de uma rotação de sequeiro pretendeu-se avaliar o grau de vulnerabilidade das culturas de sequeiro que são produzidas nesta região.

Reunidos os dados climáticos, de solos e das culturas, realizou-se a simulação do balanço hídrico do solo com o recurso ao modelo IrrigRotation, para cada uma das diferentes combinações de cenário climático, rotação e local, tendo-se realizado ao todo 20 simulações (Fig. 71). Pretendeu-se com estas simulações avaliar o modo como as rotações de culturas permitem melhorar a gestão da água na agricultura e a forma como permitem reduzir os riscos de quebra de produção das culturas de sequeiro intercaladas em rotações de regadio. A rotação de culturas ao aumentar a heterogeneidade dos sistemas agrícolas permite a redução dos riscos climáticos e uma melhor adaptação a condições mais adversas.

Como resultado da aplicação do modelo IrrigRotation obtiveram-se as necessidades hídricas das culturas, as necessidades de rega anuais e relativas ao período de ponta e o deficit hídrico das culturas de sequeiro (trigo e cevada). No capítulo 7.3 apresentam-se os dados de base e os resultados das simulações realizadas pelo modelo IrrigRotation. Com base nas necessidades relativas ao período de ponta, para uma probabilidade de não excedência de 75%, realizou-se o dimensionamento dos sistemas de rega com canhão para cada uma das simulações consideradas (Fig. 7.1) com o recurso ao programa Enrolador.

Nesta aplicação experimental avaliou-se apenas o impacto das alterações climáticas sobre os sistemas de rega com canhão com enrolador, uma vez que era necessário testar o modelo Enrolador desenvolvido ao longo deste trabalho e porque este estudo tem um carácter experimental e exploratório em que se pretende validar a metodologia desenvolvida e identificar futuras necessidades de investigação. Por outro lado, num contexto de alterações climáticas é de prever que seja necessário realizar regas de complemento ou de

socorro às culturas de sequeiro, situação para a qual os canhões de rega são bastante indicados, sendo por isso bastante pertinente o seu estudo como um método de adaptação.

Obviamente que esta opção de apenas estudar os enroladores é uma simplificação pois tendo em conta os custos da energia e a baixa taxa de infiltração dos Barros Pretos (Bpc) de Beja a sua utilização não se justifica em algumas das simulações realizadas.

Na secção 7.4 apresentam-se os dados de base utilizados pelo modelo Enrolador no dimensionamento dos canhões, assim como a listagem dos equipamentos seleccionados e respectivos indicadores de desempenho potenciais.

Nas próximas secções deste capítulo apresentam-se os vários passos realizados na aplicação desta metodologia e que incluem os cenários de alteração climática (secção 7.2), a determinação das necessidades de rega das rotações de culturas (secção 7.3) e o dimensionamento de sistema de rega com canhão com enrolador (secção 7.4).

7.2. Cenários de alteração climática considerados

Nesta secção realiza-se uma descrição dos dados meteorológicos observados nas estações de Évora e Beja, dos dados produzidos pelos modelos RCM, das anomalias dos diferentes modelos e cenários e das séries perturbadas que foram construídas para cada um dos cenários. Em primeiro lugar realiza-se uma caracterização das estações meteorológicas utilizadas (Évora e Beja). Em seguida apresentam-se os dados dos modelos RCM com o objectivo de verificar a incerteza associada aos dados produzidos pelos modelos climáticos utilizados. A caracterização dos dados dos modelos inclui a comparação entre os cenários de controlo dos modelos (1961-90) e os dados observados nas estações relativos ao mesmo período. Como forma de identificar as principais tendências de alteração climática apresentam-se as médias mensais das anomalias calculadas para cada uma das variáveis, tendo-se dado um maior destaque à precipitação e temperatura. Por último apresentam-se as séries climáticas perturbadas que foram construídas projectando as anomalias nos dados observados. Uma vez que a ET_0 é calculada com base nas séries de dados perturbados, mostra-se também a anomalia da ET_0 para cada um dos cenários e modelos considerados.

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

Os dados meteorológicos observados foram obtidos através das estações meteorológicas de Beja e Évora pertencentes ao Instituto de Meteorologia (IM). Os dados têm um passo de tempo diário e referem-se ao período de 1961-90. A estação de Évora localiza-se à latitude: 38°34'N, longitude: 07°54'W e altitude: 309m, sendo a altura do anemómetro acima do solo

de 22.9m. A estação de Beja tem como coordenadas geográficas a latitude: 38°01'N; longitude: 07°52'W, e altitude: 246m, sendo a altura do anemómetro acima do solo de 10m (IM, 2012). Nos Quadros 7.1 e 7.2 apresentam-se, respectivamente, para a estação de Beja e de Évora as médias mensais de cada uma das variáveis meteorológicas utilizadas nesta metodologia, e as respectivas médias anuais.

Quadro 7.1 – Médias mensais e 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 a estação de Beja

Estação	Média 1961-1990 (Beja)							
	$T_{\max}$ (°C)	$T_{\min}$ (°C)	$RH_{\max}$ (%)	$RH_{\min}$ (%)	U_2 (m/s)	R_s (MJ/m ² /dia)	P (mm/mês)	ET_o (mm/dia)
Jan	13.8	5.4	92	53	3.1	8.219	81.1	1.6
Fev	14.9	5.9	91	51	3.4	10.671	78.8	2.0
Mar	17.3	6.6	90	45	3.2	14.681	54.2	2.9
Abr	19.4	7.9	90	44	3.2	18.552	60.1	3.7
Mai	23.7	10.1	90	39	3.2	22.805	35.5	4.9
Jun	28.4	13.2	88	36	3.2	24.646	23.4	6.0
Jul	32.5	15.1	85	31	3.3	26.449	2.5	7.2
Ago	32.5	15.4	83	30	3.3	24.013	2.8	6.7
Set	29.3	15.1	83	36	2.9	17.864	22.4	4.9
Out	23.2	12.3	87	45	3.0	12.748	65.1	3.1
Nov	17.5	8.5	89	51	3.0	9.091	76.5	1.9
Dez	14.2	6.0	91	54	3.1	7.456	83.3	1.5
Média anual	22.3	10.1	88	43	3.2	16.464	585.9	3.9

Quadro 7.2 – Médias mensais e 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 a estação de Évora

Estação	Média 1961-1990 (Évora)							
	$T_{\max}$ (°C)	$T_{\min}$ (°C)	$RH_{\max}$ (%)	$RH_{\min}$ (%)	U_2 (m/s)	R_s (MJ/m ² /dia)	P (mm/mês)	ET_o (mm/dia)
Jan	12.8	6.2	87	57	2.8	8.040	88.0	1.4
Fev	13.6	6.7	87	56	3.0	10.547	84.7	1.8
Mar	15.9	7.7	83	50	3.0	14.866	57.5	2.7
Abr	17.8	9.0	85	49	3.0	18.664	55.2	3.4
Mai	21.6	11.1	85	45	3.1	22.944	35.9	4.6
Jun	26.2	14.0	84	41	2.9	24.721	27.8	5.5
Jul	30.0	15.9	81	35	3.0	26.663	7.5	6.5
Ago	30.1	16.3	78	34	3.1	24.388	3.7	6.2
Set	27.4	15.8	79	40	2.7	18.000	25.5	4.5
Out	21.7	12.9	83	49	2.6	12.731	70.0	2.8
Nov	16.3	9.2	85	55	2.7	8.887	77.8	1.8
Dez	13.1	6.7	87	58	2.8	7.297	84.6	1.3
Média anual	20.6	11.0	84	47	2.9	16.512	618.4	3.6

7.2.2. Dados dos modelos RCM

Conforme referido no ponto 6.2 os dados climáticos relativos aos cenários de alteração climática utilizados nesta aplicação experimental foram os cenários de controlo, A2 e B2 do modelo HadRM3P e os cenários de controlo e A2 dos modelos HIRHAMh e HIRHAMhh.

No Quadro 7.3 apresentam-se os valores das médias anuais dos dados produzidos pelos modelos RCM relativas às variáveis meteorológicas consideradas nesta tese e efectua-se a sua comparação com os dados observados para as estações de Beja e Évora, relativos à normal climática de 1961-1990.

Quadro 7.3 – Médias anuais dos dados climáticos produzidos pelos modelos RCM, considerados neste trabalho, 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

Estação	Modelo	Cenário	R_n (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	RH _{med} (%)	RH _{max} (%)	RH _{min} (%)	T _{med} (°C)	T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	U ₂ (ms ⁻¹)	P (mm)
Beja	Est. Meteo.	Controlo	8.370	65.6	88.2	42.9	16.2	22.3	10.1	3.2	586
	HadRM3P	Controlo	7.340	60.2	n.d.	n.d.	17.4	24.2	11.2	2.7	261
	HIRHAMh	Controlo	8.557	58.5	76.0	40.9	18.2	23.7	13.4	2.8	404
	HIRHAMhh	Controlo	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. Meteo.	Controlo	8.371	65.6	83.7	47.5	15.8	20.6	11.0	2.9	618
	HadRM3P	Controlo	7.288	62.8	n.d.	n.d.	16.8	23.7	10.6	2.6	366
	HIRHAMh	Controlo	8.457	60.4	78.3	42.5	17.5	23.0	12.8	2.7	474
	HIRHAMhh	Controlo	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.

Da leitura do Quadro 7.3 verifica-se uma diferença considerável entre os dados dos modelos relativos ao período de controlo e os dados observados para as estações de Beja e Évora. 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 que o desvio 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%. 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. Observando o Quadro 7.3 verifica-se 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. No caso da precipitação os erros apresentam um valor muito elevado. Assim, é realizada com maior detalhe uma análise comparativa entre os dados simulados para o período de controlo e os dados observados para as variáveis temperatura e precipitação, com o objectivo de avaliar a qualidade dos dados dos modelos, e de modo a se obter uma estimativa da incerteza associada aos dados produzidos pelos modelos RCM.

São apresentados no Quadro 7.4 os valores dos desvios médios que ocorrem entre os valores simulados para o período de controlo e os dados observados bem como a diferença entre os dados do período de controlo e os cenários de alteração climática.

Quadro 7.4 – Desvios médios entre os dados dos modelos RCM relativos ao período controlo (1961-90) e os dados observados nas estações meteorológicas (controlo RCM - observados); e desvios médios entre os cenários de alteração climática (2071-2100) e os dados de controlo dos modelos RCM (cenário RCM - controlo RCM); para as variáveis temperatura média (T_{med}) e precipitação (P)

Estação	Modelo	Cenário	T_{med} (°C)		Precipitação (%)	
			Cont-Obs	Cen-Cont	(Cont-Obs)/Obs	(Cen-Cont)/Cont
Beja	HadRM3P	B2	1.2	2.9	-55%	-25%
		A2		4.0		-39%
	HIRHAMh	A2	2.0	3.5	-31%	-28%
	HIRHAMhh	A2	2.0	3.5	-28%	-28%
Évora	HadRM3P	B2	1.1	2.9	-41%	-21%
		A2		4.1		-35%
	HIRHAMh	A2	1.7	3.6	-23%	-27%
	HIRHAMhh	A2	1.9	3.6	-31%	-25%

Para a temperatura (Quadro 7.4) verifica-se que a diferença entre os dados de controlo e os observados é maior para os modelos HIRHAMh e HIRHAMhh, cujos desvios médios variam entre 1.7 °C a 2.0 °C, do que para o modelo HadRM3P, cujos desvios médios variam entre 1.1 °C a 1.2 °C. Comparando estes desvios com o valor das anomalias, verifica-se que a anomalia para o cenário B2 é de 2.9 °C apresentando um desvio entre o valor de controlo e o observado de 1.1 °C a 1.2 °C. Para os dados do cenário A2 a anomalia varia de 3.5 °C a 4.1 °C com um desvio entre o valor de controlo e o observado a variar entre 1.1 °C a 2 °C. Pode concluir-se que o desvio do controlo face aos dados observados equivale em média a cerca de 45% do valor da anomalia projectado para os cenários A2 e a cerca de 39% para o cenário B2.

Relativamente à precipitação (Quadro 7.4), observa-se que os desvios entre os dados simulados para o período de controlo e os dados observados apresentam valores muito elevados, variando entre -23% e -55%, o que impede a sua utilização directa em estudos de impactes, tal como referido anteriormente em Miranda et al. (2006); Cunha et al. (2006) e Mourato (2009). O modelo HadRM3P apresenta os piores resultados com um desvio relativamente aos dados observados de -55% para Beja e de -41% para Évora. Estes valores são mais elevados do que as anomalias projectadas para Beja, -25% (B2) e -39% (A2), e para Évora, -21% (B2) e -35% (A2). Os modelos HIRHAMh e HIRHAMhh apresentam desvios face aos valores observados entre os -23% e os -31%, o que são valores da mesma ordem de grandeza dos valores projectados para as anomalias relativas ao cenário A2 destes modelos, que variam entre -25% a -27%. Daqui se conclui que os valores das anomalias projectadas 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 correcção dos desvios dos dados dos modelos, tal como referido em Miranda et al. (2006); Cunha et al. (2006) e Mourato (2009) (vd. secção 2.5.3.).

Na Figura 7.2 compara-se, para a temperatura média, a variabilidade das diferentes séries de dados meteorológicos. Verifica-se que os dados observados tanto para estação meteorológica de Beja como de Évora são os que apresentam os valores mais reduzidos e a menor variabilidade. Os valores dos dados simulados para o período de controlo mostram que a variabilidade é semelhante entre os três modelos RCM. Relativamente aos cenários futuros de alteração climática verifica-se que o cenário B2 é aquele que apresenta os valores de mediana mais baixos, tendo os dados relativos aos cenários A2 valores semelhantes entre os três modelos RCM.

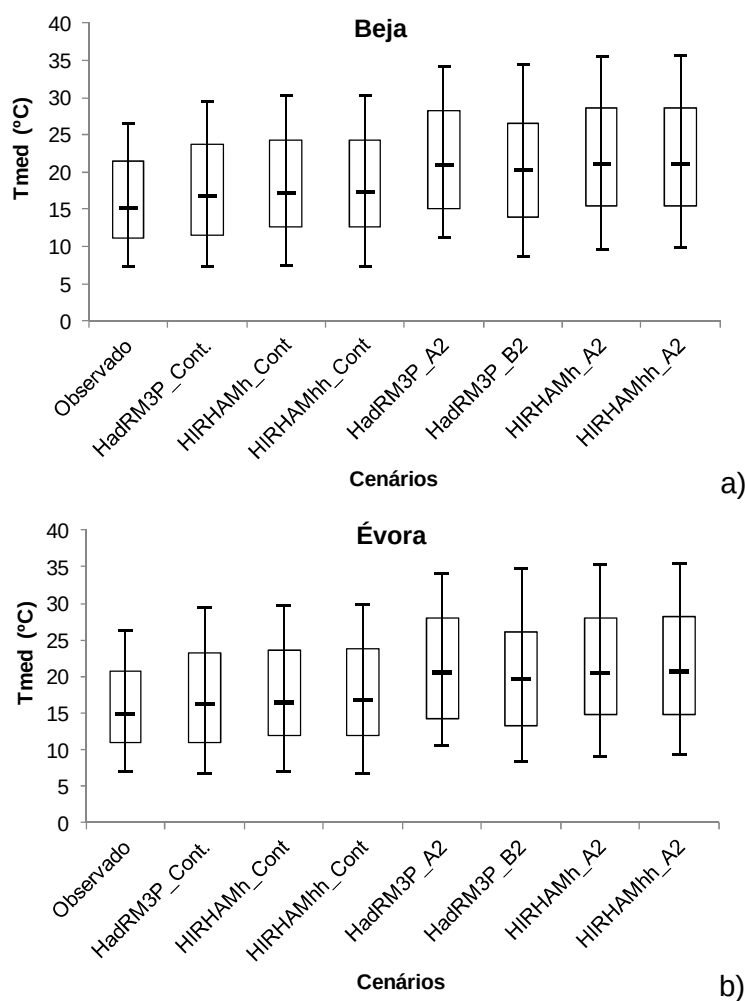


Figura 7.2 – Diagrama de extremos e quartis da temperatura média, relativo ao período observado (1961-90) e aos cenários de alteração climática (2071-2100), para a) Beja e para b) Évora.

Relativamente à variabilidade das séries de dados da precipitação (Fig. 7.3), verifica-se que os dados observados nas estações meteorológicas de Beja e Évora apresentam valores de mediana muito mais elevados e uma maior variabilidade que as restantes séries de dados. Relativamente aos dados de controlo dos modelos RCM, verifica-se que o modelo HadRM3P para além de apresentar os valores mais baixos da mediana, apresenta também uma variabilidade mais reduzida do que os modelos HIRHAMh e HIRHAMhh. Quanto aos cenários de alteração climática é de destacar os baixos valores do cenário A2 do modelo HadRM3P, e o facto de que o cenário B2 do mesmo modelo apresentar valores mais baixos do que o cenário A2, mais desfavorável, dos modelos HIRHAMh e HIRHAMhh. Verifica-se para o cenário A2 que todos os modelos projectam uma menor variabilidade da precipitação, quando comparados com a simulação de controlo, e que apenas o cenário B2 (HadRM3P) projecta um aumento na variabilidade da precipitação média mensal relativamente à simulação de controlo.

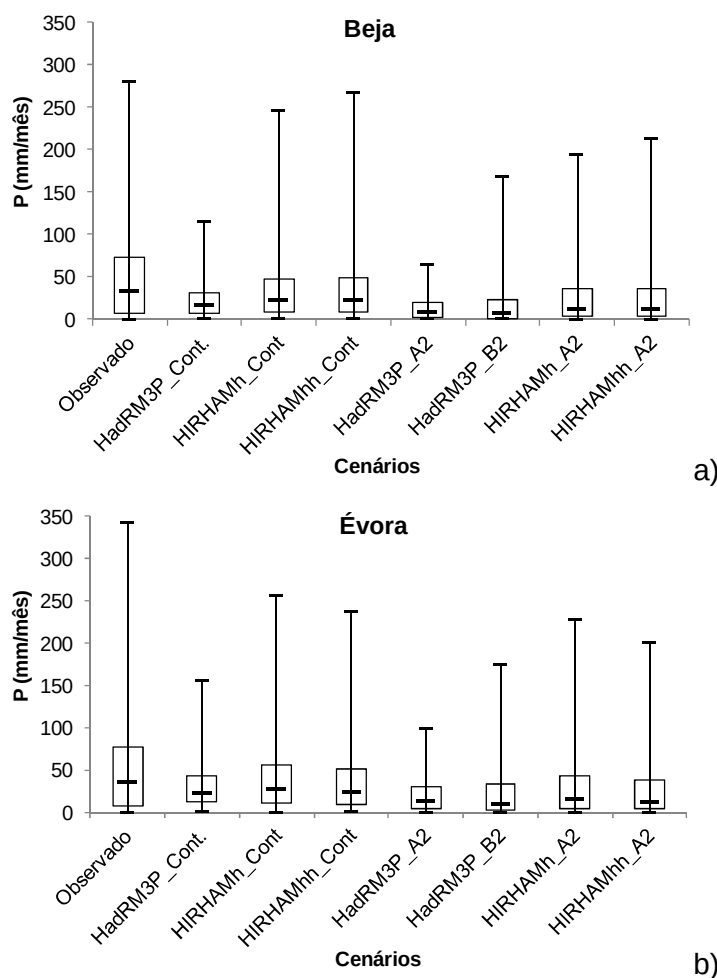


Figura 7.3 – Diagrama de extremos e quartis da precipitação, relativo ao período observado (1961-90) e aos cenários de alteração climática (2071-2100), para a) Beja e para b) Évora.

Para comparar de um modo visual os dados simulados para o período de controlo, pelos modelos RCM, com os dados observados nas estações de Beja e Évora no mesmo período realizou-se uma análise de regressão linear, com a recta forçada na origem, para as séries de médias mensais das variáveis temperatura média (Fig. 7.4) e precipitação (Fig. 7.5).

Da análise da Figura 7.4 verifica-se que para a temperatura média o valor do coeficiente de determinação (R^2) oscila entre 0.85 e 0.90, e que os valores do declive da recta variam entre 0.85 e 0.92. Este valores mostram que os dados de temperatura se ajustam razoavelmente bem à recta de regressão, apesar de ser notório a ocorrência de desvios consideráveis entre as séries simuladas e observadas. Todos os modelos apresentam uma tendência para sobrestimar os valores de temperatura, com resultados semelhantes entre si, confirmando os resultados do diagrama de extremos e quartis (Fig. 7.2). No caso da precipitação (Fig. 7.5), os valores do R^2 são muito baixos, variando entre -0.005 e 0.038. A dispersão dos valores mostra que não existe, em ambas as estações, correlação entre os dados simulados

para o período de controlo e os dados observados. Verifica-se, assim, a necessidade de realizar a correcção dos desvios dos dados produzidos pelos modelos RCM.

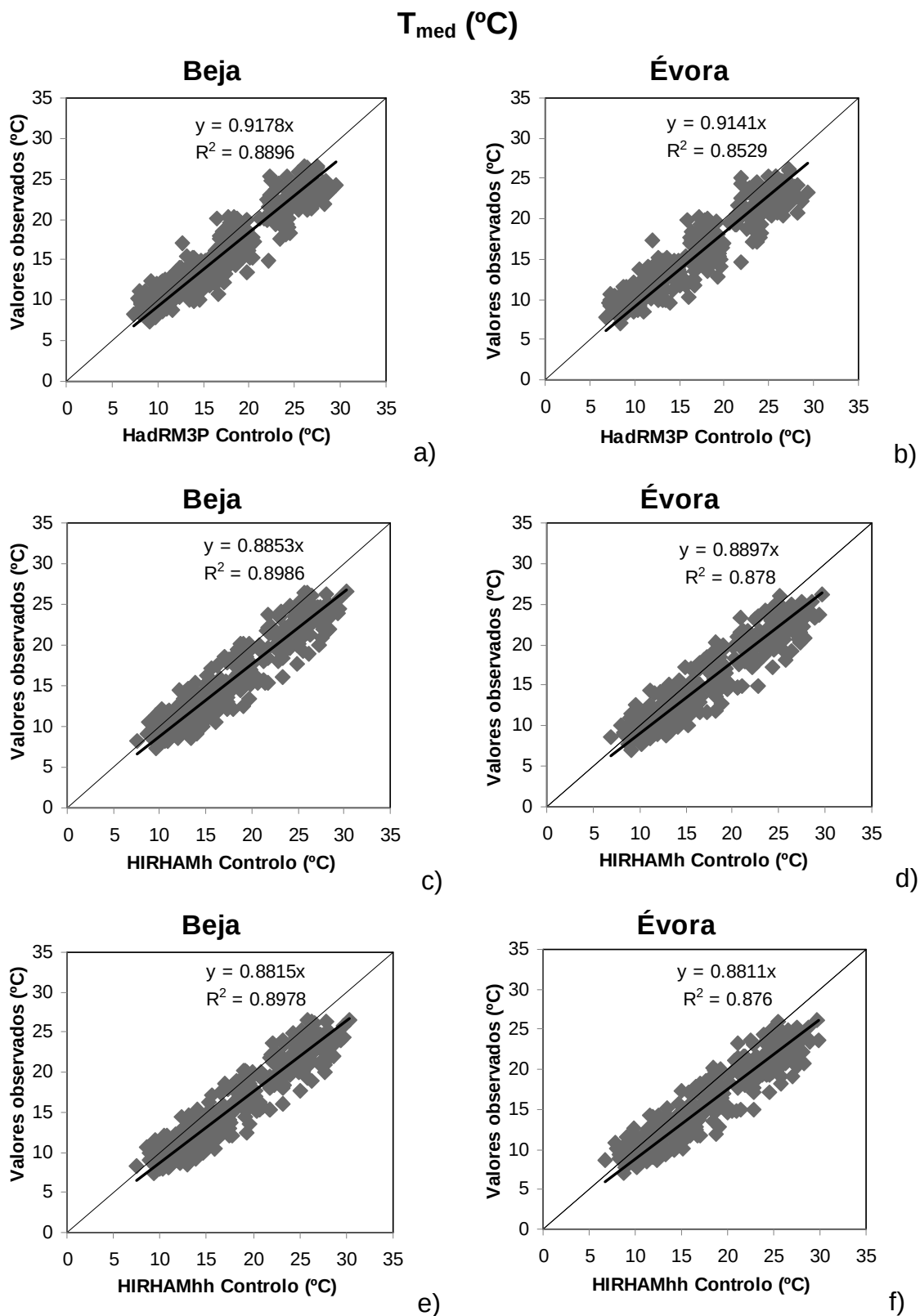


Figura 7.4 – Diagrama de dispersão das médias mensais da temperatura média, relativas ao período de controlo dos modelos RCM, sobre os valores observados para as estações meteorológicas de a), c), e) Beja e de b), d), f) Évora.

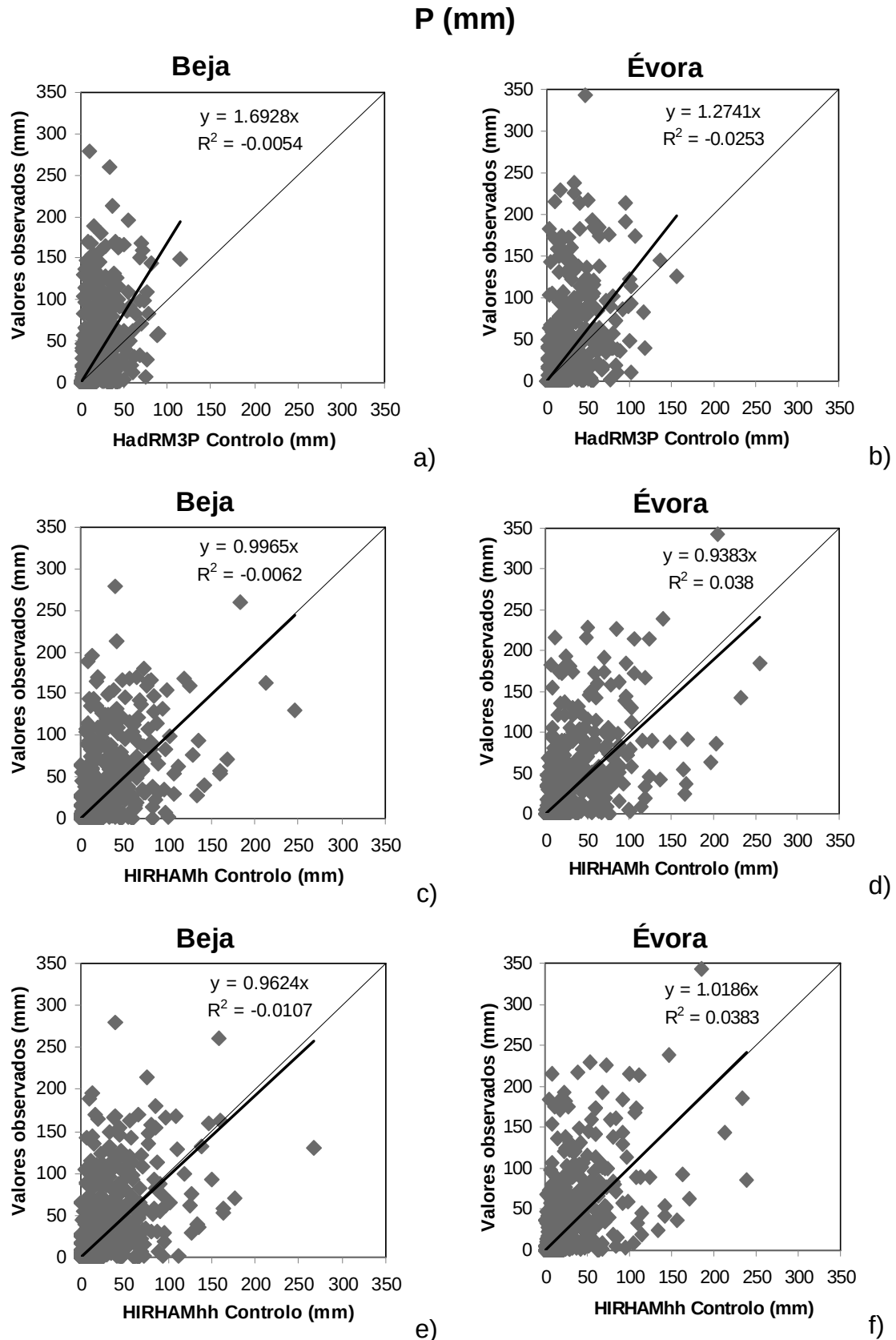


Figura 7.5 – Diagrama de dispersão das médias mensais da precipitação, relativas ao período de controlo dos modelos RCM, sobre os valores observados para as estações meteorológicas de a), c), e) Beja e de b), d), f) Évora.

7.2.3. Anomalias climáticas

Nesta secção apresentam-se os valores das anomalias climáticas dos cenários de alteração climática (2071-2100) produzidos pelos modelos RCM relativamente à normal climática de 1961-90 (Quadro 7.5). A radiação líquida (R_n) aumenta em todos os cenários com os valores mais baixos a ocorrerem no cenário B2. No caso da humidade relativa, como para o modelo HadRM3P apenas se dispunha do valor da RHmed optou-se por realizar a simplificação de considerar o valor da anomalia de RHmed tanto para RHmax como para RHmin. Para RHmax a anomalia varia entre -4.3% a -6.5% e RHmin tem uma anomalia que oscila entre -2.8% a -6.5%. Relativamente à temperatura média as anomalias variam entre 2.9 °C para o cenário B2 e de 3.5 °C a 4.1 °C para o cenário A2. A anomalia da temperatura máxima varia entre 3.1°C a 3.2°C para o cenário B2 e entre 3.9°C a 4.5 °C para o cenário A2. A temperatura mínima apresenta um aumento de 2.7°C para o cenário B2 e de 3.3°C a 3.8°C para A2. Verificando-se assim que o aumento da Tmax é superior ao da Tmin. Relativamente à velocidade média do vento (U_2) verifica-se que as anomalias são muito reduzidas. Para a precipitação verifica-se que as anomalias variam entre -22% a -26% para o cenário B2 e entre -25% a -38% para o cenário A2 com o modelo HadRM3P a apresentar valores de redução da precipitação superiores aos modelos HIRHAMh e HIRHAMhh. 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).

Quadro 7.5 – 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

Estação	Modelo	Cenário	R_n (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	RH _{max} (%)	RH _{min} (%)	T _{med} (°C)	T _{max} (°C)	T _{min} (°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

Estudos anteriores (Cunha et al., 2006; Miranda et al., 2006; e Mourato, 2009) mostram 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 no Quadro 7.6 e na Figura 7.6, para os diferentes cenários de alteração climática considerados.

Quadro 7.6 – Médias sazonais das anomalias climáticas de P e T_{med} , expressas como a diferença entre os valores dos cenários de alteração climática RCM (2071-2100) e o período de controlo (1961-90)

Estação	Modelo	Cenário	DJF*		MAM*		JJA*		SON*	
			T_{med} (°C)	P (%)	T_{med} (°C)	P (%)	T_{med} (°C)	P (%)	T_{med} (°C)	P (%)
Beja	HadRM3P	A2	3.4	-21%	3.9	-49%	4.5	-74%	4.5	-42%
	HadRM3P	B2	2.4	-16%	3.1	-29%	2.9	-59%	3.0	-35%
	HIRHAMh	A2	2.8	-15%	3.7	-49%	4.3	-53%	3.3	-27%
	HIRHAMhh	A2	2.8	-15%	3.8	-47%	4.2	-62%	3.3	-26%
Évora	HadRM3P	A2	3.3	-15%	3.9	-47%	4.6	-74%	4.5	-38%
	HadRM3P	B2	2.4	-9%	3.1	-23%	3.0	-58%	3.1	-31%
	HIRHAMh	A2	2.7	-12%	3.7	-47%	4.7	-55%	3.5	-27%
	HIRHAMhh	A2	2.7	-8%	3.7	-45%	4.5	-58%	3.5	-29%

* DJF – Dezembro, Janeiro, Fevereiro; MAM – Março, Abril, Maio; JJA – Junho, Julho, Agosto; SON – Setembro, Outubro, Novembro.

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.

No Quadro 7.6, pode-se observar que a gama de aumentos de temperatura varia entre os 2.4°C e os 3.4°C no Inverno e entre 2.9°C a 4.7°C no verão. Relativamente à precipitação, verifica-se uma redução de -8% a -21% no Inverno, e de -53% a -74% no Verão. Verifica-se assim que a redução da precipitação é relativamente ligeira durante o Inverno com reduções mais pronunciadas em todas as outras estações do ano, especialmente no Verão. Apesar da elevada redução percentual da precipitação, projectada para o Verão, essa redução em valor absoluto é pouco importante devido aos baixos valores de precipitação que ocorre nesta época do ano. Assim, a precipitação reduzir-se-á em termos do seu volume anual entre -22% a -38% (Quadro 7.5), e sofrerá também alterações na sua distribuição sazonal, dando-se uma maior concentração da precipitação na estação do Inverno e uma redução nas restantes estações. Do ponto de vista agrícola é particularmente gravosa a redução da precipitação durante a Primavera de -23% a -49% (Fig. 7.6) que coincide com a época de floração e formação do grão das culturas de Outono-Inverno, o que levará a um considerável aumento do deficit hídrico das culturas de sequeiro durante uma fase crítica da cultura resultando em fortes quebras de produção.

Na Figura 7.6 apresenta-se o ciclo anual das anomalias de temperatura média e da precipitação. Da análise da Figura 7.6 constata-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 modelos 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.

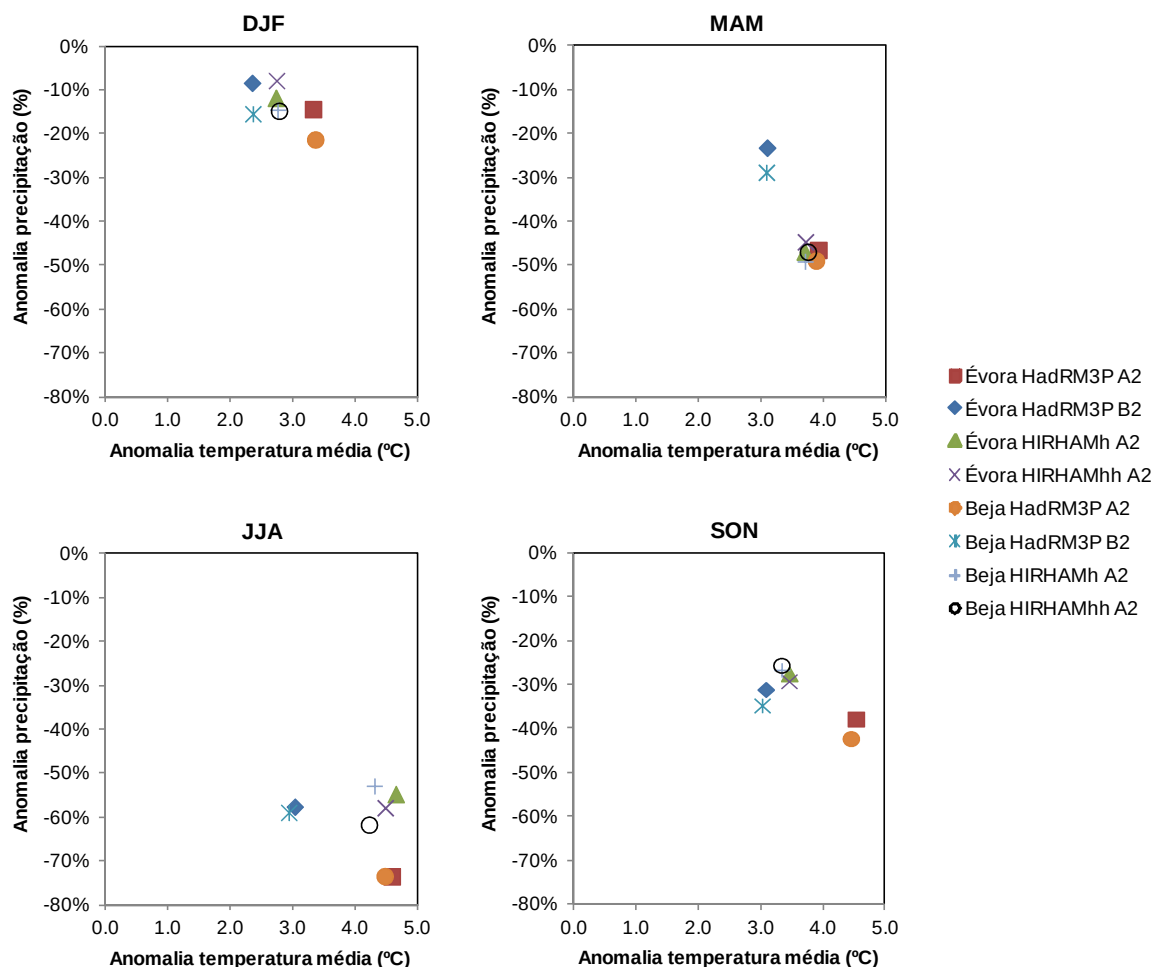


Figura 7.6 – Ciclo anual das anomalias da temperatura média e da precipitação, expressas como a diferença entre os valores dos cenários de alteração climática (2071-2100) e o período de controlo (1961-90), para as estações de Beja e Évora.

O Inverno é a estação do ano para a qual se observam (Fig. 7.6) 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 projecta 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. 7.7). Assim, apesar de ET_0 ter sido calculada com base nas séries climáticas perturbadas (vd. secção 7.2.4) decidiu-se incluir nesta secção o ciclo anual das anomalias conjuntas da ET_0 e da precipitação.

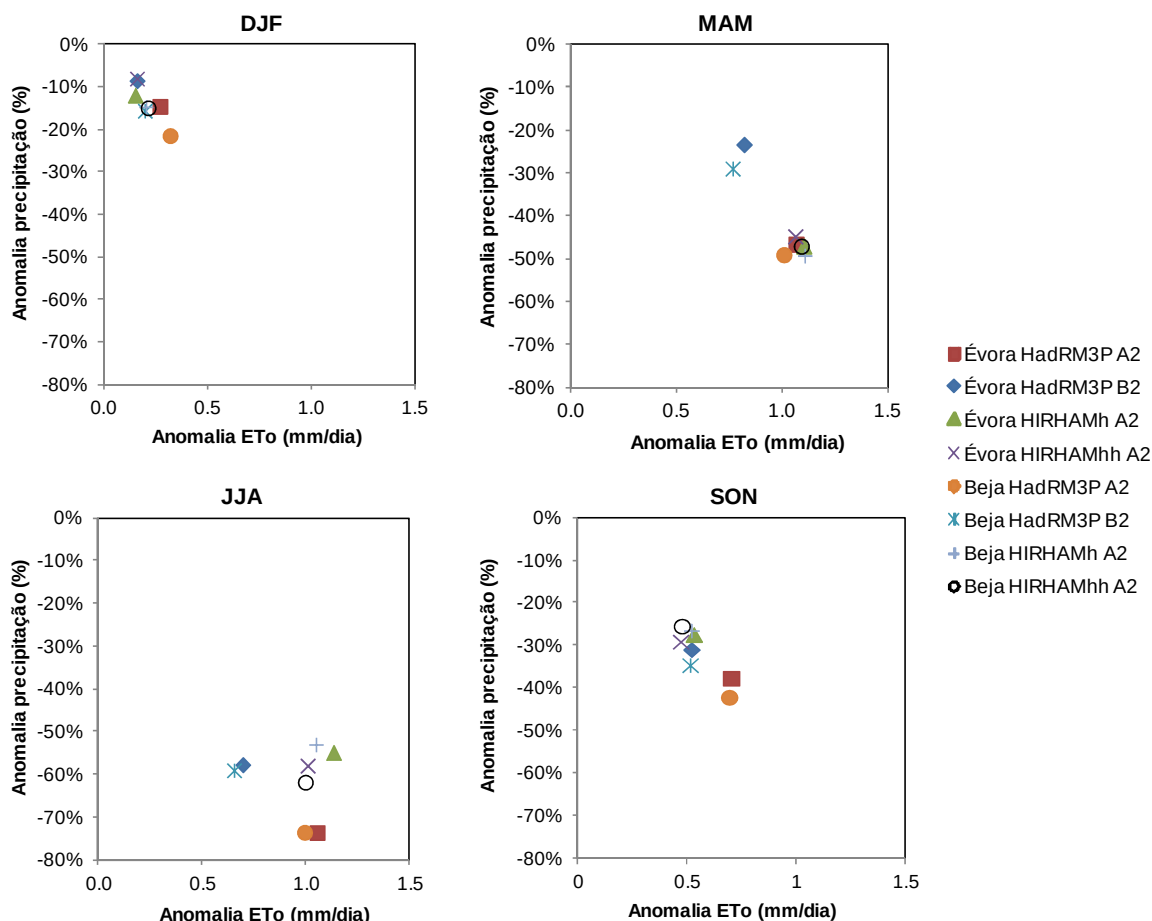


Figura 7.7 – Ciclo anual das anomalias da evapotranspiração de referência e da precipitação, expressas como a diferença entre os valores dos cenários de alteração climática (2071-2100) e o período de controlo (1961-90), para as estações de Beja e Évora.

A Figura 7.7 mostra que o cenário B2 do modelo HadRM3P é o que apresenta os menores aumentos dos valores de ET_0 e a menor redução dos valores da precipitação, enquanto que o cenário A2 do modelo HadRM3P é aquele que apresenta os maiores aumentos de ET_0 e a maior redução da precipitação, apresentando o cenário A2 dos modelos HIRHAMh e HIRHAMhh valores intermédios.

No Inverno (Fig. 7.7) observam-se os menores aumentos de ET_o , sendo a média das anomalias de todos os cenários e modelos de 0.21 mm.dia^{-1} . A Primavera é a estação ano para a qual se observa o maior valor da média dos aumentos com uma anomalia de 1.0 mm.dia^{-1} , valor que é bastante próximo do aumento médio de 0.94 mm.dia^{-1} verificado no Verão. O Outono apresenta uma anomalia média de 0.56 mm.dia^{-1} .

7.2.4. Séries climáticas perturbadas

As séries climáticas perturbadas obtêm-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, apresentadas na secção 7.2.3. As séries climáticas perturbadas constituem o produto final do sistema de informação IScenarios (vd. secção 6.2.1) e constituem os dados meteorológicos de entrada do modelo IrrigRotation (vd. secção 6.2.3). Os valores das médias anuais (2071-2100) para cada uma das variáveis meteorológicas das séries perturbadas são apresentados no Quadro 7.7.

Quadro 7.7 – 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)

Estação	Modelo	Cenário	$T_{\max}$ (°C)	$T_{\min}$ (°C)	$RH_{\min}$ (%)	$RH_{\max}$ (%)	U_2 (ms^{-1})	P (mm)	ET_o (mm dia^{-1})	R_n ($\text{Mj m}^{-2}\text{dia}^{-1}$)
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 médias mensais das séries perturbadas da temperatura máxima ($T_{\max}$), para as estações de Beja e Évora, são apresentadas na Figura 7.8. Os valores relativos às séries perturbadas da temperatura mínima ($T_{\min}$) são apresentados na Figura 7.9. Os cenários A2 relativos aos três modelos RCM considerados apresentam resultados semelhantes entre si tanto para $T_{\max}$ como para $T_{\min}$. É notório que o aumento de temperatura dos cenários A2, relativamente a B2, é maior nos meses de Verão. Todos os cenários apresentam um claro aumento face ao período de controlo.

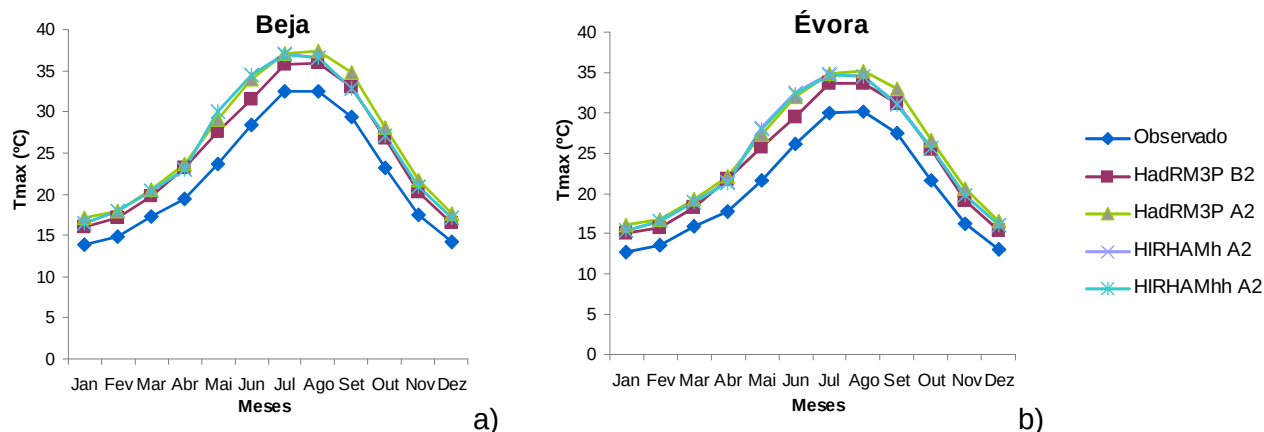


Figura 7.8 – Médias mensais da temperatura máxima das séries climáticas perturbadas produzidas para a) Beja e b) Évora.

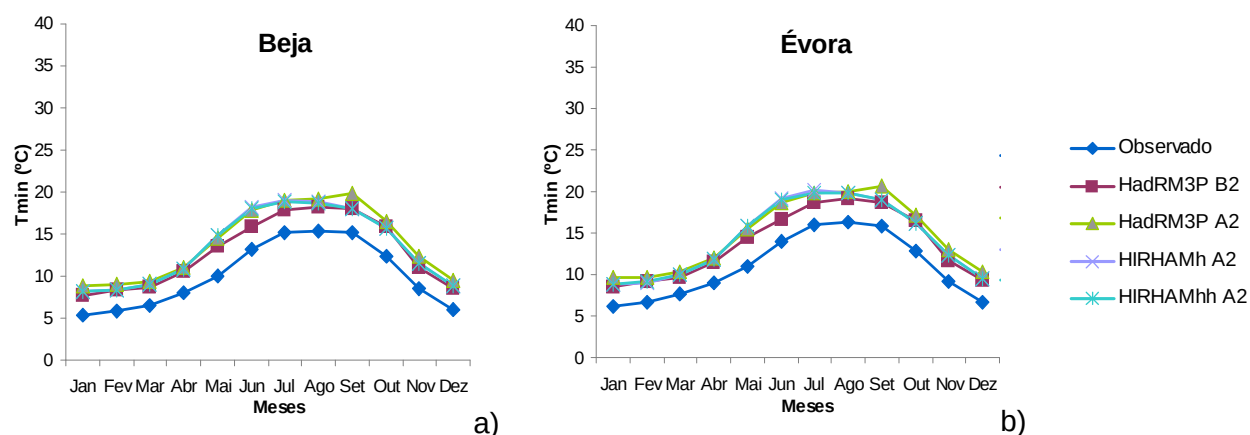
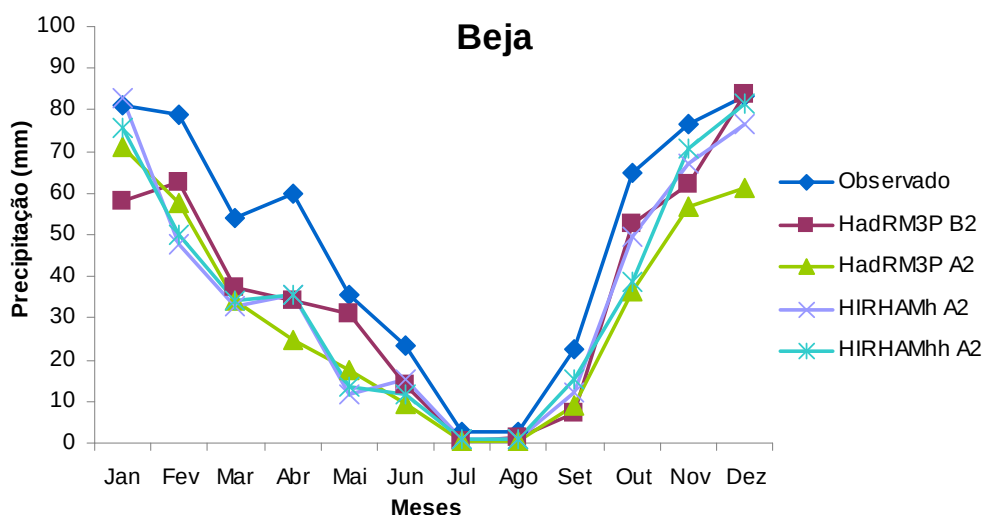
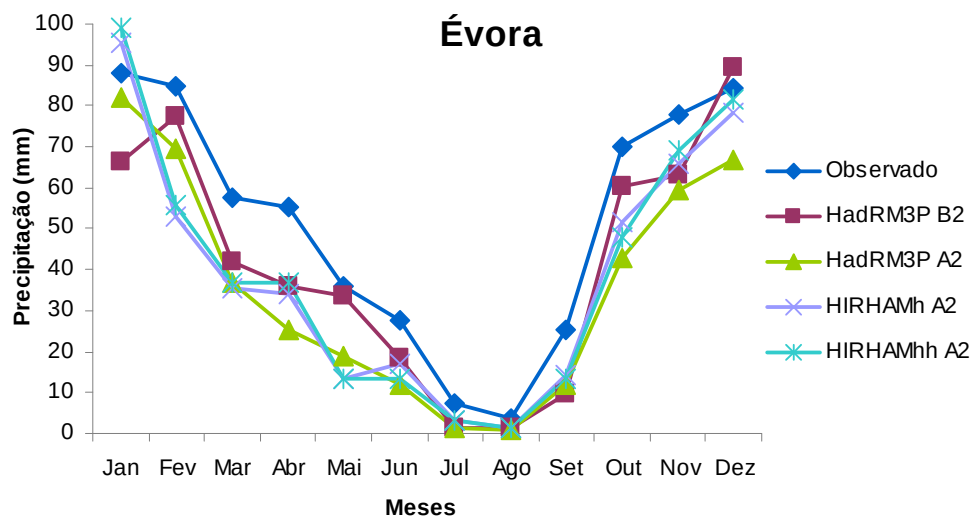


Figura 7.9 – Médias mensais da temperatura mínima das séries climáticas perturbadas produzidas para a) Beja e b) Évora.

Relativamente à precipitação constata-se através da observação da Figura 7.10 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. A precipitação apresenta uma redução muito importante nos meses de Março, Abril e Maio. No Verão a precipitação, já de si escassa para o período de controlo, apresenta valores residuais em Julho e Agosto e verifica-se também que a estação seca se prolonga ao mês de Setembro. No Outono verifica-se igualmente uma redução na precipitação embora ligeiramente menos acentuada que na Primavera. 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.



a)



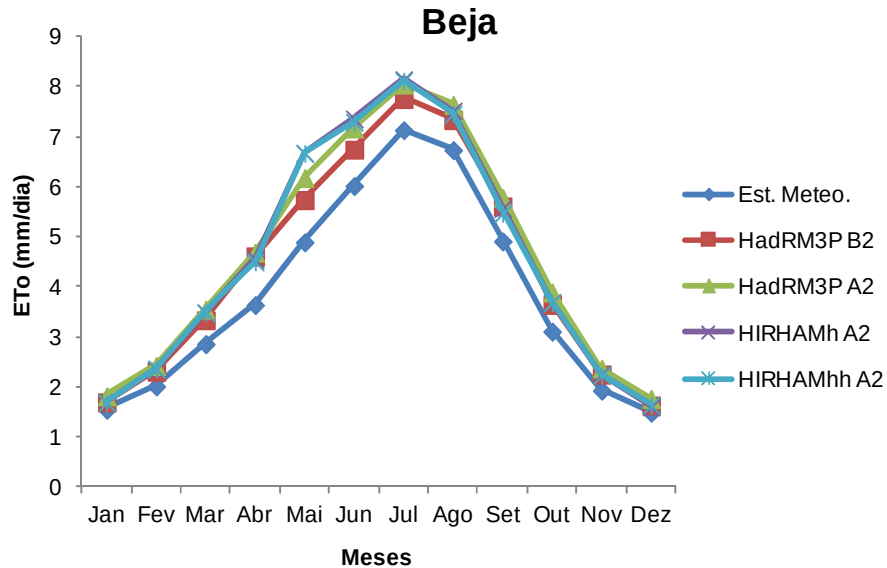
b)

Figura 7.10 – Médias mensais da precipitação das séries climáticas perturbadas produzidas para a) Beja e b) Évora.

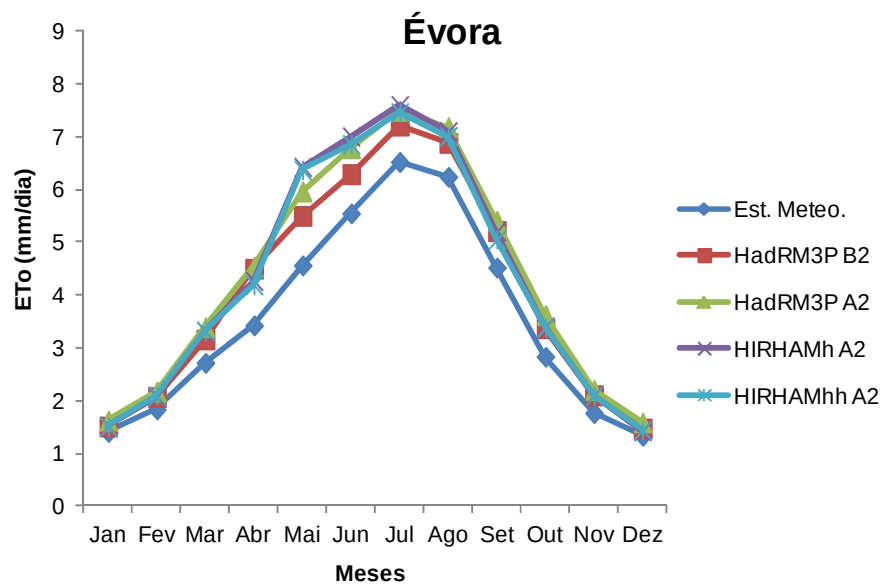
Relativamente à ET_0 (Fig. 7.11), verifica-se que os maiores aumentos de ET_0 ocorrem durante a Primavera e o Verão e que no Outono e Inverno os cenários de alteração climática para além de apresentarem valores mais próximos dos observados também apresentam uma menor diferenciação entre si. Os cenários 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.

Da observação da Figura 7.11 é de realçar o aumento muito marcado da ET_0 durante a Primavera, especialmente para o cenário A2. Este facto levanta problemas às culturas de sequeiro de Outono-Inverno uma vez que na Primavera se verifica um aumento acentuado da ET_0 associado com uma forte redução da precipitação, que coincide com 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 7.11 – 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.

7.3. Simulação do balanço hídrico do solo

Para avaliação dos impactes das alterações climáticas nas necessidades de rega das culturas construíram-se um conjunto de simulações tal como representado na Figura 7.1. Estas simulações consistem na combinação de dados climáticos, com dados de solos, das culturas e rotações de culturas, dos sistemas de rega e das opções de rega.

Nesta aplicação experimental, decidiu-se utilizar as datas de sementeira e a duração das diferentes fases das culturas actuais, sem se realizar o seu ajustamento de acordo com a metodologia dos tempos térmicos. Esta decisão tem como fundamento o facto de que na avaliação dos impactes das alterações climáticas se deve estabelecer um conjunto de simulações, de forma a se obter uma gama de valores dentro dos quais se situem os possíveis impactes. Assim, estas simulações, do ponto de vista da duração do ciclo das culturas, correspondem a um limite máximo, que poderá ocorrer no caso de se obterem variedades melhor adaptadas às futuras condições e que permitam aproveitar as estações de crescimento actuais de modo a se manterem as produções. A diminuição da duração do ciclo das culturas devido à elevação das temperaturas do ar leva à redução das produções, sendo desejável a adopção de variedades de ciclo mais longo no regadio de forma a contrariar o efeito da redução do ciclo da cultura (Abreu et al., 2010).

Adicionalmente às simulações representadas na Figura 7.1 realizaram-se mais dois conjuntos de simulações. Para a rotação B-M-T-T e para Beja, fizeram-se quatro repetições para cada cenário climático, em que se alterou a cultura que inicia a rotação, de forma a se ter para cada ano as quatro folhas da rotação e não apenas uma cultura, como no caso das simulações da Figura 7.1 que se iniciam com a cabeça da rotação considerando apenas uma folha. A consideração da média das várias folhas de uma rotação tem por objectivos avaliar o modo como a variabilidade interanual do clima pode introduzir desvios nos resultados consoante a cultura que inicia a rotação. A realização destas diferentes repetições das simulações, para diferentes culturas iniciais da rotação, tem o inconveniente de gerar um número muito elevado de simulações, sendo uma tarefa muito demorada e que obriga à gestão de um grande volume de dados. A consideração dos valores das quatro folhas permite também que se disponha de séries de 30 anos para cada cultura da rotação, o que possibilitou dispor de um número mínimo de dados para a realização da análise de variância dos resultados do balanço hídrico do solo. O outro conjunto de rotações consistiu na consideração da monocultura do trigo, para Beja, para o período de controlo e para o cenário A2 do modelo HadRM3P. Estas duas simulações tiveram como objectivos avaliar o efeito da rotação de culturas em solos com uma elevada reserva utilizável (RU) nas culturas de sequeiro, quando inseridas em rotações de regadio.

7.3.1. Dados de base

Dados climáticos

Os dados climáticos utilizados nesta aplicação incluem os dados diários observados pelas estações de Beja e Évora, referentes ao período de 1961-1990, cujas médias mensais e anuais se apresentam nos Quadros 7.1 e 7.2, e os dados relativos às séries climáticas perturbadas (2071-2100) correspondentes aos cenários de alteração climática considerados neste estudo, cujas médias anuais se podem observar no Quadro 7.7. Os dados climáticos foram apresentados anteriormente na secção 7.2.

Dados de solos

Com base na carta de solos (IDRHa, 2010) para a região de Évora, folha 460 (Fig. 7.12a), e Beja, folha 521 (Fig. 7.12b), seleccionaram-se os solos Mediterrâneos Pardos Normais de quartzodioritos (Pmg) para Évora e os solos Barros Pretos calcários Muito Descarboxatados de dioritos ou gabros (Bpc) para Beja. O critério de selecção dos solos consistiu na identificação da mancha de solo predominante no local de cada uma das estações meteorológicas. A carta de solos, à escala 1:25 000, foi introduzida no SIG desenvolvido no IScenarios (vd. secção 6.2.1.2.) e encontra-se georreferenciada no sistema de projecção Hayford-Gauss; Elipsóide Internacional; Datum de Lisboa e coordenadas militares usadas pelo IGeoE (falsa origem) (IDRHa, 2010).

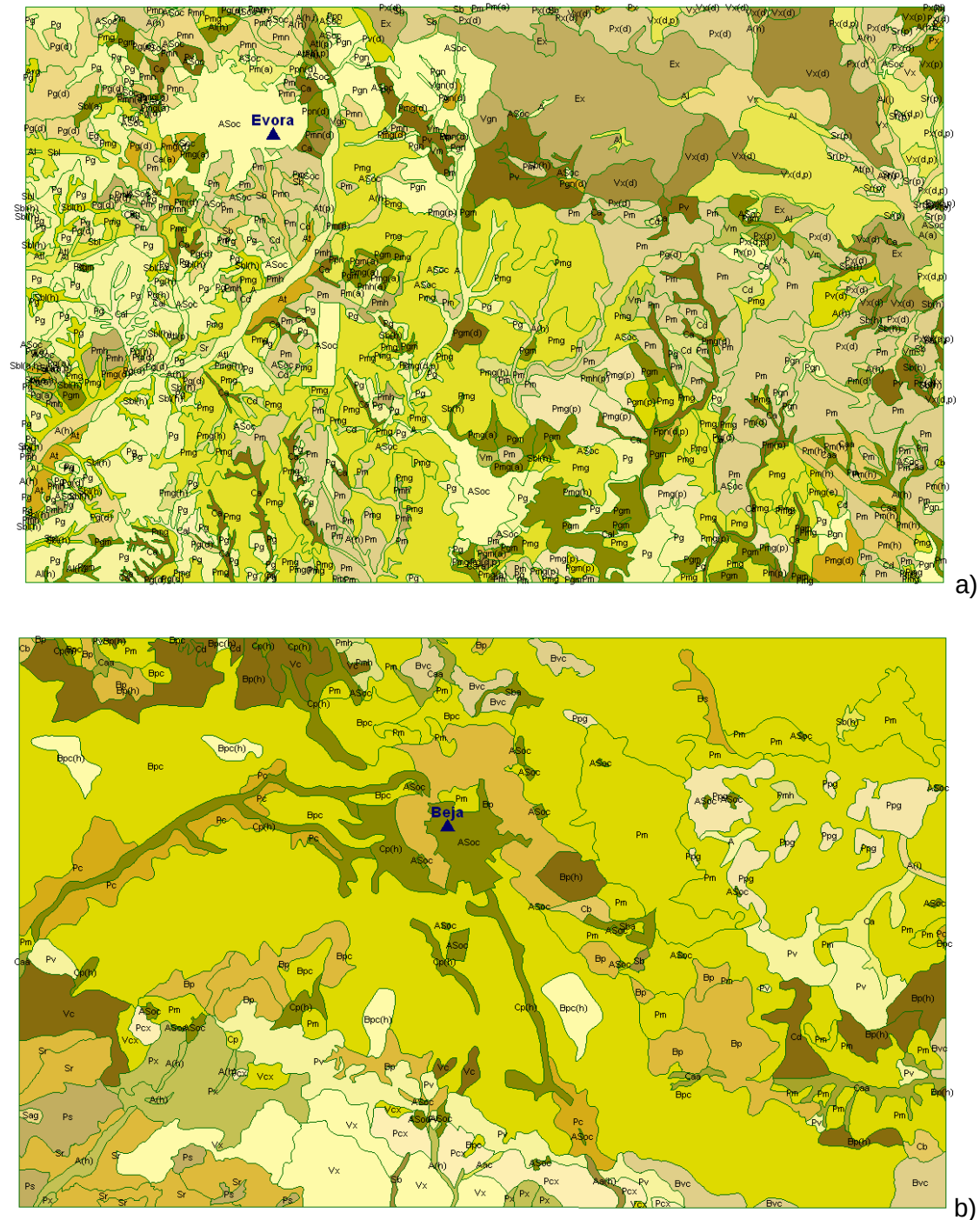


Figura 7.12 – Carta de solos (IDRHa, 2010) relativa às manchas de solos existentes na região de a) Évora (folha nº 460) e na região de b) Beja (folha nº 521).

No Quadro 7.8 apresentam-se os dados relativos aos parâmetros físicos dos solos Pmg e Bpc utilizados na modelação do balanço hídrico do solo e que foram retirados de Cardoso (1965).

Quadro 7.8 – Parâmetros dos solos Pmg e Bpc (Cardoso, 1965)

Solo	Horizonte	Profundidade superior (m)	Profundidade inferior (m)	θ_{cc} (g g ⁻¹)	θ_{ce} (g g ⁻¹)	dap* (g cm ⁻³)
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
Pmg	Ap	0	0.3	0.1375	0.03	1.5
	B	0.3	0.6	0.2365	0.1038	1.28

* dap – densidade aparente do solo.

Adoptou-se o valor de 10 cm para a profundidade da camada evaporativa do solo (Z_e), para ambos os solos, e um valor de 10 mm de água facilmente evaporável (REW) para o solo Bpc, e de 8 mm para o solo Pmg (vd. secção 4.2.5.1). Estes valores foram obtidos a partir de Allen et al. (1998), que referem que o valor da profundidade da camada evaporativa (Z_e) oscila entre os 10 cm e os 15 cm e que o valor de REW, para $Z_e = 10$ cm, varia entre 8 mm e 12 mm para um solo argiloso, e entre os 6 mm e os 10 mm para um solo franco-arenoso.

Dados das culturas e das rotações de culturas

Seleccionaram-se duas rotações de culturas características da região do Alentejo, uma de regadio, Beterraba sacarina-Milho-Tomate-Trigo (Coelho, 2008), e outra de sequeiro, Girassol-Trigo-Cevada (Carvalho e Azevedo, 1991). O objectivo de incluir uma rotação de sequeiro foi o de avaliar o grau de vulnerabilidade das culturas de sequeiro que são produzidas nesta região. Uma vez que na região a cultura do girassol é regada, optou-se por simular a rega do girassol, sendo as culturas do trigo e da cevada produzidas em sequeiro.

No Quadro 7.9 apresentam-se os parâmetros das culturas utilizados como dados de entrada no modelo IrrigRotation, tendo os dados sido retirados de Allen et al. (1998).

Para simulação do balanço hídrico adoptou-se uma profundidade efectiva inicial de enraizamento ($Z_{r\ min}$) de 20 cm (vd. secção 4.2.2.1). Este valor foi obtido através de um processo iterativo em que se começou com a profundidade de 10 cm, equivalente à espessura da camada evaporativa, e se foi aumentando o valor da profundidade até aos 20 cm. Este foi o valor da profundidade para o qual se verificou não ser necessário aplicar um elevado número de regas durante o período inicial. Deste modo, as simulações ficam de

acordo com a prática de campo em que os agricultores durante o período inicial geralmente apenas aplicam uma rega para a emergência da cultura³.

Quadro 7.9 – Parâmetros das culturas do milho, trigo, beterraba sacarina, tomate, Girassol e cevada, utilizados como dados de entrada no modelo IrrigRotation

	Cultura					
	Milho	Trigo	Beterraba sacarina	Tomate	Girassol	Cevada
Dia da plantação	10	1	5	1	20	15
Mês da plantação	4	11	11	5	4	12
L_{ini} (dias)	30	30	45	30	25	20
L_{dev} (dias)	40	140	75	40	35	50
L_{mid} (dias)	50	40	80	45	45	60
L_{late} (dias)	30	30	30	30	25	30
k_{cb ini}	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
k_{cb mid}	1.15	1.1	1.15	1.1	1.1	1.1
k_{cb end}	0.15	0.15	0.5	0.7	0.25	0.15
p_{ini}	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
p	0.55	0.55	0.55	0.4	0.45	0.55
h_{max} (m)	2	1	0.5	0.6	2	1
h_{min} (m)	0	0	0	0.07	0	0
Z_{r min} (m)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Z_{r max} (m)	1	1.8	0.7	0.7	0.8	1.5
Opções de rega	Rega opt.	Seq.	Rega opt.	Rega opt.	Rega opt.	Seq.
f_w	1		1	0.4	1	

L_{ini} = duração do período inicial; L_{dev} = duração do período de crescimento rápido; L_{mid} = duração do período intermédio; L_{late} = duração do período final; k_{cb ini} = coeficiente cultural basal para o período inicial; k_{cb mid} = coeficiente cultural basal para o período intermédio; k_{cb end} = coeficiente cultural basal para o período final; p_{ini} = fracção de água facilmente utilizável durante o período inicial; p = fracção de água facilmente utilizável; h_{max} = altura máxima da planta; h_{min} = altura mínima da planta; Z_{r min} = profundidade efectiva inicial de enraizamento; Z_{r max} = profundidade efectiva máxima de enraizamento; f_w = fracção do solo humedecida pela rega ou precipitação.

Relativamente às opções de rega considerou-se que as culturas do milho, beterraba sacarina e tomate são regadas visando o seu conforto hídrico, não se regando as culturas do trigo e da cevada. Quanto à fracção do solo humedecida pela rega ou precipitação (f_w) (vd. secção 4.2.5.1) considerou-se que as culturas do milho, beterraba sacarina e girassol

³ Durante o processo de validação do modelo IrrigRotation verificou-se que a metodologia dos coeficientes culturais de base (Allen et al., 1998) produz um número elevado de regas durante o período inicial quando se considera uma profundidade efectiva inicial de enraizamento (Z_{r min}) igual à profundidade de sementeira ou de plantação.

são regadas por aspersão com um valor de f_w igual a um e a cultura do tomate é regada com rega localizada com f_w igual a 0.4.

Os dados utilizados para o período sem cultura (Quadro 7.10) correspondem a uma situação hipotética em que, após a colheita, o solo fica coberto com os resíduos das culturas, sendo alvo de pastagem em que o gado consome os restolhos e assumindo-se que ao longo do período sem cultura (*nongrowing season*) existe a germinação e o crescimento de infestantes com uma fracção de cobertura do solo de 20%. Com base nestes dados e na equação 4.38 (vd. secção 4.2.7) obteve-se um valor de $K_{cb \text{ mid}}$ igual a 0.30 o que corresponde ao valor do $K_{cb \text{ ini}}$, tabelado em Allen et al. (1998) para os pastos sobre pastoreio, que correspondem, de forma bastante aproximada, à situação descrita.

Quadro 7.10 - Parâmetros do período sem cultura (*nongrowing season*)

	K_{cb}	z_r	p	H	f_c
Período sem cultura	0.3	0.1	0.6	0.1	0.2

7.3.2. Resultados e discussão

7.3.2.1. Necessidades hídricas das culturas

As necessidades hídricas das culturas (NH) correspondem ao somatório da evapotranspiração da cultura (ET_c), em situação de conforto hídrico, ao longo de todo o ciclo da cultura (vd. capítulo 4). No Quadro 7.11 apresentam-se os valores das necessidades hídricas obtidas para todas as culturas e cenários climáticos considerados.

Da observação dos resultados relativos às necessidades hídricas das culturas (Quadro 7.11), constata-se uma diferença expressiva entre os resultados para o período de controlo e os cenários de alteração climática. Verifica-se, ainda, que os três modelos RCM apresentam valores semelhantes para o cenário A2, apresentando o cenário B2 um aumento menor que o cenário A2 em particular para a cultura da beterraba.

Quanto à variabilidade das necessidades hídricas anuais (Quadro 7.11) verifica-se que o coeficiente de variação (CV) apresenta baixos valores para o período de controlo, indicando uma reduzida variabilidade das necessidades hídricas, sofrendo um aumento para os cenários de alteração climática. As culturas da beterraba, do trigo e da cevada são aquelas em que se verifica um maior aumento de CV para os cenários futuros especialmente para os modelos HIRHAMh e HIRHAMhh, enquanto que as culturas de Primavera-Verão tendem a apresentar os menores aumentos da variabilidade das necessidades de rega, sendo de destacar os baixos valores do CV para a cultura do tomate para todos os cenários. Este

facto deve-se à variabilidade dos dados climáticos, visto que durante o Inverno e a Primavera existe uma maior variabilidade ao nível da precipitação e dos valores da evapotranspiração de referência do que no Verão que geralmente é mais estável.

Quadro 7.11 - Médias das necessidades hídricas das culturas (NH), para o período de controlo e para os cenários de alteração climática, considerando apenas uma folha para cada rotação

Caso de estudo	Rotação	Cultura		Controlo	HadRM3P	HadRM3P	HIRHAMh	HIRHAMhh
				1961-90 NH (mm)	A2 NH (mm)	B2 NH (mm)	A2 NH (mm)	A2 NH (mm)
Beja (Bpc)	B-M-T-T	Beterraba	Média	777	956	856	1003	993
			CV	0.05	0.05	0.09	0.20	0.19
	B-M-T-T	Milho	Média	888	1041	1021	1049	1048
			CV	0.06	0.10	0.07	0.05	0.05
	B-M-T-T	Tomate	Média	855	946	920	974	968
			CV	0.05	0.05	0.05	0.03	0.04
	B-M-T-T	Trigo	Média	731	850	799	841	826
			CV	0.06	0.07	0.10	0.21	0.20
	G-T-C	Girassol	Média	837	987	931	1039	1027
			CV	0.05	0.05	0.08	0.09	0.09
	G-T-C	Trigo	Média	702	800	770	874	869
			CV	0.07	0.08	0.13	0.14	0.13
	G-T-C	cevada	Média	446	537	534	476	474
			CV	0.06	0.08	0.11	0.19	0.19
Évora (Pmg)	B-M-T-T	Beterraba	Média	698	871	775	912	901
			CV	0.05	0.06	0.12	0.21	0.21
	B-M-T-T	Milho	Média	798	946	932	952	943
			CV	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06
	B-M-T-T	Tomate	Média	759	868	837	896	873
			CV	0.05	0.06	0.05	0.04	0.05
	B-M-T-T	Trigo	Média	644	783	731	759	749
			CV	0.07	0.08	0.13	0.23	0.22
	G-T-C	Girassol	Média	742	874	826	928	907
			CV	0.05	0.07	0.11	0.09	0.09
	G-T-C	Trigo	Média	629	746	709	804	797
			CV	0.07	0.07	0.16	0.14	0.14
	G-T-C	cevada	Média	397	489	490	427	425
			CV	0.05	0.09	0.14	0.22	0.21

No caso da cevada observa-se (Quadro 7.11) que o modelo HadRM3P apresenta os valores mais elevados das necessidades hídricas, tanto para Beja como para Évora, com o cenário A2 a apresentar resultados muito próximos do cenário B2, e com o cenário A2 dos modelos HIRHAMh e HIRHAMhh a apresentar valores apenas ligeiramente maiores do que os

obtidos para o período de controlo. Este resultado inesperado deve-se à ocorrência de *outliers* nos dados desta cultura que devido ao facto de se dispor de apenas 10 valores para realizar as médias das necessidades hídricas faz com que não seja possível a sua diluição nos outros valores das necessidades hídricas das culturas. A ET_0 apresenta uma variabilidade maior durante o Inverno e a Primavera o que faz com que em alguns anos o cenário B2 apresente valores mais elevados durante estas estações do que o cenário A2 dos modelos HIRHAMh e HIRHAMhh, observando-se também que em alguns anos o cenário A2 dos modelos HIRHAMh e HIRHAMhh apresenta durante o Inverno valores de ET_0 inferiores ao período de controlo. Este facto é devido à perturbação das séries históricas com as séries mensais das anomalias climáticas que por vezes produzem valores extremos, que podem enviesar os resultados. No caso da cevada, como esta é semeada a 15 de Dezembro e colhida a 24 de Maio, todo seu ciclo está contido neste período de maior variabilidade da ET_0 , o que causa uma maior variabilidade nos resultados. Assim quando se pretenda realizar o cálculo da necessidades hídricas para culturas de Outono-Inverno é necessário contabilizar a média das várias folhas das rotações de modo a diluir os *outliers* por um maior número de registos, ou então poderão retirar-se os valores dos *outliers* obrigando a uma análise crítica dos resultados. Para o caso da cevada retirando os valores dos *outliers* obtêm-se para os cenários de alteração climática os valores apresentados no Quadro 7.12, que estão de acordo com os valores esperados.

Quadro 7.12 -Média das necessidades hídricas (NH) da cevada para os diferentes cenários de alteração climática, considerando apenas uma folha da rotação, e retirando os valores dos *outliers*

Caso de estudo	Cultura		HadRM3P	HadRM3P	HIRHAMh	HIRHAMhh
			A2	B2	A2	A2
			NH (mm)	NH (mm)	NH (mm)	NH (mm)
Beja (Bpc)	cevada	Média	526	518	525	524
		CV	0.06	0.07	0.11	0.09
Évora (Pmg)	cevada	Média	480	473	475	475
		CV	0.07	0.10	0.13	0.10

No Quadro 7.13 apresentam-se as médias das 4 folhas da rotação B-M-T-T, para Beja, verificando-se nalguns casos desvios consideráveis relativamente aos dados do Quadro 7.11. Salienta-se a tendência para as culturas de Outono-Inverno apresentarem as maiores diferenças, sendo de destacar a diferença de 46 mm entre os valores da beterraba para o cenário B2 (Quadro 7.11 e 7.13).

Quadro 7.13 - Médias das necessidades hídricas das culturas (NH) para o período de controlo e para os cenários de alteração climática, considerando a média das quatro folhas da rotação B-M-T-T, para Beja

Caso de estudo	Rotação	Cultura		Controlo	HadRM3P	HadRM3P	HIRHAMh	HIRHAMhh
				1961-90 NH (mm)	A2 NH (mm)	B2 NH (mm)	A2 NH (mm)	A2 NH (mm)
Beja (Bpc)	B-M-T-T	Beterraba	Média	763	943	902	965	966
			CV	0.05	0.09	0.13	0.13	0.13
	B-M-T-T	Milho	Média	889	1030	990	1044	1043
			CV	0.05	0.07	0.09	0.07	0.06
	B-M-T-T	Tomate	Média	866	974	939	974	965
			CV	0.03	0.05	0.05	0.06	0.06
	B-M-T-T	Trigo	Média	716	837	787	871	864
			CV	0.05	0.07	0.10	0.15	0.15

Apresenta-se na Figura 7.13 a gama de variações das necessidades hídricas, projectadas para os cenários de alteração climática, para cada uma das culturas. Os aumentos nas necessidades hídricas variam entre os 7% e os 31%, observando-se os menores aumentos no tomate e no milho e os maiores na beterraba sacarina. Verifica-se que os valores mais elevados dos aumentos se verificam para o cenário A2, com os modelos HIRHAMh e HIRHAMhh a apresentarem os maiores aumentos para grande parte das culturas. O cenário B2 apresenta de forma clara os menores aumentos das necessidades hídricas para todas as culturas com excepção da cevada.

É importante salientar a discrepância dos valores obtidos para o trigo da rotação B-M-T-T relativamente ao trigo da rotação G-T-C, tanto para Beja como para Évora. Esta discrepância deve-se ao facto de apenas se considerar uma única folha da rotação no Quadro 7.13, o que faz com que o trigo na rotação B-M-T-T entre no terreno em anos diferentes relativamente ao trigo da rotação G-T-C. Quando se considera as quatro folhas da rotação B-M-T-T para Beja (Fig. 7.13) verifica-se que o intervalo de valores varia entre 10% a 22% apresentando valores semelhantes ao trigo da rotação G-T-C (Fig. 7.13a) o que se deve ao facto de a rotação G-T-C apresentar um maior número de valores para as necessidades hídricas do trigo do que a rotação B-M-T-T. Constata-se, assim, que a consideração de apenas uma folha da rotação introduz um elevado grau de incerteza na determinação das necessidades hídricas das culturas, devendo-se realizar a média das várias folhas que compõem a rotação para garantir a fiabilidade dos resultados, apesar de isso aumentar grandemente o número de simulações a realizar, o volume de dados a processar e de ser uma tarefa que consome muito tempo.

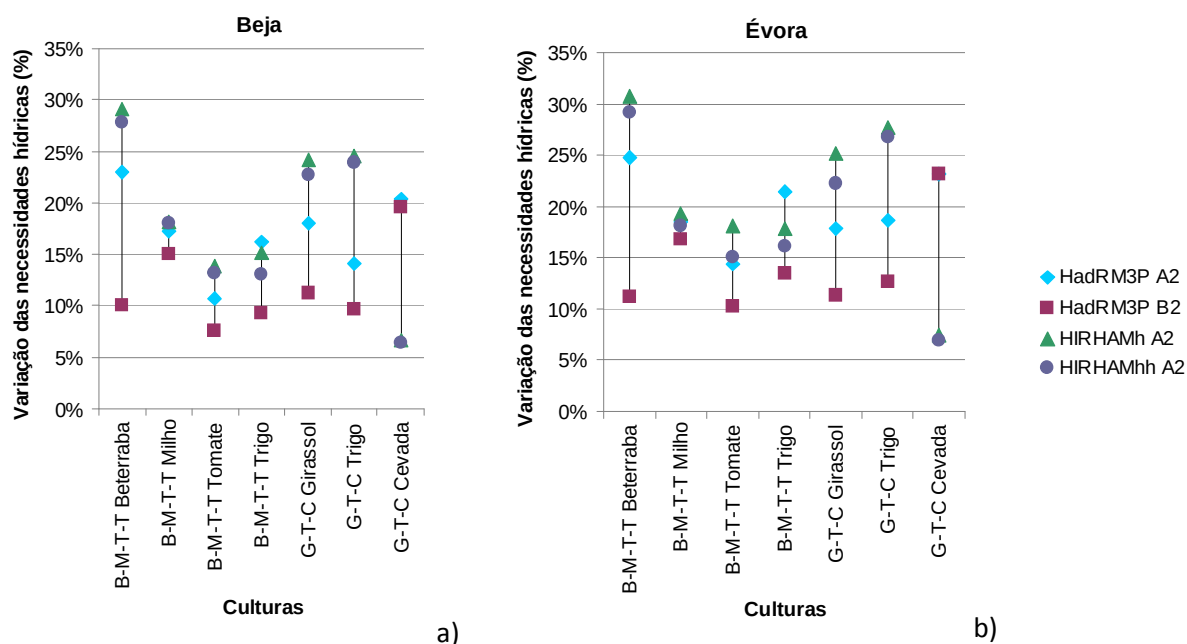


Figura 7.13 - Variação das necessidades hídricas das culturas para o período de 2071-2100, considerando apenas uma folha para cada rotação, para a) Beja e b) Évora.

A cultura da beterraba é a cultura que apresenta os maiores aumentos das necessidades hídricas (Fig. 7.13 e Fig. 7.14). Verifica-se que as culturas de Primavera-Verão, tomate e milho, apresentam os menores aumentos das necessidades hídricas para os cenários futuros, tanto para os resultados de apenas uma folha da rotação como para a média das quatro folhas. A cultura do girassol apesar de ser igualmente uma cultura de Primavera-Verão apresenta uma gama de variações das necessidades hídricas semelhante às culturas de Outono-Inverno (Fig. 7.13), principalmente devido aos resultados dos modelos HIRHAMh e HIRHAMhh. Não é possível afirmar se este resultado apresentado pelo girassol acontece devido à consideração de um número reduzido de valores por se considerar apenas uma folha da rotação, ou se é devido ao facto de o girassol ser a cultura de Primavera-Verão que é semeada e colhida mais cedo desenvolvendo, por isso, uma percentagem maior do seu ciclo durante a estação da primavera, que é a estação do ano que apresenta os maiores aumentos relativos da ET_0 .

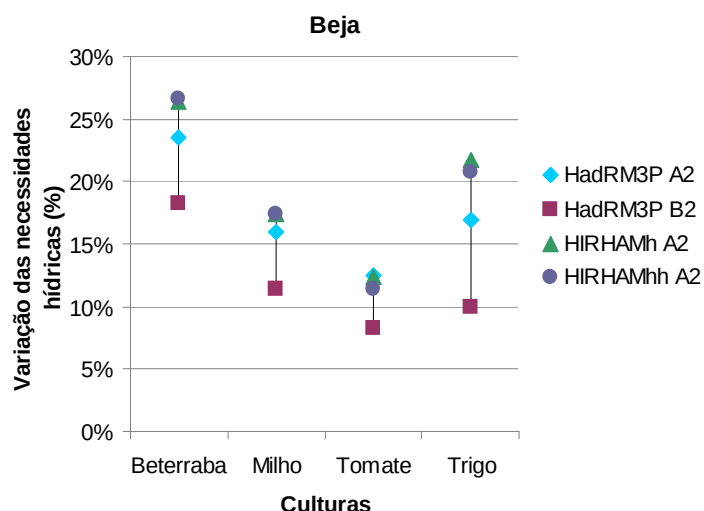


Figura 7.14 - Variação das necessidades hídricas das culturas para Beja e para o período de 2071-2100, considerando a média das quatro folhas da rotação B-M-T-T.

7.3.2.2. Necessidades de rega anuais

As necessidades de rega anuais das culturas (NRg), para cada um dos cenários climáticos considerados são apresentadas no Quadro 7.14. No Quadro 7.15 apresentam-se os resultados das necessidades de rega para a média das quatro folhas da rotação. Verifica-se que a cultura da beterraba é a que apresenta em média as menores necessidades de rega, embora apresente os coeficientes de variação mais elevados. O milho, o tomate e o girassol apresentam necessidades de rega da mesma ordem de grandeza, com Beja a apresentar valores mais elevados do que Évora.

Verifica-se um aumento das necessidades de rega para todos os cenários de alteração climática (Quadro 7.14 e Fig. 7.15), com o cenário B2 a apresentar os menores aumentos e com o cenário A2 dos três modelos considerados a apresentarem valores muito aproximados entre si, com excepção das culturas da beterraba e do girassol para Évora (Fig. 7.15b) onde o cenário A2 do modelo HadRM3P apresenta valores de aumento ligeiramente inferiores aos cenários A2 dos modelos HIRHAMh e HIRHAMhh.

Considerando a média das 4 folhas da rotação (Quadro 7.15), verifica-se que existem desvios na estimação das necessidades de rega relativamente aos resultados do Quadro 7.14, em que se considera apenas uma folha da rotação, principalmente quanto ao cenário B2 para a cultura da beterraba.

Quadro 7.14 - Necessidades de rega anuais (NRg) obtidas pelo programa IrrigRotation, considerando apenas uma das folhas para cada rotação, para o período de controlo (1961-90) e para os diferentes cenários de alteração climática (2071-2100)

Caso de estudo	Rotação	Cultura		Controlo	HadRM3P	HadRM3P	HIRHAMh	HIRHAMhh
				1961-90	A2	B2	A2	A2
				NRg (mm)	NRg (mm)	NRg (mm)	NRg (mm)	NRg (mm)
Beja (Bpc)	B-M-T-T	Beterraba	Média	458	760	613	763	777
			CV	0.21	0.09	0.11	0.32	0.30
	B-M-T-T	Milho	Média	728	977	936	988	973
			CV	0.12	0.20	0.11	0.08	0.08
	B-M-T-T	Tomate	Média	763	900	862	918	914
			CV	0.05	0.05	0.06	0.04	0.04
	G-T-C	Girassol	Média	737	1003	905	1029	1019
			CV	0.11	0.09	0.12	0.13	0.13
Évora (Pmg)	B-M-T-T	Beterraba	Média	414	633	515	681	666
			CV	0.18	0.10	0.16	0.32	0.31
	B-M-T-T	Milho	Média	676	858	812	845	848
			CV	0.11	0.10	0.10	0.09	0.08
	B-M-T-T	Tomate	Média	680	822	771	850	833
			CV	0.07	0.07	0.09	0.05	0.06
	G-T-C	Girassol	Média	646	820	753	866	844
			CV	0.12	0.08	0.15	0.10	0.10

Quadro 7.15 - Necessidades de rega anuais (NRg) obtidas pelo programa IrrigRotation, para Beja e para a rotação B-M-T-T, considerando a média das quatro folhas da rotação, e em que se comparam os valores obtidos para o período de controlo (1961-90) com os resultados dos diferentes cenários de alteração climática

Caso de estudo	Rotação	Cultura		Controlo	HadRM3P	HadRM3P	HIRHAMh	HIRHAMhh
				1961-90	A2	B2	A2	A2
				NRg (mm)	NRg (mm)	NRg (mm)	NRg (mm)	NRg (mm)
Beja (Bpc)	B-M-T-T	Beterraba	Média	461	765	684	763	767
			CV	0.23	0.16	0.19	0.20	0.20
	B-M-T-T	Milho	Média	736	975	885	958	956
			CV	0.10	0.13	0.15	0.11	0.11
	B-M-T-T	Tomate	Média	778	933	882	928	920
			CV	0.08	0.06	0.07	0.08	0.08

As variações das necessidades de rega, considerando as estações de Beja e Évora e apenas uma folha da rotação (Fig. 7.15), apresentam uma gama de valores que variam entre 25% a 70% para a beterraba, de 20% a 36% para o milho, 17% a 40% para o girassol e de 13% a 23% para o tomate, sendo que os aumentos são semelhantes entre Beja e Évora.

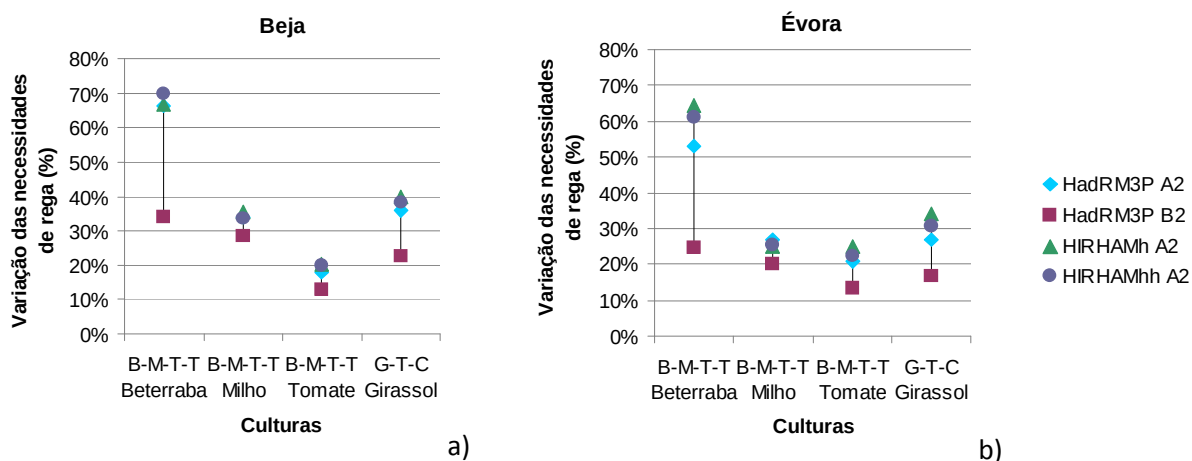


Figura 7.15 -Variação média das necessidades de rega anuais para o período de 2071-2100, considerando apenas uma folha para cada rotação, para a) Beja e b) Évora.

A variação dos valores das necessidades de rega para a cultura tomate é semelhante tanto para Figura 7.15 como para a Figura 7.16. Para a cultura do milho verifica-se um aumento da gama dos valores dos acréscimos das necessidades de rega para a média das quatro folhas da rotação. Na Figura 7.16 verifica-se um aumento dos valores mais baixos dos acréscimos das necessidades de rega para a cultura da beterraba sacarina, originando uma redução da gama de valores de incrementos obtidos.

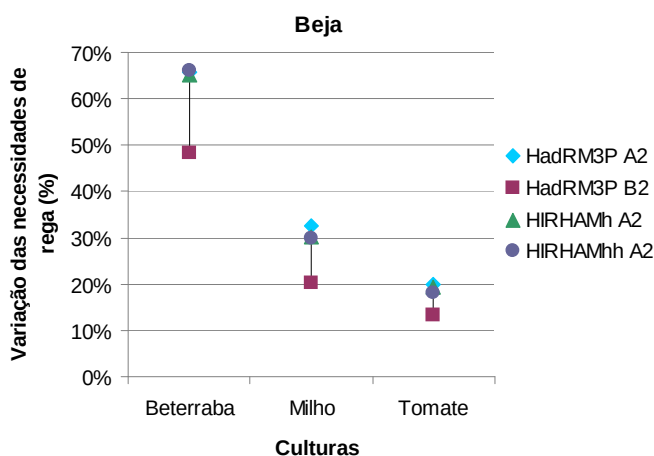


Figura 7.16 -Variação média das necessidades de rega anuais para Beja e para o período de 2071-2100, considerando a médias das quatro folhas da rotação B-M-T-T.

Os aumentos das necessidades de rega do tomate são explicados principalmente pelo aumento das necessidades hídricas uma vez que o aumento das necessidades de rega é da mesma ordem de grandeza dos aumentos verificados para as necessidades hídricas desta cultura (Fig. 7.15 e 7.16). Quanto às culturas do milho e do girassol as necessidades hídricas são também o principal responsável pelo aumento das necessidades de rega tendo

a redução da precipitação um peso menor, uma vez que a precipitação é muito diminuta durante o ciclo destas culturas. Relativamente à cultura da beterraba, o maior aumento das necessidades de rega verificado para esta cultura é explicado pela redução da precipitação ao longo do ciclo da cultura associada a um aumento das necessidades hídricas. Este resultado indica que as culturas de Outono-Inverno terão tendência a sofrer um maior impacto das alterações do que as culturas de regadio de Primavera-Verão para as quais são projectados menores aumentos das necessidades de rega.

Os valores obtidos para os aumentos das NRg estão em linha com os estudos realizados para a região do Mediterrâneo por Rodriguez Díaz et al. (2007) e Daccache et al. (2010), que correspondem à abordagem que não realiza o ajustamento da fenologia das culturas em função do tempo térmico ou graus de crescimento dia (GDD). O estudo desenvolvido por Lovelli et al. (2010) para as condições do Sul de Itália utiliza o tempo térmico para ajustar o ciclo das culturas. Para a cultura do trigo de Inverno obtiveram uma diminuição considerável nas NRg devido ao encurtamento do ciclo das culturas, e para a cultura do tomate (Primavera-Verão) obtiveram um ligeiro aumento das necessidades de rega, apesar do encurtamento do ciclo da cultura, devido a uma forte redução da precipitação durante o ciclo da cultura. Todorovic et al. (2012) também utilizaram o tempo térmico para ajustar o ciclo das culturas no estudo que realizaram para avaliar os impactes das alterações climáticas nas necessidades hídricas das culturas para os países da antiga Jugoslávia. Os resultados obtidos apontam para uma ligeira redução ou manutenção dos valores actuais das NRg, com a redução no ciclo das culturas a compensar a redução da precipitação e o aumento da ET_0 . Os resultados de Lovelli et al. (2010) e Todorovic et al. (2012) divergem dos resultados obtidos neste trabalho, que apontam para um considerável aumento nas NRg que é particularmente expressivo para as culturas de Outono-Inverno. Esta diferença nos resultados é devida ao facto de se ter assumido, neste trabalho, a utilização de novas variedades com ciclos mais longos. Estas novas variedades permitem, para os cenários de alteração climática, manter as durações actuais dos ciclos das culturas minimizando as perdas de produção devidas à redução do período de crescimento. Assim, constata-se que os estudos de avaliação dos impactes das alterações climáticas sobre o regadio estão muito dependentes das abordagens utilizadas.

7.3.2.3. Deficit hídrico das culturas de sequeiro

O deficit hídrico (DH) corresponde neste trabalho à diferença entre o somatório da evapotranspiração cultural (ET_c), ao longo de todo o ciclo da cultura, em condições conforto

hídrico, e o somatório da $ET_{c\_ajustada}$ em função do valor da reserva de água no solo (vd. secção 4.2.5.2) segundo a seguinte equação:

$$DH = \sum ET_C - \sum ET_{C\_ajustada} \quad (7.1)$$

Da observação do Quadro 7.16 verifica-se que os menores valores de deficit hídrico se verificam para o solo Bpc (Barros Pretos) em Beja. No período de 1961-90 o trigo apresenta em média um deficit de 19% (G-T-C) a 22% (B-M-T-T) e a cevada apresenta em média um deficit de 12%. Para o solo Pmg, em Évora, os valores do DH aumentam consideravelmente, com o trigo a apresentar um deficit médio de 39%, para ambas as rotações, e a cevada um DH de 21%.

Para o período de controlo Beja (Bpc) apresenta valores de CV mais elevados do que Évora (Pmg) traduzindo uma maior variabilidade dos valores do deficit hídrico para Beja, especialmente na cevada, o que indica a existência de anos com baixos valores de DH e de outros com valores mais elevados (Quadro. 7.16). No caso do solo Pmg, em Évora, observa-se que para além de apresentar os valores mais elevados de DH também apresenta os valores mais baixos do CV indicando uma maior constância nas condições de carência hídrica o que torna muito difícil produzir cereais em regime de sequeiro no solo Pmg. A diferença entre os resultados de Beja (Bpc) e Évora (Pmg) deve-se ao facto de o solo Bpc possuir um elevada reserva utilizável (RU) enquanto que o solo Pmg possui um baixo valor de RU (vd. secção 4.2.2).

Para os cenários de alteração climática verifica-se que para Beja o deficit hídrico passará a ter valores a variar entre 32% a 39%, que são similares aos valores que ocorrem para o período de 1961-90 em Évora, sendo de salientar que no caso do cenário B2 os valores projectados para o trigo são inferiores aos verificados em Évora para 1961-90. No caso de Évora os valores do deficit hídrico atingem valores tais para os cenários futuros, variando entre 36% a 59%, que tornam impraticável a produção das culturas do trigo e da cevada em regime de sequeiro.

Quadro 7.16 - Médias do deficit hídrico (DH) das culturas de sequeiro, expresso em altura de lâmina de água (mm) e em percentagem (%), para o período de controlo e para os cenários de alteração climática, considerando apenas uma folha de cada rotação

Caso de estudo	Rotação	Cultura		Controlo		HadRM3P		HadRM3P		HIRHAMh		HIRHAMhh	
				1961-90		A2		B2		A2		A2	
				DH (mm)	DH (%)	DH (mm)	DH (%)	DH (mm)	DH (%)	DH (mm)	DH (%)	DH (mm)	DH (%)
Beja (Bpc)	B-M-T-T	Trigo	Média	162	22%	329	39%	254	32%	300	35%	299	35%
			CV	0.43	0.44	0.26	0.26	0.45	0.43	0.44	0.30	0.41	0.31
	G-T-C	Trigo	Média	138	19%	354	44%	272	35%	373	42%	371	42%
			CV	0.46	0.44	0.23	0.19	0.38	0.29	0.28	0.19	0.26	0.17
	G-T-C	Cevada	Média	51	12%	235	44%	190	36%	161	34%	162	34%
			CV	1.60	1.66	0.45	0.45	0.50	0.54	0.57	0.63	0.56	0.62
Évora (Pmg)	B-M-T-T	Trigo	Média	252	39%	442	57%	345	47%	410	53%	399	53%
			CV	0.34	0.29	0.19	0.17	0.33	0.25	0.35	0.20	0.33	0.19
	G-T-C	Trigo	Média	249	39%	431	58%	356	49%	479	59%	468	58%
			CV	0.35	0.31	0.15	0.11	0.34	0.21	0.17	0.06	0.18	0.07
	G-T-C	Cevada	Média	83	21%	219	45%	204	42%	166	37%	159	36%
			CV	0.32	0.31	0.26	0.26	0.28	0.24	0.50	0.41	0.48	0.40

O quadro 7.17 apresenta os valores obtidos para o DH considerando a média das 4 folhas da rotação. Observa-se que existe um desvio no período de controlo para a cultura do trigo (B-M-T-T), com um valor de DH de 22%, quando se considera apenas uma folha, e com DH de 19% quando se considera a média das quatro folhas da rotação.

Quadro 7.17 - Médias do deficit hídrico (DH) da cultura do trigo (B-M-T-T) para Beja, expresso em altura de lâmina de água (mm) e em percentagem (%), para o período de controlo e para os cenários de alteração climática, considerando a média das quatro folhas da rotação

Caso de estudo	Rotação	Cultura		Controlo		HadRM3P		HadRM3P		HIRHAMh		HIRHAMhh	
				1961-90		A2		B2		A2		A2	
				DH (mm)	DH (%)	DH (mm)	DH (%)	DH (mm)	DH (%)	DH (mm)	DH (%)	DH (mm)	DH (%)
Beja (Bpc)	B-M-T-T	Trigo	Média	134	19%	317	38%	245	31%	331	38%	329	38%
			CV	0.40	0.40	0.22	0.20	0.33	0.28	0.39	0.30	0.38	0.30

Na Figura 7.17 apresentam-se os valores da variação do deficit hídrico para cada um dos cenários de alteração climática, em que se verifica um aumento muito superior para Beja do que para Évora. O aumento menos acentuado do DH para Évora traduz a situação actual muito mais desfavorável para as culturas de sequeiro produzidas nos solos Pmg em Évora, que se caracteriza por um elevado stress hídrico, o que conduz a que os aumentos do DH para os cenários futuros tendam a ser mais reduzidos. Os valores da variação do deficit hídrico para a média das 4 folhas da rotação B-M-T-T (Fig. 7.18) são superiores aos

aumentos verificados na Figura 7.17a para o trigo B-M-T-T, mas são da mesma ordem de grandeza dos valores obtidos para o trigo G-T-C, o que mostra a necessidade de se considerar a média de todas as folhas da rotação.

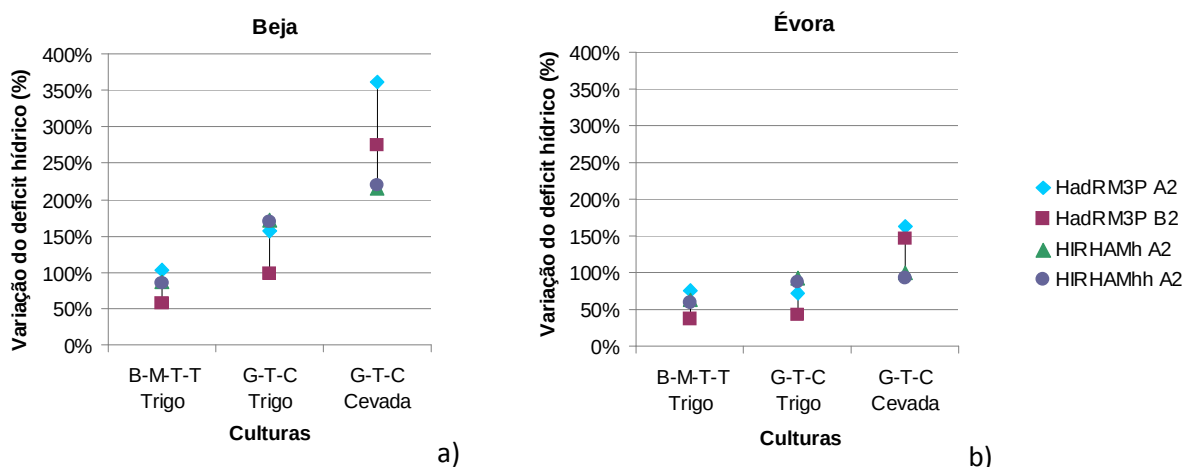


Figura 7.17 - Variação média do deficit hídrico das culturas de sequeiro para o período de 2071-2100, considerando apenas uma folha de cada rotação, para a) Beja e b) Évora.

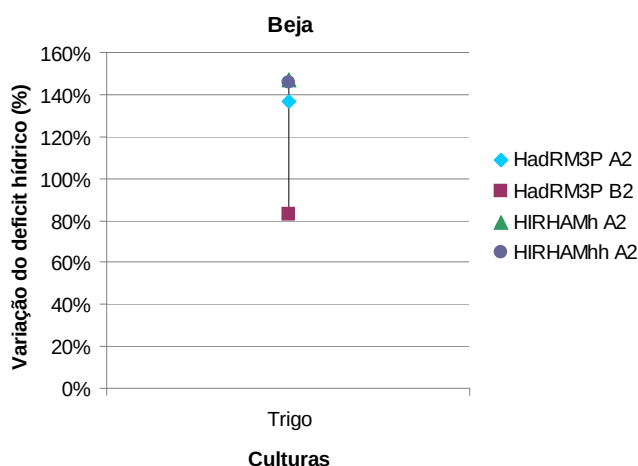


Figura 7.18 - Variação média do deficit hídrico da cultura do trigo para Beja e para o período 2071-2100, considerando a média das quatro folhas da rotação B-M-T-T.

7.3.2.4. Probabilidades de não excedência das necessidades de rega anuais e relativas ao período de ponta

No Quadro 7.18 apresentam-se os valores das necessidades de rega para o período de ponta (R_{gp}) e das necessidades de rega anuais (R_g), para as probabilidades de não excedência de 75%, 80% e 90%. Os valores das necessidades de rega para o período de ponta (R_{gp}) foram calculadas com base em médias de 10 dias, uma vez, que se verificou que com as séries diárias se obtinham valores de R_{gp} muito elevados para o período de

controlo, que não correspondem aos valores utilizados normalmente pelos projectistas para a região do Alentejo (Calejo, 2003).

Quadro 7.18 – Valores das necessidades de rega anuais e das necessidades de rega para o período de ponta (média de 10 dias) para as probabilidades de não excedência de 75%, 80%, 90%, para o período de controlo e para os cenários de alteração climática

Caso de estudo	Rotação	Modelo	Cenário	Rgp (mm/d)			NRg (mm)		
				Prob. não excedência			Prob. não excedência		
				75%	80%	90%	75%	80%	90%
Beja (Bpc)	B-M-T-T	Est. Meteo.	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. Meteo.	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
Évora (Pmg)	B-M-T-T	Est. Meteo.	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. Meteo.	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

Da observação do Quadro 7.18 constata-se que os valores mais elevados tanto de Rgp como de NRg são obtidos para o cenário A2, com os três modelos climáticos a apresentarem resultados semelhantes. O cenário B2 (HadRM3P) apresenta os valores mais baixos de aumento tanto de NRg como de Rgp. Os valores do Quadro 7.18 mostram que os impactes das alterações climáticas são consideravelmente maiores sobre os volumes de água consumidos ao longo da campanha de rega (NRg) do que sobre os caudais de ponta (Rgp). As necessidades de rega anuais aumentam de 16% a 47% ($P=0.75$), 18% a 44% ($P=0.80$) e de 16% a 53% ($P=0.90$), enquanto que as necessidades de rega de ponta aumentam entre 8% a 23% para $P=0.75$, de 12% a 21% para $P=0.80$ e de 17% a 28% para $P=0.90$.

Os valores dos aumentos de Rgp e de NRg são relativamente idênticos entre Beja e Évora para a rotação B-M-T-T. Para o cenário A2 dos modelos HIRHAMh e HIRHAMhh, verifica-se que a cultura do girassol (rotação G-T-C) apresenta valores mais elevados de aumento das NRg do que a rotação B-M-T-T, especialmente para Beja onde se verifica um forte aumento das necessidades de rega anuais (entre 43% a 53%). Este resultado justifica-se devido ao facto de que a cultura do girassol sucede na rotação a duas culturas de sequeiro que esgotam a reserva de água no solo, que deixa de ser repostada pela precipitação de Inverno para o cenário A2 dos modelos HIRHAMh e HIRHAMhh. Isto leva a que seja necessário fornecer um volume de rega correspondente à soma das necessidades de rega da cultura e do valor da reserva de água no solo necessário para repor o teor de água no solo na zona de conforto hídrico (vd. secção 4.2.4).

Os valores das necessidades de rega para ao período de ponta (Rgp), relativos à probabilidade não excedência de 75% (Quadro 7.18), são utilizados para realizar o dimensionamento dos canhões de rega com Enrolador, que se descreve na secção 7.4.

7.3.2.5. Análise de variância (ANOVA)

Realizou-se uma análise de variância às séries de dados relativos às 4 folhas da rotação B-M-T-T (Beja/Bpc), uma vez que deste modo é possível dispor de 30 anos de dados para cada cultura, permitindo deste modo a aplicação da ANOVA. Este teste teve como objectivos verificar se as diferenças nos resultados entre os diferentes cenários são estatisticamente significativas considerando um nível de significância (α) de 0.05.

O Quadro 7.19 apresenta os resultados para o valor p, quando se realiza a comparação simultânea de todos os cenários climáticos, para uma dada cultura. Observa-se da análise do Quadro 7.19 que a ANOVA produz resultados para o valor p muito inferiores a 0.05, para todas as culturas e variáveis do balanço hídrico considerados, o que indica que os diferentes cenários climáticos (Controlo, cenários A2 e B2) têm influência nos resultados do balanço hídrico do solo para um nível de significância de 0.05.

Realizando uma análise mais pormenorizada para avaliar se as diferenças entre os resultados do balanço hídrico são significativamente diferentes para diferentes combinações de cenários produziu-se o Quadro 7.20. Comparando os resultados do período de controlo (1961-90) com os resultados dos cenários A2 e B2 do modelo HadRM3P verifica-se para todas as culturas, que se obtêm valores p muito inferiores a 0.05, o que mostra que existe uma diferença significativa, para $\alpha = 0.05$, entre os resultados das necessidades hídricas, necessidades de rega e deficit hídrico entre o período de controlo e os cenários de alteração climática.

Quadro 7.19 – Valor p obtido para a análise de variância (ANOVA a um factor) para cada uma das culturas da rotação B-M-T-T, para o caso de estudo Beja, em que se comparam simultaneamente todos os cenários climáticos

Caso de estudo	Rotação	Cultura	Nec. Rega	Nec. hídricas.	Deficit hídrico
Beja (Bpc)	B-M-T-T	Beterraba	5.75E-17	2.27E-13	
	B-M-T-T	Milho	3.60E-15	5.84E-16	
	B-M-T-T	Tomate	4.04E-18	7.78E-16	
	B-M-T-T	Trigo		2.36E-09	9.06E-15

Comparando dois cenários A2 com o cenário B2 (Quadro 7.20) verifica-se que o efeito do factor cenário climático é mais evidente para as necessidades de rega onde todas as culturas apresentam diferenças significativas para um nível de significância de 0.05, enquanto que para as necessidades hídricas se verifica que para esse nível de significância apenas uma das duas comparações é significativamente diferente para as culturas da beterraba, milho e tomate.

Para um nível de significância de 0.01 observa-se que para a beterraba sacarina nenhuma das comparações entre os cenários A2 e B2 é significativamente diferente, tanto para as necessidades hídricas como para as necessidades de rega. Para as culturas do milho e do tomate observa-se que apenas uma das comparações (A2 vs. B2) é significativamente diferente para as necessidades de rega, e que apenas para o tomate existe uma comparação em que as diferenças nas necessidades hídricas são significativamente diferentes para um nível de $\alpha = 0.01$. Para o trigo as duas comparações entre os cenários A2 e B2 são significativamente diferentes para $\alpha = 0.05$ (e $\alpha = 0.01$) tanto para as necessidades hídricas como para o deficit hídrico.

Relativamente à comparação entre os cenários A2 dos três modelos RCM verifica-se que para todas as culturas o valor p é muito elevado, não existindo nenhuma diferença estatisticamente significativa, a um nível de significância de 0.05, entre os resultados do balanço hídrico obtidos pelos cenários A2 dos modelos HadRM3P, HIRHAMh e HIRHAMhh.

Quadro 7.20 – Valor p obtido para a análise de variância (ANOVA a um factor) para cada uma das culturas da rotação B-M-T-T, para o caso de estudo Beja, em que se realizam diferentes comparações entre os cenários climáticos

Cultura	Cenários comparados	Nec. Rega	Nec. hídricas	Deficit hídrico
Beterraba	Controlo-HadRM3P B2	2.926E-09	6.590E-08	
	Controlo-HadRM3P A2	2.345E-14	3.110E-15	
	HadRM3P B2 - HadRM3P A2	0.018	0.126	
	HadRM3P B2 - HIRHAMhh A2	0.030	0.043	
	HadRM3P A2 - HIRHAMh A2 - HIRHAMhh A2	0.993	0.653	
Milho	Controlo-HadRM3P B2	1.774E-06	8.867E-07	
	Controlo-HadRM3P A2	3.243E-12	2.721E-12	
	HadRM3P B2 - HadRM3P A2	0.009	0.061	
	HadRM3P B2 - HIRHAMhh A2	0.023	0.012	
	HadRM3P A2 - HIRHAMh A2 - HIRHAMhh A2	0.785	0.721	
Tomate	Controlo-HadRM3P B2	1.006E-08	4.608E-09	
	Controlo-HadRM3P A2	5.404E-14	2.290E-15	
	HadRM3P B2 - HadRM3P A2	0.002	0.006	
	HadRM3P B2 - HIRHAMhh A2	0.028	0.060	
	HadRM3P A2 - HIRHAMh A2 - HIRHAMhh A2	0.763	0.771	
Trigo	Controlo-HadRM3P B2		6.607E-05	5.870E-08
	Controlo-HadRM3P A2		3.240E-13	3.750E-16
	HadRM3P B2 - HadRM3P A2		0.009	0.001
	HadRM3P B2 - HIRHAMhh A2		0.008	0.003
	HadRM3P A2 - HIRHAMh A2 - HIRHAMhh A2		0.464	0.864

Conclui-se, assim, que as diferenças entre o período de controlo e os diferentes cenários climáticos são estatisticamente significativas ($\alpha = 0.05$), enquanto que as diferenças entre os cenários A2 e B2 apenas são significativas em alguns dos casos. Quando se comparam as diferenças entre os cenários A2, dos diferentes modelos RCM, verifica-se que não existem diferenças significativas entre os resultados dos diferentes modelos para nenhuma das culturas.

7.3.2.6. Balanço hídrico ao nível da rotação de culturas

Após a análise dos diversos componentes do balanço hídrico para cada uma das culturas, importa analisar o balanço hídrico ao nível da rotação de culturas com o objectivo de avaliar o modo como a rotação de culturas pode contribuir para a gestão da água no solo. Nesta análise presta-se uma especial atenção à cultura do trigo comparando-se os resultados obtidos para esta cultura inserida na rotação de regadio B-M-T-T com os resultados alcançados para o trigo produzido em regime de monocultura, 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 para cada um dos cenários referidos apresentando-se no Quadro 7.21 os valores das necessidades hídricas e do deficit hídrico para as duas simulações do trigo monocultura efectuadas para Beja, uma para o período de 1961-90 e outra para o cenário A2 do modelo HadRM3P.

Quadro 7.21 - Médias anuais das necessidades hídricas (NH) e do deficit hídrico (DH), para Beja, da cultura do trigo produzida em monocultura para o período de controlo (1961-90) e para o cenário A2 do modelo HadRM3P (2071-2100)

		NH(mm)	DH (mm)	DH (%)
Trigo monocultura	Média	708	211	30%
Controlo	CV	0.05	0.51	0.51
Trigo monocultura	Média	826	476	58%
HadRM3P A2	CV	0.08	0.24	0.22

Do Quadro 7.21 verifica-se que as necessidades hídricas do trigo produzido em regime de monocultura são idênticas aos resultados obtidos para o mesmo cenário (HadRM3P – A2) para a média das 4 folhas da rotação B-M-T-T para Beja (Quadro 7.13). Relativamente ao deficit hídrico constata-se que quando se considera o trigo em monocultura o deficit hídrico aumenta de 19% (134 mm) para a rotação B-M-T-T relativa ao período de controlo (Quadro 7.17) para 30% (211 mm) para a monocultura do trigo. Para o cenário A2 do modelo HadRM3P verifica-se que o deficit 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 deficit 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. Relativamente à variação dos valores do deficit hídrico para o cenário A2 (HadRM3P) a cultura do trigo monocultura apresenta um aumento de 126% enquanto que o trigo na rotação apresenta um aumento de 137%.

Na Figura 7.19 apresentam-se as curvas da reserva de água no solo simuladas pelo modelo IrrigRotation para a rotação B-M-T-T, para região de Beja (solo Bpc) e para os cenários de controlo e A2 (HadRM3P). Optou-se por apresentar os resultados para a segunda repetição da rotação (1965-1969 para o cenário de controlo e 2075-2079 para o cenário A2) a título exemplificativo do que se passa ao longo da rotação, tendo-se excluído a primeira repetição devido ao erro inicial da reserva de água no solo, uma vez que este valor é atribuído pelo utilizador do modelo IrrigRotation. Da observação da Figura 7.19 verifica-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.

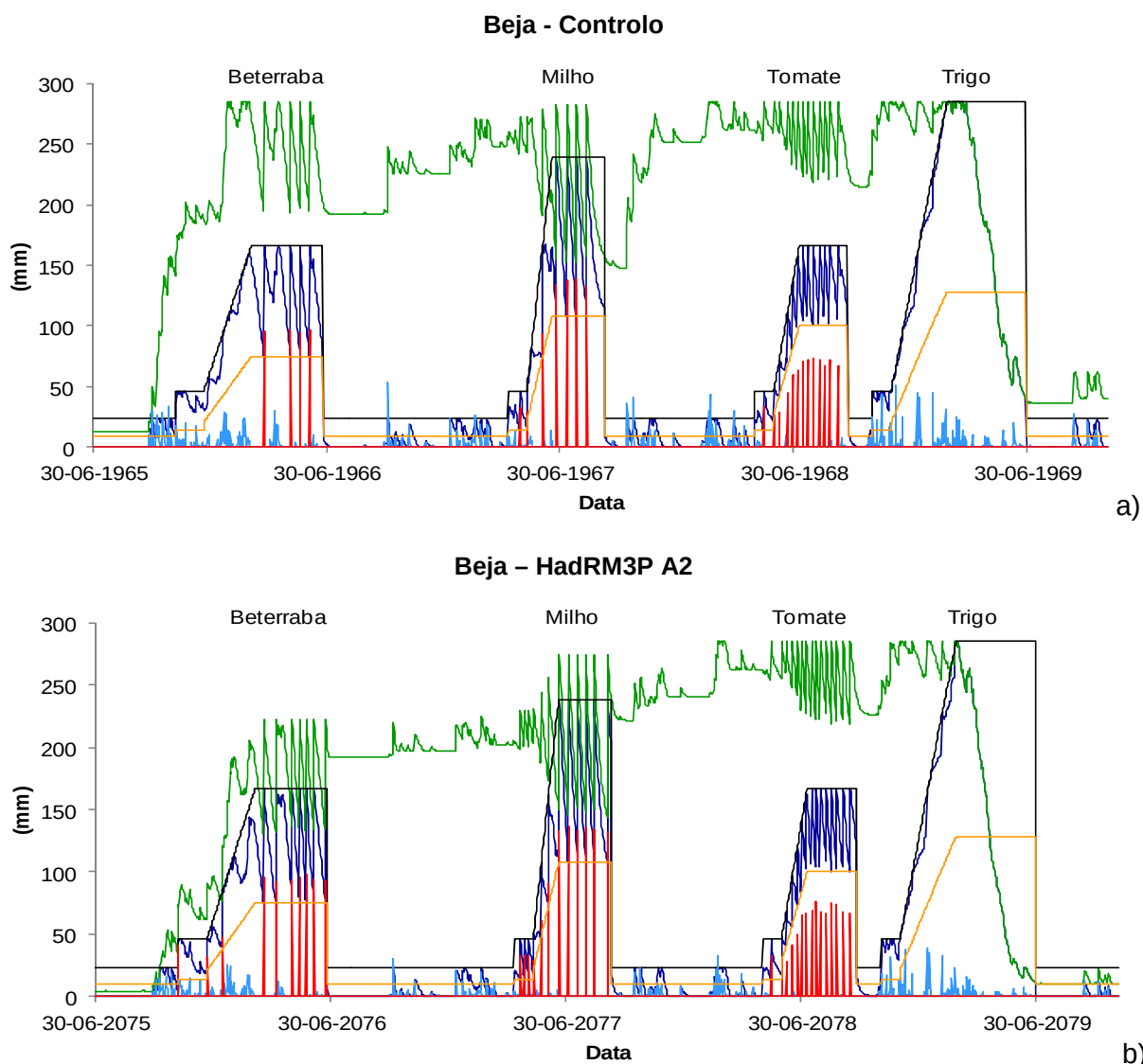


Figura 7.19 – Curvas simuladas do conteúdo de água no solo, para a região de Beja, considerando o solo Bpc e a rotação B-M-T-T, onde (—) é a água disponível na zona radicular, (—) é a água disponível no solo para a raiz mais profunda da rotação (Zr max_rot). A linha (—) representa RU e (—) o limite da 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.

Na Figura 7.20, representa-se a cultura do trigo produzida em monocultura, para Beja (Bpc) e para os mesmos cenários considerados na Figura 7.19. Quanto à monocultura do trigo, verifica-se para o período de controlo (Fig. 7.20a) a ocorrência de diversos anos em que a cultura está sujeita a valores muito elevados de deficit hídrico, de que é exemplo a campanha de 1966-67 representada na Figura 7.20a, onde se constata uma elevada quebra

de produção para esse ano. Verifica-se assim, que mesmo para as condições actuais, a produção do trigo de sequeiro em monocultura apresenta um risco importante de quebras de produção

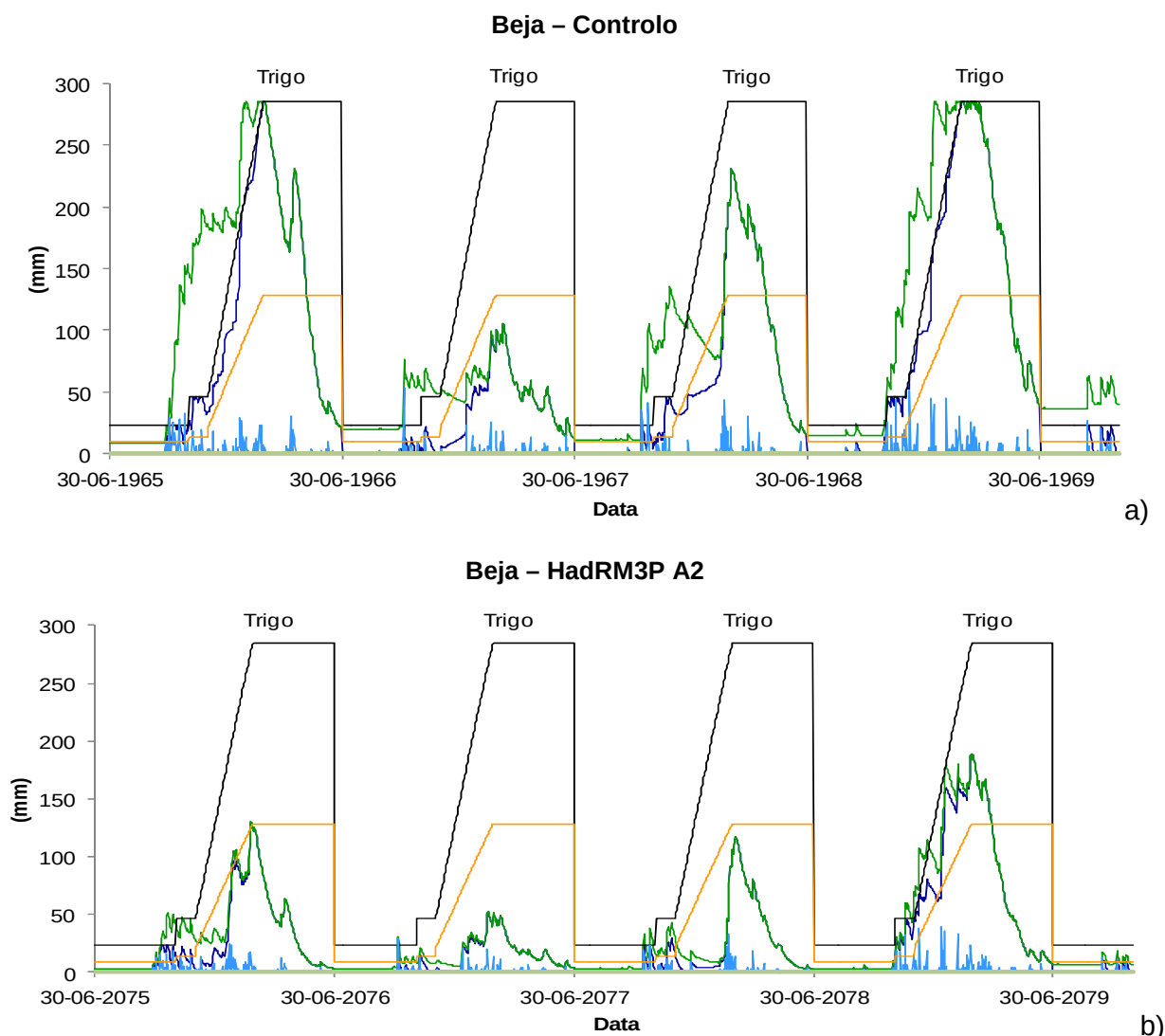


Figura 7.20 – Curvas simuladas do conteúdo de água no solo, para a região de Beja e considerando o solo Bpc e a cultura do trigo em monocultura, onde (—) é a água disponível na zona radicular, (—) é a água disponível no solo para a raiz mais profunda da rotação (Zr max_rot). A linha (—) representa RU 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.

Para o cenário A2 (Fig. 7.20b) verifica-se que esta situação se agrava de uma forma muito acentuada verificando-se que na maioria dos anos a linha da reserva $R(t)$ se situa quase sempre abaixo do limite da reserva facilmente utilizável indicando uma situação de grande carência hídrica, como uma elevada probabilidade de perda da cultura, o que torna impraticável a produção da cultura do trigo em monocultura em regime de sequeiro.

7.4. Dimensionamento dos canhões de rega com enrolador

O modelo Enrolador foi utilizado para dimensionar os sistemas de rega com canhão para cada uma das simulações representadas na Figura 7.1. Estas simulações correspondem às diferentes combinações de cenário climático, rotação cultural e local (solo e estação meteorológica). Com base nos valores das necessidades de rega para o período de ponta (Rgp), calculadas para cada uma dessas simulações através do modelo IrrigRotation (Quadro 7.18), dimensionaram-se os equipamentos de canhão com enrolador, simulou-se a distribuição espacial da sua pluviometria e calcularam-se os respectivos indicadores de desempenho.

Em primeiro lugar, apresentam-se os dados de base utilizados para construir os ficheiros de entrada do modelo Enrolador. Posteriormente mostram-se os resultados obtidos, tendo como objectivos avaliar o impacte dos cenários de alteração climática no dimensionamento das condutas, dos enroladores e dos canhões e nas pressões necessárias nas bocas de rega. Para cada um destes equipamentos efectua-se a simulação da distribuição espacial da pluviometria do canhão, de forma a simular o seu funcionamento no campo, conseguindo-se deste modo estimar os indicadores de desempenho dos sistemas dimensionados para condições óptimas de utilização e manutenção e em condições de ausência de vento.

7.4.1. Dados de base

Apresentam-se os dados de base utilizados na definição das diferentes simulações (vd. Fig. 7.1). Os dados de base dizem respeito a dados da parcela, do solo, da cultura, da velocidade do vento, dados da rega e dos equipamentos.

Dados da parcela

Para realizar o dimensionamento considerou-se uma parcela hipotética com 12 ha, que é igual para todas as simulações realizadas. A Figura 7.21 constitui uma representação esquemática desta 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.

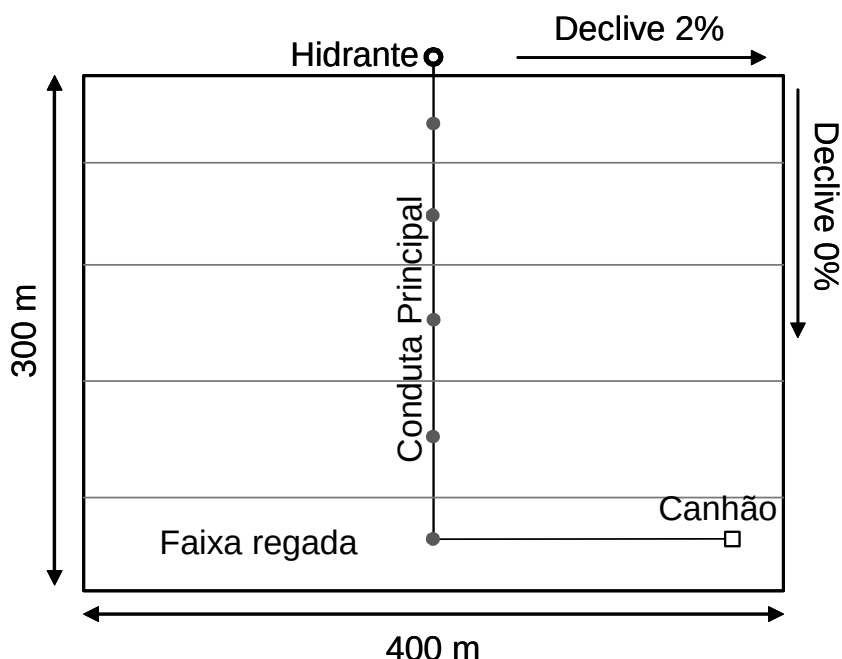


Figura 7.21 - Representação esquemática da parcela hipotética utilizada no dimensionamento dos sistemas de rega de canhão, com o recurso ao modelo Enrolador.

Dados do solo

Os solos considerados nas simulações foram os Barros Pretos (Bpc) e os solos Mediterrâneos Pardos (Pmg) (vd. secção 7.3.1). No Quadro 7.22 descrevem-se os parâmetros dos solos obtidos através de Cardoso (1965).

Quadro 7.22 – Parâmetros dos solos utilizados como dados de entrada no modelo Enrolador

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

^a valores retirados do Quadro 5.4 (Tarjuelo, 2005)

^b Nas simulações substituiu-se a classe de textura Argiloso por Franco.

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 do solo de Argiloso para Franco, pois este último possui um valor para a taxa de infiltração que permite dimensionar os canhões. Optou-se por realizar esta alteração apenas para se poderem comparar os equipamentos seleccionados para estes dois locais, mas a nível de projecto de rega não se poderão utilizar canhões de rega nestes solos (Bpc).

Dados das necessidades de rega relativas ao período de ponta

As necessidades de rega para o período de ponta (Rgp) são apresentadas no Quadro 7.23. Foram seleccionadas as necessidades de rega para o período de ponta, para uma probabilidade de não excedência de 75%. Raposo (1996) refere que no projecto de rega se deve considerar normalmente uma probabilidade de não excedência de 80% a 85%. Neste caso, optou-se por 75% porque os canhões de rega que são equipamentos que requerem elevadas pressões de funcionamento, consumindo elevadas quantidades de energia, acrescido do facto de que quando bem projectados e mantidos apenas atingem uma eficiência de rega (E_a) de 70% (Pereira, 2004). Assim, é preferível considerar uma probabilidade não excedência mais reduzida, em que se aceita um maior número de anos em que a cultura sofrerá algum deficit hídrico, pois a baixa eficiência destes equipamentos não justifica o elevado consumo de energia associado a uma elevada probabilidade não excedência. O facto de estes equipamentos serem móveis também condiciona o seu dimensionamento no sentido de reduzir o seu tamanho.

Da análise dos valores das Rgp (Quadro 7.23) verifica-se que os valores mais baixos ocorrem para o cenário de controlo, oscilando entre os 8.2 mm/dia e os 9.2 mm/dia. Os cenários de alteração climática apresentam valores de Rgp mais elevados, com o cenário B2 a apresentar valores que variam entre 9.3 mm/dia a 10.0 mm/dia, e com o cenário A2 a apresentar valores entre 9.8 mm/dia a 11.0 mm/dia. As necessidades de rega para o período de ponta apresentam valores mais elevados para Beja do que para Évora, o que está de acordo com os valores mais elevados da ET_0 que se verificam em Beja (Quadro 7.1 e Quadro 7.2).

Relativamente à percentagem de aumento dos valores de Rgp, em função dos cenários de alteração climática, verificaram-se os menores aumentos para o cenário B2, com um aumento de 8% para Beja e de 14% para Évora. Para o cenário A2 os aumentos de Rgp variaram entre 13% a 20% para Beja e entre 20% a 23% para Évora.

Quadro 7.23 - Necessidades de rega para o período de ponta (Rgp), para as diferentes simulações consideradas, para uma probabilidade de não excedência de 75%

Caso de estudo	Rotação	Modelo	Cenário	Rgp (mm/d)
Beja (Bpc)	B-M-T-T	Estação Meteo.	Controlo	9.2
	B-M-T-T	HadRM3P	A2	10.4
	B-M-T-T	HadRM3P	B2	10.0
	B-M-T-T	HIRHAMh	A2	11.0
	B-M-T-T	HIRHAMhh	A2	10.9
	G-T-C	Estação Meteo.	Controlo	8.8
	G-T-C	HadRM3P	A2	9.9
	G-T-C	HadRM3P	B2	9.5
	G-T-C	HIRHAMh	A2	10.5
	G-T-C	HIRHAMhh	A2	10.4
	B-M-T-T	Estação Meteo.	Controlo	8.6
	B-M-T-T	HadRM3P	A2	10.3
	B-M-T-T	HadRM3P	B2	9.8
	B-M-T-T	HIRHAMh	A2	10.6
	B-M-T-T	HIRHAMhh	A2	10.3
Évora (Pmg)	G-T-C	Estação Meteo.	Controlo	8.2
	G-T-C	HadRM3P	A2	9.9
	G-T-C	HadRM3P	B2	9.3
	G-T-C	HIRHAMh	A2	10.1
	G-T-C	HIRHAMhh	A2	9.8

Dados da cultura, velocidade do vento e outros parâmetros

No Quadro 7.24 mostram-se os restantes dados de base utilizados na definição das simulações: velocidade média do vento (m/s), profundidade radicular Z_r (m), eficiência de aplicação (E_a), deficit permitido em termos de gestão (MAD) e tempo útil diário de rega (Trd). A profundidade radicular (Quadro 7.24) teve que ser definida de um modo iterativo de forma a fazer coincidir o intervalo entre regas com o número de faixas regadas, garantindo-se assim que é regada uma faixa por dia.

Conforme referido anteriormente na secção 6.2.4.3 os dados relativos às características dos equipamentos encontram-se nos ficheiros canhões.txt, enroladores.txt e tubagens.txt (Anexo VIII). Estes ficheiros foram construídos durante o desenvolvimento do modelo e contêm uma listagem bastante completa de equipamentos, retirada dos catálogos dos fabricantes, o que permite ao modelo seleccionar de um modo bastante preciso o equipamento que melhor se aproxima dos critérios de projecto. Os dados dos canhões foram retirados do catálogo da Komet (2011), os dos enroladores foram obtidos a partir do catálogo da Irrifrance (2011) e

da Idrofoglia (2011) e os dados das condutas principais, em alumínio, foram retirados do catálogo da RAESA (2011).

Quadro 7.24 - Dados de base utilizados para realizar o dimensionamento dos sistemas de rega com canhão

Caso de estudo	Rotação	Cenário	Vel. Med. Vento U2 (m/s)	Prof. Raiz Zr (m)	Ef. Aplic. E _a	Deficit permitido MAD	Tempo rega Trd (h/dia)
Beja	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
Evora	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

7.4.2. Resultados e discussão

Com base nos dados apresentados no ponto anterior realizou-se o dimensionamento dos equipamentos, a simulação da pluviometria do canhão e a estimação dos indicadores de desempenho dos sistemas de rega dimensionados.

7.4.2.1. Dimensionamento dos sistemas de rega com canhão com enrolador

O módulo de dimensionamento do modelo Enrolador produziu como resultados uma listagem com os equipamentos seleccionados, assim como os parâmetros de funcionamento e as regulações dos equipamentos, para cada uma das simulações realizadas.

No Quadro 7.25 apresentam-se os canhões seleccionados pelo modelo Enrolador para cada uma das simulações consideradas. Da sua leitura observa-se que os caudais debitados pelos canhões variam entre os 60.9 m³/h e os 70.6 m³/h para o período de 1961-90, aumentando para o cenário B2 com valores de 70.6 m³/h a 73.8 m³/h, e com o cenário A2 a apresentar os valores mais elevados que variam entre os 73.8 m³/h e os 82.9 m³/h. Constata-se também que o bocal dos canhões é na maioria dos cenários de alteração climática maior do que para o período de controlo.

Quadro 7.25 - Canhão seleccionado pelo modelo Enrolador para cada uma das simulações

Caso de estudo	Rotação	Cenário	Modelo canhão	Caudal (m ³ /h)	Pressão (kPa)	Alcance (m)	Bocal (mm)
Beja	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
Évora	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

A Figura 7.22 apresenta a percentagem de aumento dos caudais de projecto, para cada um dos cenários de alteração climática, em relação aos respectivos cenários de controlo. Para a estação de Beja (Fig. 7.22a) os menores aumentos do caudal de projecto (5% a 6%) verificaram-se para o cenário B2, apresentando o cenário A2 valores de aumento que vão de 11% a 24%. Para Évora (Fig. 7.22b) o cenário da alteração climática que apresenta os valores mais baixos de aumento do caudal de projecto é o cenário B2 (11% a 16%) com os vários cenários A2 a apresentar valores de aumento que variam entre 21% a 24%.

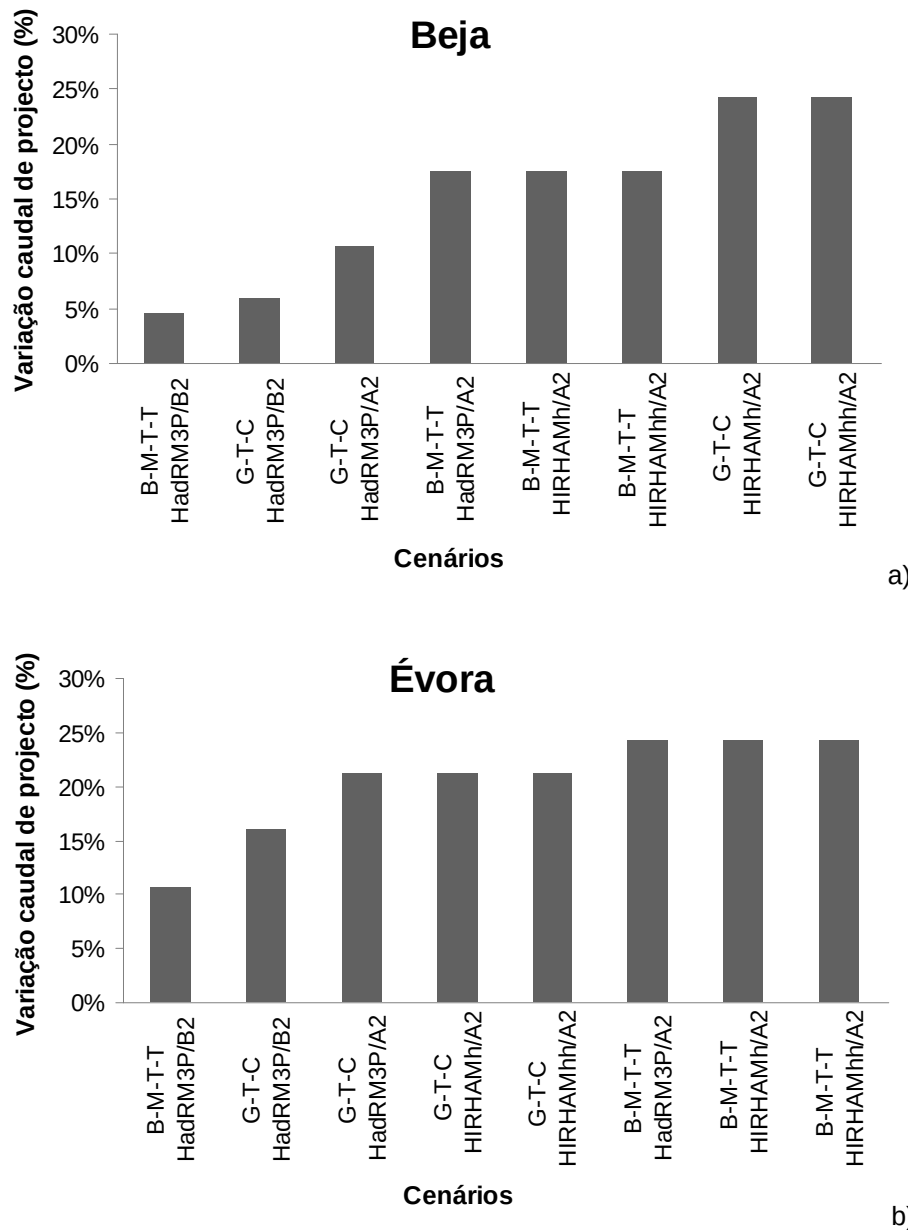


Figura 7.22 - Percentagem de variação do caudal de projecto, para cada um dos cenários de alteração climática, para a) Beja e b) para Évora.

No Quadro 7.26 apresentam-se os enroladores seleccionados para cada uma das simulações, em que é possível verificar que os menores diâmetros do tubo flexível correspondem ao cenário de controlo (100 mm). O cenário de alteração climática B2 apresenta metade das simulações com o diâmetro de 100 mm e a outra metade com 110 mm. Para o cenário B2 verifica-se que os tubos flexíveis de todas as simulações possuem um diâmetro de 110 mm. Relativamente à pressão necessária à entrada do enrolador verifica-se que os valores são relativamente semelhantes entre todos os cenários, oscilando entre 877 kPa e 905 kPa.

Quadro 7.26 - Enrolador seleccionado pelo modelo Enrolador para cada uma das simulações

Caso de estudo	Rotação	Cenário	Diâm. Tubo (mm)	Comp. tubo (m)	Pressão enrolador (kPa)
Beja	B-M-T-T	Controlo	100	210	900
		HadRM3P A2	110	200	905
		HadRM3P B2	110	200	877
		HiRHAMh A2	110	200	905
		HiRHAMhh A2	110	200	905
	G-T-C	Controlo	100	210	880
		HadRM3P A2	110	200	877
		HadRM3P B2	100	210	900
		HiRHAMh A2	110	200	905
		HiRHAMhh A2	110	200	905
Évora	B-M-T-T	Controlo	100	210	880
		HadRM3P A2	110	200	905
		HadRM3P B2	110	200	877
		HiRHAMh A2	110	200	905
		HiRHAMhh A2	110	200	905
	G-T-C	Controlo	100	210	853
		HadRM3P A2	110	200	877
		HadRM3P B2	100	210	900
		HiRHAMh A2	110	200	877
		HiRHAMhh A2	110	200	877

Quanto à conduta principal em alumínio (vd. Fig. 7.21) verifica-se da leitura do Quadro 7.27, que o modelo Enrolador seleccionou condutas de 127 mm (5") para todas as simulações relativas aos cenários de controlo e B2. 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 projecto e pelo esquema do sistema de rega, nomeadamente quanto ao número de faixas regadas (vd. Quadro 7.28), o que torna mais difícil isolar os efeitos das alterações climáticas.

Quadro 7.27 - Conduta principal seleccionada pelo modelo Enrolador para cada uma das simulações

Caso de estudo	Rotação	Cenário	Diam. conduta (mm)	Comp. conduta (m)	Pressão hidrante (kPa)
Beja	B-M-T-T	Controlo	127	366	982
		HadRM3P A2	152.4	360	950
		HadRM3P B2	127	360	964
		HiRHAMh A2	152.4	360	950
		HiRHAMhh A2	152.4	360	950
	G-T-C	Controlo	127	360	953
		HadRM3P A2	127	360	964
		HadRM3P B2	127	366	982
		HiRHAMh A2	152.4	360	950
		HiRHAMhh A2	152.4	360	950
Évora	B-M-T-T	Controlo	127	366	954
		HadRM3P A2	152.4	360	950
		HadRM3P B2	127	360	964
		HiRHAMh A2	152.4	360	950
		HiRHAMhh A2	152.4	360	950
	G-T-C	Controlo	127	360	914
		HadRM3P A2	127	360	964
		HadRM3P B2	127	360	980
		HiRHAMh A2	127	360	964
		HiRHAMhh A2	127	360	964

No quadro 7.28 apresentam-se os principais parâmetros de funcionamento e regulações dos equipamentos seleccionados. Da análise do Quadro 7.28 verifica-se que à excepção das dotações aplicadas (Db e DI) não se verificam tendências claras de alteração dos parâmetros de projecto em função dos cenários climáticos.

Para os valores das dotações encontram-se essencialmente as mesmas tendências observadas anteriormente para o caudal de projecto (Quadro 7.25), com os valores das dotações de rega a aumentarem à medida que se passa do cenário de controlo, para o cenário B2 e para o cenário A2. No entanto, nestes resultados existe uma pequena nuance, pois para algumas simulações o intervalo entre regas é de cinco dias enquanto que para outras é de seis dias, o que faz com que o cenário B2, com 6 dias de intervalo para todas as simulações, tenha valores de dotação mais elevados do que algumas simulações relativas ao cenário A2 com cinco dias de intervalo, o que dificulta a análise dos aumentos das dotações em função dos cenários de alteração climática.

Quadro 7.28 - Parâmetros de funcionamento e regulações dos sistemas de rega com canhão dimensionados

Caso de estudo	Rotação	Cenário	Db (mm)	DI (mm)	Interv. regas (dias)	Nº faixas
Beja	B-M-T-T	Controlo	73.6	55.2	6	6
		HadRM3P A2	69.3	52	5	5
		HadRM3P B2	80	60	6	6
		HiRHAMh A2	73.3	55	5	5
		HiRHAMhh	72.7	54.5	5	5
	G-T-C	Controlo	58.7	44	5	5
		HadRM3P A2	79.2	59.4	6	6
		HadRM3P B2	76	57	6	6
		HiRHAMh A2	70	52.5	5	5
		HiRHAMhh	69.3	52	5	5
Évora	B-M-T-T	Controlo	57.3	43	5	5
		HadRM3P A2	68.7	51.5	5	5
		HadRM3P B2	78.4	58.8	6	6
		HiRHAMh A2	70.7	53	5	5
		HiRHAMhh	68.7	51.5	5	5
	G-T-C	Controlo	65.6	49.2	6	6
		HadRM3P A2	79.2	59.4	6	6
		HadRM3P B2	74.4	55.8	6	6
		HiRHAMh A2	80.8	60.6	6	6
		HiRHAMhh	78.4	58.8	6	6
			Espaçamento (m)	Tempo rega banda (h)	Veloc. avanço (m/h)	Pluviometria (mm/h)
Beja	B-M-T-T	Controlo	66.67	10.42	14.4	14.8
		HadRM3P A2	80	10.06	14.9	13.6
		HadRM3P B2	66.67	10.87	13.8	14.5
		HiRHAMh A2	80	10.64	14.1	13.6
		HiRHAMhh	80	10.49	14.3	13.6
	G-T-C	Controlo	80	10.56	14.2	12.5
		HadRM3P A2	66.67	10.71	14	14.5
		HadRM3P B2	66.67	10.79	13.9	14.8
		HiRHAMh A2	80	10.13	14.8	13.6
		HiRHAMhh	80	10.06	14.9	13.6
Évora	B-M-T-T	Controlo	80	10.34	14.5	12.5
		HadRM3P A2	80	9.93	15.1	13.6
		HadRM3P B2	66.67	10.64	14.1	14.5
		HiRHAMh A2	80	10.2	14.7	13.6
		HiRHAMhh	80	9.93	15.1	13.6
	G-T-C	Controlo	66.67	10.79	13.9	13.8
		HadRM3P A2	66.67	10.71	14	14.5
		HadRM3P B2	66.67	10.57	14.2	14.8
		HiRHAMh A2	66.67	10.95	13.7	14.5
		HiRHAMhh	66.67	10.64	14.1	14.5

7.4.2.2. Avaliação do desempenho potencial dos sistemas de rega

Os resultados obtidos pelo módulo de avaliação de desempenho relativos à uniformidade de distribuição (DU), ao coeficiente uniformidade (CU) e à eficiência potencial de aplicação relativa ao primeiro quartil das observações mais desfavoráveis (PELQ) (vd. secção 5.2.1.) são apresentados no Quadro 7.29. Olhando para os valores da PELQ verifica-se que todos os equipamentos seleccionados apresentam bons desempenhos, com um valor mínimo de 72.4% e um valor máximo de 86.7%. Obviamente, estes valores estão sobrevalorizados pois referem-se a condições de ausência de vento e a uma gestão perfeita dos equipamentos, sendo por isso apenas valores potenciais. Em condições de utilização normais, que incluem a ocorrência de vento, os valores dos indicadores de desempenho serão mais baixos.

Quadro 7.29 - Indicadores de desempenho potenciais dos sistemas de rega dimensionados com o modelo Enrolador, em condições em que não ocorra vento e quando sejam bem geridos e mantidos

Caso de estudo	Rotação	Cenário	UD (%)	CU (%)	PELQ (%)
Beja	B-M-T-T	Controlo	85.5	85	86.7
		HadRM3P A2	80.4	82	81.5
		HadRM3P B2	72.4	81.2	74.1
		HiRHAMh A2	80.4	82	81.5
		HiRHAMhh A2	80.4	82	81.5
	G-T-C	Controlo	75.1	80.9	76.8
		HadRM3P A2	82.9	83.2	84.1
		HadRM3P B2	80.4	82	81.5
		HiRHAMh A2	75.5	81	76.5
		HiRHAMhh A2	75.5	81	76.5
Évora	B-M-T-T	Controlo	85.5	85	86.7
		HadRM3P A2	80.4	82	81.5
		HadRM3P B2	80.4	82	81.5
		HiRHAMh A2	80.4	82	81.5
		HiRHAMhh A2	80.4	82	81.5
	G-T-C	Controlo	75.1	80.9	76.8
		HadRM3P A2	80.4	82	81.5
		HadRM3P B2	80.4	82	81.5
		HiRHAMh A2	76.7	81	77.7
		HiRHAMhh A2	76.7	81	77.7

7.5. Considerações finais

A aplicação experimental realizada permitiu verificar a existência de uma elevada incerteza associada às simulações dos modelos climáticos RCM, especialmente ao nível da precipitação, que apresentou para o Alentejo desvios entre os dados observados e simulados, para o período de controlo, superiores às anomalias projectadas pelos diferentes cenários de alteração climática. Neste estudo, apenas foi possível ter acesso a dados meteorológicos observados relativos ao período de 1961-90, com um passo de tempo diário, para as estações de Évora e Beja. A dificuldade na obtenção de dados observados para este período não permitiu realizar uma caracterização mais detalhada da região do Alentejo, do ponto de vista da variabilidade espacial dos impactes.

Relativamente ao período sem cultura utilizou-se um valor estimado de K_C para uma situação hipotética de um solo coberto com restolho, alvo de pastoreio e parcialmente coberto por vegetação espontânea. Em estudos futuros será necessária uma melhor caracterização dos valores dos coeficientes culturais que descrevem os períodos sem cultura ao longo das rotações.

As necessidades de rega apresentaram um aumento considerável, especialmente no caso da beterraba sacarina, que é uma cultura de Outono-Inverno, devido ao aumento da temperatura do ar associado com uma redução da precipitação durante o período de desenvolvimento da cultura. As culturas de Primavera-Verão apresentam uma menor vulnerabilidade aos impactes das alterações climáticas, uma vez que para além de apresentarem menores aumentos das necessidades de rega, permitem saber antecipadamente, na altura da sementeira ou plantação, se se dispõe do volume de água armazenado suficiente para regar a cultura.

A gama de valores obtidos com os diferentes modelos e cenários de alteração climática permitem a definição de um intervalo de valores para as necessidades de rega e caudais de projecto. Esta gama de valores poderá ser utilizada no projecto de rega para definir margens de segurança, de acordo com o grau de exposição ao risco pretendido pelo decisor. Neste estudo verificou-se que os caudais de ponta apresentam um aumento menos pronunciado do que o aumento das necessidades de rega anuais.

Relativamente à duração das fases fenológicas das culturas, nesta aplicação experimental, optou-se por utilizar os valores actuais (retirados de Allen et al., 1998). Assim, as simulações efectuadas correspondem ao limite superior das necessidades hídricas e de rega das culturas para os cenários futuros de alteração climática. Esta abordagem justifica-se, na medida em que um aumento da temperatura do ar levará a uma redução do ciclo das culturas, reduzindo-se a duração do período de interceptação da radiação solar e do período

de produção de biomassa, resultando em produções mais baixas. Assim, nas culturas de regadio, quando não existam limitações de água para rega, será conveniente a adopção de variedades de ciclo longo que aproveitem a duração actual do ciclo de desenvolvimento das culturas de modo a manter as produções, conforme referido em Abreu et al. (2010). Em estudos futuros deverá utilizar-se as durações actuais das fases de desenvolvimento das culturas para definir o limite superior dos aumentos das necessidades de rega, que corresponde à utilização de novas variedades de ciclo longo, e as durações das fases das culturas ajustadas de acordo com o tempo térmico para definir um limite inferior dos aumentos das necessidades de rega, correspondente à manutenção das variedades actuais.

Quanto ao dimensionamento dos sistemas de rega com canhão verificou-se que os equipamentos seleccionados pelo programa Enrolador são diferentes para os diferentes cenários climáticos (referência, A2 e B2). A aplicação bem sucedida do modelo Enrolador aponta para o interesse em utilizar outros programas de dimensionamento de sistemas de rega em aplicações futuras, tais como os modelos Mirrig (Pedras, et al., 2008) para a rega localizada, o Asper97 (Correia, 1997) para a aspersão fixa, o DEPIVOT (Valín e Pereira, 2006) para as rampas pivotantes ou o SADREG (Gonçalves, 2006) para rega de gravidade.

A aplicação da metodologia desenvolvida, a dois casos de estudo na região do Alentejo, mostrou que esta é capaz de introduzir a problemática das alterações climáticas no projecto e gestão da rega. É de referir, no entanto, que a consideração de vários cenários climáticos para a construção de uma gama de valores para as necessidades de rega e caudais de projecto, e a consideração das rotações de culturas (que necessita que se realize a média das várias folhas da rotação) torna o projecto de rega bastante mais moroso. Acresce, ainda o facto de que existem alguns passos nesta metodologia que não estão automatizados e que têm que ser realizados manualmente, o que obriga a um maior consumo de tempo durante a sua utilização. Em trabalhos futuros, deverão desenvolver-se esforços no sentido de aumentar o grau de automatismo da metodologia desenvolvida.

8. Conclusões e perspectivas futuras.

Como resultado dos trabalhos desenvolvidos criou-se uma metodologia para a avaliação dos impactes das alterações climáticas sobre a agricultura de regadio. Esta metodologia baseia-se na utilização combinada de modelos de simulação, de bases de dados e sistemas de informação geográfica, tendo-se desenvolvido para o efeito um conjunto de ferramentas informáticas que se encontram concluídas e operacionais. Alcançaram-se, assim, os objectivos propostos inicialmente para esta tese.

A metodologia desenvolvida calcula as necessidades hídricas e de rega das culturas e efectua o dimensionamento dos sistemas de rega de canhão com enrolador, tendo em conta tanto as séries climáticas observadas em estações meteorológicas como os cenários de alteração climática produzidos por modelos climáticos. Este facto permite efectuar a gestão da água na agricultura e realizar o projecto dos sistemas de rega tendo em conta o risco associado às alterações climáticas. A metodologia desenvolvida introduz a problemática das alterações climáticas no processo de tomada de decisão na engenharia da rega, permitindo:

- i. uma adaptação planeada da agricultura de regadio a um clima em mudança;
- ii. a identificação de vulnerabilidades e potenciais riscos;
- iii. o estabelecimento de margens de segurança a adoptar no planeamento e no projecto dos sistemas de rega.

As ferramentas informáticas desenvolvidas no decorrer deste trabalho foram as seguintes:

- i. O sistema de informação IScenarios constituído por aplicações informáticas, uma base de dados e um SIG, que permitem o processamento dos dados climáticos produzidos pelos modelos climáticos regionais (RCM) e a criação de séries climáticas perturbadas. A sua utilização permite operacionalizar facilmente os dados dos modelos RCM, que são disponibilizados num formato dificilmente acessível aos gestores e projectistas, o que tem constituído uma barreira à sua utilização na engenharia da rega. No seu desenvolvimento consideraram-se os modelos (RCM) HadRM3P com os cenários A2 e B2, o modelo HIRHAMh com o cenário A2 e o modelo HIRHAMhh com o cenário A2.
- ii. O programa Interpolador permite combinar as anomalias climáticas, dos cenários de alteração climática produzidos pelos modelos climáticos, com os dados observados nas estações meteorológicas, de forma a produzir as séries climáticas perturbadas. A interpolação espacial das variáveis climáticas para o centro de cada parcela

permite aumentar a exactidão dos dados agrometeorológicos de entrada utilizados pelos modelos de simulação do balanço hídrico.

- iii. O modelo de balanço hídrico IrrigRotation realiza a simulação do balanço hídrico do solo, continuamente no tempo, permitindo determinar as necessidades de rega ao nível de uma rotação de culturas. As rotações de culturas são a base de uma agricultura sustentável e a sua consideração é particularmente pertinente num contexto de alterações climáticas. As rotações constituem uma medida de adaptação bastante relevante, uma vez que permitem reduzir os custos e estabilizar as produções, para além de constituírem uma medida de mitigação, uma vez que permitem aumentar o teor de matéria orgânica no solo, e reduzir as emissões na agricultura através de uma redução da quantidade de fertilizantes aplicados e da energia consumida. O Balanço hídrico do solo é calculado de forma contínua no tempo, permitindo reduzir o erro da estimativa da reserva de água no solo no início da simulação, através da sua diluição ao longo de toda a série de dados. A selecção dos caudais de projecto, para uma determinada probabilidade de não excedência, faz-se utilizando o módulo de análise de frequência.
- iv. O programa Enrolador realiza o dimensionamento hidráulico dos sistemas de rega com canhão com enrolador, seleccionando automaticamente os equipamentos que melhor satisfaçam os critérios de projecto definidos pelo projectista. Realiza a simulação do perfil pluviométrico do canhão que será utilizado na avaliação do desempenho potencial do equipamento seleccionado. Este *software* possui um módulo que realiza o cálculo dos indicadores de desempenho com base tanto nos dados recolhidos em avaliações de campo como nos dados obtidos através da simulação do perfil pluviométrico. Deste modo, este programa tanto pode ser utilizado para o projecto de novos sistemas de rega como para avaliar o desempenho de canhões de rega já existentes, com o objetivo de melhorar a sua gestão.

No âmbito da validação do programa Interpolador realizou-se um estudo para avaliar o valor da incerteza introduzida no cálculo das necessidades de rega das culturas pelos diferentes métodos de interpolação espacial (Anexo II). O estudo realizado, com base nos dados meteorológicos observados na rede SAGRA (COTR, 2009), mostra que o valor do erro obtido na determinação das necessidades de rega devido à interpolação espacial dos dados meteorológicos é considerável, variando entre 14% a 17% das necessidades de rega anuais, e que a sua minimização poderá levar à poupança de importantes volumes de água para rega. Esta incerteza junta-se à incerteza da modelação do balanço hídrico e à incerteza

dos dados utilizados na caracterização do solo e das culturas. Assim, verifica-se que os estudos no domínio da rega e recursos hídricos possuem um grau considerável de incerteza ao qual se vem juntar a problemática da incerteza da evolução do clima. Deste modo, os resultados destes estudos terão que ser sempre analisados com cuidado e com um forte espírito crítico, devendo ser realizados por técnicos com experiência e sensibilidade para os valores obtidos, de forma a evitar erros grosseiros e/ou conclusões que não estejam de acordo com a realidade.

A integração das ferramentas informáticas IScenarios, Interpolador, IrrigRotation e Enrolador, conduziu à definição de uma metodologia que permite a consideração da problemática das alterações climáticas ao longo de todo o projecto de rega, desde a recolha dos dados de base, até ao dimensionamento e avaliação dos sistemas de rega, passando pela determinação das necessidades de rega das culturas. Esta metodologia foi aplicada experimentalmente a dois casos de estudo na região do Alentejo, a saber:

- Caso de estudo Beja onde se considera os dados climáticos da estação de Beja e os solos Barros Pretos (Bpc);
- Caso de estudo Évora onde se considera os dados climáticos da estação de Évora e os solos Mediterrâneos Pardos (Pmg).

Foi testado o desempenho da metodologia e realizado um estudo exploratório relativo à avaliação dos impactes das alterações climáticas no regadio. Com base nos resultados desta aplicação foram formuladas algumas medidas de adaptação e foram identificadas necessidades de investigação futuras que serão discriminadas mais à frente neste capítulo.

Os cenários de alteração climática considerados para a região do Alentejo apontam para um aumento da temperatura média anual entre 2.9 °C a 4.1 °C e uma redução da precipitação média anual entre 21% a 39%. Estes cenários, a concretizarem-se terão impactes muito consideráveis sobre a agricultura de regadio desta região. Eles implicam um aumento significativo dos volumes de água necessários para a rega e uma redução dos recursos hídricos disponíveis, traduzindo-se num aumento do deficit hídrico e na quebra da produtividade das culturas.

As simulações, realizadas com o modelo IrrigRotation, projectam um aumento médio das necessidades hídricas das culturas entre 6 % a 29% para Beja e entre 7% a 31% para Évora. Verifica-se que os incrementos das necessidades hídricas são muito semelhantes

entre os três cenários A2 (HadRM3P, HIRHAMh e HIRHAMhh), apresentando o cenário B2 (HadRM3P) valores incrementos consideravelmente mais baixos.

As necessidades de rega apresentam aumentos, para os diferentes cenários de alteração climática, que variam entre 13% a 40% para as culturas de Primavera-Verão, e entre 25% a 70% para as culturas de Outono-Inverno. Os acréscimos das necessidades de rega tendem a ser ligeiramente maiores para Beja do que para Évora.

Relativamente ao deficit hídrico das culturas de sequeiro, verificou-se para a cultura do trigo, em Beja, um deficit hídrico médio de 22% para o período de controlo e de 31% a 44% para os cenários de alteração climática. Em Évora, obteve-se para o trigo um deficit hídrico médio de 39% para o período de controlo e de 48% a 57% para os cenários de alteração climática. Constatou-se, assim, que os Barros Pretos (Bpc) permitem obter valores de deficit hídrico para os cenários de alteração climática semelhantes aos que se verificam actualmente para os solos Mediterrâneos Pardos (Pmg) em Évora. Os valores de deficit hídrico obtidos para os cenários de alteração climática apontam para uma grande vulnerabilidade das culturas de sequeiro aos impactes das alterações climáticas projectadas para a região do Alentejo. Os resultados mostram ainda a capacidade das rotações de culturas em reduzir os valores de deficit hídrico, visto que a simulação do trigo em monocultura, para Beja (Bpc), produziu um deficit hídrico de 30% para o período de controlo e de 58% para o cenário A2 do modelo HadRM3P, que são valores bastante mais elevados do que os obtidos para o trigo inserido na rotação B-M-T-T.

Numa rotação de culturas o terreno é dividido num número de folhas igual ao número de culturas na rotação. Quando se inicia a simulação do balanço hídrico do solo, em cada folha existe uma cultura diferente. Nestas condições, os resultados obtidos pela simulação contínua são necessariamente diferentes de folha para folha, porque as mesmas culturas são simuladas em anos diferentes. Assim, é necessário considerar a média dos resultados obtidos em todas as folhas.

Para uma probabilidade de não excedência de 80% as necessidades de rega relativas ao período de ponta sofrem um acréscimo entre 12% a 21%, variando o aumento das necessidades de rega anuais entre 18% a 44%, com Beja e Évora a apresentarem resultados semelhantes. Os resultados mostram, assim, que os impactes serão mais pronunciados sobre as necessidades de rega anuais das culturas do que sobre os caudais de projecto. Deste modo, os esforços de adaptação deverão dar especial atenção à gestão da rega.

O impacte das alterações climáticas sobre o projecto de sistemas de rega com canhão é considerável com um aumento do caudal de projecto entre 5 a 24%. O cenário B2 do modelo HadRM3P apresenta os menores aumentos, que variam entre 5 e 16%, enquanto

que os diversos cenários A2 apresentam uma gama de variações entre 11% e 24%. Os diâmetros do tubo flexível aumentaram de 100 mm para o período de controlo para 110 mm para todos os cenários A2 e para metade dos cenários B2. Estes resultados têm como implicações um aumento dos custos de investimento e exploração dos sistemas de rega e maiores consumos de energia.

Os resultados obtidos são importantes pois, sendo a rega o maior consumidor de água em Portugal, o aumento projectado das necessidades de rega das culturas faz prever uma maior pressão sobre os recursos hídricos. Cunha et al. (2006) e Mourato (2009) projectam, para o Sul de Portugal, uma redução das disponibilidades dos recursos hídricos, nomeadamente dos volumes de água armazenados nas barragens e aquíferos. Assim, na avaliação dos impactes das alterações climáticas sobre a agricultura de regadio, para além da avaliação dos efeitos directos nas necessidades de rega das culturas e no dimensionamento e gestão dos sistemas de rega, também terá muito interesse no futuro integrar esta metodologia com cenários hidrológicos (Turrall e Faurés, 2011; Xiong et al, 2010). Deste modo seria possível avaliar o efeito conjugado de um previsível aumento das necessidades de rega das culturas com a projectada redução das disponibilidades de água para a rega, obtendo-se assim uma melhor avaliação do grau de vulnerabilidade dos sistemas de rega.

Com base nos resultados da aplicação experimental da metodologia desenvolvida a dois casos de estudo na região do Alentejo foi possível identificar algumas medidas de adaptação que poderão ajudar a diminuir os impactes negativos das alterações climáticas. Assim, do ponto de vista da gestão da água na agricultura, essas medidas são:

- i. A utilização de rotações de culturas em solos profundos e com elevados valores de reserva utilizável, como os Barros Pretos (Bpc), em que se alternam culturas com diferentes profundidades radiculares, permite armazenar água no solo durante as culturas com raízes menos profundas, aumentando a reserva de água no solo para as culturas com raízes mais profundas. Diminui-se, assim, as necessidades de rega no caso das culturas de regadio ou o deficit hídrico no caso das culturas de sequeiro, ajudando a atenuar os efeitos da variabilidade interanual da precipitação. As rotações permitem, também, distribuir o risco por diversas culturas e reduzir os custos de produção, para além de aumentarem o teor de matéria orgânica no solo e reduzirem a quantidade de fertilizantes e fitofármacos aplicados e do número de operações a realizar, reduzindo o consumo de energia dos sistemas agrícolas. Deste

modo, as rotações de culturas satisfazem simultaneamente objectivos de adaptação e de mitigação das alterações climáticas.

- ii. A utilização de variedades com ciclos culturais mais curtos ou culturas com menores necessidades de rega no caso de não ser possível aumentar os volumes de água de rega utilizados pelas culturas. No caso de solos com uma reduzida capacidade utilizável, como os solos Mediterrâneos Pardos (Pmg), identificou-se a ocorrência de elevados valores de deficit hídrico para as culturas de sequeiro, mesmo para as condições actuais. Os resultados obtidos para os diferentes cenários de alteração climática projectam a inviabilidade da utilização destes solos para a produção de cereais de sequeiro, devendo estas culturas ser substituídas por pastagens.
- iii. A antecipação das datas de sementeira, em conjunto com a utilização de variedades de ciclo mais curto, poderá permitir às culturas evitar os períodos de elevadas temperaturas e de menores disponibilidades hídricas. No entanto, quando se reduz o ciclo das culturas, reduz-se a quantidade de biomassa produzida pelas plantas, devendo esta medida ser aplicada principalmente às culturas de sequeiro. No caso de culturas de regadio, caso existam disponibilidades de água para rega, deverão utilizar-se culturas com um ciclo mais longo que permitam aproveitar a duração do período térmico de crescimento vegetativo de modo a se manterem as produções. No futuro é de prever que venham a surgir novas cultivares, com ciclos mais longos, melhor adaptadas às novas condições climáticas.
- iv. O aumento da eficiência dos sistemas de rega, sobretudo através do aumento da uniformidade de aplicação e da melhoria das práticas de gestão da rega. O projecto dos sistemas de rega deverá ser realizado com valores revistos dos caudais de ponta, uma vez que este estudo aponta para um aumento considerável dos seus valores.
- v. A utilização de sistemas de rega de canhão com enrolador, quando exista disponibilidade de água para rega, para efectuar regas de socorro ou de complemento às culturas de Outono-Inverno, em especial devido à tendência de redução da precipitação na Primavera. Estes sistemas de rega têm uma elevada flexibilidade de utilização e permitem com um investimento inicial relativamente reduzido regar áreas consideráveis. Têm no entanto como inconvenientes os elevados custos de funcionamento e as elevadas taxas de aplicação que poderão originar escoamento superficial e erosão do solo.
- vi. Aumentar a capacidade de armazenamento de água, quando exista essa possibilidade, para dar resposta aos prováveis acréscimos das necessidades de rega

das culturas. As projecções das alterações climáticas para a região do Alentejo, produzidas pelos modelos RCM, apontam para uma maior concentração da precipitação durante o Inverno e uma redução acentuada nas outras estações do ano, o que acentuará a necessidade de aumentar a capacidade de armazenamento de água como forma de contrariar o aumento da variabilidade sazonal da precipitação.

- vii. A redução das áreas regadas num dado aproveitamento hidroagrícola como forma de ajustar o aumento da procura a uma redução das disponibilidades de água para rega. Uma forma de reduzir as necessidades de rega ao nível de um aproveitamento hidroagrícola, sem reduzir a área cultivada, poderá passar pela inclusão de culturas de sequeiro nas rotações de culturas de regadio, tal como na rotação estudada nesta tese, Beterraba sacarina–Milho–Tomate–Trigo.

Perspectivas futuras

Durante o desenvolvimento desta metodologia foi necessário realizar um equilíbrio entre a abrangência do tema estudado e o grau de profundidade e de detalhe dos modelos desenvolvidos. O presente trabalho abordou todas as etapas do projecto de rega iniciando-se na recolha e selecção dos dados edafo-climáticos, passando pelo cálculo das necessidades de rega das culturas e terminando no dimensionamento e avaliação dos sistemas de rega. Assim, na continuação do trabalho desenvolvido, e tendo em conta as principais limitações da metodologia apresentada, teria interesse no futuro continuar a desenvolver a metodologia de avaliação dos impactes das alterações climáticas e realizar aperfeiçoamentos às ferramentas informáticas desenvolvidas. De uma forma mais detalhada, os pontos mais importantes ao nível dos desenvolvimentos futuros são:

- i. O sistema de informação IScenarios deverá ser aperfeiçoado ao nível da criação de uma interface gráfica e da melhoria da ligação entre os seus diversos componentes aumentando a sua automatização. Neste sistema de informação incluíram-se os dados do projecto PRUDENCE (Christensen, 2005) relativos aos modelos HadRM3P, HIRHAMh e HIRHAMhh, para o período de 2071 a 2100. Uma vez que os cenários de alteração climática produzidos pelos modelos climáticos possuem um elevado grau de incerteza, em trabalhos futuros deverá incorporar-se um maior número de cenários, correspondentes a diferentes modelos climáticos e a diferentes cenários de emissão, de modo a melhorar a caracterização das incertezas associadas às projecções futuras do clima. É de referir o projecto ENSEMBLES (Hewitt e Griggs, 2004) que disponibiliza dados de simulações transientes de

modelos RCM relativas ao período de 1951-2100, com uma resolução espacial de 25 km. Este período é muito interessante pois permite que as infra-estruturas de rega, que estão a ser projectadas actualmente, tenham uma análise de risco para o período em que estarão em funcionamento. O sistema IScenarios realiza a correcção dos desvios dos dados dos modelos climáticos de acordo com o método *Delta Change*. No futuro também teria interesse a inclusão de outros métodos de correcção dos dados climáticos tais como o *Direct Forcing* ou o método de Lenderink (Graham et al., 2007; Lenderink et al., 2007; Mourato, 2009).

- ii. O modelo IrrigRotation deverá ser melhorado através da incorporação de um módulo de ajustamento das datas de sementeira e da duração dos períodos de desenvolvimento das culturas em função do tempo térmico (Monteith, 1977; Abreu et al., 2010). A utilização do tempo térmico assume uma relação linear entre a taxa de desenvolvimento das culturas e a temperatura do ar. O tempo térmico é uma variável conservativa, para uma dada cultivar e fase de desenvolvimento, o que permite a sua utilização em regiões e condições climáticas diferentes daquelas onde foi determinado (Abreu et al., 2010). As datas de sementeira e as durações das fases fenológicas das culturas seriam estimadas em função das temperaturas médias do ar, projectadas para cada um dos cenários climáticos, sendo o tempo necessário para se atingir uma determinada fase de desenvolvimento da cultura expresso em tempo térmico em vez do número de dias (McMaster e Wilhelm, 1997; Raes, 2009; Abreu e Pereira, 2010; Lovelli et al., 2010).
- iii. O modelo Enrolador não considera o efeito do vento na simulação do perfil pluviométrico do canhão. Assim, prevê-se o desenvolvimento de um módulo de cálculo que considere o efeito do vento na simulação do perfil pluviométrico de modo a permitir aumentar o rigor no cálculo dos indicadores de desempenho esperados para o sistema projectado.
- iv. A metodologia desenvolvida deverá incluir no futuro outros modelos de simulação de sistemas de rega, para além do programa Enrolador, que permitissem a avaliação dos impactes das alterações climáticas para os de sistemas de rega existente numa dada região. Como exemplos referem-se o modelo para a simulação da rega localizada Mirrig (Pedras et al., 2008), o modelo para a aspersão fixa Asper97 (Correia, 1997), o modelo para as rampas pivotantes DEPIVOT (Valín e Pereira, 2006) e o sistema de apoio à decisão para a rega por gravidade SADREG (Gonçalves, 2006).

9. Referências bibliográficas

- Abreu, F.G., Ferreira, A.M.D., Magro, T.J., Mendes, A.G., 2010. Variação de alguns elementos agroclimáticos na região de Lisboa, nos últimos 80 anos. In *Clima e recursos naturais*, Figueiredo, T., Ribeiro, L.F., Ribeiro, A.C., Fernandes, L.F. (eds), pp. 83-115. IPB, Bragança, Portugal.
- Abreu, V.M. e Pereira, L.S., 2002. Sprinkler irrigation systems design using ISADim. In: *2002 ASAE Annual International Meeting/CIGR XVth World Congress* (July 28-31, 2002), ASAE/CIGR, Chicago, Illinois; USA, paper 022254.
- Aguiar, R., 2006. Cenários Socioeconómicos. In *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários Impactos e Medidas de Adaptação – Projecto SIAM II*, F.D: Santos e P. Miranda (eds.), pp. 483-492. Gradiva; Lisboa.
- Alcamo, J., Moreno, J.M., Nováky, B., Bindi, M., Corobov, R., Devoy, R.J.N., Giannakopoulos, C., Martin, E., Olesen, J.E., Shvidenko, A., 2007. *Europe. 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, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 541-580.
- 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.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Smith, M., Raes, D., Wright, J.L., 2005a. FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions. *J Irrig. Drain. Engng.* 131: 2-13.
- Allen, R.G., Clemmens, A.J., Burt, C.M., Solomon, K., O'Halloran, T., 2005b. Prediction Accuracy for Projectwide Evapotranspiration Using Crop Coefficients and Reference Evapotranspiration. *J Irrig. Drain. Engng.*, 131: 24-36.
- Allen, R.G., Wright, J.L., Pruitt, W.O., Pereira, L.S., Jensen M.E., 2007. Water Requirements. In: M.E. Jensen et al., (eds.), *Design and Operation of Farm Irrigation Systems* (2nd Edition), ASABE, St. Joseph, MI, pp. 208-288.
- Al-Naeem, M.A.H., 1993. *A hose reel raingun irrigation system computer simulation to predict water distribution and crop yield: optimizing trajectory angle, sector angle, sector position and lane spacing in different wind conditions*. PhD thesis, Silsoe college, Cranfield University (UK).

- Bastiaanssen, W.G.M., Allen, R.G., Droogers, P., D'Urso, G., Steduto, P., 2007. Twenty-five years modeling irrigated and drained soils: State of the art. *Agricultural Water Management* 92: 111-125.
- Baethgen, W. E. e Terra, R., 2010. El Riego en un clima cambiante. In: *Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas*, 1^{er} Seminario Internacional, Paysandú, Uruguay, Agosto, 2010. Instituto Nacional de Investigación Agropecuario de Uruguay, Montevideo, Uruguay. 7-18 pp.
- Bazzani, G.M., 2005. An integrated decision support system for irrigation and water policy design: DSIRR. *Environmental Modelling & Software* 20: 153-163.
- Blaney, H.F. e Criddle, W.O., 1950. *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*. Washington: USDA Soil Conservation Service. Technical paper n.96. 48 pp.
- Bodner, G., Loiskandl, W., Kaul, H.-P., 2007. Cover crop evapotranspiration under semi-arid conditions using FAO dual crop coefficient method with water stress compensation. *Agricultural Water Management* 93(3): 85-98.
- 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.
- Bøssing Christensen, O., 2012. CORDEX: A COordinated Regional climate Downscaling Experiment. Disponível em: <http://prudence.dmi.dk/>. Acedido em: Maio de 2012.
- Braga, R. e Pinto, P.A., 2009. *Alterações climáticas e Agricultura*. AJAP, Lisboa, Portugal. 127 pp.
- Brandão, A.M.C.P., 2006. *Alterações climáticas na agricultura portuguesa: instrumentos de análise, impactos e medidas de adaptação*. Tese de Doutoramento em Engenharia Agronómica, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa. 221 pp.
- Bremond, B. e Molle, B., 1995. Characterization of rainfall under center pivot: Influence of measuring procedure. *Journal of irrigation and drainage engineering* 121(5): 347-353.
- Burman, R.D., Nixon, P.R., Wright, J.L., Pruitt, W.O., 1983. Water Requirements. In: M.E. Jensen (eds.), *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 189-232.
- Calejo, M.J.P.C., 2003. *Projecto e análise do funcionamento de redes de rega em pressão. Modelação da procura. Dois casos de estudo: Lucefecit e Vigia*. Tese de

- Doutoramento em Engenharia Rural, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Camargo, E.C.G., Fucks, S.D., Câmara, G., 2004. Análise espacial de superfícies. In *Análise Espacial de Dados Geográficos*, Druck, S.; Carvalho, M.S.; Câmara, G.; Monteiro, A.V.M. (eds). EMBRAPA, Brasília, Brasil.
- 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.
- Carreira, D.N.M.C., 1997. *Aplicação SIG para a gestão da água em agricultura à escala regional*. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Rega e dos Recursos Agrícolas, Instituto Superior de Agronomia, UTL, Lisboa. 114 pp.
- Carrión, P., Montero, J., Tarjuelo, J.M., 2001. Aplicación de la simulación al diseño de los sistemas de riego por aspersión: el modelo SIRIAS. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 17(3): 347-362.
- Carvalho, M. e Azevedo, A.L., 1991. *Rotação de culturas*. Departamento de Fitotecnia, Universidade de Évora, Évora. 92 pp.
- Castell, J-F., 2006. Fonctionnement hydrique et écophysiologie de la plante. In *Traité d'irrigation*. Tiercelin, J.R.; Vidal, A. (eds), pp. 67-93. Lavoisier, Paris, France.
- Castellazzi, M.S., Wood, G.A., Burgess, P.J., Morris, J., Conrad, K.F., Perry, J.N., 2008. A systematic representation of crop rotations. *Agricultural Systems*, 97: 26-33.
- Catalão, J., 2000. A colocação por mínimos quadrados e a sua aplicação à geodesia física. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa. 30 pp.
- Catalão, J., 2006. Iberia-Azores Gravity Model (IAGRM) using multi-source gravity data. *Earth, Planets and Space*. 58: 277–286.
- Choisnel, E., 2006. Approche agrométéorologique du conseil à l'irrigation. In *Traité d'irrigation*. Tiercelin, J.R.; Vidal, A. (eds), pp. 177-190. Lavoisier, Paris, France.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill international Editions, Civil Engineering Series. 572 pp.
- Chowdary, V.M., Rao, N.H., Sharma, P.B.S., 2003. GIS based decision support system for groundwater assessment in large irrigation project areas. *Agricultural Water Management* 62: 229–252.
- Christensen, J.H., 2005. Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects. Final report. DMI. 269 pp.

- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr A., Whetton, P., 2007. *Regional Climate Projections. 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.
- Coelho, J.C., 2008. *Beterraba e Agricultura Sustentável*. DAI. Disponível em: http://www.dai-sa.pt/beterraba/info_tecnica.asp?menu=2&submenu=4. Acedido em: 01-03- 2008.
- Correia, S.M.M.C., 1997. Modelo de simulação de rega por aspersão em instalações em quadrícula. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 92 pp.
- Costa, J.B., 1995. *Caracterização e constituição do solo*. 5ª ed., Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. 527 pp.
- COTR, 2009. SAGRA - Sistema Agrometeorológico para a Gestão da Rega no Alentejo. Disponível em: <http://www.cotr.pt/sagra.asp>. Acedido em: 24-03-2009.
- COTR, 2010. Necessidades em água das culturas. Região do Alentejo. Campanha de rega de 2009/2010. Disponível em: <http://www.cotr.pt/documentos/FolhetoNA2010.pdf>. Acedido em: 30-06-2011.
- Cunha, L.V., Ribeiro, L., Oliveira, R.P., Nascimento, J., 2006. Recursos Hídricos. In *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários Impactos e Medidas de Adaptação – Projecto SIAM II*, F.D: Santos e P. Miranda (eds.), pp. 117-168. Gradiva; Lisboa.
- 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.
- De Lorenzi, F., Bonfante, A., Alfieri, S., Patanè, C., Basile, A., Di Tommasi, P., Monaco, E., Menenti, M., 2012. Sustainability of irrigated crops under future climate: the interplay of irrigation strategies and cultivar responses. *Geophysical Research Abstracts* 14: EGU2012-8160.
- Denzer, R., 2005. Generic integration of environmental decision support systems – state-of-the-art. *Environmental Modelling & Software* 20: 1217–1223.
- Detlefsen, N.K. e Jensen, A.L., 2007. Modelling optimal crop sequences using network flows. *Agricultural Systems*, 94: 566-572.

- Dogliotti, S., Rossing, W.A.H., Van Ittersum, M.K., 2003. ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations. *European Journal of Agronomy*, 19: 239-250.
- Döll, P., 2002. Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. *Clim. Change* 54:269-293.
- Doorenbos, J. e Kassam, A.H., 1979. *Yield response to water*. FAO Irrigation and drainage paper nº 33, FAO, Rome, Italy. 193 pp.
- Doorenbos, J. e Pruitt, W.O., 1977. *Guidelines for predicting crop water requirements*. Irrigation and drainage paper nº 24, FAO, Rome, Italy. 179 pp.
- Droogers; P. e Allen, R., 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and drainage systems*, 16: 33-45.
- Droogers, P., van Loon, A., Immerzeel W., 2008. Quantifying the impact of model inaccuracy in climate change impact assessment studies using an agro-hydrological model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 12:1–10.
- Duarte Júnior, J.B. e Coelho, F.C., 2010. *Rotação de culturas*. Programa Rio Rural. Manual Técnico; 22. Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária, Pesca e Abastecimento, Rio de Janeiro, Brasil. 13 pp.
- Duarte Santos, F., 2006. Problemática das alterações climáticas no início do século XXI. In *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários Impactos e Medidas de Adaptação – Projecto SIAM II*, F.D: Santos e P. Miranda (eds.), pp. 17-43. Gradiva, Lisboa.
- 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, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 273-313.
- Ewen, J., Parkin, G., O'Connell, P.E., 2000. SHETRAN: distributed river basin flow and transport modeling system. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering* 5: 250-258.
- FAO, 2011a. CLIMWAT 2.0 for CROPWAT. Disponível em: http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_climwat.html. Acedido em: 12-09-2011.
- FAO, 2011b. AQUASTAT. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>. Acedido em: 12-09-2011.

- Fernando, R.M., 1998. *Balanço hídrico do solo*. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 16 pp.
- Filintas AG., Dioudis, P., Koutseris, E., Papadopoulos, A., 2007. *Soils Nitrates GIS mapping, Irrigation water and applied N-fertilizer effects in soils nitrogen depletion in a drip irrigated experimental field in Thessaly basin*. In: Proc. of the 3rd IASME/WSEAS Int. Conf. on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development, Agios Nikolaos, Greece, July 24-26, 2007, pp. 487-492.
- Fischer, G., Tubiello, F.N., van Velthuisen, H., Wiberg, D.A., 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990-2080. *Technological forecasting and social change* 74: 1083-1107.
- Folland, C.K., Karl, T.R., Christy, J.R., Clarke, R.A., Gruza, G.V., Jouzel, J., Mann, M.E., Oerlemans, J., Salinger, M.J., Wang, S.-W., 2001. Observed Climate Variability and Change. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., 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, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- Fortes, P.S., Platonov, A.E., Pereira, L.S., 2005. GISAREG - A GIS based irrigation scheduling simulation model to support improved water use. *Agric. Water Management*, 77: 159-179.
- Funtowicz, S.O. e Ravetz, J.R., 1990. *Uncertainty and quality in science for policy*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 229 pp.
- Gaspar, J.A., 2000. *Cartas e projecções cartográficas*. LIDEL, Lisboa. 292 pp.
- Gavilán, P., Lorite, I.J., Tornero, S., Berengena, J., 2005. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. *Agricultural water management* 81(3): 257-281.
- Gonçalves, J.M., Horst, M.G., Pereira, L.S., Rolim, J., 2005. Multicriteria analysis for surface irrigation improvements and water saving with SADREG, a DSS linked with GIS. In: *Environmental Quality through Collaboration and Design* (Proc. 8th CIGR Inter-Regional Conference Envirowater-2005), Arlington, Texas, CD-ROM.
- Gonçalves, J.M., Muga, A., Pereira L.S., Rolim, J., Horst, M.G., 2006. SADREG, a client-server application DSS for design and management of surface irrigation. In: F. Zazueta, J. Xin, S. Ninomiya, G. Schiefer (eds.) *Computers in Agriculture and Natural Resources* (Proc. 4th WCCA, Orlando, Florida, USA, July 24-26, 2006), pp. 427-432.

- González-Dugo, M.P. e Mateos, L., 2005. Spectral vegetation indices for estimating cotton and sugarbeet evapotranspiration. In: *Earth Observation for vegetation monitoring and water management*. American Institute of Physics Conference Proceedings, G. D'Urso. M.A. Osann Jochum and J. Moreno (Eds.), Napoli 2005, Italy. 115-123 pp.
- 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.
- 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.
- Graves, A.R., Hess, T., Matthews, R.B., Stephens, W., Mason, T., 2002. Crop simulation models as tools in computer laboratory and classroom-based education. *Journal of Natural Resources and Life Sciences Education* 31: 48–54.
- Grayson, R.B., Bloeschl, G., Barling, R.D., Moore, I.D., 1993. Process, scale and constraints to hydrological modelling in GIS. In: *Applications of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*. IASH Publication N° 211, 83 – 92.
- Hajare, H.V., Raman, N.S., Dharkar, J.M., 2007. *A new technique for evaluation of crop coefficients: A case study*. In: Proceedings of the 2nd IASME/WSEAS International Conference on Water Resources, Hydraulics & Hydrology, Portoroz, Slovenia, May 15-17, 2007, pp. 7-14.
- Hajare, H.V., Raman, N.S., Jayant Dharkar ER., 2008. New Technique for Evaluation of Crop Water Requirement. *WSEAS TRANSACTIONS on ENVIRONMENT and DEVELOPMENT*, Issue 5, Vol. 4, May 2008, pp. 436-446.
- Harcum, J.B. e Loftis, J.C., 1987a. Spatial interpolation of Penman evapotranspiration. *Trans. ASAE* 30(1): 129-136.
- Harcum, J.B. e Loftis, J.C., 1987b. Design and evaluation of regional weather monitoring networks. *Trans. ASAE* 30(6): 1673-1678.
- Hargreaves G.H., 1975. Moisture availability and crop production. *Transactions of the ASAE* 18: 980-984.
- Hargreaves, G.H. e Samani, Z.A., 1982. Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrig. and Drain. Engr., ASCE*, 108(IR3):223-230.
- Hargreaves, G.H. e Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Transaction of ASAE* 1(2):96-99.

- Hargreaves G.H. e Allen, R.G., 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of irrigation and drainage engineering* 129: 53-63.
- Hart, Q.J., Brugnach, M., Temesgen, B., Rueda, C., Ustin, S.L., Frame, K., 2008. Daily reference evapotranspiration for California using satellite imagery and weather station measurement interpolation. *Civil Engineering and Environmental Systems* 0(0): 1-15.
- Hashmi, M.A., Garcia, L.A., Fontane, D.G., 1995. Spatial estimation of regional crop evapotranspiration. *Transactions of ASAE* 38 (5), 1345–1351.
- Hatfield, J., Boote, K., Fay, P., Hahn, L., Izaurralde, C., Kimball, B.A., Mader, T., Morgan, J., Ort, D., Polley, W., Thomson, A., Wolfe, D., 2008. Agriculture. In: *The effects of climate change on agriculture, land resources, water resources, and biodiversity in the United States*. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. Washington, DC., USA, 362 pp
- Heywood, I., Cornelius, S., Carver, S., 2002. *An Introduction to Geographical Information Systems*. 2nd edition, Pearson Education, Harlow, UK. 295 pp.
- Hewitt, C.D. e Griggs, D.J., 2004. Ensembles-Based Predictions of Climate Changes and Their Impacts (ENSEMBLES). Technical Report No. 1. Met Office, UK. 5 pp.
- Hoogenboom, G., Jones, J.W., Wilkens, P.W., Porter, C.H., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Boote, K.J., Singh, U., Uryasev, O., Bowen, W.T., Gijsman, A.J., du Toit, A.S., White, J.W., Tsuji, G.Y., 2004. Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0 [CD-ROM]. University of Hawaii, Honolulu, USA.
- Huinink, J.E. e Droogers, P., 2011. *Climate Change Impact Assessment on Crop Production in Uzbekistan*. World Bank/FutureWate, Wageningen, Netherlands. 24 pp.
- 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.
- IDRHa, 2010. Cartas de Solos e de Capacidade de Uso do Solo. Disponível em: <http://www.dgadr.pt/cartografia/cartas-solos-cap-uso-analogico>. Acesso em: Junho de 2010.
- Idrofoglia, 2011. Turbocar Girevoli. Disponível em: http://www.idrofoglia.it/prodotti_irrigation_cat.asp?id=10. Acedido em Janeiro de 2011.

- IGeoE, 2010. Informação digital. Disponível em: http://www.igeoe.pt/produtos/detalhes_vector.htm. Acedido em Junho de 2010.
- IM, 2010. *Análise climatológica da década 2000-2009 (Relatório preliminar)*. IM, Lisboa, 18 pp.
- IM, 2012a. Normais Climatológicas 71-00. Disponível em: <http://www.meteo.pt/pt/oclima/clima.normais/>. Acedido em Janeiro de 2012.
- IM, 2012b. Glossário Climatológico/Meteorológico. Disponível em: <http://www.meteo.pt/pt/areaeducativa/glossario/>. Acedido em Março de 2012.
- IM, 2012c. Cenários climáticos para portugal continental no século XXI. Disponível em: <http://www.meteo.pt/pt/oclima/servicos.clima/index.jsp?page=cenarios21.clima.xml>. Acedido em Maio de 2012.
- 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.
- IPCC, 2007c: *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- IPCC, 2011. Data Distribution Center. Disponível em: <http://www.ipcc-data.org/>. Acedido em: Dezembro de 2011.
- IPCC-TGICA, 2007. General Guidelines on the Use of Scenario data for climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2. IPCC-TGICA, 66 pp.
- Irrifrance, 2011. La Gamme Enrouleur. Disponível em: <http://www.irrifrance.com/produits/enrouleurs/index.html?contenu=sommaire.html>. Acedido em Janeiro de 2011.

- Isaaks, E.H. e Srivastava, R.M., 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University press. New York. 561 pp.
- James, L.G., 1998. *Principles of farm irrigation systems design*. Krieger, Florida, USA. 543 pp.
- Jones, J.W., e Kiniry J.R., 1986. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station, 194 pp.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18: 235–265.
- Jones, R.G., Noguier, 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.
- Jones, R.N., 2000. Analysing the risk of climate change using an irrigation demand model. *Climate research* 14: 89-100.
- Jorge, J. e Pereira, L.S., 2003. Simulation and evaluation of set sprinkler systems with Avasper. In: *Int. Workshop on Improved Irrigation Technologies and Methods* (ICID, Sep. 2003), Association Française des Irrigations et du Drainage, AFEID e CEMAGREF, Montpellier, CD_ROM Paper 21.
- Keller, J. e Bliesner, R.D., 1990. *Sprinkler and Trickle Irrigation*. Van Nostrand Reinhold, New York. 652 pp.
- Khaledian, M.R, Mailhol, J.C, Ruelle, P., Rosique, P., 2008. Adapting PILOTE model for water and yield management under direct seeding system (DSM). The case of corn and durum wheat in mediterranean climate. *Agricultural water management*. 96(5): 757-770.
- Komet, 2011. Big Volume Guns – Irrigation. Disponível em: <http://www.kometirrigation.com/w3k/index.jsp?k=36&l=2>. Acedido em Janeiro de 2011.
- Kundzewicz, Z.W., Mata, L.J., Arnell, N.W., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miller, K.A., Oki, T., Sen, Z., Shiklomanov, I.A., 2007: Freshwater resources and their management. *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 inden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 173-210.

- Lamaddalena, N. e Sagardoy, J.A., 2000. *Performance Analysis of On-Demand Pressurized Irrigation Systems*, FAO Irrigation and Drainage Paper Nº 59, FAO, Rome.
- Le Gat, Y. e Molle, B., 2000. Model of Water Application under Pivot Sprinkler. I: Theoretical Grounds. *Journal of Drainage and Irrigation Engineering* 126(6): pp. 343-347.
- Lehner, B., Umlauf, G., Hamann, B., Ustin, S., 2006. Topographic distance functions for interpolation of meteorological data. In: H.Hagen, A.Kerren, P.Dannenmann (eds.), *GI Lecture Notes in Informatics, Visualization of Large and Unstructured Data Sets*, 119-131.
- Lencastre, A. e Franco, F.M., 2003. *Lições de hidrologia*. Fundação Armando Lencastre, Caparica, Portugal. 451 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. Earth Syst. Sci.*, 11(3): 1145-1159.
- Li, B., McClendon, R.W., Hoogenboom, G., 2004. Spatial interpolation of weather variables for single locations using artificial neural networks. *Trans. ASAE* 47(2): 629-637.
- Li, L. e Reves, P., 2002. A comparison of spatio-temporal interpolation methods. In GIScience 2002, M.J. Egenhofer and D.M. Mark (Eds.), pp. 145-160. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Liu, Y., Pereira, L.S., Fernando, R.M., 2006. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: Parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation. *Agricultural Water Management*, 84: 27–40.
- Liu, Y. e Luo, Y., 2010. A consolidated evaluation of the FAO-56 dual crop coefficient approach using the lysimeter data in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 97(1): 31-40.
- Lockie, S., Mead, A., Vanclay, F., Butler, B., 1995. Factors encouraging the adoption of more suitable crop rotations in south-east Australia – profit, sustainability, risk and stability. *Journal of Sustainable Agriculture*, 6(1): 61-79.
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W., 2005. *Geographic Information Systems and Science*. 2nd edition, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 517 pp.
- Lopes Aleixo, A., 1986. Rotações e técnicas culturais com referência às proteaginosas. *Actas da I jornadas portuguesas de proteaginosas*, 19 a 21 de Fevereiro, 1986, Estação Agronómica Nacional, Oeiras. 197-205 pp.

- Lovelli, S., Perniola, M., Di Tommaso, 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.
- Luc, J.P., 2006. Réserve en eau des sols et bilan pédo-climatique, approche pratique. In *Traité d'irrigation*. Tiercelin, J.R.; Vidal, A. (eds), pp. 177-190. Lavoisier, Paris, France.
- Lyon, D.J., Boa, F., Arkebauer, T.J., 1995. Water-yield relations of several spring-planted dryland crops following winter wheat. *Journal of production agriculture*, 8(2): 281-286.
- Maia, J., 2008. A importância da meteorologia no uso eficiente da água na agricultura. Available at: http://www.cotr.pt/informacao/JT_met_2/. Accessed on: 24-03-2009.
- Mailhol J.C., Olufayo A.A., Ruelle P., 1997. Sorghum and sunflower evapotranspiration and yield from simulated leaf area index. *Agricultural Water Management*, Vol. 35, Issues 1-2, 1997, pp. 167-182
- Mailhol, J.C., Zaïri, A., Slatni, A., Nouma, B., El Amani, H. 2004. Analysis of irrigation systems and irrigation strategies for durum wheat in Tunisia. *Agric. Water Manag.* 70: 19-37.
- Martin, D.L., Stegman, E.C., Fereres, E., 1990. Irrigation scheduling principles. In: *Management of Farm Irrigation Systems*, G.J. Hoffman, T.A. Howell e K.H. Solomon (eds.), ASAE. St. Joseph, MI, 155-203 pp.
- Mateos, L., López-Cortijo, I., Sagardoy, J.A., 2002. SIMIS: the FAO decision support system for irrigation scheme management. *Agricultural Water Management* 56(3): 193-206.
- Mardikis, M.G., Kalivas, D.P., Kollias, V.J., 2005. Comparison of interpolation methods for the prediction of reference evapotranspiration—An application in Greece. *Water Resources Management*, 19:251–278.
- Matos, J. L., 2001. Fundamentos de informação geográfica. LIDEL, Lisboa. 326 pp.
- McMaster, G.S. e Wilhelm, W.W., 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology* 87: 291-300.
- Melo-Abreu, J.P.M., 1994. *Modelo de crescimento e produção da cultura do trigo em condições mediterrânicas*. Tese de Doutoramento, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 309 pp.
- Melo-Abreu, J.P. e Pereira, L.S., 2010. Impactos e vulnerabilidades da agricultura resultantes das alterações climáticas. In: *Tecnologias para o uso sustentável da água em regadio*, L.S. Pereira, F.B. Victoria, P. Paredes, M. García, E. Palácios e E.

- Torrecilhas (eds). Edições colibri e CEER – Centro de Engenharia dos Biossistemas, Lisboa. 159-163 pp.
- Miranda, P.M.A., 2001. *Meteorologia e ambiente. Fundamentos de meteorologia, clima e ambiente atmosférico*. Universidade Aberta, Lisboa, Portugal 321 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 Impactos e Medidas de Adaptação – Projecto SIAM II*, F.D: Santos e P. Miranda (eds.), pp. 45-113. Gradiva, Lisboa.
- Monteith, J.L., 1977. Climate. In *Ecophysiology of tropical crops*. P. de T. Alvim e T.T. Kozlowski (eds.), pp. 1-27. Academic Press, New York, USA.
- Mollion, L.C.B., 2010. Variabilidade e alterações climática. In *Clima e recursos naturais*, Figueiredo, T., Ribeiro, L.F., Ribeiro, A.C., Fernandes, L.F. (eds.), pp. 17-41. IPB, Bragança, Portugal.
- Moritz, H., 1980. *Advanced Physical Geodesy*. H. Wichmann Verlag, Karlsruhe , 500 pp.
- 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.
- Musy A., Pereira L.S., Fritsch M., editors, 1999. *Emerging Technologies for Sustainable Land Use and Water Management*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 71p. and CD-ROM.
- Mysiak, J., Giupponi, C., Rosato P., 2005. Towards the development of a decision support system for water resource management. *Environmental Modelling & Software* 20: 203-214.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grußler, 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
- Neale, C.M.U., Jayanthi, H., Wright, J.L., 2005. Irrigation water management using high resolution airborne remote sensing. *Irrigation and Drainage Systems* 19: 321-336.
- Neto, M.C., Pinto, P.A., Coelho, J.P.P., 2005. *Tecnologias de Informação e Comunicação e a Agricultura*. SPI – Sociedade Portuguesa de Inovação, Porto. 104 pp.

- Nielsen, D.C., Vigil, M.F., Anderson, R.L., Bowman, R.A., Halvorson, A.D., 2002. Cropping system influence on planting water content and yield of winter wheat. *Agronomy Journal*, 94:962-967.
- Nielsen, D.C., 2003. Water in dryland cropping systems. In: *The high plains no-till conference*. Proceedings of the 15th annual winter conference, Colorado conservation tillage association / national sunflower association, Greeley, USA - Feb. 4-5, 2003.
- Nielsen, D.C., Unger, P.W., Miller, P.R., 2005. Efficient water use in dryland cropping systems in the great plains. *Agronomy Journal*, 97: 364-372.
- NOAA, 2011. NDBC DODS Server. Disponível em: <http://dods.ndbc.noaa.gov/>. Acedido em Dezembro de 2010.
- Nunes, F., Oliveira, I., Fabião, M., 2003. *Avaliação da rega por aspersão – Enrolador*. COTR, Beja. 54 pp.
- Ojeda-Bustamante, W., González-Camacho, J.M., Sifuentes-Ibarra, E., Isidro, E., Rendón-Pimentel, L., 2007. Using spatial information systems to improve water management in Mexico, *Agricultural Water Management*. (2007), doi:10.1016/j.agwat.2006.11.002.
- Ortega, J.F., de Juan, J.A., Tarjuelo, J.M., 2005. Improving water management: the irrigation advisory service of Castilla la Mancha (Spain). *Agricultural Water Management* 77, 37–58.
- Paço, T.A., Ferreira, M.I., Rosa, R.D., Paredes, P., Rodrigues, G.C., Conceição, N., Pacheco, C.A., Pereira L.S., 2011. The dual crop coefficient approach using a density factor to simulate the evapotranspiration of a peach orchard: SIMDualKc model versus eddy covariance measurements. *Irrigation Science*, published online.
- Paustian, k., Ojima, D., Kelly, R., Lockett, J., Tubiello, F., Brown, R., Izaurralde, C., Jagtap, S., Li, C., 2000. *Crop Model Analysis of Climate and CO₂ Effects*. Workshop report – Preliminary Draft. Disponível em: <http://www.usgcrp.gov/usgcrp/nacc/agriculture/PaustianEtal-2000.pdf>. Acedido em: Maio de 2012.
- Parry, M.L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., 1998. Agriculture. In *Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies*, J.F. Feenstra, I. Burton, J.B. Smith e R.S.J. Tol (ed(s).), pp. 8-1:8-47. Version 2.0. United Nations Environment Programme e Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam, the Netherlands.
- Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P. and Co-authors, 2007. Technical Summary. *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, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 23-78.
- Pedras, C.M.G. e Pereira, L.S., 2005. A multicriteria decision support tool for design of farm micro-irrigation systems. In: *Environmental Quality through Collaboration and Design* (Proc. 8th CIGR Inter-Regional Conference Envirowater-2005, July 2-5), Arlington, Texas, CD-ROM.
- Pedras, C.M.G., Pereira, L.S., Gonçalves, J.M., 2009. MIRRIG: A decision support system for design and evaluation of microirrigation systems. *Agricultural water management* 96: 691 – 701.
- Peixoto, J.P., 1987. *O homem, o clima e o ambiente II. As variações do clima e o ambiente*. Ministério do Plano e da Administração do Território. Secretaria de Estado do Ambiente e dos Recursos Naturais, Gabinete de estudos e planeamento da administração do território, Lisboa, Portugal. 127 pp.
- Peixoto, J.P. e Oort, A.H., 1992. *Physics of climate*. American Institute of Physics, New York, USA. 520 pp.
- Pereira, J.S., Chaves, M.M., Caldeira, M.C., Correia, A.V., 2006. Water availability and productivity. In: *Plant Growth and Climate Change*, J.I.L. Morison e M.D. Morecroft (eds.), pp. 118-145. Blackwell Publishing, UK.
- Pereira, L.S. 1999. Higher performance through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion. *Agricultural Water Management* 40: 153-169.
- Pereira, L.S. e Allen, R.G., 1999. Crop water requirements, In: H. Van Lier, L. S. Pereira and F. Steiner (Eds.), *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*, vol. I: Land and Water Engineering, American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, MI: 213-262.
- Pereira, L.S. (coordenador), 2002. *Diagnóstico de sistemas de rega em pressão no Alentejo (evaluation of pressurized irrigation systems in Alentejo)*. Relatório Final do Projecto PEDIZA, CEER, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa. 231 pp.
- Pereira, L.S., 2004. *Necessidades de água e métodos de rega*. Publicações Europa-América, Mem Martins, Portugal. 312 pp.
- Pereira, L.S. (coordenador), 2005. *Tecnologias para Melhorar o Uso da Água Em Regadio*. Relatório Final do Projecto AGRO 8.1 – projecto n.º 115, CEER, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa. 106 pp.
- Pereira, L.S., 2008. Necessidades de agua e programação da rega: modelação, avanços e

- tendências. In: E. Ruz and L.S. Pereira (eds) *Modernización de Riegos y Uso de Tecnologías de Información* (Taller internacional, La Paz, Bolivia, sept. 2007). CYTED and PROCISUR/IICA, Montevideo, pp. 14-16 + CD-ROM paper 1.1.
- Pereira, L.S., 2010. Necessidades de água e de rega das culturas: uso de modelos. In: *Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas*, 1^{er} Seminario Internacional, Paysandú, Uruguay, Agosto, 2010. Instituto Nacional de Investigación Agropecuario de Uruguay, Montevideo, Uruguay. 73-90 pp.
- Pereira, L.S., 2011. Challenges on water resources management when searching for sustainable adaptation to climate change focusing agriculture. *European water* 34:41-54.
- Pinto, P.A., Braga, R., Brandão, A.P., 2006. Agricultura. In *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários Impactos e Medidas de Adaptação – Projecto SIAM II*, F.D: Santos e P. Miranda (eds.), pp. 209-231. Gradiva; Lisboa.
- Qing, Z. e Linvill, D.E., 2002. Integrating crop models into GIS regional crop yield. In: *2002 ASAE Annual International Meeting/CIGR XVth World Congress*. Chicago, IL, July 28–31, ASAE and CIGR, CD-Rom Paper n. 021196.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. 2009. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal* 101(3): 438–447.
- RAESA, 2011. Catálogo completo de riego RAESA. Disponível em: <http://www.riegosagricolasporaspersion.com/es/65722/Catalogo-Riego-RAESA/Catalogo-completo-riego-RAESA.htm>. Acedido em Janeiro de 2011.
- Ramakrshnan, R.E. e Gehrke, J., 2003. *Database management systems*. 3rd ed. McGraw-Hill, Singapore. 1065 pp.
- Raposo, J.R., 1996. *A rega. Dos primitivos regadios às modernas técnicas de rega*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal. 485 pp.
- Ray, S.S. e Dadhwal, V.K., 2001. Estimation of crop evapotranspiration of irrigation command area using remote sensing and GIS. *Agricultural Water Management* 49, 239–249.
- Richards, P.J. e Weatherhead, E.K., 1993. Prediction of raingun application patterns in windy conditions. *J. Agric. Eng. Res.*, 54(4), 281-291.

- Reguzzoni, M., Sansó, F., Venuti, G. 2005. The theory of general kriging, with applications to the determination of a local geoid. *Geophysical Journal International*, 162(2): 303-314.
- 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. e Pereira L.S., 2005. Design and Evaluation of Traveling-Gun Systems: the Simulation Model TRAVGUN. In: J. Boaventura Cunha and R. Morais (Eds.) *Proceedings of the EFITA/WCCA 2005 Joint Conference on Information Technologies in Agriculture, Food and Environment and Computers in Agriculture and Natural Resources* (5th EFITA Conference and 3rd WCCA, Vila Real, July), Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, CD-ROM, pp. 166-171.
- Rolim J., Godinho P., Sequeira B., Rosa R., Paredes P., Pereira L.S., 2006. SIMDualKc, a software tool for water balance simulation based on dual crop coefficient. In: F. Zazueta, J. Xin, S. Ninomiya, G. Schiefer (eds.) *Computers in Agriculture and Natural Resources* (Proc. 4th WCCA, Orlando, Florida, USA, July 24-26, 2006), pp. 781-786.
- Rolim, J., Godinho, P., Sequeira, B., Paredes P., Pereira, L.S., 2007. Assessing the SIMDualKc model for irrigation scheduling simulation in Mediterranean environments. In: N. Lamaddalena, C. Bogliotti, M. Todorovic, A. Scardigno (eds.). *Water saving in Mediterranean agriculture & future research needs* (Proc. Int. Conf. CIHEAM/IAMB, Valenzano, Italy, Feb. 14 – 17, 2007), *Options méditerranéennes*, B, 56(1): 49-61.
- 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. e Teixeira, J. L., 2010a. “Desenvolvimento de um Interpolador Espacial de Dados Agrometeorológicos. Aplicação à Região do Alentejo”. In: *Sustentabilidade do Regadio*, Actas do III Congresso Nacional de Rega e Drenagem, 19-20 de Maio de 2010, COTR, Beja, CD-ROM.
- Rolim J., Teixeira, J., Catalão J., 2010b. Apoio ao projecto de rega num contexto de alterações climáticas. In: T. Figueiredo, L.F. Ribeiro, A.C. Ribeiro (eds). *II Workshop Clima e Recursos Naturais 2010 nos Países de Língua Portuguesa*, Actas do WSCRA2010, 15-19 de Novembro 2010, IPB, Bragança, Portugal. 123-130 pp.
- 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.

- Rosenberg, N.J., Brown, R.A., Izaurralde, R.C., Thomson, A.M., 2003. Integrated assessment of Hadley Centre (HadCM2) climate change projections on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States I. Climate change scenarios and impacts on irrigation water supply simulated with the HUMUS model. *Agricultural and Forest Meteorology* 117: 73–96.
- Rowshon, M.K., Kwok, C.Y., Lee, T.S., 2003. GIS based scheduling and monitoring of irrigation delivery for rice irrigation system. Part I. Scheduling. *Agricultural Water Management* 62, 105–116.
- Rubio, E., Colin, J., D'Urso, G., Trezza, R., Allen, R., Calera, A., Gonzáles, J., Jochum, A., Menenti, M., Tasumi, M., Kelly, C., Vuolo, F., 2005. Golden Day Comparison of Methods to Retrieve ET (Kc-NDVI, Kc-analytical, MSSEBS, METRIC. in *Earth Observation for vegetation monitoring and water management*, Napoli 2005, edited by G. D'Urso, American Institute of Physics Conference Proceedings.
- San-Payo, M.M.G.L.S., 1994. *Utilização de um sistema de informação geográfica numa aplicação hidroagrícola*. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Rega e dos Recursos Agrícolas, Instituto Superior de Agronomia, UTL, Lisboa. 193 pp.
- Santa Olalla, F.M., Fabeiro, C., Brasa, A., Legorburu, A., 1999. Irrigation scheduling techniques. In: van Lier, H.N., Pereira, L.S., Steiner, F.R. (Eds.), *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*, Vol. I: Land and Water Engineering. ASAE, St. Joseph, MI. 294–297 pp.
- Santa Olalla, F.M., Calera, A., Domínguez, A., 2003. Monitoring irrigation water use by combining Irrigation Advisory Service, and remotely sensed data with a geographic information System. *Agricultural Water Management* 61: 111-124.
- Sarangi, A., Cox, C.A., Madramootoo, C.A., 2005. Geostatistical methods for prediction of spatial variability of rainfall in a mountainous region. *Trans. ASAE* 48(3): 943-954.
- Sheng, T.C., 1989. *Soil conservation for small farmers in the humid tropics*. FAO Soils Bulletin nº 60, FAO, Rome. 104 pp.
- Smith, M., 1998. *Manual for CROPWAT. A computer program for IBM_PC or compatibles*. Land and Water Development Division, FAO, Rome.
- Smith, R.J., Gillies, M.H., Newell, G., Foley, J.P., 2008. A decision support model for traveling gun irrigation machines. *Biosystems Engineering* 100(1): 126.136.
- Soares, A., 2006. *Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente*. 2ª ed., IST press, Lisboa. 214 pp.

- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R.B., Berntsen, T., Bindoff, N.L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J.M., Hegerl, G.C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B.J., Joos, F., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., Nicholls, N., Overpeck, J., Raga, G., Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M., Somerville, R., Stocker, T.F., Whetton, P., Wood, R.A., Wratt, D., 2007. Technical Summary. 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.
- Spadavecchia, I. e Williams, M., 2009. Can spatio-temporal geostatistical methods improve high resolution regionalization of meteorological variables? *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 1105-1117.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E. 2009. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal* 101(3): 426–437.
- Stockle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18: 289–307.
- Tarjuelo, J.M. e de Juan, J.A., 1999. Crop water management. In: van Lier, H.N., Pereira, L.S., Steiner, F.R. (Eds.), *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*, Vol. I: Land and Water Engineering. ASAE, St. Joseph, MI. 380–429 pp.
- Tarjuelo, J.M., 2005. *El Riego por Aspersión y su Tecnología*, 3ª ed., Mundi-Prensa, Madrid. 581 pp.
- Tarjuelo, J. M., Santa Olalla, F.M., Pereira L. S., (Guest Editors), 2005. *Land and Water Use: Environmental Management Tools and Practices*. Special Issue of *Agricultural Water Management*. Volume 77.
- Teixeira, J.L., 1989. *Modelos de programação e condução da rega*. Tese de Doutorado, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 303 pp.
- Teixeira, J.L. e Pereira, L.S., 1992. ISAREG, an irrigation scheduling model. *ICID Bulletin*, 41: 29-48.
- Teixeira, J.L., Fernando, R.M., Pereira, L.S., 1995. RELREG: a model for real time irrigation scheduling. In: *Crop-Water-Simulation Models in Practice*. Pereira, L.S., van den Broek, B.J., Kabat, P., Allen, R.G. (eds). Wageningen Pers, Wageningen, Netherlands. 3-15 pp.

- Teixeira, J.L., Shahidian, S., Rolim, J., 2008. Selection of a Simplified Method to Compute Evapotranspiration for Climatic Input on an Autonomous Controller for Landscape Irrigation. In: Proc. of the 4th IASME/WSEAS Int. Conf. on ENERGY, ENVIRONMENT, ECOSYSTEMS and SUSTAINABLE DEVELOPMENT Faro, Algarve, Portugal, June 11-13, 2008, Part II and III, pp 380-385.
- Temez, J.R., 1977. *Modelo matemático de transformación precipitación – aportación*. ASINEL. Madrid. Espanha. 31 pp.
- Thiessen, A.H., 1911. Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review* 39(7), 1082-1089.
- Thornton, P.E., Running, S.W., White, M.A., 1997. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *Journal of Hydrology* 190 (3-4): 214-251.
- 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.
- Todorovic, M. e Steduto P., 2003. A GIS for irrigation management. *Physics and Chemistry of the Earth* 28: 163-174.
- Todorovic, M., Tanasijevic, 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 (eds). BALWOIS 2012 Proceedings, International Conference on water, climate and environment, 28 May – 2 June 2012, Ohrid, Republic of Macedonia.
- Tscherning, C.C., 1996. EMPCOV, Program empirical covariance functions. Disponível em: <http://cct.qfy.ku.dk/software/empcov.pdf>. Acedido em: 02/01/2012.
- Turrall, H. e Faurés, J.B.J-M., 2011. *Climate change, water and food security*. FAO Water Reports 36, FAO, Rome, Italy, 174 pp.
- UNFCCC, 1992. United Nations Framework Convention on Climate Change. 24 pp. Disponível em: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>. Acedido em: 15/04/2011.
- UNFCCC, 2009. Compendium on methods and tools to evaluate impacts of, and vulnerability and adaptation to, climate change. Disponível em: http://unfccc.int/adaptation/nairobi_workprogramme/knowledge_resources_and_publications/items/5457.php. Acedido em: Maio de 2012.

- Valín M.I. e Pereira, L.S., 2006. DEPIVOT, a simulation model for design and performance assessment of center-pivot irrigation systems. In: *CIGR World Congress 2006*, Bonn, Germany CD-ROM paper.
- Victoria, F.B., Viegas Filho, J.S., Pereira, L.S., Teixeira, J.L., Lanna, A.E., 2005. Multi-scale modeling for water resources planning and management in rural basins. *Agricultural Water Management* 77: 4-20.
- Walker, W.E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J.P., van Asselt, M.B.A., Janssen, P., Krayen von Krauss, M.P., 2003. Defining uncertainty. A conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integrated Assessment* 4(1): 5-17.
- Wang, Yu-Min, Traore, S., Kerh, T., 2007. *Determination of a Reference Model for Estimating Evapotranspiration in Burkina Faso*. In: Proceedings of the 6th WSEAS Int. Conf. on Artificial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases, Corfu Island, Greece, February 16-19, 2007.
- Wesseling, J.G. e Feddes, R.A., 2006. Assessing crop water productivity from field to regional scale. *Agricultural Water Management* 86: 30-39.
- Wibberley, J., 1996. A brief history of rotations, economic considerations and future directions. *Aspects of Applied Biology*, 47: 1-10.
- Williams, J.R., Jones, C.A., Dyke, P.T., 1989. EPIC—Erosion/productivity impact calculator. 1. The EPIC model. USDA-ARS, Temple, TX.
- Xiong, W., Holman, I., Lin, E., Conway, D., Jiang, J., Xu, Y., Li, Y., 2010. Climate change, water availability and future cereal production in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 135: 59-69.
- Yang, Y., Zeng, A., Zhang, J., 2009. Adaptive collocation with application in height systems transformation. *J.Geod.* 83(5): 403-410.
- Zhao, C., Nan, Z., Cheng, G., 2005. Methods for estimating irrigation needs of spring wheat in middle Heihe basin, china. *Agricultural water management* 75: 54-70.
- Zhao, N., Liu, Y., Cai, J., Paredes, P., Rosa, R., Pereira, L.S., 2010. The dual crop coefficient approach: Application of the SIMDualKc model to winter wheat in North China Plain. CIGR XVIIth World Congress, CSBE/SCGAB, Québec City, Canada – June 13-17, 2010.

Anexo I – Testes e validação do modelo IrrigRotation

(corresponde ao artigo publicado: Rolim, J. e Teixeira, J., 2008. IrrigRotation, a time continuous soil water balance model. *WSEAS TRANSACTIONS on ENVIRONMENT and DEVELOPMENT*, 4(7): 577-587).

I.1. Aplicação experimental

O modelo IrrigRotation foi testado para a região de Beja, Alentejo, com o objectivo de avaliar o seu desempenho na determinação das necessidades de rega de uma dada rotação de culturas. Também se pretendeu realizar um estudo prévio relativo aos efeitos das rotações de culturas na gestão da água do solo. Outro dos objectivos foi o de produzir mapas temáticos das necessidades de rega das culturas de acordo com os resultados das simulações do balanço hídrico, realizadas pelo modelo IrrigRotation, para as diferentes manchas de solo. Para tal considerou-se uma rotação cultural utilizada nesta região e consideraram-se as principais manchas de solo. Os dados utilizados para a realização desta aplicação experimental foram os seguintes:

Dados geográficos: Os dados geográficos introduzidos na base de dados solos_Beja.mdb (vd. Fig. 6.12) correspondem a diferentes *layers* de informação vectorial, à escala 1:25000, relativas à região de Beja. Estas *layers* dizem respeito à carta de solos número 521 (Fig. I.1) do Instituto de Desenvolvimento Rural e Hidráulica (IDRHa, 2010) (Fig. I.1), um modelo digital do terreno (MDT), um mapa de curvas de nível e a folha nº 521 da carta militar 1:25000 do Instituto Geográfico do Exército (IGeoE, 2010).

Dados do solo: Os dados relativos ao solo são compostos pela informação georeferenciada relativa à definição espacial das manchas de solo, fornecida pela carta de solos referida no ponto anterior, e pelos dados dos parâmetros dos solos obtidos em Cardoso (1965).

Para realizar uma análise de sensibilidade ao programa IrrigRotation e para permitir gerar um mapa com as necessidades hídricas das culturas consideraram-se as principais manchas de solo da região de Beja, para as quais havia dados disponíveis. As famílias de solos consideradas neste estudo foram (Cardoso, 1965): Barros Pretos Calcários Muito Descarboxiatados de dioritos ou gabros (Bpc), Barros Pretos Não Calcários de dioritos ou gabros (Bp), Solos Mediterrâneos Pardos Para-Barros de dioritos ou quartzodioritos ou rochas microfaneríticas ou cristalofílicas afins (Pm), Solos Mediterrâneos Vermelhos ou Amarelos de rochas cristalofílicas básicas (Pv), Solos Mediterrâneos Vermelhos ou Amarelos de xistos (Vx), Barros Pretos Calcários Pouco Descarboxiatados de rochas eruptivas básicas ou grés argilosos calcários ou margas (Cp).

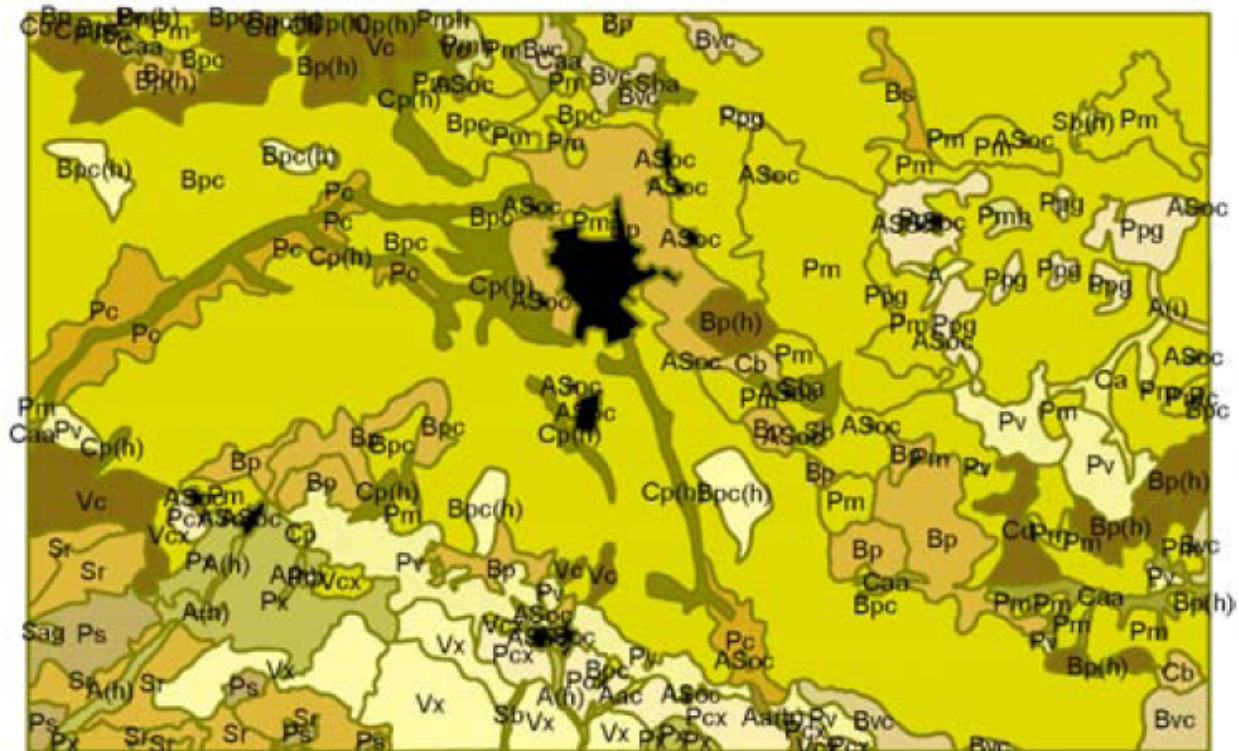


Figura I.1 – Folha nº 521 da carta de solos (IDRHa, 2010) relativa às manchas de solos existentes na região de Beja

No Quadro I.1 são apresentadas as propriedades dos solos Bpc e Pv, sendo que ao solo Bpc corresponde o valor mais elevado da reserva utilizável (RU) e ao solo Pv o valor mais baixo de RU. Neste estudo pretendeu-se realizar uma análise de sensibilidade ao modelo IrrigRotation através da comparação dos resultados das necessidades hídricas das culturas obtidos para os diferentes solos. Por ser ilustrativo dos resultados obtidos optou-se por apresentar apenas os resultados obtidos para os solos Bpc e Pv uma vez que correspondem às duas situações mais afastadas, apresentando os outros solos valores intermédios.

Quadro I.1 – Parâmetros dos solos Bpc e Pv

Solo	Horizonte	Profundidade superior (m)	Profundidade inferior (m)	θ_{cc} (cm ³ /cm ³)	θ_{ce} (cm ³ /cm ³)
Bpc	Ap	0	0.3	0.431	0.200
	B	0.3	0.65	0.475	0.231
	Bcca	0.65	0.9	0.507	0.263
	CcaC	0.9	1.2	0.429	0.197
Pv	Ap	0	0.2	0.298	0.174
	B	0.2	0.4	0.356	0.207

Dados das culturas e das rotações de culturas: a rotação de culturas adoptada para testar este programa foi a rotação Beterraba sacarina-Milho-Tomate-Trigo, que é uma rotação de regadio com interesse para a região do Alentejo, conforme referido por Coelho (2008) e Aleixo (2011, comunicação oral). Os dados das culturas inseridos na base de dados foram obtidos a partir dos valores tabelados em Allen et al. (1998) e são apresentados no Quadro I.2.

Quadro I.2 – Parâmetros das culturas beterraba sacarina, milho, tomate e trigo.

	Cultura			
	Beterraba sacarina	Milho	Tomate	Trigo
Dia da plantação	15	10	2	1
Mês da plantação	11	4	5	11
L_{ini}	45	30	30	30
L_{dev}	75	40	40	140
L_{mid}	80	50	45	40
L_{late}	30	30	30	30
k_{cb ini}	0.15	0.15	0.15	0.15
k_{cb mid}	1.15	1.15	1.1	1.1
k_{cb end}	0.5	0.15	0.8	0.15
Z_{r min} (m)	0.15	0.15	0.15	0.15
Z_{r max} (m)	0.7	1	0.7	1.8
p ini	0.6	0.6	0.5	0.6
p	0.55	0.55	0.4	0.55
h_{max} (m)	0.5	2	0.6	1
h_{min} (m)	0	0	0.07	0

Dados Meteorológicos: os dados meteorológicos utilizados para realizar a simulação do balanço hídrico do solo foram obtidos a partir da estação meteorológica automática da Quinta da Saúde, Beja, pertencente à rede de estações SAGRA (Sistema Agrometeorológico para a Gestão da Rega no Alentejo) operadas pelo COTR (2009). No Quadro I.3 são listadas as características desta estação. A série de dados meteorológicos utilizada tem um passo de tempo diário e foi considerado o período de 2003 a 2007. O Quadro I.4 apresenta as médias mensais dos parâmetros meteorológicos considerados neste trabalho: 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).

Quadro I.3 – Características da estação meteorológica de Beja (COTR, 2009)

Longitude*	07° 53' 06" O
Latitude*	38° 02' 15" N
Alt. (m)	206
Alt. anem. (m)	2
Intervalo considerado	2003-2007

* Datum 73

Quadro I.4 – Médias mensais dos parâmetros climáticos: 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 2003 a 2007 para a estação de Beja (SAGRA).

Mês	Médias mensais							
	$T_{\max}$ °C	$T_{\min}$ °C	$RH_{\max}$ %	$RH_{\min}$ %	U_2 m/s	R_s MJ/m ² /dia	P mm	ET_o mm/dia
Janeiro	15.3	4.3	94.2	56.8	1.8	9.7	33.3	1.3
Fevereiro	16.3	5.1	94.9	54.5	2.0	12.2	49.1	1.8
Março	19.4	6.9	94.3	47.8	2.1	17.1	38.7	2.8
Abril	22.3	8.3	94.0	43.1	2.0	21.9	39.6	3.9
Maio	26.6	10.8	90.8	34.6	2.0	25.9	25.4	5.2
Junho	31.8	14.5	88.4	30.2	2.2	28.8	13.5	6.6
Julho	34.0	15.3	84.8	25.2	2.4	29.8	1.5	7.3
Agosto	35.0	16.7	82.4	24.4	2.3	26.1	5.6	6.8
Setembro	31.3	14.8	83.9	28.2	2.1	21.2	22.1	5.0
Outubro	24.5	12.9	92.1	46.0	2.3	13.7	131.4	2.9
Novembro	19.1	8.7	94.0	55.2	2.0	9.9	95.7	1.6
Dezembro	15.5	5.2	93.9	57.1	2.1	9.1	46.9	1.2

I.2 Resultados

Como resultados da aplicação experimental do modelo IrrigRotation obtiveram-se as necessidades de rega das culturas para cada um dos solos considerados. Com base no somatório das necessidades de rega da rotação para o período de 2003-2007 produziu-se um mapa das necessidades de rega que se mostra na Figura I.2. Esta Figura mostra que as necessidades hídricas da rotação apresentam uma variação espacial significativa, entre as diferentes manchas de solo consideradas, com o solo Pv a apresentar o valor mais elevado (2021 mm) e o Bpc com o valor mais baixo (1811 mm).

Comparando os valores obtidos para este dois solos (Pv e Bpc) é possível avaliar o efeito da RU na simulação do balanço hídrico de forma continua no tempo. O Quadro I.5 apresenta as necessidades de rega, o número de regas e dotação média aplicada para cada cultura, para os solos Bpc e Pv, calculados com o programa IrrigRotation. O Quadro I.5 também mostra o total da percolação profunda que ocorre ao longo de toda a série de dados considerada, com um valor de 616 mm para o solo Bpc e de 1027 mm para o solo Pv. Esta diferença é devida à quantidade de água armazenada no perfil do solo devido ao valor mais elevado da RU para o solo Bpc. No caso de solos com uma elevada capacidade de utilizável e com um perfil profundo, a água é armazenada nos horizontes mais profundos do solo durante o período sem cultura e durante as culturas com raízes menos profundas (Fig. I.3a). Esta água é utilizada posteriormente por outras culturas da rotação, com sistemas radiculares mais profundos, permitindo reduzir as necessidades de rega de toda a série de dados (2003-2007) de 2021 mm (Pv) para 1811 mm (Bpc) como se mostra no Quadro I.5.

Quadro I.5 – Necessidades de rega das culturas, número de regas, dotação de rega média e percolação profunda obtidas com o programa IrrigRotation para os solos Bpc e Pv.

Cultura	Nº ordem na rotação	Nec. rega (mm)		Nº de regas		Dotação média (mm)	
		Bpc	Pv	Bpc	Pv	Bpc	Pv
Beterraba sacarina	1	476	556	5	17	95	33
Milho	2	671	756	7	24	96	31
Tomate	3	664	710	12	32	55	22
Trigo*	4	0	0	0	0	0	0
Total da rotação		1811	2021				
Percolação prof. (mm)		616	1027				

*sequeiro

A Figura I.3 mostra a variação do volume de água armazenado no solo ao longo de toda a rotação, incluindo os períodos relativos às campanhas de rega e aos períodos sem cultura (*nongrowing season*). Através da simulação do balanço hídrico contínua no tempo é possível transferir a água remanescente no solo no fim de uma cultura para a próxima cultura, reduzindo o erro na estimativa do valor da reserva de água no solo no início da cultura.

Da comparação da Figura I.3a com a Figura I.3b constata-se que a cultura do trigo no caso do solo Bpc beneficia da água armazenada no solo durante a cultura do tomate (regadio) e durante a época sem cultura, sendo esse efeito muito reduzido no caso do solo Pv. A utilização de uma cultura de sequeiro intercalada numa rotação de regadio permite, nos solos com uma elevada RU, dispor de uma elevada reserva de água no solo na altura da sementeira da cultura de sequeiro (Trigo) o que garante à cultura uma situação de maior conforto hídrico em situações em que ocorra uma menor precipitação (Fig. I.3a).

Os resultados alcançados (Quadro I.5 e Figura I.3) indicam que a consideração das rotações de culturas na gestão da água do solo pode permitir reduzir as necessidades de rega das culturas e aumentar a disponibilidade de água para as culturas de sequeiro. Assim, no capítulo 7 realizou-se o estudo do impacte das alterações climáticas sobre duas rotações de culturas utilizadas na região do Alentejo, com o objectivo de avaliar a influência das rotações de culturas na gestão da água do solo para diferentes cenários climáticos.

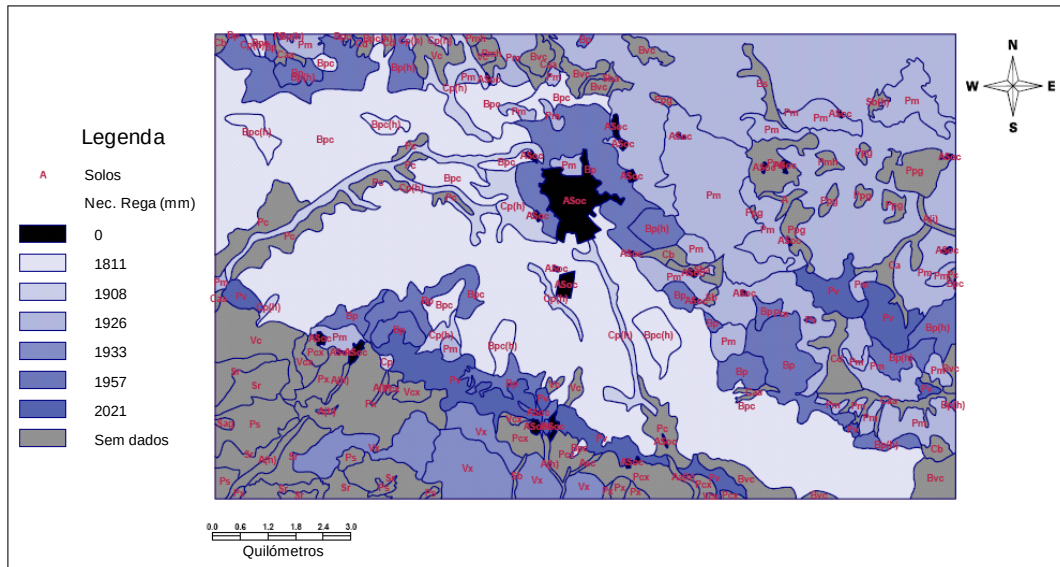


Figura I.2 – Mapa das necessidades de rega (mm) da rotação de culturas Beterraba sacarina-Milho-Tomate-Trigo, para a região de Beja, para o período compreendido entre 2003 a 2007.

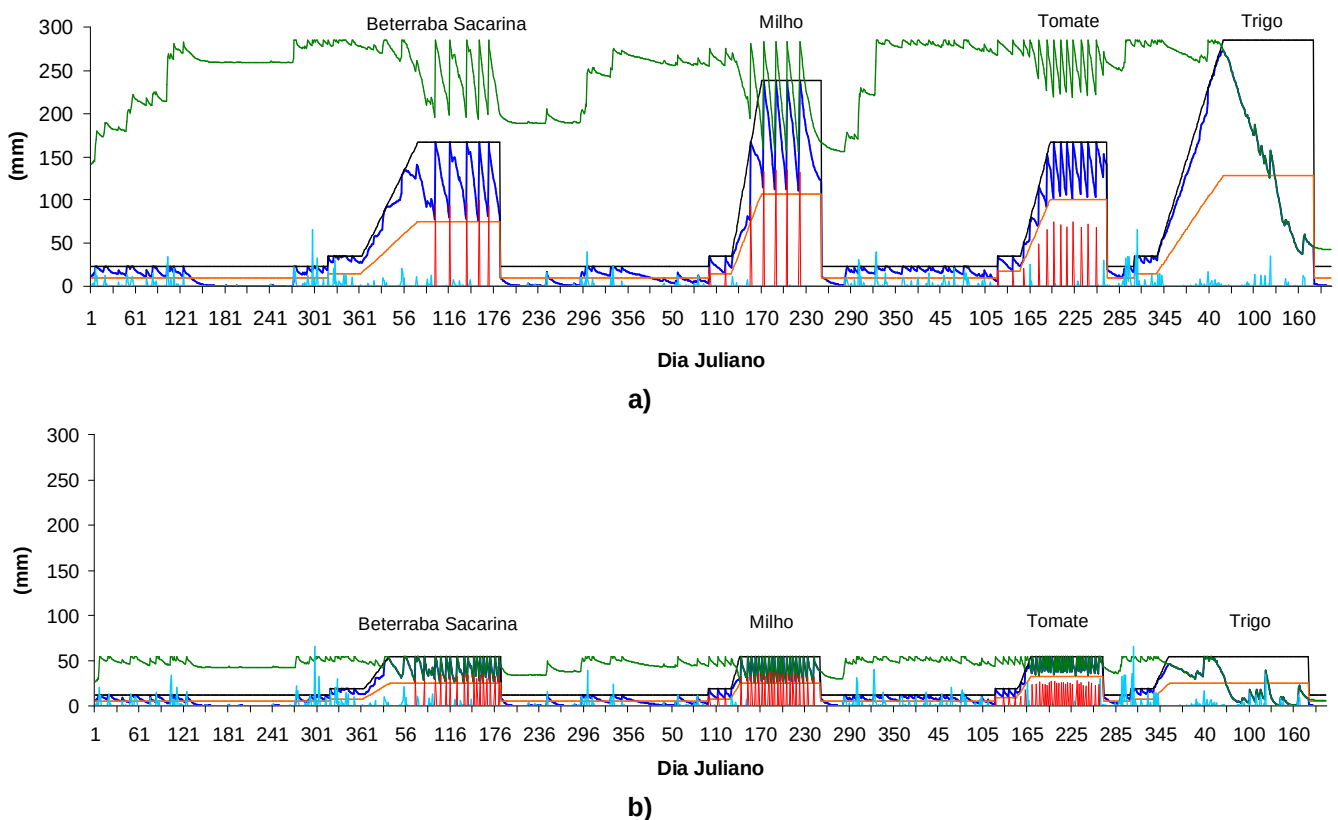


Figura I.3 – Curvas simuladas do conteúdo de água no solo onde (—) é a água disponível na zona radicular, (—) é a água disponível no solo para a raiz mais profunda da rotação (Zr max_rot). A linha (—) representa RU e (—) o limite da reserva facilmente utilizável (LRFU). Os picos correspondem à (—) precipitação e a (—) eventos de rega, a) para o solo Bpc e b) e para o solo Pv.

Os bons resultados obtidos com os testes realizados durante esta avaliação do modelo IrrigRotation fornecem um elevado grau de confiança relativamente aos resultados esperados para a utilização do modelo IrrigRotation na metodologia desenvolvida para avaliação dos impactes das alterações climáticas sobre os sistemas de regadio.

I.3 - Conclusões

A aplicação informática IrrigRotation foi testada e avaliada para as condições da região de Beja mostrando ser capaz de calcular as necessidades de rega de uma rotação de culturas tanto ao nível da parcela como ao nível regional, tendo produzido um mapa para a região de Beja com as necessidades de rega referentes à rotação Beterraba sacarina-Milho-Tomate-Trigo.

O modelo IrrigRotation através da realização da simulação do balanço hídrico de modo contínuo no tempo permitiu reduzir o nível de incerteza envolvido no cálculo do balanço hídrico. O volume de água armazenado no perfil do solo no início de cada cultura é calculado pelo modelo em vez de arbitrariamente se atribuir um valor como acontece com a maioria dos modelos de balanço hídrico existentes.

O *software* IrrigRotation permitiu avaliar a rotação de culturas Beterraba sacarina-Milho-Tomate-Trigo sob o ponto de vista da gestão da água do solo, tendo-se verificado que as rotações de culturas podem ter um efeito benéfico ao nível do volume de água armazenado no solo nos casos em que os solos são profundos e possuem uma elevada capacidade utilizável (U). Os testes realizados permitem ter boas perspectivas quanto à utilização das rotações de culturas como uma medida de adaptação que permita atenuar os expectáveis aumentos das necessidades de rega e do deficit hídrico das culturas para os vários cenários de alterações climáticas.

A integração do modelo IrrigRotation num SIG é ainda bastante incipiente limitando-se a exportar os resultados das simulações do balanço hídrico para as manchas de solos respectivas. Em desenvolvimentos futuros terá interesse aumentar a integração deste modelo num SIG, nomeadamente permitir que o modelo leia directamente os dados de entrada a partir da base de dados georeferenciada, e a inclusão de mais informação de carácter geográfica na quantificação das necessidades de rega das culturas.

Anexo II – Testes e validação do programa Interpolador

(corresponde ao artigo publicado: 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).

II.1. Introdução

O principal objectivo deste estudo foi o de avaliar a influência de diferentes métodos de interpolação de dados climáticos, implementados no programa Interpolador, no cálculo das necessidades de rega das culturas. Os métodos de interpolação estudados são o vizinho mais próximo (VMP), inverso do quadrado da distância (IQD), e colocação por mínimos quadrados (CMQ). Realizou-se uma análise de exactidão e uma análise comparativa para estes três métodos de interpolação, com o objectivo de avaliar a sua precisão e o seu desempenho. Este estudo permite avaliar a incerteza que é introduzida na determinação das necessidades de rega das culturas devido à interpolação espacial das variáveis agrometeorológicas utilizadas no seu cálculo. A área de estudo localiza-se no Alentejo tendo-se utilizado os dados meteorológicos das 14 estações meteorológicas que compõem a rede SAGRA (Sistema Agrometeorológico para a Gestão da Rega no Alentejo) (COTR, 2009). São analisados os resultados obtidos para a interpolação de cinco anos de dados meteorológicos, que incluem a humidade relativa mínima (RH_{min}), a velocidade do vento (U_2), a precipitação (P), e a evapotranspiração de referência (ET_o), avaliando-se a incerteza introduzida nos dados de entrada do modelo de simulação do balanço hídrico IrrigRotation. Posteriormente avalia-se a influência do desempenho dos métodos de interpolação no cálculo das necessidades de rega, comparando para cada estação meteorológica as necessidades de rega calculadas com os dados observados com as necessidades de rega calculadas com os dados interpolados. Finalmente discutem-se as implicações da utilização de dados meteorológicos interpolados espacialmente nos resultados dos modelos de simulação da rega.

II.2. Material e métodos

II.2.1. Avaliação da exactidão dos métodos de interpolação

Os três métodos de interpolação foram avaliados relativamente às suas exactidões interna e externa de modo a aferir a qualidade dos dados interpolados de ET_o , U_2 , RH_{min} , e P para uma dada localização. Para a avaliação da exactidão, as 14 estações meteorológicas da rede

SAGRA foram divididas em dois subconjuntos: um subconjunto contendo 10 estações (com os registos mais longos de dados) utilizado para a estimação dos parâmetros da função de covariância (variância, C_0 , e distância de correlação, α) e um segundo subconjunto contendo as restantes quatro estações (com apenas um ano de registos) para controlo externo. O segundo subconjunto corresponde aos dados de controlo e é constituído pelas séries de observações com as quais serão comparados os dados interpolados para estimar a precisão dos métodos de interpolação. Dividindo as estações neste dois subconjuntos assegura-se a independência dos dados de controlo. A avaliação de exactidão externa foi realizada através da comparação dos valores das variáveis meteorológicas estimados para as quatro estações de controlo com as observações.

A avaliação da exactidão interna corresponde a uma validação cruzada (Isaaks et al., 1989; Soares 2006) e foi realizada para avaliar a adequação do *software* Interpolador no preenchimento de falhas de dados em séries climáticas. Utilizaram-se as 10 estações do subconjunto com os registos mais longos tendo-se estimado os parâmetros das funções de covariância para essas estações. Para efectuar a avaliação retiraram-se as séries de dados de uma dada estação, e calcularam-se os valores interpolados (com as restantes nove estações) para o local dessa estação. Repetiu-se este procedimento para todas as 10 estações, retirando-se uma de cada vez. Os valores interpolados serão utilizados posteriormente para a determinação do erro entre a série medida e os dados interpolados.

Posteriormente, os resultados obtidos com os métodos de interpolação tanto para a avaliação externa como interna foram comparados com as séries de dados observados utilizando uma análise de resíduos, de modo a avaliar a exactidão dos valores interpolados. A análise de resíduos incluiu a determinação do erro médio ($\bar{E}$), do erro absoluto médio ($|\bar{E}|$), do erro relativo absoluto médio ($\bar{E}_r$), do desvio padrão dos erros (σ) e do coeficiente de determinação dos erros (CV), tal como se apresenta no Quadro II.1. O erro médio ($\bar{E}$) foi escolhido para avaliar o enviesamento introduzido nos dados interpolados por cada método, enquanto o erro absoluto médio ($|\bar{E}|$) indica a amplitude média dos erros, e o erro relativo absoluto médio ($\bar{E}_r$), fornece uma estimativa da dimensão do erro relativamente ao valor das observações. Para realizar o cálculo de $\bar{E}_r$ é necessário dividir os resíduos pelos valores observados (vd. a equação de $\bar{E}_r$ na Quadro II.1). No caso da variável precipitação (P) os valores observados são frequentemente iguais a zero ($z_i = 0$) e assim sendo, neste caso, é preferível utilizar o erro relativo calculado como o rácio entre o erro absoluto médio ($|\bar{E}|$) e a média dos valores observados ($\bar{z}$), de modo a evitar uma divisão por zero. O desvio padrão dos erros (σ) e o coeficiente de variação dos erros (CV) são medidas de dispersão.

Quadro II.1 – Equações utilizadas na análise de resíduos.

Nome	Equação	Variáveis
Resíduos e_i	$e_i = z_i - \hat{z}_i$	z_i – valor observado $\hat{z}_i$ – valor estimado
Erro médio $\bar{E}$	$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{N}$	N – dimensão da amostra $ e_i $ - resíduos absolutos
Erro absoluto médio $ \bar{E} $	$ \bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i }{N}$	
Erro relativo absoluto médio $\bar{E}_r$	$\bar{E}_r = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{ e_i }{z_i}}{N}$	
Desvio padrão σ	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (z_i - \bar{z})^2}{N}}$	
Coeficiente de variação CV	$CV = \frac{\sigma}{\bar{z}} \times 100\%$	

Realizou-se uma análise de regressão linear com a ordenada forçada à origem para os dados interpolados e medidos, tanto para a avaliação externa como interna, de modo a determinar (para cada conjunto de dados interpolados-medidos) o coeficiente de determinação (R^2), e o declive da recta de regressão.

De modo a avaliar o desempenho dos três métodos de interpolação foi efectuada também uma análise de variância (ANOVA a um factor) considerando um nível de significância de 0.05. O teste da ANOVA foi aplicado a todas as variáveis meteorológicas (ET_o , RH_{min} , U_2 , P), para todas as estações e para cada um dos métodos de interpolação. As séries interpoladas foram comparadas com as séries medidas e foram obtidos os respectivos valores p. O número de rejeições da hipótese nula H_0 , para um nível de significância de 0.05, ou seja as séries de dados significativamente diferentes, foram contadas para cada variável climática. O método com o melhor desempenho será aquele que apresentar um menor número de rejeições.

Finalmente foram avaliadas as implicações e incertezas associadas com os métodos de interpolação nos resultados dos cálculos das necessidades de rega das culturas. Para tal, utilizou-se o modelo IrrigRotation (vd. secção 6.2.3) que efectua a simulação do balanço hídrico do solo para uma rotação de culturas, realizando a simulação de forma contínua no tempo e com um passo de tempo diário. O cálculo da evapotranspiração das culturas (ET_c) é efectuado de acordo com a metodologia dos coeficientes culturais de base (Allen et al., 1998).

Este modelo foi utilizado para calcular as necessidades de rega (NRg) da cultura do milho instalada num solo argiloso (Barros Pretos - Bpc). Considerou-se o solo Barros Pretos para todos os locais para permitir a comparação directa entre as NRg estimadas para cada estação. Uma vez que o modelo IrrigRotation necessita de séries contínuas de dados meteorológicos, para realizar a simulação do balanço hídrico do solo, apenas se utilizaram as oito estações meteorológicas com os registos de dados mais longos e em que não existiam falhas nos dados. Assim, não se incluíram as estações de Moura e Serpa porque possuem períodos significativos com falhas nos dados. Os dados meteorológicos utilizados têm um passo de tempo diário e são relativos ao período de 2003 a 2008. Os dados da cultura incluem a data de sementeira (10 de Abril), o comprimento dos períodos de desenvolvimento da cultura, o valor do coeficiente cultural basal (K_{cb}), a fracção de água facilmente utilizável (p), a altura máxima da cultura e a profundidade máxima da raiz. Os dados do solo incluem a caracterização da camada evaporativa e os dados relativos a cada horizonte do solo, que incluem a profundidade e espessura de cada horizonte, e o teor de água no solo à capacidade de campo e ao coeficiente de emurchecimento. Os dados da parcela incluem as coordenadas geográficas desta, a caracterização do sistema de rega nela instalado e os limiares de gestão da rega. As NRg calculadas a partir dos dados interpolados (VMP, IQD, CMQ), gerados para a localização de cada estação meteorológica, foram comparadas com as NRg calculadas com os dados medidos nessas estações.

II.2.2. Região de aplicação e dados climáticos

Foram realizadas para a região do Alentejo a análise comparativa, validação e avaliação de exactidão dos métodos de interpolação implementados no *software* Interpolador, tendo sido utilizados os dados meteorológicos da rede de estações meteorológicas SAGRA (Sistema Agrometeorológico para a Gestão da Rega no Alentejo). A rede SAGRA pertence e é operada pelo Centro Operativo de Tecnologias do Regadio (COTR), e os dados foram disponibilizados através do seu *website* (COTR, 2009). Esta rede cobre grande parte do Alentejo (Maia, 2008) e a sua distribuição espacial é apresentada na Figura II.1. Os dados meteorológicos utilizados, possuem um passo de tempo diário, e considerou-se neste estudo o período de 2003 a 2008.

O Quadro II.2 apresenta, para cada estação, a média anual das principais variáveis agrometeorológicas e as suas coordenadas geográficas, assim como a média, desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (CV) das várias estações para o período de 2003 a 2008. As estações de controlo apenas ficaram operacionais após 2006, não podendo por isso ser comparadas directamente com as restantes estações. Estes valores (Quadro II.2)

mostram que a variabilidade espacial das médias anuais dos dados meteorológicos é pequena ao longo desta região, com os valores de CV a variar entre 0.02 a 0.09, com excepção da U₂ com um CV igual a 0.21. Contudo, a média anual mascara a variabilidade dos dados diários; e assim sendo, quando se utilizam dados diários, como é o caso deste estudo, esta variabilidade será maior. A estação de Odemira, que é a única estação da rede SAGRA localizada perto da costa (Fig. II.1), apresenta a temperatura máxima mais baixa (21.4°C), a humidade relativa mais elevada (RH_{max} = 96% e RH_{min} = 54%), a segunda maior precipitação (516 mm) e a mais baixa evapotranspiração (ET_o = 3.1 mm), demonstrando as condições mais húmidas desta estação.



Figura II.1 - Distribuição geográfica das estações meteorológicas da rede SAGRA, onde (•) são as estações cujos dados são utilizados na interpolação e (▲) são as estações de controlo utilizadas apenas para a avaliação de exactidão.

Quadro II.2 - Estações meteorológicas da rede SAGRA (COTR, 2009)

Estação	Long ^[a] (decimal °)	Lat (decimal °)	Alt (m)	Média 2003-2008							
				T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	RH _{max} (%)	RH _{min} (%)	U ₂ (m/s)	R _s (kJ/m ² /dia)	P (mm/ano)	ET _o (mm/dia)
Aljustrel	-8.19	37.97	104	24.6	9.7	94	40	2.2	16568	496	3.7
Alvalade	-8.35	37.93	79	24.8	10.0	95	42	2.1	15899	454	3.6
Beja	-7.89	38.04	206	24.1	10.1	91	42	2.1	18574	471	3.8
Elvas	-7.10	38.92	202	24.8	9.3	89	39	1.8	16855	481	3.7
Évora	-7.94	38.74	246	23.8	8.7	94	44	2.1	15955	524	3.4
F. Alentejo	-8.27	38.05	74	24.9	9.4	94	41	1.5	16659	459	3.4
Moura	-7.28	38.09	172	25.2	8.1	90	37	1.3	16270	388	3.3
Odemira	-8.75	37.50	92	21.4	10.7	96	54	2.0	18248	516	3.1
Redondo	-7.63	38.53	236	24.0	10.0	91	42	2.7	16460	444	3.9
Serpa	-7.55	37.97	190	24.8	10.3	90	41	1.9	16839	449	3.6
Castro Verde ^[b]	-8.08	37.76	200	23.6	9.2	97	44	2.8	16779	454	3.9
Estremoz ^[b]	-7.60	38.87	404	21.7	9.0	94	45	1.4	16388	519	3.0
Viana do Alentejo ^[b]	-8.13	38.36	138	23.0	9.2	95	44	2.3	17353	511	3.6
Vidigueira ^[b]	-7.79	38.18	155	24.4	9.7	93	41	1.7	16600	522	3.5
Média				23.9	9.5	93	43	2.0	16818	478	3.5
σ				1.1	0.7	2	4	0.4	744	38	0.3
CV				0.05	0.07	0.02	0.09	0.21	0.04	0.08	0.07

^[a] Long = Longitude; Lat = Latitude; Alt = Altitude; T_{max} = temperatura máxima do ar; T_{min} = temperatura mínima do ar; RH_{max} = humidade relativa máxima; RH_{min} = humidade relativa mínima; U₂ = velocidade do vento a 2 m de altura; R_s = radiação solar; P = precipitação; ET_o = evapotranspiração de referência.

^[b] Estações de controlo utilizadas para avaliação de exactidão externa.

II.3. Resultados e discussão

II.3.1. Determinação dos parâmetros da função de covariância

No Quadro II.3 apresentam-se os parâmetros das funções de covariância empíricas, determinados para cada uma das variáveis meteorológicas consideradas neste estudo. Os parâmetros da função de covariância foram determinados como médias mensais relativas ao período 2003-2008. Para realizar a determinação destes parâmetros utilizou-se o *software* EMPCOV (Tscherning, 1996) que é um programa de cálculo de funções de covariância empíricas. Um exemplo dos resultados obtidos é apresentado na Figura II.2, para o caso da função empírica de covariância da variável RH_{min} para o mês de Março (média de 2003-2008). A distância de correlação (α) em média variou entre 7 a 9 km para todas as variáveis meteorológicas estudadas. Os valores de α são relativamente constantes (Quadro II.3), em contraste com a variabilidade bastante marcada de C₀. As médias mensais de C₀ e de α , foram fornecidas como dados de entrada ao programa Interpolador de modo a permitir a realização da interpolação com o método da CMQ.

A função de covariância empírica é determinada a partir dos dados observados utilizando todos os pares de estações entre uma dada distância entre elas. O número de estações por quilómetro quadrado, mais do que o número de estações, é crítico para a estimação da covariância. Assumindo um modelo de covariância que é dependente da distância entre as observações das variáveis climáticas, com uma correlação típica de dezenas de quilómetros, a distância entre estações deve ser menor do que distância de correlação esperada. Neste estudo, o número disponível de estações foi 10, com uma distância média

para a estação mais próxima de 29 km. Portanto não foi possível ter um elevado número de classes (pares de estações dentro de uma determinada distância) para estimar as funções de covariância empíricas (Fig. II.2). Consequentemente, os parâmetros C_0 e distância de correlação (α) poderão não ter sido optimamente estimados. No entanto, os parâmetros estimados da função de covariância são confiáveis e consistentes com o comportamento das variáveis climáticas. Para melhorar a estimação da covariância empírica, as classes de distâncias (intervalo entre distâncias no eixo das abcissas) são geralmente definidas de acordo com a densidade das observações, de tal modo que exista um número suficiente de pares de pontos de amostragem para calcular a covariância de uma dada classe.

Quadro II.3 – Parâmetros das funções de covariância empíricas, variância C_0 e distância de correlação α (em km), calculados para as variáveis evapotranspiração de referência (ET_0), velocidade do vento (U_2), humidade relativa mínima (RH_{min}), e precipitação (P).

Mês	$ET_0 C_0$	$ET_0 \alpha$	$U C_0$	$U \alpha$	$RH_{min} C_0$	$RH_{min} \alpha$	$P C_0$	$P \alpha$
Jan	0.0090	7	0.1257	9	1.9191	8	0.0072	10.5
Fev	0.0083	6	0.1597	6	6.5031	9	0.0324	10.5
Mar	0.0142	7	0.1594	5.5	11.5201	8	0.0304	9
Abr	0.0193	8	0.1284	6	15.0736	7.5	0.0090	5.5
Mai	0.0591	9	0.0956	6	34.4038	7	0.0334	7
Jun	0.2321	8	0.0947	6	59.1469	7	0.0315	9
Jul	0.4763	7.5	0.1330	6	85.8148	8	0.0004	7
Ago	0.3792	8	0.1294	6	68.0464	7.5	0.0071	12
Set	0.1601	8	0.1024	7	47.2378	7.5	0.0810	7
Out	0.0294	10.5	0.1797	7	14.1499	9	0.3565	10.5
Nov	0.0156	7.5	0.1377	8	5.3536	10.5	0.3129	9
Dez	0.0110	7	0.1721	8	2.7779	7	0.0800	14

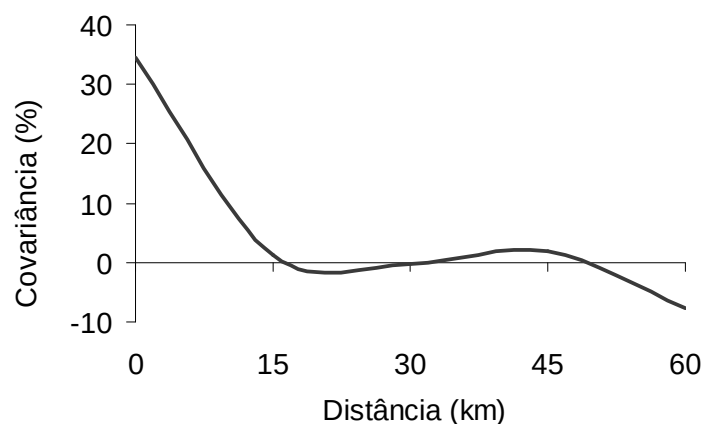


Figura II.2 – Função de covariância empírica da variável RH_{min} , relativa ao mês de Maio (média de 2003-2008), em que $C_0 = 34\%$ e $\alpha = 8$ km.

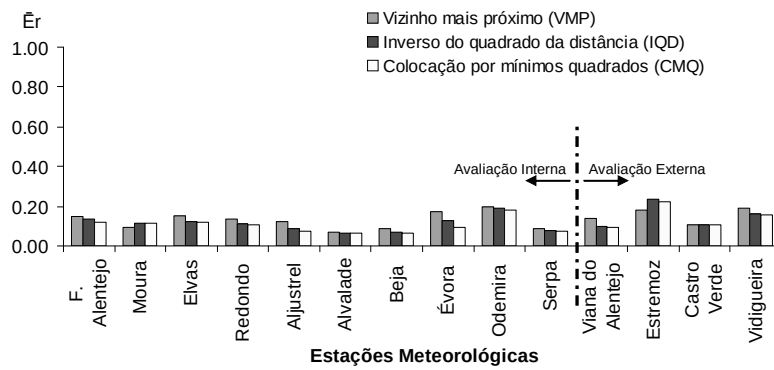
II.3.2. Avaliação da exactidão dos dados de entrada do modelo de simulação da rega

Comparação dos métodos através da utilização do erro relativo absoluto médio

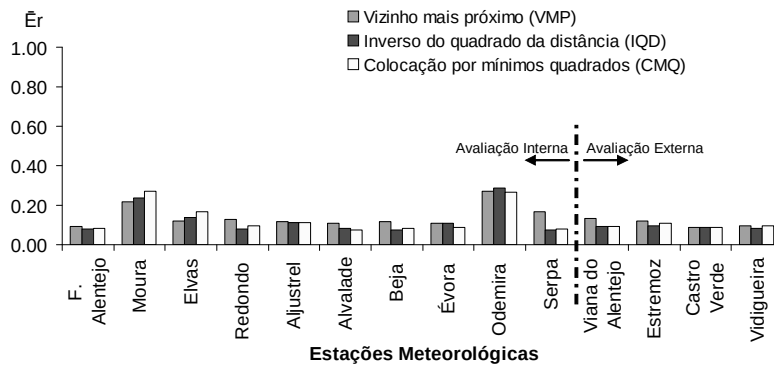
Os dados meteorológicos utilizados para realizar a análise de resíduos (que se apresenta nas Figuras II.3 e II.4 e nos Quadros II.4 e II.5) são os valores diários relativos à totalidade do período de 2003 a 2008. Os resultados obtidos nas avaliações de exactidão externa e interna, são apresentados na Figura II.3 e dizem respeito ao erro relativo absoluto médio obtido para cada estação para as variáveis climáticas ET_o , RH_{min} , U_2 , e P . Os resultados mostram que o método da CMQ é o melhor interpolador para a ET_o com um valor médio do erro relativo de 0.11, seguido de muito perto pelo método do IQD com 0.12 (Fig. II.3a). O método do VMP apresenta em média o erro mais elevado (0.14), apesar da sua diferença para os outros métodos ser muito pequena. Os resultados das avaliações externa e interna para a ET_o são muito semelhantes. Relativamente à RH_{min} (Fig. II.3b), os melhores resultados foram obtidos utilizando os métodos da CMQ e do IQD com um valor de $\bar{E}_r$ de 0.12 para ambos os métodos, mas novamente, o desempenho do método do VMP é apenas marginalmente inferior (0.13). Para a RH_{min} , verificam-se uns picos no gráfico para as estações de Odemira e Moura (Fig. II.3b) que correspondem às suas posições de fronteira dentro da rede SAGRA (Fig. II.1), com a estação de Odemira próxima da costa e, portanto, sendo a estação mais húmida e a estação de Moura localizada bastante no interior, próxima da fronteira com Espanha, e sendo a mais seca. Relativamente à U_2 (Fig. II.3.c) o método da CMQ apresenta os erros mais baixos (0.25), com o método do IQD a apresentar resultados muito próximos (0.28) e com o método do VMP sendo claramente o pior método (0.33). Quanto à P , o VMP é claramente o pior método de interpolação, com valor médio do $\bar{E}_r$ de 0.58 (Fig. II.3.d). O método da CMQ apresenta os melhores resultados (0.50) tendo, outra vez, o IQD apresentado resultados bastante próximos da CMQ (0.51). As avaliações de exactidão externa e interna de P apresentam resultados semelhantes.

As variáveis ET_o (Fig. II.3a), RH_{min} (Fig. II.3b), e P (Fig. II.3d) exibem os valores mais elevados de erro relativo para a estação de Odemira, o que se explica pelas diferentes condições desta estação devido à sua proximidade ao litoral (vd. Fig. II.1). Em contraste, é evidente a partir da análise da Figura II.3a-d que as três estações centrais (Beja, Alvalade, e Aljustrel) exibem os menores erros de interpolação para todas as variáveis estudadas. Isto pode ser explicado devido à posição destas estações no centro da rede de estações meteorológicas, caracterizada por uma distribuição muito favorável das estações meteorológicas à sua volta e por uma reduzida distância destas estações às estações que as rodeiam.

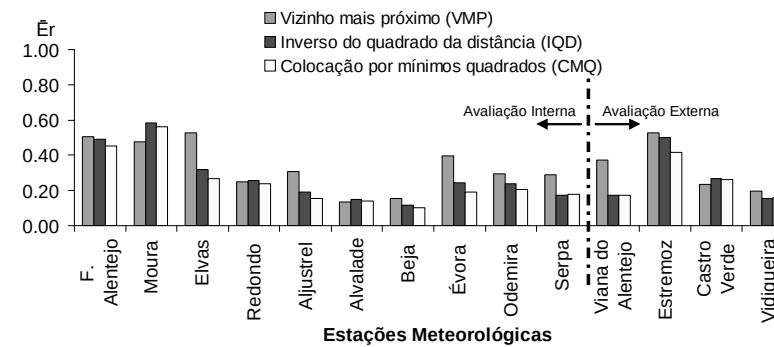
a) Evapotranspiração de referência (ET_o)



b) Humidade relativa mínima (RH_{min})



c) Velocidade do vento a 2 m de altura (U_2)



d) Precipitação (P)

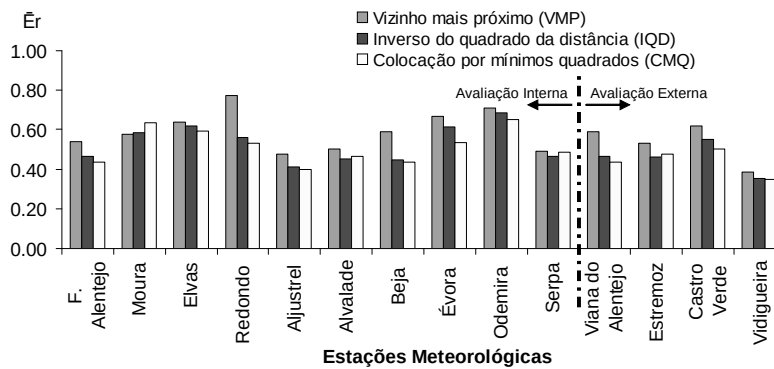


Figura II.3 - Erro relativo absoluto médio apresentado pelos métodos VMP, IQD, e CMQ, para as variáveis meteorológicas a) ET_o , b) RH_{min} , c) U_2 , e d) P, para as avaliações de exactidão externa e interna.

Análise de resíduos da ET_0 e P

Realizou-se a análise de resíduos para todas as variáveis, no entanto apenas serão apresentados os resultados para a ET_0 (Quadro II.4) e P (Quadro II.5) porque estas duas variáveis são as mais relevantes no cálculo do balanço hídrico do solo. As outras duas variáveis, U_2 e RH_{min} , apenas são utilizadas para o ajustamento dos coeficientes culturais, apresentando uma influência muito mais reduzida na simulação do balanço hídrico do solo (Allen et al., 1998).

Da análise do Quadro II.4 verifica-se que para a ET_0 o método da CMQ produz valores mais centrados, apresentando um erro médio muito próximo de zero, tanto para avaliação da exactidão externa como interna. O erro absoluto médio e o erro relativo absoluto médio têm tendência a diminuir quando se passa dos métodos do VMP para o IQD e para a CMQ. O desvio padrão (σ) exibe uma diferença considerável entre os métodos, com o método do VMP a produzir a maior dispersão de valores ($\sigma = 0.42$ e 0.41), e com o método da CMQ a apresentar a menor dispersão ($\sigma = 0.34$ e 0.35), tanto para as avaliações externa como interna.

Quadro II.4 - Resultados da análise de resíduos para a evapotranspiração de referência (ET_0), em que $\bar{E}$ é o erro médio, $|\bar{E}|$ é o erro absoluto médio, $\bar{E}_r$ é o erro relativo absoluto médio, e σ é o desvio padrão dos erros (valores em mm).

Estação	Métodos											
	Vizinho mais próximo (VMP)				Inverso do quadrado da distância (IQD)				Colocação por mínimos quadrados (CMQ)			
	$\bar{E}$	$ \bar{E} $	$\bar{E}_r$	σ	$\bar{E}$	$ \bar{E} $	$\bar{E}_r$	σ	$\bar{E}$	$ \bar{E} $	$\bar{E}_r$	σ
F. Alentejo	-0.40	0.43	0.15	0.39	-0.36	0.39	0.14	0.33	-0.32	0.35	0.12	0.31
Moura	-0.14	0.25	0.09	0.31	-0.21	0.30	0.12	0.32	-0.16	0.29	0.12	0.34
Elvas	-0.19	0.37	0.15	0.45	0.08	0.32	0.12	0.41	0.14	0.33	0.12	0.41
Redondo	0.44	0.48	0.14	0.47	0.35	0.39	0.11	0.38	0.34	0.38	0.11	0.36
Aljustrel	0.40	0.43	0.12	0.39	0.25	0.29	0.09	0.30	0.21	0.25	0.08	0.27
Alvalade	-0.05	0.20	0.07	0.26	0.15	0.20	0.06	0.22	0.16	0.20	0.07	0.21
Beja	-0.05	0.24	0.09	0.31	0.11	0.19	0.07	0.22	0.14	0.19	0.07	0.20
Évora	-0.44	0.48	0.17	0.47	-0.27	0.34	0.13	0.35	-0.13	0.25	0.09	0.30
Odemira	-0.42	0.66	0.20	0.85	-0.33	0.62	0.19	0.82	-0.27	0.59	0.18	0.79
Serpa	0.14	0.25	0.09	0.31	-0.04	0.18	0.08	0.23	-0.01	0.18	0.08	0.24
Média aval. interna	-0.07	0.38	0.13	0.42	-0.03	0.32	0.11	0.36	0.01	0.30	0.10	0.34
Viana do Alentejo	0.32	0.45	0.14	0.50	0.08	0.27	0.10	0.35	0.12	0.28	0.10	0.35
Estremoz	-0.36	0.40	0.18	0.37	-0.54	0.55	0.23	0.35	-0.48	0.49	0.22	0.32
Castro Verde	0.31	0.36	0.11	0.38	0.34	0.39	0.11	0.42	0.36	0.40	0.11	0.41
Vidigueira	-0.19	0.31	0.19	0.39	-0.13	0.27	0.16	0.33	-0.11	0.26	0.16	0.32
Média aval. externa	0.02	0.38	0.15	0.41	-0.06	0.37	0.15	0.36	-0.03	0.36	0.15	0.35

* (valores em fracção)

Os resultados relativos à comparação do desempenho dos três métodos de interpolação para a P (Quadro II.5) são essencialmente os mesmos que foram identificados para a ET_o , com o método da CMQ a apresentar os melhores resultados, seguido pelo método do IQD e com o VMP a ser o pior interpolador. No entanto, e em contraste com a ET_o , os erros médios na avaliação de exactidão interna são centrados em zero enquanto que na avaliação externa o erro médio tem um valor de 0.22 para o método do VMP, 0.23 para o IQD e 0.19 para a CMQ, apresentando um claro desvio do zero. Este resultado indica a tendência de subestimar os valores interpolados para as estações de controlo. Adicionalmente, a redução nos valores do erro relativo absoluto médio e do desvio padrão apresentados pelos métodos da CMQ e IQD, quando comparados com os resultados do método do VMP, é muito mais marcada na P do que para a ET_o .

Com base nos resultados da avaliação de exactidão dos dados interpolados (Quadro II.4 e Quadro II.5), pode-se concluir que a interpolação da ET_o produz valores muito exactos, com $\bar{E}_r$ a variar entre 0.10 a 0.15 devido à baixa variabilidade espacial desta variável; estes resultados contrastam com a P que apresenta de algum modo resultados insatisfatórios, com $\bar{E}_r$ a variar entre 0.44 e 0.60, devido à dificuldade destes métodos de interpolação em lidar com a sua elevada variabilidade espacial.

Quadro II.5 - Resultados da análise de resíduos para a precipitação (P), em que $\bar{E}$ é o erro médio, $|\bar{E}|$ é o erro absoluto médio, $\bar{E}_r$ é o erro relativo absoluto médio, e σ é o desvio padrão dos erros (valores em mm).

Estação	Métodos											
	Vizinho mais próximo (VMP)				Inverso do quadrado da distância (IQD)				Colocação por mínimos quadrados (CMQ)			
	$\bar{E}$	$ \bar{E} $	$\bar{E}_r$	σ	$\bar{E}$	$ \bar{E} $	$\bar{E}_r$	σ	$\bar{E}$	$ \bar{E} $	$\bar{E}_r$	σ
F. Alentejo	-0.15	0.61	0.54	3.36	-0.10	0.53	0.46	2.58	-0.09	0.50	0.44	2.15
Moura	-0.18	0.57	0.58	2.28	-0.21	0.57	0.59	1.98	-0.25	0.62	0.63	2.08
Elvas	0.12	0.84	0.64	3.16	0.11	0.82	0.62	3.07	0.07	0.78	0.59	2.87
Redondo	-0.19	0.93	0.77	3.82	-0.04	0.67	0.56	2.28	-0.06	0.64	0.53	2.08
Aljustrel	0.15	0.61	0.48	3.36	0.14	0.53	0.41	2.91	0.12	0.51	0.40	2.76
Alvalade	-0.13	0.58	0.50	2.96	-0.06	0.52	0.45	2.21	-0.07	0.54	0.47	2.12
Beja	-0.11	0.69	0.59	3.14	-0.01	0.53	0.45	2.15	-0.05	0.52	0.44	2.06
Évora	0.19	0.93	0.67	3.82	0.20	0.85	0.61	3.51	0.15	0.75	0.54	3.06
Odemira	0.15	0.93	0.71	3.44	0.12	0.90	0.68	3.10	0.06	0.85	0.65	2.79
Serpa	0.18	0.57	0.49	2.28	0.03	0.54	0.47	2.44	-0.02	0.56	0.49	2.39
Média aval. interna	0.00	0.73	0.60	3.16	0.02	0.65	0.53	2.62	-0.02	0.63	0.52	2.44
Viana do Alentejo	0.45	1.03	0.59	3.61	0.36	0.81	0.47	2.71	0.33	0.76	0.44	2.47
Estremoz	0.17	0.90	0.53	3.11	0.25	0.78	0.46	2.42	0.25	0.81	0.48	2.41
Castro Verde	0.10	0.87	0.62	3.02	0.13	0.77	0.55	2.55	0.07	0.70	0.50	2.28
Vidigueira	0.14	0.50	0.38	1.80	0.15	0.46	0.35	1.74	0.13	0.46	0.35	1.72
Média aval. externa	0.22	0.82	0.53	2.88	0.23	0.71	0.46	2.35	0.19	0.68	0.44	2.22

* (valores em fracção)

Os resultados do Coeficiente de variação (CV) apresentam os valores mais baixos para ET_o , sendo estes maiores no Verão do que no Inverno (Fig. II.4). A P apresenta os valores mais elevados de CV, especialmente durante os meses de Verão. A RH_{min} obteve valores elevados de CV durante o Verão, em contraste com baixos valores durante o Inverno. Quando se faz a média anual, a RH_{min} apresenta valores mais baixos do que a U_2 ($CV_{RH_{min}} = 0.146$; $CV_{U_2} = 0.197$), com os valores mensais de CV_{U_2} sendo bastante constantes ao longo do ano.

Cruzando a informação da Figura II.4 com a informação da Figura II.3 e dos Quadros II.4 e II.5 verifica-se que os métodos da CMQ e do IQD geram melhores resultados do que o método do VMP quando interpolam variáveis com valores elevados de CV. Quando as variáveis apresentam baixos valores de CV, i.e. para variáveis com uma baixa dispersão, como é o caso da ET_o , a diferença no desempenho dos métodos de interpolação é reduzida. Para variáveis com uma baixa variabilidade espacial, o método do VMP produz valores próximos dos observados e assim sendo os três métodos apresentam resultados muito semelhantes. Quando existe uma maior variabilidade espacial, e por conseguinte uma maior dificuldade em produzir valores interpolados precisos, os métodos da CMQ e o do IQD permitem lidar melhor com esta variabilidade, do que o VMP, produzindo melhores estimativas para um dado ponto.

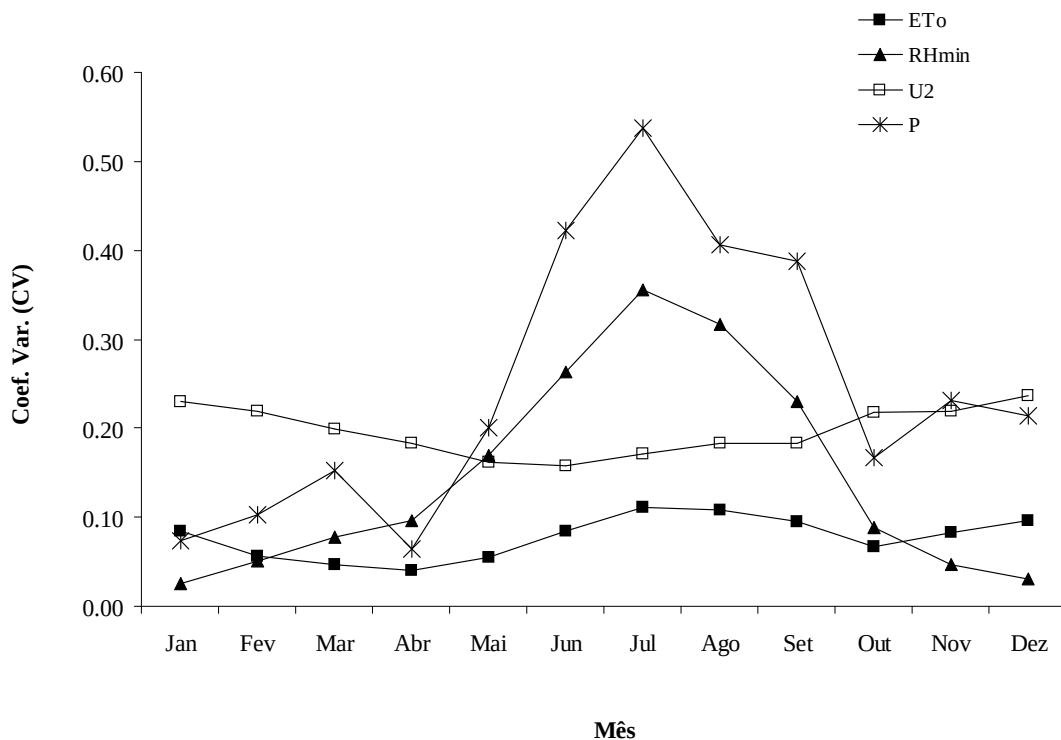


Figura II.4 – Valores mensais do coeficiente de variação (CV) para cada uma das variáveis estudadas (ET_o , RH_{min} , U_2 , e P).

Análise de regressão linear

A análise de regressão linear foi realizada para todas as estações e variáveis meteorológicas, tendo-se optado novamente por apenas apresentar os resultados relativos à ET_0 e P. Os resultados da análise de regressão linear para a ET_0 apresentaram valores de R^2 (média para todas as estações) que variam entre 0.959 para o VMP, 0.967 para o IQD, e 0.968 para o método da CMQ, com os valores de declive de 0.988 para o VMP, 0.992 para o IQD, e 1.002 para a CMQ. Para a precipitação, a média dos valores de R^2 variam entre 0.622 para o VMP, 0.702 para o IQD, e 0.739 para a CMQ. Os valores de declive apresentam para a precipitação, uma considerável diferença entre o método do VMP, com um valor de 0.843, e os métodos do IQD e da CMQ, com um valor de 0.995 e 1.030 respectivamente.

A análise de regressão dos dados interpolados de ET_0 e P para a estação de Beja é apresentada na Figura II.5 como um exemplo ilustrativo. Esta revela que o método VMP produziu a maior dispersão dos valores para ambas as variáveis e que os métodos do IQD e da CMQ apresentam resultados bastante semelhantes entre si (Fig. II.5). O coeficiente de determinação (R^2) aumenta do método do VMP para o do IQD e para o da CMQ. Daqui, pode-se concluir que o método da CMQ fornece uma maior confiança relativamente aos dados interpolados, uma vez que é o método que apresenta os menores desvios entre os dados medidos e os valores interpolados. O método do IQD apresenta resultados muito semelhantes ao método da CMQ (Fig. II.5) apesar de ser um método muito mais simples e muito mais fácil de implementar computacionalmente. A evapotranspiração de referência demonstra um bom grau de estabilidade nos resultados da interpolação, apresentando valores elevados de R^2 (0.978 a 0.991) e declives próximos de um para todos os métodos de interpolação (Fig. II.5a-c); contrastando com P, que exhibe uma maior dispersão dos valores interpolados, especialmente quando se utiliza o método do VMP, com um R^2 de 0.662 (Fig. II.5d-f). Estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos, em média, para todas as estações apresentadas anteriormente (Quadro II.2).

Os resultados obtidos pelo IQD são semelhantes aos alcançados por Spadavecchia e Williams (2009), confirmando o bom desempenho deste método para um grande número de aplicações tal como referido por Camargo et al. (2004). O método do IQD produz um considerável aumento na exactidão dos dados de entrada dos modelos quando comparado com os resultados obtidos pelo método dos polígonos de Thiessen (VMP).

Os resultados obtidos para a avaliação de exactidão dos dados meteorológicos interpolados foram semelhantes aos resultados geralmente descritos na literatura. O método estatístico (CMQ) mostrou melhores resultados do que os métodos mais simples, mas a diferença no

desempenho entre os métodos é muito pequena, especialmente quando se compara com o método do IQD, tal como constatado por diversos autores (Harcum e Loftis, 1987a, Li et al., 2004; Mardikis et al., 2005; Spadavecchia e Williams, 2009).

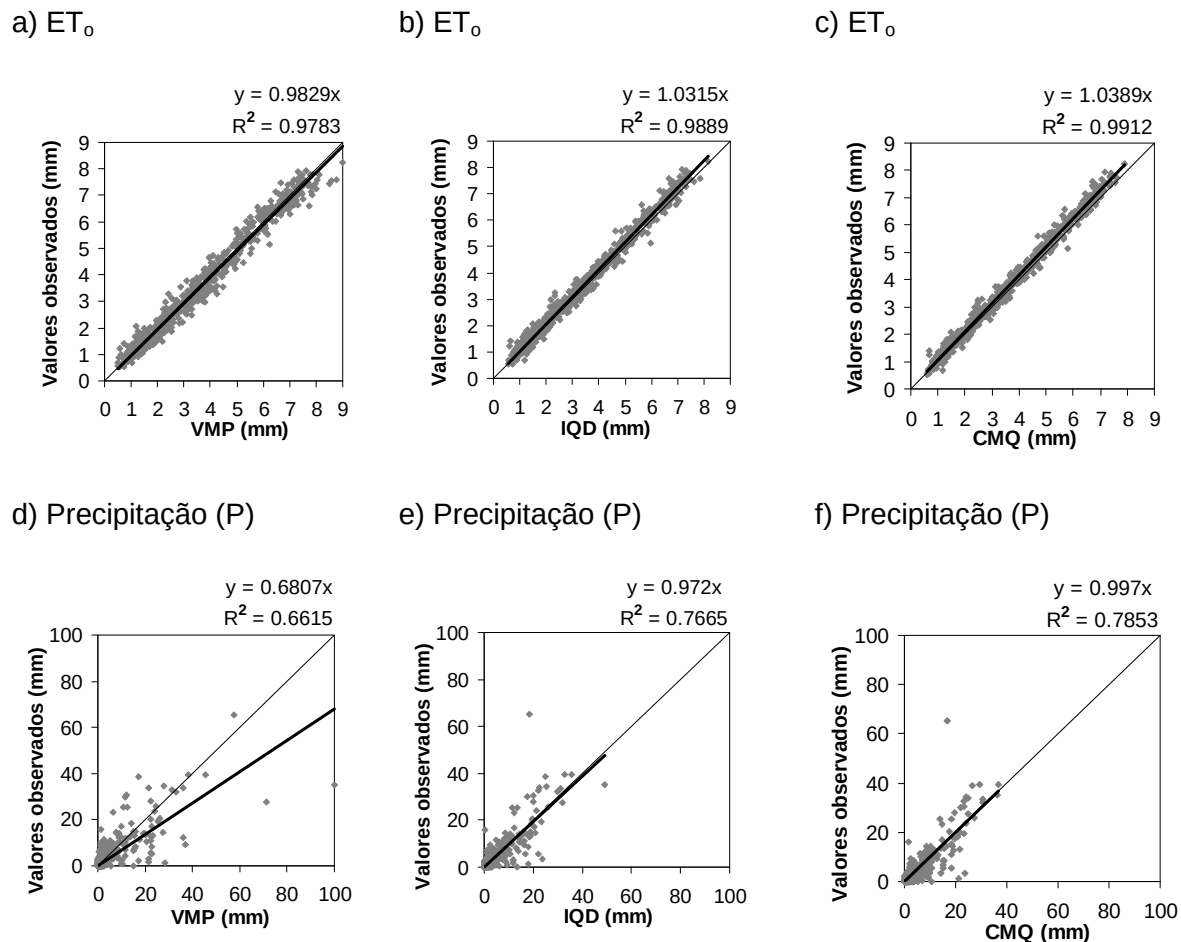


Figura II.5 – Diagrama de dispersão dos valores interpolados sobre os valores observados para a estação meteorológica de Beja. Os valores interpolados de ET_o foram obtidos com os métodos a) VMP, b) IQD, e c) CMQ. Para a precipitação os valores interpolados foram calculados com d) VMP, e) IQD, e f) CMQ.

Análise de variância (ANOVA)

Os três métodos de interpolação foram comparados utilizando o método estatístico da ANOVA. A análise de variância tem como objectivo testar as diferenças entre os valores interpolados e os valores medidos. A hipótese nula (H_0) é a de que as duas amostras são estatisticamente semelhantes. O número de rejeições da hipótese nula (séries de dados significativamente diferentes) foram contadas para todos os métodos e variáveis climáticas, para um nível de significância de 0.05. O método cujos dados interpolados melhor se

ajustam aos dados observados é o método que apresentar um menor número de rejeições de H_0 .

No Quadro II.6 apresentam-se os resultados obtidos para a ANOVA. Os resultados para a ET_0 mostram que o VMP e o IQD apresentam diferenças significativas em 7 das 14 estações consideradas. A CMQ tem apenas 5 rejeições apresentando, portanto, um melhor desempenho do que os outros métodos. No caso da P, os três métodos apresentam resultados iguais em todas as estações, com as séries de dados a serem consideradas como não significativamente diferentes. Este resultado deve-se ao facto de que a variância dentro de cada série de dados de P é maior do que a variância entre diferentes séries. Assim sendo, a aplicação da ANOVA às séries de precipitação é inconclusiva e não permite distinguir os 3 métodos. Para a U_2 , tanto o VMP como o IQD apresentaram 13 estações em que H_0 é rejeitado, e a CMQ apresenta 12 rejeições sendo o método que apresenta os melhores resultados para a variável U_2 , apesar de ser apenas marginalmente. A RH_{min} é a variável para a qual a ANOVA produz uma maior diferenciação entre os métodos. O VMP conta com 12 rejeições de H_0 , o IQD apresenta 9 e a CMQ apenas tem 6. Verifica-se assim que a CMQ é o método mais exacto.

O método da CMQ apresentou melhores resultados para o teste da ANOVA, para todas as variáveis e estações meteorológicas consideradas, o que demonstra a maior exactidão e fiabilidade deste método, o que vem reforçar os resultados obtidos pela análise de resíduos e pela análise de regressão linear.

Quadro II.6 – Resultados da análise de variância (ANOVA) em que se apresenta o valor p para as variáveis ET_0 , P, U_2 , e RH_{min} , para todas as estações da rede SAGRA, realçando-se a negrito as rejeições de H_0 para um nível de significância de 0.05.

Estações	ET_0			P			U_2			RH_{min}		
	VMP	IQD	CMQ	VMP	IQD	CMQ	VMP	IQD	CMQ	VMP	IQD	CMQ
F. Alentejo	0.000	0.000	0.002	0.472	0.591	0.596	0.000	0.000	0.000	0.018	0.606	0.685
Moura	0.205	0.053	0.138	0.229	0.125	0.063	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Elvas	0.105	0.489	0.206	0.476	0.479	0.676	0.000	0.000	0.024	0.000	0.000	0.000
Redondo	0.000	0.002	0.002	0.276	0.779	0.700	0.000	0.000	0.000	0.000	0.916	0.139
Aljustrel	0.000	0.018	0.051	0.374	0.411	0.472	0.000	0.000	0.000	0.018	0.001	0.000
Alvalade	0.681	0.163	0.133	0.451	0.715	0.643	0.071	0.000	0.000	0.000	0.014	0.137
Beja	0.625	0.287	0.195	0.532	0.927	0.733	0.001	0.000	0.000	0.000	0.153	0.808
Évora	0.000	0.011	0.211	0.276	0.242	0.382	0.000	0.003	0.002	0.000	0.000	0.009
Odemira	0.000	0.000	0.004	0.346	0.437	0.714	0.001	0.253	0.197	0.000	0.000	0.000
Serpa	0.205	0.733	0.898	0.229	0.837	0.870	0.000	0.013	0.242	0.000	0.009	1.000
Viana do Alentejo	0.003	0.474	0.288	0.057	0.108	0.148	0.000	0.000	0.000	0.034	0.013	0.089
Estremoz	0.000	0.000	0.000	0.467	0.237	0.250	0.000	0.000	0.000	0.936	0.006	0.040
Castro Verde	0.080	0.045	0.036	0.770	0.683	0.817	0.000	0.000	0.000	0.597	0.535	0.729
Vidigueira	0.270	0.452	0.510	0.688	0.647	0.696	0.000	0.000	0.000	0.041	0.112	0.076
Número de rejeições de H_0	7	7	5	0	0	0	13	13	12	12	9	6

II.3.3. Análise da incerteza do *output* do modelo de simulação da rega IrrigRotation

Foi analisado o efeito dos três métodos de interpolação nos resultados do modelo de simulação do balanço hídrico. Utilizando os dados interpolados produzidos pelos três métodos de interpolação, para os locais das estações meteorológicas listadas no Quadro II.7, calcularam-se as necessidades de rega (NRg) utilizando o programa IrrigRotation (Rolim e Teixeira, 2008). As NRg calculadas com os dados interpolados foram comparadas com as NRg calculadas com os valores observados nas estações meteorológicas. O Quadro II.7 mostra os valores médios das necessidades de rega calculadas para a cultura do Milho para o período de 2003-2008, demonstrando que a variabilidade espacial tem um efeito considerável nos resultados do modelo IrrigRotation. O método do VMP introduz um erro relativo médio de 16% nas NRg, o que corresponde aproximadamente a 79 mm de altura de água em cada campanha de rega. O método do IQD apresentou um erro relativo de 17% (86 mm) tendo sido marginalmente pior do que o método do VMP. O método da CMQ alcançou um viés médio de 14% (67 mm), o que constitui uma ligeira melhoria relativamente aos métodos do VMP e do IQD. Em média, a diferença entre os três métodos foi muito reduzida, com a diferença na precisão dos métodos a variar entre 1% a 3%, o que corresponde a 7 a 19 mm para a toda a campanha de rega.

Estes valores são muito pequenos quando comparados com as incertezas e erros no cálculo das NRg. Assim, sob um ponto de vista prático, os três métodos são equivalentes, com os métodos da CMQ e do IQD a não apresentarem uma melhoria clara nos resultados do modelo IrrigRotation.

Quadro II.7 – Necessidades de rega (NRg) para a cultura do Milho calculadas pelo modelo do balanço hídrico IrrigRotation (média de 2003-2008)^[a].

Estações	Simulado com dados observados NRg (mm)	Métodos								
		VMP			IQD			CMQ		
		NRg (mm)	$ \Delta\text{NRg} $ (mm)	$ \Delta\text{NRg} /\text{NRg}$ [b]	NRg (mm)	$ \Delta\text{NRg} $ (mm)	$ \Delta\text{NRg} /\text{NRg}$ [b]	NRg (mm)	$ \Delta\text{NRg} $ (mm)	$ \Delta\text{NRg} /\text{NRg}$ [b]
F. Alentejo	496	571	76	0.16	552	56	0.12	550	54	0.12
Odemira	373	539	165	0.45	505	131	0.36	526	153	0.41
Aljustrel	571	496	76	0.13	507	64	0.11	528	43	0.08
Évora	492	592	101	0.21	532	40	0.09	531	39	0.08
Beja	599	571	33	0.05	423	176	0.28	483	116	0.19
Redondo	592	492	104	0.18	469	127	0.21	523	72	0.12
Elvas	555	592	45	0.07	495	63	0.11	526	31	0.05
Alvalade	539	571	33	0.06	523	31	0.06	528	27	0.05
Média	527	553	79	0.16	501	86	0.17	525	67	0.14

^[a] Erro absoluto médio $|\Delta\text{NRg}|$ e erro relativo absoluto médio $|\Delta\text{NRg}|/\text{NRg}$ entre as NRg calculadas com os dados interpolados e as NRg calculadas com os dados observados.

^[b] NRg simuladas com dados observados.

Existiram seis estações onde o método da CMQ teve os valores mais baixos do erro relativo, enquanto que o método do IQD teve duas e o método do VMP teve apenas uma (Beja). O método da CMQ nunca apresentou o valor mais elevado do erro relativo para nenhuma estação, enquanto que o método do IQD apresentou o valor mais elevado para quatro estações e o VMP para cinco. Quanto aos valores extremos, a estação de Odemira obteve o valor máximo do erro relativo, 45% (165 mm), seguida pela estação de Beja com um erro relativo de 28%, que corresponde ao valor mais elevado do erro absoluto médio, 176 mm. A estação de Alvalade apresentou o valor mínimo para o erro relativo, 5% (27 mm). É evidente que o valor deste erro que varia entre 27 e 176 mm de altura de água é relevante para a gestão da rega e não pode ser negligenciado.

Os resultados também mostram que a influência da variabilidade espacial nos resultados modelos de simulação da rega são devidos em grande parte à variabilidade da ET_0 , uma vez que o erro relativo médio das NRg (Quadro II.7) é da mesma ordem de grandeza do que o erro relativo médio da ET_0 (Quadro II.4), o que é normal no clima Mediterrâneo onde a época de crescimento da cultura do Milho ocorre durante a estação seca, quando a precipitação é quase inexistente. Para outros climas, ou outras culturas em que a rega ocorra numa altura em que a precipitação é maior durante o período de desenvolvimento da cultura, é esperado um aumento no valor do erro e uma maior diferenciação entre os métodos.

Este estudo avaliou a influência de diferentes métodos de interpolação no cálculo das NRg. Constatou-se que os erros nas NRg para a região do Alentejo são consideráveis, com desvios de aproximadamente 14% a 17% e com um impacto significativo na gestão da rega. Estes resultados são úteis nos esforços para integrar os modelos de simulação do balanço hídrico em ambiente SIG (Todorovic e Steduto, 2003; Fortes et al., 2005; Rolim e Teixeira, 2008) onde a interpolação de dados meteorológicos é necessária.

O método da CMQ foi utilizado em condições bastante desfavoráveis, com uma baixa densidade de pontos de amostragem disponível para estimar os parâmetros das funções covariância, e ainda assim produziu os melhores resultados. Na continuação deste trabalho, seria interessante avaliar se a aplicação deste *software* a uma rede com uma maior densidade de estações meteorológicas iria permitir uma maior diferenciação entre a CMQ e os outros métodos (VMP e IQD). Para uma rede com um maior número de estações, pode-se esperar que o método da CMQ alcance melhores resultados e uma maior diferenciação do método do IQD. Contudo, com um número crescente de estações e com um aumento da densidade de estações, todos os métodos de interpolação irão trabalhar melhor, e vários estudos mostraram que mesmo em condições mais adequadas para os métodos estatísticos, a diferença para o método do IQD é reduzida (Mardikis et al., 2005;

Spadavecchia e Williams, 2009). Assim, é difícil prever qual será o desempenho do método da CMQ nestas circunstâncias.

O método da CMQ necessita de uma análise estatística dos dados e a estimação da covariância para cada variável climática, melhorando o conhecimento que se tem do comportamento espacial de cada variável climática. Utilizando este método, é possível ter em conta a variabilidade sazonal das variáveis climáticas utilizando diferentes parâmetros de covariância para cada um dos meses do ano. Contudo, os resultados mostram que os métodos da CMQ e do IQD apresentam precisões semelhantes e que o método da CMQ é muito mais exigente computacionalmente e necessita de calibração antes de ser utilizado, o que é uma grande desvantagem deste método. Também requer um número elevado de estações para calibrar adequadamente as funções de covariância, sendo que na prática muitas vezes não se dispõe de um grande número de estações meteorológicas.

II.4. Conclusões

Este trabalho consistiu na avaliação do desempenho dos métodos de interpolação implementados no programa Interpolador. Foi avaliado o desempenho dos métodos do VMP, do IQD e da CMQ na interpolação dos valores de quatro variáveis agrometeorológicas utilizadas na modelação das necessidades hídricas das culturas. Em média as diferenças entre os três métodos foi bastante reduzida. A avaliação de exactidão mostrou que o método da CMQ foi quem apresentou o melhor desempenho, para todas as análises efectuadas, sendo seguido pelo método do IQD, tendo estes dois métodos apresentado apenas uma ligeira melhoria na exactidão dos dados meteorológicos interpolados quando comparados com os resultados do método do VMP. A precipitação apresentou um desvio bastante elevado para os valores interpolados por qualquer dos métodos, sendo a qualidade dos dados interpolados bastante baixa.

Os resultados da avaliação de exactidão das NRg mostrou que o erro introduzido pela variabilidade dos dados climáticos foi considerável e não deve ser negligenciada. As NRg para a cultura do milho tiveram um erro relativo em média de 14% para a CMQ, 16% para o VMP, e 17% para o IQD, o que corresponde, respectivamente, a 67, 79, e 86 mm de desvio. Apesar das pequenas diferenças entre os desempenhos dos métodos de interpolação, que variaram entre 1% a 3%, o impacto da média do erro relativo nas NRg foi considerável devido ao volume de água que representa. Estes valores dos desvios médios (67 a 86 mm) podem equivaler a várias regas, dependendo do método de rega considerado. O máximo valor do erro relativo, 45% (165 mm), foi obtido para a estação de Odemira e o mínimo valor do erro relativo, 5% (27 mm), foi alcançado para Alvalade. O impacto da variabilidade

espacial dos dados climáticos nos resultados das simulações dos modelos da rega é devido principalmente à variabilidade da ET_o , uma vez que o erro relativo absoluto médio das NRG é da mesma ordem de grandeza do erro relativo absoluto médio da ET_o , o que é normal num clima Mediterrânico onde a época de crescimento das culturas de Primavera-Verão ocorre durante a época seca, na qual a precipitação é praticamente inexistente.

Estes resultados são importantes para a agricultura de regadio, em especial para ambientes em que exista escassez de água. Estes indicam o potencial para ocorrerem erros consideráveis nos dados meteorológicos de entrada dos modelos devido à distância entre a parcela ser regada e a estação meteorológica. Em aplicações no campo, estes erros podem representar o desperdício de grandes quantidades de água e custos de rega acrescidos. O conhecimento deste erro para um dado local e a utilização de dados com uma maior qualidade podem permitir a poupança de água em casos de sobrestimação ou evitar perdas de produção no caso de subestimação.

Apesar dos bons resultados alcançados pelo método da CMQ, este foi utilizado em condições bastante adversas devido ao número reduzido de pontos (apenas 10) disponíveis para efectuar a calibração das funções covariância para cada variável meteorológica. Para utilizar o método da CMQ, é necessário determinar os parâmetros da função de covariância, o que requer mais tempo e esforço do que a utilização dos métodos mais comuns do VMP ou do IQD. O método do IQD gera resultados muito próximos dos do método da CMQ, e é um método computacionalmente simples que não necessita de calibração para ser utilizado. Portanto, o método do IQD parece ser um método muito interessante para a interpolação dos dados agrometeorológicos fornecidos como dados de entrada aos modelos de simulação da rega.

Na continuação deste trabalho, teria interesse no futuro desenvolver trabalhos com o objectivo de avaliar a aplicação do *software* Interpolador a diferentes condições climáticas, para outras culturas e para redes de estações meteorológicas com um maior número de estações.

Anexo III – Listagem dos ficheiros extraídos do projecto PRUDENCE

Quadro III.1 – Lista dos ficheiros extraídos do projecto PRUDENCE.

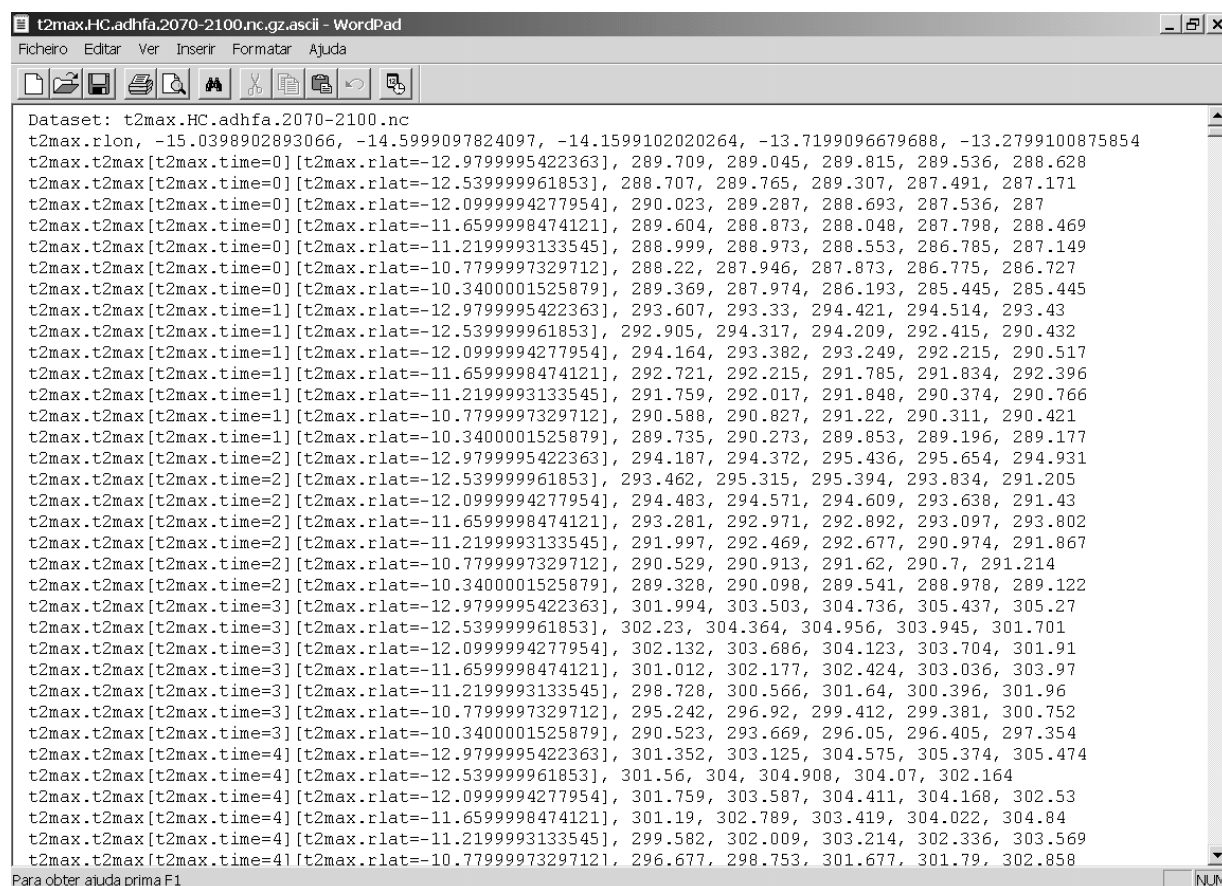
Modelo	Cenário	Ficheiros
HadRM3P	Controlo adeha	LWnet.HC.adeha.1960-1990.nc.gz.ascii
		SWnet.HC.adeha.1960-1990.nc.gz.ascii
		t2m.HC.adeha.1960-1990.nc.gz.ascii
		t2min.HC.adeha.1960-1990.nc.gz.ascii
		t2max.HC.adeha.1960-1990.nc.gz.ascii
		precip.HC.adeha.1960-1990.nc.gz.ascii
		rh2m.HC.adeha.1960-1990.nc.gz.ascii
		w10m.HC.adeha.1960-1990.nc.gz.ascii
	A2 adhfa	LWnet.HC.adhfa.2070-2100.nc.gz.ascii
		SWnet.HC.adhfa.2070-2100.nc.gz.ascii
		t2m.HC.adhfa.2070-2100.nc.gz.ascii
		t2m.HC.adhfa.2070-2100.nc.gz.ascii
		t2max.HC.adhfa.2070-2100.nc.gz.ascii
		precip.HC.adhfa.2070-2100.nc.gz.ascii
		rh2m.HC.adhfa.2070-2100.nc.gz.ascii
		w10m.HC.adhfa.2070-2100.nc.gz.ascii
	Controlo adehb	LWnet.HC.adehb.1960-1990.nc.gz.ascii
		SWnet.HC.adehb.1960-1990.nc.gz.ascii
		t2m.HC.adehb.1960-1990.nc.gz.ascii
		t2min.HC.adehb.1960-1990.nc.gz.ascii
		t2max.HC.adehb.1960-1990.nc.gz.ascii
		precip.HC.adehb.1960-1990.nc.gz.ascii
		rh2m.HC.adehb.1960-1990.nc.gz.ascii
		w10m.HC.adehb.1960-1990.nc.gz.ascii
	A2 adhfe	LWnet.HC.adhfe.2070-2100.nc.gz.ascii
		SWnet.HC.adhfe.2070-2100.nc.gz.ascii
		t2m.HC.adhfe.2070-2100.nc.gz.ascii
		t2min.HC.adhfe.2070-2100.nc.gz.ascii
		t2max.HC.adhfe.2070-2100.nc.gz.ascii
		precip.HC.adhfe.2070-2100.nc.gz.ascii
		rh2m.HC.adhfe.2070-2100.nc.gz.ascii
		w10m.HC.adhfe.2070-2100.nc.gz.ascii
	Controlo adehc	LWnet.HC.adehc.1960-1990.nc.gz.ascii
		SWnet.HC.adehc.1960-1990.nc.gz.ascii
		t2m.HC.adehc.1960-1990.nc.gz.ascii
		t2min.HC.adehc.1960-1990.nc.gz.ascii
		t2max.HC.adehc.1960-1990.nc.gz.ascii
		precip.HC.adehc.1960-1990.nc.gz.ascii
		rh2m.HC.adehc.1960-1990.nc.gz.ascii
		w10m.HC.adehc.1960-1990.nc.gz.ascii

(continua)

Quadro III.1 – Lista dos ficheiros extraídos do projecto PRUDENCE (continuação).

Modelo	Cenário	Ficheiros
HadRM3P	A2 adhff	LWnet.HC.adhff.2070-2100.nc.gz.ascii
		SWnet.HC.adhff.2070-2100.nc.gz.ascii
		t2m.HC.adhff.2070-2100.nc.gz.ascii
		t2min.HC.adhff.2070-2100.nc.gz.ascii
		t2max.HC.adhff.2070-2100.nc.gz.ascii
		precip.HC.adhff.2070-2100.nc.gz.ascii
		rh2m.HC.adhff.2070-2100.nc.gz.ascii
		w10m.HC.adhff.2070-2100.nc.gz.ascii
	B2 adhfd	LWnet.HC.adhfd.2070-2100.nc.gz.ascii
		precip.HC.adhfd.2070-2100.nc.gz.ascii
		t2m.HC.adhfd.2070-2100.nc.gz.ascii
		t2min.HC.adhfd.2070-2100.nc.gz.ascii
		t2max.HC.adhfd.2070-2100.nc.gz.ascii
		precip.HC.adhfd.2070-2100.nc.gz.ascii
		rh2m.HC.adhfd.2070-2100.nc.gz.ascii
		w10m.HC.adhfd.2070-2100.nc.gz.ascii
HIRHAMh	Controlo F25	LWnet.DMI.F25.nc.gz.ascii
		SWnet.DMI.F25.nc.gz.ascii
		t2m.DMI.F25.nc.gz.ascii
		t2min.DMI.F25.nc.gz.ascii
		t2max.DMI.F25.nc.gz.ascii
		precip.DMI.F25.nc.gz.ascii
		td2m.DMI.F25.nc.gz.ascii
		w10m.DMI.F25.nc.gz.txt.ascii
	A2 S25	LWnet.DMI.S25.nc.gz.ascii
		SWnet.DMI.S25.nc.gz.ascii
		t2m.DMI.S25.nc.gz.ascii
		t2min.DMI.S25.nc.gz.ascii
		t2max.DMI.S25.nc.gz.ascii
		precip.DMI.S25.nc.gz.ascii
		td2m.DMI.S25.nc.gz.ascii
		w10m.DMI.S25.nc.gz.ascii
HIRHAMhh	Controlo F12	LWnet.DMI.F12.nc.gz.ascii
		SWnet.DMI.F12.nc.gz.ascii
		t2m.DMI.F12.nc.gz.ascii
		t2min.DMI.F12.nc.gz.ascii
		t2max.DMI.F12.nc.gz.ascii
		precip.DMI.F12.nc.gz.ascii
		td2m.DMI.F12.nc.gz.ascii
		w10m.DMI.F12.nc.gz.ascii
	A2 S12	LWnet.DMI.S12.nc.gz.ascii
		SWnet.DMI.S12.nc.gz.ascii
		t2m.DMI.S12.nc.gz.ascii
		t2min.DMI.S12.nc.gz.ascii
		t2max.DMI.S12.nc.gz.ascii
		precip.DMI.S12.nc.gz.ascii
		td2m.DMI.S12.nc.gz.ascii
		w10m.DMI.S12.nc.gz.ascii

Anexo IV – Formato dos dados dos modelos RCM



```

Dataset: t2max.HC.adhfa.2070-2100.nc
t2max.rlon, -15.0398902893066, -14.5999097824097, -14.1599102020264, -13.7199096679688, -13.2799100875854
t2max.t2max[t2max.time=0][t2max.rlat=-12.9799995422363], 289.709, 289.045, 289.815, 289.536, 288.628
t2max.t2max[t2max.time=0][t2max.rlat=-12.539999961853], 288.707, 289.765, 289.307, 287.491, 287.171
t2max.t2max[t2max.time=0][t2max.rlat=-12.0999994277954], 290.023, 289.287, 288.693, 287.536, 287
t2max.t2max[t2max.time=0][t2max.rlat=-11.6599998474121], 289.604, 288.873, 288.048, 287.798, 288.469
t2max.t2max[t2max.time=0][t2max.rlat=-11.2199993133545], 288.999, 288.973, 288.553, 286.785, 287.149
t2max.t2max[t2max.time=0][t2max.rlat=-10.7799997329712], 288.22, 287.946, 287.873, 286.775, 286.727
t2max.t2max[t2max.time=0][t2max.rlat=-10.3400001525879], 289.369, 287.974, 286.193, 285.445, 285.445
t2max.t2max[t2max.time=1][t2max.rlat=-12.9799995422363], 293.607, 293.33, 294.421, 294.514, 293.43
t2max.t2max[t2max.time=1][t2max.rlat=-12.539999961853], 292.905, 294.317, 294.209, 292.415, 290.432
t2max.t2max[t2max.time=1][t2max.rlat=-12.0999994277954], 294.164, 293.382, 293.249, 292.215, 290.517
t2max.t2max[t2max.time=1][t2max.rlat=-11.6599998474121], 292.721, 292.215, 291.785, 291.834, 292.396
t2max.t2max[t2max.time=1][t2max.rlat=-11.2199993133545], 291.759, 292.017, 291.848, 290.374, 290.766
t2max.t2max[t2max.time=1][t2max.rlat=-10.7799997329712], 290.588, 290.827, 291.22, 290.311, 290.421
t2max.t2max[t2max.time=1][t2max.rlat=-10.3400001525879], 289.735, 290.273, 289.853, 289.196, 289.177
t2max.t2max[t2max.time=2][t2max.rlat=-12.9799995422363], 294.187, 294.372, 295.436, 295.654, 294.931
t2max.t2max[t2max.time=2][t2max.rlat=-12.539999961853], 293.462, 295.315, 295.394, 293.834, 291.205
t2max.t2max[t2max.time=2][t2max.rlat=-12.0999994277954], 294.483, 294.571, 294.609, 293.638, 291.43
t2max.t2max[t2max.time=2][t2max.rlat=-11.6599998474121], 293.281, 292.971, 292.892, 293.097, 293.802
t2max.t2max[t2max.time=2][t2max.rlat=-11.2199993133545], 291.997, 292.469, 292.677, 290.974, 291.867
t2max.t2max[t2max.time=2][t2max.rlat=-10.7799997329712], 290.529, 290.913, 291.62, 290.7, 291.214
t2max.t2max[t2max.time=2][t2max.rlat=-10.3400001525879], 289.328, 290.098, 289.541, 288.978, 289.122
t2max.t2max[t2max.time=3][t2max.rlat=-12.9799995422363], 301.994, 303.503, 304.736, 305.437, 305.27
t2max.t2max[t2max.time=3][t2max.rlat=-12.539999961853], 302.23, 304.364, 304.956, 303.945, 301.701
t2max.t2max[t2max.time=3][t2max.rlat=-12.0999994277954], 302.132, 303.686, 304.123, 303.704, 301.91
t2max.t2max[t2max.time=3][t2max.rlat=-11.6599998474121], 301.012, 302.177, 302.424, 303.036, 303.97
t2max.t2max[t2max.time=3][t2max.rlat=-11.2199993133545], 298.728, 300.566, 301.64, 300.396, 301.96
t2max.t2max[t2max.time=3][t2max.rlat=-10.7799997329712], 295.242, 296.92, 299.412, 299.381, 300.752
t2max.t2max[t2max.time=3][t2max.rlat=-10.3400001525879], 290.523, 293.669, 296.05, 296.405, 297.354
t2max.t2max[t2max.time=4][t2max.rlat=-12.9799995422363], 301.352, 303.125, 304.575, 305.374, 305.474
t2max.t2max[t2max.time=4][t2max.rlat=-12.539999961853], 301.56, 304, 304.908, 304.07, 302.164
t2max.t2max[t2max.time=4][t2max.rlat=-12.0999994277954], 301.759, 303.587, 304.411, 304.168, 302.53
t2max.t2max[t2max.time=4][t2max.rlat=-11.6599998474121], 301.19, 302.789, 303.419, 304.022, 304.84
t2max.t2max[t2max.time=4][t2max.rlat=-11.2199993133545], 299.582, 302.009, 303.214, 302.336, 303.569
t2max.t2max[t2max.time=4][t2max.rlat=-10.7799997329712], 296.677, 298.753, 301.677, 301.79, 302.858

```

Figura IV.1 – Exemplo de um ficheiro descarregado do arquivo de dados do projecto PRUDENCE em que se pode observar o formato dos dados dos ficheiros produzidos pelos modelos RCM.

Anexo V – Ficheiros do programa AlterClim

V.1. Ficheiros relativos aos dados de entrada

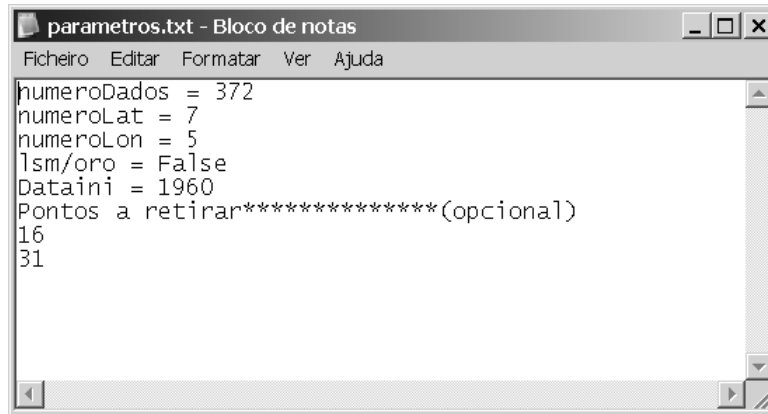


Figura V.1 – Ficheiro parâmetros.txt que permite configurar o programa AlterClim para cada uma das grelhas dos modelos climáticas.

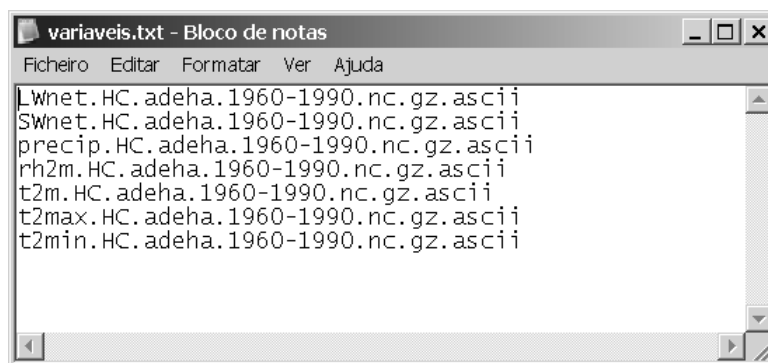


Figura V.2 - Ficheiro variaveis.txt em que se listam todos ficheiros das variáveis climáticas que o programa AlterClim deverá ler.

```

Dataset: precip.HC.adeha.1960-1990.nc
precip.rlon, -15.0398902893066, -14.5999097824097, -14.1599102020264, -13.7199096679688, -13.2799100875854
precip.precip[precip.time=0][precip.rlat=-12.9799995422363], 0.272995, 0.311978, 0.113357, 0.10447, 0.120076
precip.precip[precip.time=0][precip.rlat=-12.539999961853], 0.393087, 0.0767104, 0.0479259, 0.104348, 0.135135
precip.precip[precip.time=0][precip.rlat=-12.0999994277954], 0.139534, 0.128275, 0.0317821, 0.0626764, 0.0905633
precip.precip[precip.time=0][precip.rlat=-11.6599998474121], 0.155747, 0.172061, 0.1332, 0.0767966, 0.0574487
precip.precip[precip.time=0][precip.rlat=-11.2199993133545], 0.1798, 0.120373, 0.0596964, 0.096912, 0.0844169
precip.precip[precip.time=0][precip.rlat=-10.7799997329712], 0.227582, 0.140138, 0.0494246, 0.0752073, 0.048932
precip.precip[precip.time=0][precip.rlat=-10.3400001525879], 0.11439, 0.0837607, 0.15942, 0.123044, 0.0788113
precip.precip[precip.time=1][precip.rlat=-12.9799995422363], 0.00926209, 0.0182643, 0.00216185, 0.00498413, 0.0360493
precip.precip[precip.time=1][precip.rlat=-12.539999961853], 0.0680135, 0.0260051, 0.0336387, 0.018784, 0.156314
precip.precip[precip.time=1][precip.rlat=-12.0999994277954], 0.0138799, 0.0241128, 0.0361076, 0.0430806, 0.145366
precip.precip[precip.time=1][precip.rlat=-11.6599998474121], 0.0477253, 0.0589129, 0.09716, 0.0791199, 0.0731057
precip.precip[precip.time=1][precip.rlat=-11.2199993133545], 0.109054, 0.0964757, 0.077415, 0.239724, 0.118293
precip.precip[precip.time=1][precip.rlat=-10.7799997329712], 0.243682, 0.243024, 0.179992, 0.215021, 0.147385
precip.precip[precip.time=1][precip.rlat=-10.3400001525879], 0.405143, 0.354895, 0.962596, 0.596862, 0.322074
precip.precip[precip.time=2][precip.rlat=-12.9799995422363], 2.03516e-05, 0.0126198, 0.0181531, 0.0491859, 0.0886602
precip.precip[precip.time=2][precip.rlat=-12.539999961853], 0.00131827, 0.00134392, 0.00790172, 0.00857969, 0.00141957
precip.precip[precip.time=2][precip.rlat=-12.0999994277954], 0.00290601, 0.0112827, 0.00819626, 0.0171048, 5.39714e-05
precip.precip[precip.time=2][precip.rlat=-11.6599998474121], 0.0100096, 0.0283952, 0.0131848, 0.00596263, 0.0107175
precip.precip[precip.time=2][precip.rlat=-11.2199993133545], 0.0230493, 0.0227368, 0.014613, 0.00710555, 0.000265003
precip.precip[precip.time=2][precip.rlat=-10.7799997329712], 0.0416257, 0.0367255, 0.0239081, 0.00318816, 0.00154694
precip.precip[precip.time=2][precip.rlat=-10.3400001525879], 0.06158, 0.127569, 0.0180207, 0.001855, 0.000123655
precip.precip[precip.time=3][precip.rlat=-12.9799995422363], 0.0964966, 0.199488, 0.152711, 0.285264, 0.663092
precip.precip[precip.time=3][precip.rlat=-12.539999961853], 0.276105, 0.18326, 0.325789, 0.547752, 1.23704
precip.precip[precip.time=3][precip.rlat=-12.0999994277954], 0.235958, 0.408509, 0.485424, 0.514324, 0.993761
precip.precip[precip.time=3][precip.rlat=-11.6599998474121], 0.454549, 0.606773, 0.568694, 0.586148, 0.621319
precip.precip[precip.time=3][precip.rlat=-11.2199993133545], 0.753384, 0.621512, 0.452457, 1.15127, 1.32196
precip.precip[precip.time=3][precip.rlat=-10.7799997329712], 0.90067, 0.770264, 0.453896, 1.23758, 1.29878
precip.precip[precip.time=3][precip.rlat=-10.3400001525879], 0.396381, 0.798972, 1.27848, 1.61803, 1.51899
precip.precip[precip.time=4][precip.rlat=-12.9799995422363], 0.320037, 0.378452, 0.193679, 0.202526, 0.535772
precip.precip[precip.time=4][precip.rlat=-12.539999961853], 0.535597, 0.423211, 0.363381, 0.564332, 0.919961
precip.precip[precip.time=4][precip.rlat=-12.0999994277954], 0.388078, 0.493748, 0.35427, 0.465333, 0.69051
precip.precip[precip.time=4][precip.rlat=-11.6599998474121], 0.48543, 0.696031, 0.542364, 0.469784, 0.420035
precip.precip[precip.time=4][precip.rlat=-11.2199993133545], 0.643299, 0.682847, 0.422914, 0.697091, 0.624662
precip.precip[precip.time=4][precip.rlat=-10.7799997329712], 0.973426, 0.745479, 0.523135, 0.563038, 0.525861
precip.precip[precip.time=4][precip.rlat=-10.3400001525879], 0.436907, 1.13963, 0.973299, 0.762076, 0.546258
precip.precip[precip.time=5][precip.rlat=-12.9799995422363], 0.00376444, 0.00913344, 0.00796712, 0.0089676, 0.00973486
precip.precip[precip.time=5][precip.rlat=-12.539999961853], 0.0199957, 0.00289757, 0.00743848, 0.0246077, 0.129144
precip.precip[precip.time=5][precip.rlat=-12.0999994277954], 0.00507307, 0.0192053, 0.0247267, 0.0327035, 0.121072
precip.precip[precip.time=5][precip.rlat=-11.6599998474121], 0.0170946, 0.0491681, 0.0553371, 0.0768883, 0.0474214
precip.precip[precip.time=5][precip.rlat=-11.2199993133545], 0.0679727, 0.119691, 0.0663343, 0.223299, 0.136373
precip.precip[precip.time=5][precip.rlat=-10.7799997329712], 0.132348, 0.198998, 0.0889149, 0.181113, 0.211954
precip.precip[precip.time=5][precip.rlat=-10.3400001525879], 0.123832, 0.627439, 0.261092, 0.237368, 0.240928
precip.precip[precip.time=6][precip.rlat=-12.9799995422363], 0.000419722, 0.000119544, 0.00751142, 0.0175379, 0.0103083

```

Figura V.3 – Ficheiro precip.HC.adeha.1960-1990.nc.gz.ascii produzido pelo modelo HadRM3P relativo à precipitação simulada para o cenário de controlo.

```

Dataset: lsm.HC.nc
lat.rlon, -15.0398902893066, -14.5999097824097, -14.1599102020264, -13.7199096679688, -13.2799100875854
lat.lat[lat.rlat=-12.9799995422363], 37.1058, 37.2142, 37.3196, 37.4222, 37.5214
lat.lat[lat.rlat=-12.539999961853], 37.531, 37.6402, 37.7464, 37.8496, 37.9497
lat.lat[lat.rlat=-12.0999994277954], 37.956, 38.0661, 38.1731, 38.2777, 38.3779
lat.lat[lat.rlat=-11.6599998474121], 38.3808, 38.4917, 38.5996, 38.7043, 38.806
lat.lat[lat.rlat=-11.2199993133545], 38.8055, 38.9172, 39.0259, 39.1314, 39.2339
lat.lat[lat.rlat=-10.7799997329712], 39.23, 39.3426, 39.452, 39.5584, 39.6616
lat.lat[lat.rlat=-10.3400001525879], 39.6543, 39.7677, 39.878, 39.9852, 40.0892
lon.rlon, -15.0398902893066, -14.5999097824097, -14.1599102020264, -13.7199096679688, -13.2799100875854
lon.lon[lon.rlat=-12.9799995422363], -8.4852, -7.96469, -7.44241, -6.91849, -6.39301
lon.lon[lon.rlat=-12.539999961853], -8.62741, -8.10321, -7.5773, -7.04971, -6.52039
lon.lon[lon.rlat=-12.0999994277954], -8.7713, -8.24341, -7.71381, -7.18231, -6.6492
lon.lon[lon.rlat=-11.6599998474121], -8.9169, -8.38531, -7.85181, -7.31659, -6.7796
lon.lon[lon.rlat=-11.2199993133545], -9.06421, -8.52881, -7.99149, -7.45239, -6.9115
lon.lon[lon.rlat=-10.7799997329712], -9.2132, -8.67401, -8.1329, -7.5899, -7.0451
lon.lon[lon.rlat=-10.3400001525879], -9.36411, -8.82101, -8.27609, -7.72919, -7.1803
lsm.rlon, -15.0398902893066, -14.5999097824097, -14.1599102020264, -13.7199096679688, -13.2799100875854
lsm.lsm[lsm.time=-1][lsm.rlat=-12.9799995422363], 1, 1, 1, 1, 1
lsm.lsm[lsm.time=-1][lsm.rlat=-12.539999961853], 1, 1, 1, 1, 1
lsm.lsm[lsm.time=-1][lsm.rlat=-12.0999994277954], 1, 1, 1, 1, 1
lsm.lsm[lsm.time=-1][lsm.rlat=-11.6599998474121], 1, 1, 1, 1, 1
lsm.lsm[lsm.time=-1][lsm.rlat=-11.2199993133545], 1, 1, 1, 1, 1
lsm.lsm[lsm.time=-1][lsm.rlat=-10.7799997329712], 1, 1, 1, 1, 1
lsm.lsm[lsm.time=-1][lsm.rlat=-10.3400001525879], 0, 1, 1, 1, 1

```

Figura V.4 – Ficheiro lsm.ascii, contendo a informação relativa à *land/sea mask* do modelo HadRM3P, em que os pontos de terra são classificados como um e os pontos de mar são classificados como zero.

```

Dataset: oro.HC.nc
lat.rlon, -15.0398902893066, -14.5999097824097, -14.1599102020264, -13.7199096679688, -13.2799100875854
lat.lat[lat.rlat=-12.9799995422363], 37.1058, 37.2142, 37.3196, 37.422, 37.5214
lat.lat[lat.rlat=-12.539999961853], 37.531, 37.6402, 37.7464, 37.8496, 37.9497
lat.lat[lat.rlat=-12.0999994277954], 37.956, 38.0661, 38.1731, 38.277, 38.3779
lat.lat[lat.rlat=-11.6599998474121], 38.3808, 38.4917, 38.5996, 38.7043, 38.806
lat.lat[lat.rlat=-11.2199993133545], 38.8055, 38.9172, 39.0259, 39.1314, 39.2339
lat.lat[lat.rlat=-10.7799997329712], 39.23, 39.3426, 39.452, 39.5584, 39.6616
lat.lat[lat.rlat=-10.3400001525879], 39.6543, 39.7677, 39.878, 39.9852, 40.0892
lon.rlon, -15.0398902893066, -14.5999097824097, -14.1599102020264, -13.7199096679688, -13.2799100875854
lon.lon[lon.rlat=-12.9799995422363], -8.4852, -7.96469, -7.44241, -6.91849, -6.39301
lon.lon[lon.rlat=-12.539999961853], -8.62741, -8.10321, -7.5773, -7.04971, -6.52039
lon.lon[lon.rlat=-12.0999994277954], -8.7713, -8.24341, -7.71381, -7.18231, -6.6492
lon.lon[lon.rlat=-11.6599998474121], -8.9169, -8.38531, -7.85181, -7.31659, -6.7796
lon.lon[lon.rlat=-11.2199993133545], -9.06421, -8.52881, -7.99149, -7.45239, -6.9115
lon.lon[lon.rlat=-10.7799997329712], -9.2132, -8.67401, -8.1329, -7.5899, -7.0451
lon.lon[lon.rlat=-10.3400001525879], -9.36411, -8.82101, -8.27609, -7.72919, -7.1803
oro.rlon, -15.0398902893066, -14.5999097824097, -14.1599102020264, -13.7199096679688, -13.2799100875854
oro.oro[oro.time=-1][oro.rlat=-12.9799995422363], 165.161, 253.242, 141.782, 125.176, 213.285
oro.oro[oro.time=-1][oro.rlat=-12.539999961853], 259.265, 183.06, 186.134, 305.904, 557.364
oro.oro[oro.time=-1][oro.rlat=-12.0999994277954], 91.5491, 156.122, 187.775, 272.526, 488.756
oro.oro[oro.time=-1][oro.rlat=-11.6599998474121], 68.7891, 151.518, 214.876, 239.985, 222.143
oro.oro[oro.time=-1][oro.rlat=-11.2199993133545], 102.44, 118.603, 154.082, 332.561, 302.877
oro.oro[oro.time=-1][oro.rlat=-10.7799997329712], 168.097, 203.902, 210.036, 327.264, 318.717
oro.oro[oro.time=-1][oro.rlat=-10.3400001525879], 0, 176.668, 373.331, 483.556, 503.532

```

Figura V.5 – Ficheiro oro.ascii, contendo a informação relativa à orografia do terreno para os pontos da grelha do modelo HadRM3P.

V.2. Ficheiros relativos aos dados de saída

Numero_Est	Latitude	Longitude	lsm	orografia
0	37.1058	-8.4852	1	165.161
1	37.2142	-7.96469	1	253.242
2	37.3196	-7.44241	1	141.782
3	37.422	-6.91849	1	125.176
4	37.5214	-6.39301	1	213.285
5	37.531	-8.62741	1	259.265
6	37.6402	-8.10321	1	183.06
7	37.7464	-7.5773	1	186.134
8	37.8496	-7.04971	1	305.904
9	37.9497	-6.52039	1	557.364
10	37.956	-8.7713	1	91.5491
11	38.0661	-8.24341	1	156.122
12	38.1731	-7.71381	1	187.775
13	38.277	-7.18231	1	272.526
14	38.3779	-6.6492	1	488.756
15	38.3808	-8.9169	1	68.7891
16	38.4917	-8.38531	1	151.518
17	38.5996	-7.85181	1	214.876
18	38.7043	-7.31659	1	239.985
19	38.806	-6.7796	1	222.143
20	38.8055	-9.06421	1	102.44
21	38.9172	-8.52881	1	118.603
22	39.0259	-7.99149	1	154.082
23	39.1314	-7.45239	1	332.561
24	39.2339	-6.9115	1	302.877
25	39.23	-9.2132	1	168.097
26	39.3426	-8.67401	1	203.902
27	39.452	-8.1329	1	210.036
28	39.5584	-7.5899	1	327.264
29	39.6616	-7.0451	1	318.717
30	39.6543	-9.36411	0	0
31	39.7677	-8.82101	1	176.668
32	39.878	-8.27609	1	373.331
33	39.9852	-7.72919	1	483.556
34	40.0892	-7.1803	1	503.532

Figura V.6 – Ficheiro saida_Long_Lat.txt, no qual o programa AlterClim escreve a informação de carácter geográfico associada aos pontos das grelhas produzidas pelos modelos RCM, sendo esta figura relativa aos pontos do modelo HadRM3P.

saída_precip.HC.adeha.1960-1990.nc.gz.ascii - WordPad

Ficheiro Editar Ver Inserir Formatar Ajuda

Ano	Mes	Precip1	Precip2	Precip3	Precip4	Precip5	Precip6	Precip7	Precip8	Precip9	Precip10
1960	1	0.272995	0.311978	0.113357	0.10447	0.120076	0.393087	0.0767104	0.0479259	0.10479259	0.10479259
1960	2	0.00926209	0.0182643	0.00216185	0.00498413	0.0360493	0.0680135	0.0260051	0.0336387	0.0336387	0.0336387
1960	3	2.03516E-05	0.0126198	0.0181531	0.0491859	0.0886602	0.00131827	0.00134392	0.00790172	0.00790172	0.00790172
1960	4	0.0964966	0.199488	0.152711	0.285264	0.663092	0.276105	0.18326	0.325789	0.325789	0.325789
1960	5	0.320037	0.378452	0.193679	0.202526	0.535772	0.535597	0.423211	0.363381	0.363381	0.363381
1960	6	0.00376444	0.00913344	0.00796712	0.0089676	0.00973486	0.0199957	0.00289757	0.00743848	0.00743848	0.00743848
1960	7	0.000419722	0.000119544	0.00751142	0.0175379	0.0103083	0.00147809	0.000217985	0.000382626	0.000382626	0.000382626
1960	8	0.314816	0.12067	0.0369934	0.0106639	0.0639231	0.300118	0.0968946	0.0169244	0.0169244	0.0169244
1960	9	0.00417124	0.0841172	0.119153	0.151908	0.27185	0.151893	0.060058	0.123584	0.123584	0.123584
1960	10	1.44353	1.39827	0.583503	0.682617	0.850311	2.17392	0.438283	0.553654	0.553654	0.553654
1960	11	4.38631	4.13613	1.97947	1.61186	3.39284	4.8929	1.43478	1.58669	1.58669	1.58669
1960	12	2.28514	2.76092	1.73787	2.11591	2.6875	3.2583	1.45235	1.92381	1.92381	1.92381
1961	1	2.94367	3.32854	1.9209	2.08359	2.82466	4.16729	1.74088	1.97127	1.97127	1.97127
1961	2	2.89341	4.0578	1.3873	1.60278	3.33657	6.76746	2.68365	2.66105	2.66105	2.66105
1961	3	0.491044	1.47209	0.944509	0.883261	1.10159	1.24134	0.793122	1.13176	1.13176	1.13176
1961	4	0.444182	0.362894	0.281432	0.219765	0.22885	0.726368	0.34942	0.466685	0.466685	0.466685
1961	5	0.46925	0.848761	0.430761	0.461948	0.856329	1.15754	0.506705	0.744572	0.744572	0.744572
1961	6	0.161908	0.139168	0.100568	0.143268	0.215403	0.228494	0.105554	0.204286	0.204286	0.204286
1961	7	8.61515E-07	0.188897	0.131642	0.062587	0.311591	0.137379	0.124213	0.33863	0.33863	0.33863
1961	8	0.0300639	0.0494174	0.049196	0.113137	0.185913	0.0618413	0.0474835	0.0837107	0.0837107	0.0837107
1961	9	0.0558986	0.121382	0.0459785	0.028486	0.0689282	0.0962449	0.0440929	0.0899995	0.0899995	0.0899995
1961	10	1.12609	2.18897	0.906984	0.925798	1.72283	2.54504	0.853961	0.731844	0.731844	0.731844
1961	11	4.1774	5.85113	2.71174	2.68302	5.93718	5.92079	1.773	2.39504	5.11349	5.11349
1961	12	7.32853	7.98291	4.03111	4.19307	6.94086	9.77196	3.65136	3.79252	7.44252	7.44252
1962	1	2.06018	2.15116	0.99996	1.02527	2.25928	3.67285	1.35827	1.32156	2.59256	2.59256
1962	2	0.281885	0.405452	0.257825	0.395787	1.44219	0.656563	0.245585	0.225119	0.79256	0.79256
1962	3	0.0848188	0.125841	0.0525968	0.0603837	0.0957355	0.300801	0.108708	0.122423	0.26423	0.26423
1962	4	0.376844	0.302598	0.180784	0.126803	0.187822	0.566543	0.324507	0.213114	0.38256	0.38256
1962	5	0.0598374	0.020242	0.0162798	0.0531559	0.193035	0.0903393	0.00498548	0.00848973	0.12256	0.12256
1962	6	0.0401377	0.154034	0.0387881	0.0233759	0.104427	0.364193	0.252836	0.297182	0.27256	0.27256
1962	7	2.19263E-05	4.50273E-05	0	3.97419E-09	0	0.0048147	0.00052144	0.00169865	0.0275148	0.0275148
1962	8	0.0762224	0.0567192	0.0149263	0.00941202	0.0395244	0.0943327	0.00755392	0.007513	0.09256	0.09256
1962	9	0.0313889	0.0303944	0.013003	0.0149948	0.0232977	0.101095	0.0373256	0.0394095	0.09256	0.09256
1962	10	6.5513	7.13242	4.52957	4.67705	7.40753	7.99327	2.50831	3.53491	7.99327	7.99327

Para obter ajuda prima F1

Figura V.7 – Ficheiro de saída do programa AlterClim, saída_precip.HC.adeha.1960-1990.nc.gz.ascii, no qual é armazenada a informação relativa à precipitação simulada pelo modelo HadRM3P para o período de controlo (1961-90). Neste ficheiro as colunas correspondem aos pontos das grelhas do modelo climático e as colunas correspondem aos diferentes meses da série de dados de precipitação.

Anexo VI – Ficheiros do programa Interpolador

VI.1. Ficheiros relativos aos dados de entrada

Semana	DiaJuliano	Data	Eto_PM_CO	Eto_PM_alfa	Vento_CO	Vento_alfa	HR_CO	HR_alfa	P_CO	P_alfa
1	1	01/01/2003	0.006406009	7	0.135298516	9	3.409853191	8	0.078807558	10.5
1	2	01/02/2003	0.006406009	7	0.135298516	9	3.409853191	8	0.078807558	10.5
1	3	01/03/2003	0.006406009	7	0.135298516	9	3.409853191	8	0.078807558	10.5
1	4	01/04/2003	0.006406009	7	0.135298516	9	3.409853191	8	0.078807558	10.5
1	5	01/05/2003	0.006406009	7	0.135298516	9	3.409853191	8	0.078807558	10.5
1	6	01/06/2003	0.006406009	7	0.135298516	9	3.409853191	8	0.078807558	10.5
1	7	01/07/2003	0.006406009	7	0.135298516	9	3.409853191	8	0.078807558	10.5
2	8	01/08/2003	0.010740867	7	0.107258528	9	3.998250791	8	0.050988697	10.5
2	9	01/09/2003	0.010740867	7	0.107258528	9	3.998250791	8	0.050988697	10.5
2	10	01/10/2003	0.010740867	7	0.107258528	9	3.998250791	8	0.050988697	10.5
2	11	01/11/2003	0.010740867	7	0.107258528	9	3.998250791	8	0.050988697	10.5
2	12	01/12/2003	0.010740867	7	0.107258528	9	3.998250791	8	0.050988697	10.5
2	13	1/13/2003	0.010740867	7	0.107258528	9	3.998250791	8	0.050988697	10.5
2	14	1/14/2003	0.010740867	7	0.107258528	9	3.998250791	8	0.050988697	10.5
3	15	1/15/2003	0.012931922	7	0.110225576	9	4.526039544	8	0.083005553	10.5
3	16	1/16/2003	0.012931922	7	0.110225576	9	4.526039544	8	0.083005553	10.5
3	17	1/17/2003	0.012931922	7	0.110225576	9	4.526039544	8	0.083005553	10.5
3	18	1/18/2003	0.012931922	7	0.110225576	9	4.526039544	8	0.083005553	10.5
3	19	1/19/2003	0.012931922	7	0.110225576	9	4.526039544	8	0.083005553	10.5
3	20	1/20/2003	0.012931922	7	0.110225576	9	4.526039544	8	0.083005553	10.5
3	21	1/21/2003	0.012931922	7	0.110225576	9	4.526039544	8	0.083005553	10.5
4	22	1/22/2003	0.015115517	7	0.171986007	9	2.555799102	8	0.031755896	10.5
4	23	1/23/2003	0.015115517	7	0.171986007	9	2.555799102	8	0.031755896	10.5
4	24	1/24/2003	0.015115517	7	0.171986007	9	2.555799102	8	0.031755896	10.5
4	25	1/25/2003	0.015115517	7	0.171986007	9	2.555799102	8	0.031755896	10.5
4	26	1/26/2003	0.015115517	7	0.171986007	9	2.555799102	8	0.031755896	10.5
4	27	1/27/2003	0.015115517	7	0.171986007	9	2.555799102	8	0.031755896	10.5
4	28	1/28/2003	0.015115517	7	0.171986007	9	2.555799102	8	0.031755896	10.5
5	29	1/29/2003	0.007116844	6	0.105407951	6	6.462436397	9	0.224714223	10.5
5	30	1/30/2003	0.007116844	6	0.105407951	6	6.462436397	9	0.224714223	10.5
5	31	1/31/2003	0.007116844	6	0.105407951	6	6.462436397	9	0.224714223	10.5
5	32	02/01/2003	0.007116844	6	0.105407951	6	6.462436397	9	0.224714223	10.5
5	33	02/02/2003	0.007116844	6	0.105407951	6	6.462436397	9	0.224714223	10.5
5	34	02/03/2003	0.007116844	6	0.105407951	6	6.462436397	9	0.224714223	10.5
5	35	02/04/2003	0.007116844	6	0.105407951	6	6.462436397	9	0.224714223	10.5
6	36	02/05/2003	0.014717579	6	0.142399637	6	7.454492667	9	0.070361873	10.5
6	37	02/06/2003	0.014717579	6	0.142399637	6	7.454492667	9	0.070361873	10.5
6	38	02/07/2003	0.014717579	6	0.142399637	6	7.454492667	9	0.070361873	10.5
6	39	02/08/2003	0.014717579	6	0.142399637	6	7.454492667	9	0.070361873	10.5
6	40	02/09/2003	0.014717579	6	0.142399637	6	7.454492667	9	0.070361873	10.5
6	41	02/10/2003	0.014717579	6	0.142399637	6	7.454492667	9	0.070361873	10.5
6	42	02/11/2003	0.014717579	6	0.142399637	6	7.454492667	9	0.070361873	10.5
7	43	02/12/2003	0.011019167	6	0.187408801	6	5.630272675	9	0.166765417	10.5

Figura VI.1 – Ficheiro CoAlfa.txt que fornece ao programa Interpolador os parâmetros da função de covariância (C_0 e α) para as variáveis meteorológicas ET_o , RH_{min} , U_2 e P .

Código	Estações	longitude - datum73	latitude - datum73	altitude (m)
1001.txt	Ferreira do Alentejo (Herdade do Outeiro)	-8.266388889	38.045	74
1002.txt	Moura (Herdade dos Lameirões)	-7.2775	38.0875	172
1003.txt	Elyas (Perímetro de rega do Caia)	-7.098888889	38.91555556	202
1004.txt	Redondo (Perímetro de rega da Vigia)	-7.627777778	38.52805556	235.6
1005.txt	Aljustrel (Perímetro de rega do Roxo)	-8.190277778	37.97138889	104
1006.txt	Alvalade do Sado (Perim rega Campilhas Alto Sado)	-8.345833333	37.92888889	78.5
1007.txt	Beja (Quinta da Saúde)	-7.885	38.0375	206
1008.txt	Evora (Perímetro de rega do Divor)	-7.936111111	38.73777778	246
1009.txt	Odemira (Perímetro de rega do Mira)	-8.753333333	37.50166667	91.5
1102.txt	Serpa	-7.550833333	37.96833333	190

Figura VI.2 – Ficheiro Estacoes.txt contendo a listagem das estações da rede SAGRA (COTR, 2009) com as respectivas coordenadas geográficas.

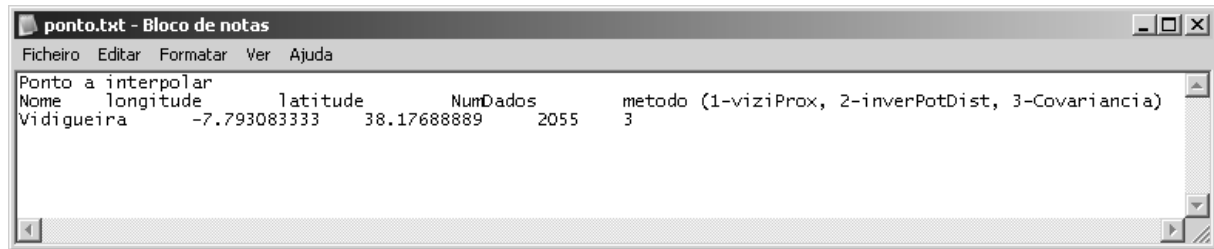


Figura VI.3 – Ficheiro ponto.txt onde se define o ponto para o qual se pretendem interpolar os dados meteorológicos, indicando-se as coordenadas geográficas, o número de registos a interpolar e o método de interpolação seleccionado.

Data	EVAP_PM_1001	EVAP_PM_1002	EVAP_PM_1003	EVAP_PM_1004	EVAP_PM_1005	EVAP_PM_1006	EVAP_PM_1007
1/1/2003	0.92	0.99	0.73	0.63	0.87	1.13	0.92
1/2/2003	0.89	0.87	0.67	0.68	0.96	1.03	0.82
1/3/2003	1.05	0.91	1.17	1.22	1.32	1.32	1.31
1/4/2003	0.9	0.88	0.84	0.81	1.08	1.03	0.93
1/5/2003	1.06	1.03	0.84	0.99	1.07	1.17	0.97
1/6/2003	1.17	1.19	1.37	1.39	1.37	1.43	1.3
1/7/2003	0.88	0.85	0.7	0.79	0.79	0.82	0.7
1/8/2003	0.9	0.88	0.87	0.91	1.05	1.09	0.91
1/9/2003	1.23	1.15	1.18	1.34	1.46	1.43	1.12
1/10/2003	1.46	1.38	1.73	1.6	1.58	1.73	1.35
1/11/2003	1.01	0.84	0.94	0.98	0.98	1	0.84
1/12/2003	1.22	1.11	1.13	1.25	1.14	1.26	1.29
1/13/2003	1.32	1.03	1.22	1.6	1.1	1.23	1.36
1/14/2003	0.82	0.92	1.18	1.43	0.99	1.07	1.61
1/15/2003	0.82	0.83	1.12	1	1.01	0.97	1.29
1/16/2003	0.81	0.95	1.05	1.03	1.04	1.09	1.16
1/17/2003	0.64	0.67	0.85	0.75	0.69	0.85	1.1
1/18/2003	1.34	1.08	0.81	0.98	1.39	1.32	1.19
1/19/2003	1.25	1.35	1.46	1.43	1.48	1.58	1.51
1/20/2003	1.02	1.06	0.68	0.79	1.16	1.15	0.99
1/21/2003	1.45	1.54	1.66	1.6	1.65	1.89	1.57
1/22/2003	1.23	1.29	1.41	1.41	1.34	1.34	1.22
1/23/2003	1.51	1.36	1.9	2.01	1.59	1.57	1.72
1/24/2003	1.44	1.44	1.56	1.62	1.65	1.44	1.88
1/25/2003	1.58	1.29	1.69	1.87	1.63	1.48	1.64
1/26/2003	1.65	1.5	2.3	2.25	1.57	1.61	1.77
1/27/2003	1.77	1.49	2.15	1.75	1.85	1.92	2.12
1/28/2003	1.91	1.57	2.12	2.17	1.87	1.85	2.2
1/29/2003	2.04	2.02	2.61	2.53	2.06	2.06	2.25
1/30/2003	2.11	1.85	2.58	2.45	2.2	2.18	2.09
1/31/2003	2.18	2.28	2.33	2.52	2.39	2.45	2.24
2/1/2003	1.51	1.39	1.62	1.54	1.45	1.53	1.67
2/2/2003	1.41	1.25	1.58	1.55	1.49	1.51	1.56
2/3/2003	1.44	1.2	1.56	1.51	1.43	1.53	1.51
2/4/2003	1.2	1.12	1.75	1.38	1.33	1.35	1.45
2/5/2003	1.81	1.59	2.03	2.16	1.96	1.89	2.03
2/6/2003	1.33	1.41	1.67	1.48	1.32	1.38	1.5
2/7/2003	0.88	0.74	0.66	0.84	0.81	0.85	0.86
2/8/2003	1.66	1.38	1.62	1.66	1.55	1.4	1.74
2/9/2003	1.44	1.47	2.05	1.74	1.42	1.54	1.68
2/10/2003	1.33	1.02	1.82	1.17	1.48	1.7	1.65
2/11/2003	1.27	1.25	1.05	1.3	1.46	1.41	1.66
2/12/2003	1.09	0.93	1.09	0.94	1.08	1.45	1.02

Figura VI.4 – Ficheiro EToPM.txt que contém os dados da evapotranspiração de referência, correspondendo cada coluna a uma estação.

Precipitacao.txt - Bloco de notas

Ficheiro

Editar

Formatar

Ver

Ajuda

Data	P-1001	P-1002	P-1003	P-1004	P-1005	P-1006	P-1007	P-1008	P-1009	P-1102	Media
1/1/2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-99999 0
1/2/2003	3.3	2.3	3.7	6.5	1.7	1.8	1.2	4.9	1.8	-99999 3.022222222	
1/3/2003	3.2	3.1	2.3	2.8	0.1	0.1	3.1	0.5	0.4	-99999 1.733333333	
1/4/2003	0	0	0	0.1	0	0	0.1	0.4	0.2	-99999 0.088888889	
1/5/2003	3.7	3.8	4.5	4.6	3.8	4.6	4	5.6	4	-99999 4.288888889	
1/6/2003	0.1	0	0.5	0.6	0.1	0.9	0	1.6	1.2	-99999 0.555555556	
1/7/2003	13.3	9.8	5.8	8.1	12.1	13.5	20.2	6.7	7.7	-99999 10.8	
1/8/2003	7.2	2	0.8	0.8	6	7.1	6.2	4.3	6.1	-99999 4.5	
1/9/2003	9.1	7.3	2.2	5.7	5.8	9	11.5	12	4.6	-99999 7.466666667	
1/10/2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-99999 0	
1/11/2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-99999 0	
1/12/2003	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	-99999 0.011111111	
1/13/2003	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	-99999 0.033333333	
1/14/2003	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	-99999 0.011111111	
1/15/2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-99999 0	
1/16/2003	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	-99999 0.011111111	
1/17/2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-99999 0	
1/18/2003	2.1	2.1	3.3	3.7	1.5	2.3	1.7	8	4.6	-99999 3.255555556	
1/19/2003	2.2	4.5	6.2	1.6	5.6	1.9	5	1.4	1.1	-99999 3.277777778	
1/20/2003	11.5	13.7	23.8	22.2	8.8	9.2	12.7	23.7	21.3	-99999 16.32222222	
1/21/2003	0.5	0.7	0	0.5	0.9	0.1	0.3	0.4	0.2	-99999 0.4	
1/22/2003	1	1.3	2.5	6	0.4	1.1	2.8	1.8	4.5	-99999 2.377777778	
1/23/2003	0.1	0.1	0.4	0.2	0	0	0	0.2	0.1	-99999 0.122222222	
1/24/2003	0.2	0	0	0	0.1	0.1	0	0	0	-99999 0.044444444	
1/25/2003	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	-99999 0.011111111	
1/26/2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-99999 0	
1/27/2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-99999 0	
1/28/2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-99999 0	
1/29/2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-99999 0	
1/30/2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-99999 0	
1/31/2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6	-99999 0.066666667	
2/1/2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-99999 0	
2/2/2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-99999 0	
2/3/2003	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0.1	-99999 0.022222222	
2/4/2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	-99999 0.011111111	
2/5/2003	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	-99999 0.011111111	
2/6/2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	-99999 0.011111111	
2/7/2003	5.8	7.5	7.3	5.1	5.5	8.5	5	8.5	3.8	-99999 6.333333333	
2/8/2003	0	0.1	0	0	0.2	0.1	0.1	0	0.1	-99999 0.066666667	
2/9/2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	-99999 0.022222222	
2/10/2003	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	-99999 0.011111111	
2/11/2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-99999 0	
2/12/2003	0	0.3	0	0	0	0	0.6	0	0.1	-99999 0.111111111	

Figura VI.5 – Ficheiro Precipitacao.txt que contém os dados da precipitação observados nas estações meteorológicas, correspondendo cada coluna a uma estação.

Data	HR_mn-1001	HR_mn-1002	HR_mn-1003	HR_mn-1004	HR_mn-1005	HR_mn-1006	HR_mn-1007
1/1/2003	79.9	70.8	84.2	90.2	81.6	75.8	82.5
1/2/2003	82.8	83.1	88.4	90	82.5	81.3	85.9
1/3/2003	59	69.8	53.7	67.9	57.7	60.3	67
1/4/2003	53.5	54	59.5	71	53.7	56	63.8
1/5/2003	67.4	70.6	78.7	79	76.1	71.5	76.2
1/6/2003	50.3	49.3	53.4	57.1	54.7	53.7	56.1
1/7/2003	80.8	81.1	85.2	85.7	85.4	83.8	87.2
1/8/2003	65.5	68.3	70.2	76.2	68.1	66.7	74.3
1/9/2003	60	66.4	61.5	63.2	61.1	62.5	69.2
1/10/2003	45	45.8	48.7	49	47.9	43.5	49.1
1/11/2003	47.4	46.7	46.4	47.5	49.6	49.9	46.6
1/12/2003	43.7	36.6	40.4	49.3	44.2	44	45.6
1/13/2003	43.6	35.4	37.3	42.1	45.3	45.7	47.8
1/14/2003	37	37	32.7	41.4	39.7	40.3	38.3
1/15/2003	33.7	30.3	36.6	36.1	32.4	35.4	35
1/16/2003	29.7	28.6	33.9	19.4	30.3	28.7	35
1/17/2003	68.8	46.7	59.7	65.8	69.9	59.6	70.6
1/18/2003	64.4	71	76.3	79.2	66.2	67.9	70.6
1/19/2003	50	49.7	53.3	58.9	53.7	53.7	55.1
1/20/2003	75.1	76	85	84.4	74.5	76.7	77.3
1/21/2003	54	52.1	52.6	61.3	56.2	54.5	58.5
1/22/2003	67.1	60.8	60.6	68.4	67.1	67.7	71.2
1/23/2003	44.5	43.8	41.1	40.9	43	46.9	43.9
1/24/2003	36.5	32.4	35.1	42.7	39.5	39.8	37.7
1/25/2003	31.7	34.4	29.6	27.3	36.1	32.4	33
1/26/2003	31.3	32.1	39.4	33.2	36.1	35.3	33
1/27/2003	44.7	40.3	46.9	46.5	43.6	44.4	46.6
1/28/2003	31.9	41.5	33.2	41.8	31.7	36.3	37
1/29/2003	42.9	32.2	35.9	36.3	42.7	44.2	37.4
1/30/2003	43.6	37.7	38.1	43.3	45	44.9	43.3
1/31/2003	37.4	31	33.6	32.4	37.1	36.3	35
2/1/2003	29.2	31.1	30.7	36.3	31.8	29	31.3
2/2/2003	50.1	44.5	44.9	48.9	51.3	50	43.7
2/3/2003	53.8	48.6	49.6	58.7	56.9	55.3	58.1
2/4/2003	62.3	63.6	61.9	71.5	66.3	67.8	66.1
2/5/2003	47	45.8	41.8	41.8	45.2	48.4	42.7
2/6/2003	53.7	37	36.9	49.4	51.1	53.3	54.5
2/7/2003	73.8	69.8	88.4	78.8	77.5	79.8	75.9
2/8/2003	52.2	48.6	46.6	52.5	52.8	55.2	52.8
2/9/2003	50.7	33.9	33.9	44.9	53.2	47.7	46.9
2/10/2003	54.9	66.8	53.8	68.1	57.2	53.4	49
2/11/2003	56	46.3	59.1	56.8	51.3	57	47.7
2/12/2003	66.3	69.4	66.2	75.3	70.2	62.1	74.9

Figura VI.6 – Ficheiro HR.txt que contém os dados da humidade relativa mínima observados nas estações meteorológicas, correspondendo cada coluna a uma estação.

Vento.txt - Bloco de notas									
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda									
Data	VV_md-1001	VV_md-1002	VV_md-1003	VV_md-1004	VV_md-1005	VV_md-1006	VV_md-1007		
1/1/2003	2.3	1.6	2	3.7	2.3	2.7	2.8	3.5	2
1/2/2003	2.6	2.7	2.5	5.7	3.3	3.6	3.5	4.9	4.3
1/3/2003	1	1.3	1.4	3	1.9	2	2.5	2.1	1.7
1/4/2003	0.5	0.5	0.7	1.1	0.9	0.8	0.9	1.1	0.8
1/5/2003	1.6	1.9	1.9	4.1	2.9	2.6	2.4	3.3	3.2
1/6/2003	1.2	1.4	2.6	3.2	2.2	2.1	2.2	2.3	2.7
1/7/2003	2.2	2.3	2.2	4.5	2.9	3	3	3.4	3.8
1/8/2003	1.3	1.5	1.9	3.8	2.4	2.4	2.5	2.3	3.6
1/9/2003	2.4	2.7	3	5.1	4.2	3.8	3.5	4	4.8
1/10/2003	2.6	2.4	4.1	4.1	3.6	3.1	2.5	4.1	2.7
1/11/2003	1.2	0.7	1.1	1.4	1.2	1.2	0.7	1.1	1.4
1/12/2003	1.8	1.2	1.5	2.8	1.6	1.9	2.2	1.6	2.2
1/13/2003	1.8	0.9	1.5	3.3	1.3	1.6	2.2	1.4	1.9
1/14/2003	0.5	0.7	1.2	2.1	0.8	0.9	1.9	0.9	2.2
1/15/2003	0.5	0.5	1	0.9	0.8	0.7	1.3	0.7	1.4
1/16/2003	0.4	0.6	0.8	0.7	0.7	1	1	0.8	0.9
1/17/2003	0.7	0.4	1.3	1	0.9	1	2.2	1.1	1.1
1/18/2003	2.7	2.8	2.1	5.6	3.3	3.3	3.4	4.7	3.9
1/19/2003	1.4	1.7	2.6	3.4	2.4	2.7	2.6	2.6	2.7
1/20/2003	3.2	3.5	2.7	6.2	4.2	4.7	3.8	5.1	4.2
1/21/2003	1.8	2.1	2.9	4.5	2.9	3.3	2.7	2.9	3.1
1/22/2003	2	1.9	2.6	4.4	2.9	3	2.8	3.7	2.7
1/23/2003	1.3	0.8	1.8	2.2	1.5	1.5	1.9	1.4	1.6
1/24/2003	0.9	0.9	1.2	1.6	1.1	0.8	1.7	1.3	0.9
1/25/2003	1	0.7	1.1	1.4	1.2	0.9	1.1	1.2	1.5
1/26/2003	1	0.9	2.1	2.1	1	1	1.2	1.5	1.8
1/27/2003	1.3	0.8	2	1.4	1.4	1.5	2	1.4	1.9
1/28/2003	1.2	0.9	1.4	2.1	1.1	1.2	1.7	1.2	2.2
1/29/2003	2.8	2	3.6	4.1	3	2.9	2.7	3.4	3
1/30/2003	2.8	1.9	3.7	5	3.6	3.2	2.7	3.9	2.6
1/31/2003	3	3.1	3.7	4.9	3.9	3.6	3.3	4.2	3.8
2/1/2003	1.1	1	1.3	1.6	1.1	1.1	1.3	1.2	2
2/2/2003	1	0.7	1.3	1.6	1.3	1.2	1.1	1.7	1.7
2/3/2003	1.1	0.7	1.5	2.1	1.4	1.4	1.4	1.9	1.4
2/4/2003	1.7	1.6	4.1	5	2.9	2.9	3.3	3.7	2
2/5/2003	1.9	1.4	2.4	3.1	2.4	2.1	2.3	3.2	2
2/6/2003	0.7	0.6	0.9	1.1	0.7	0.8	0.9	1.1	0.9
2/7/2003	0.8	0.5	0.9	1.3	0.7	1	0.9	0.8	1.1
2/8/2003	1.3	0.8	1.1	1.8	1.2	0.8	1.4	1.2	1.7
2/9/2003	0.8	0.6	1.4	1.6	0.9	1	1	1.6	1.1
2/10/2003	1.2	1	2.2	2.4	2	2.2	1.7	2.7	1.6
2/11/2003	0.5	0.5	0.6	0.9	0.8	0.8	1	1	0.7
2/12/2003	1	0.8	1.2	1.6	1.4	1.4	1.3	1.7	0.9

Figura VI.7 – Ficheiro Vento.txt que contém os dados da velocidade do vento observados nas estações meteorológicas, correspondendo cada coluna a uma estação.

VI.2. Ficheiros relativos aos dados de saída

Data	ET0	Vento	HR	Precip	
1/1/2003	0.830125568882238		2.40370605020846	75.763389832353	0
1/2/2003	0.786588466721225		3.3141767360074	79.2835326654253	2.27198072146201
1/3/2003	1.11689231614226		1.91231946776494	59.725418214569	2.09715026077654
1/4/2003	0.893861478895195		0.761473691983305	56.0619747019024	0.0764649717577365
1/5/2003	0.963560752517141		2.35101532113873	69.4604750839861	3.66138215171222
1/6/2003	1.25656590950462		1.99601575545472	50.6877650313547	0.279253442884046
1/7/2003	0.767163785538418		2.76101985172297	77.8285403738916	12.3806012610142
1/8/2003	0.919523018708601		2.22180780475009	65.9052183399879	4.24277681196897
1/9/2003	1.21008797202488		3.30990770101031	59.9815426552134	7.84434891393678
1/10/2003	1.42518134189252		2.70875522397732	44.0597427065866	0
1/11/2003	0.878283728190805		0.879818253409624	43.6676613446536	0
1/12/2003	1.16088989919878		1.80823672065914	41.3210645736201	0.00900480009171875
1/13/2003	1.21164258646324		1.76918706533106	41.4335102490176	0.0210630457712082
1/14/2003	1.22528200198556		1.32787531410209	35.7462782635631	0.00900480009171875
1/15/2003	1.03814715814398		0.897861550400996	32.2190248356633	0
1/16/2003	1.00654726696339		0.732946420451743	29.1161112675847	0.00522055764512721
1/17/2003	0.849411107673499		1.28915885371354	59.5900897262094	0
1/18/2003	1.10441530210877		3.21212721057994	66.3035754570744	2.3056703405012
1/19/2003	1.3672087563114		2.2668175473715	51.1662172147852	3.32257919047205
1/20/2003	0.915170083792089		3.72275476661635	72.8798650171969	13.148345995159
1/21/2003	1.5191582327759		2.59637957303206	52.9554356401814	0.34556195185277
1/22/2003	1.22500682273139		2.61259464317431	63.2532559791127	2.33754047507527
1/23/2003	1.5604763745335		1.51323732964933	41.109465237698	0.0683951413222854
1/24/2003	1.53578477521297		1.21926740363962	35.5365603226995	0.0248327573744534
1/25/2003	1.53823330877276		1.00407385231715	30.4964339529648	0.00900480009171876
1/26/2003	1.71942548798538		1.20439381021484	31.7984180100918	0
1/27/2003	1.83611082774803		1.48889721854047	42.231897936289	0
1/28/2003	1.91880605424323		1.38624574208024	34.6545436786441	0
1/29/2003	2.14926311870844		2.89703484056481	34.994482797499	0
1/30/2003	2.0932271193842		3.06551901941468	38.9249117348274	0
1/31/2003	2.22989120599124		3.53275194621595	32.065891721905	0.0228807008564847
2/1/2003	1.53311772593175		1.26050370558495	28.6087199232497	0
2/2/2003	1.45811795086677		1.21254893631618	42.6303924231248	0
2/3/2003	1.40827956409083		1.38494579662714	51.3275664090759	0.0404169263648095
2/4/2003	1.28989476248032		2.99083680724468	60.739812061613	0.00381345008591586
2/5/2003	1.89839956711585		2.24112105902021	39.9909718373765	0.0366034762788937
2/6/2003	1.39934914554772		0.838363598470236	46.6702291178483	0.00381345008591586
2/7/2003	0.828375238826145		0.865029192438768	68.7155666624969	5.1230098022694
2/8/2003	1.55513863568807		1.24800670384138	47.5575001809442	0.0654063493058993
2/9/2003	1.56681908475424		1.05607482078806	42.2009597193134	0.00762690017183171
2/10/2003	1.41053666795821		1.79442020262399	50.9903671785277	0.0366034762788937
2/11/2003	1.3450068689301		0.780215102874117	47.6532161385082	0
2/12/2003	1.04947495207011		1.22732830170487	64.9531174114406	0.250448708375424

Figura VI.8 – Ficheiro de saída (saida_Interpolacao.txt) do programa Interpolador contendo os dados interpolados para o ponto indicado no ficheiro ponto.txt.

Anexo VII – Base de dados do modelo IrrigRotation

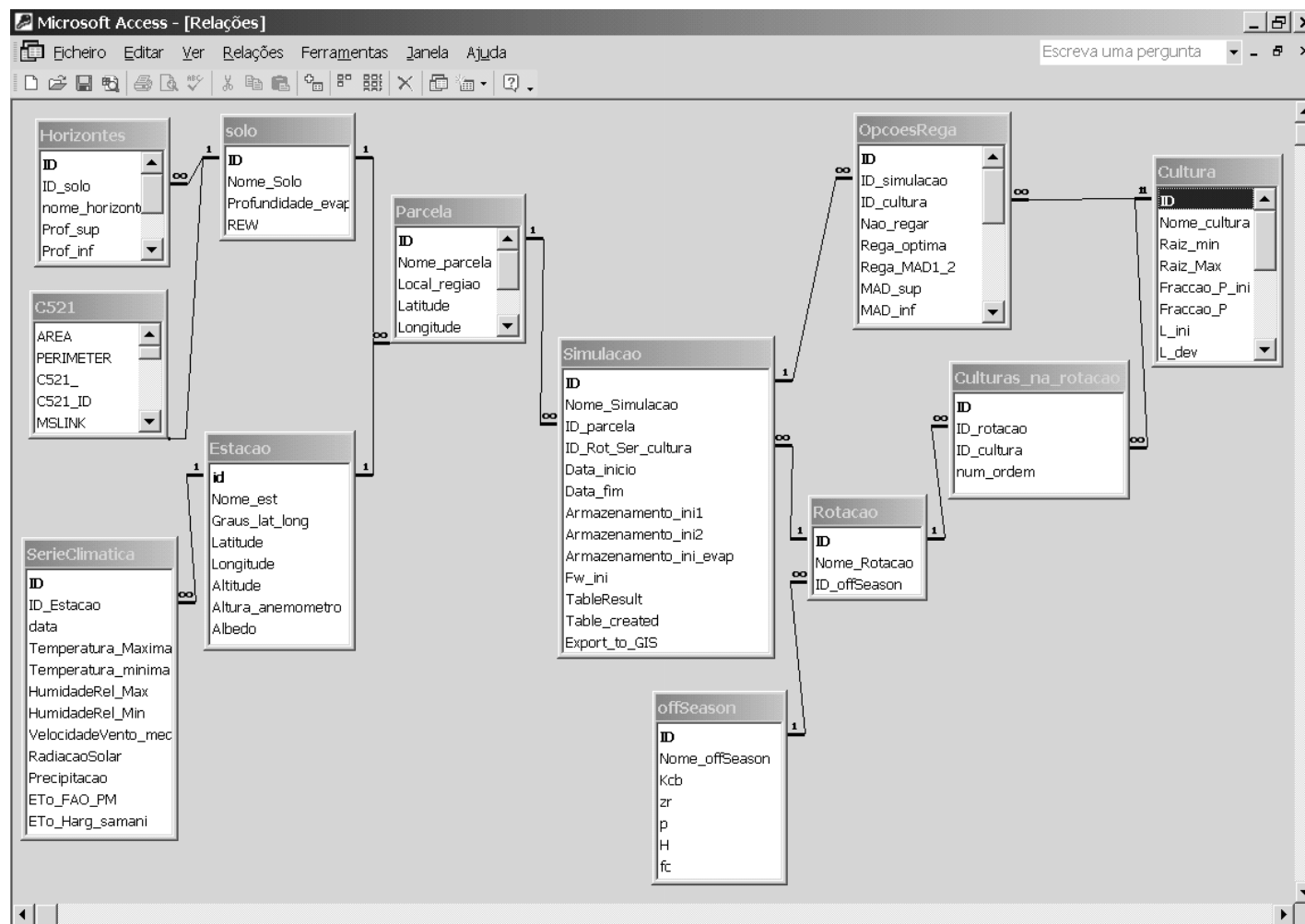
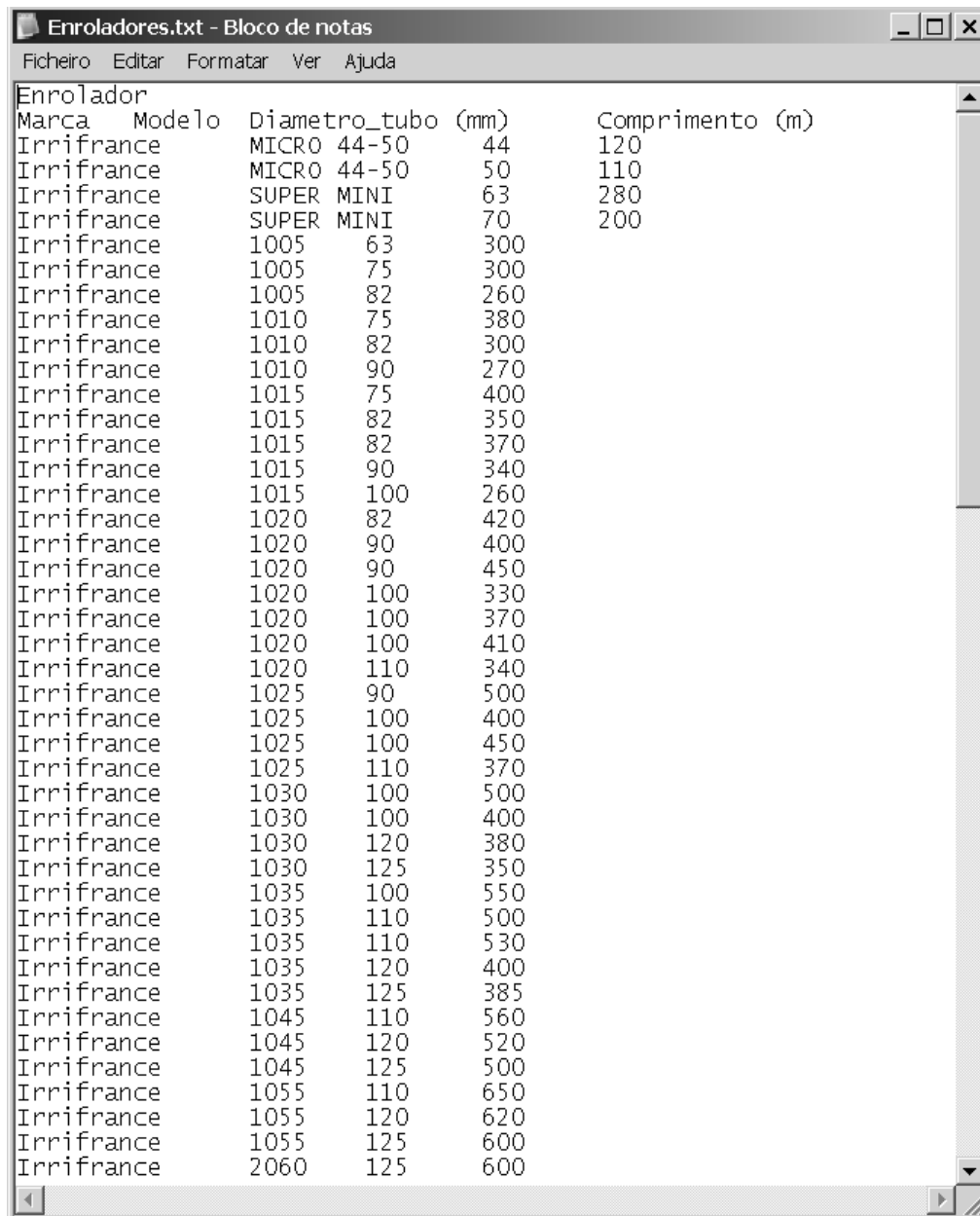


Figura VII.1 – Relações entre tabelas da base de dados balançoHidr.mdb pertencente ao modelo IrrigRotation.

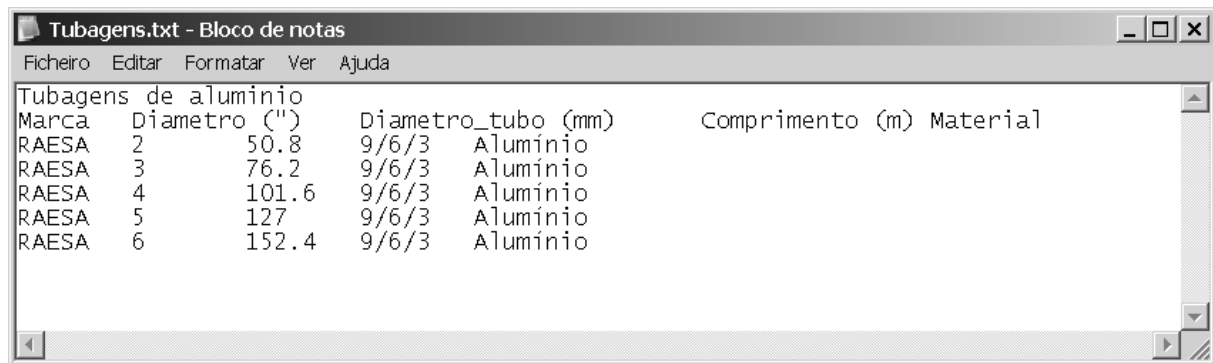
Anexo VIII – Ficheiros do modelo Enrolador

VIII.1. Ficheiros relativos aos dados de entrada



Enrolador	Marca	Modelo	Diametro_tubo (mm)	Comprimento (m)
Irrifrance	MICRO	44-50	44	120
Irrifrance	MICRO	44-50	50	110
Irrifrance	SUPER	MINI	63	280
Irrifrance	SUPER	MINI	70	200
Irrifrance	1005		63	300
Irrifrance	1005		75	300
Irrifrance	1005		82	260
Irrifrance	1010		75	380
Irrifrance	1010		82	300
Irrifrance	1010		90	270
Irrifrance	1015		75	400
Irrifrance	1015		82	350
Irrifrance	1015		82	370
Irrifrance	1015		90	340
Irrifrance	1015		100	260
Irrifrance	1020		82	420
Irrifrance	1020		90	400
Irrifrance	1020		90	450
Irrifrance	1020		100	330
Irrifrance	1020		100	370
Irrifrance	1020		100	410
Irrifrance	1020		110	340
Irrifrance	1025		90	500
Irrifrance	1025		100	400
Irrifrance	1025		100	450
Irrifrance	1025		110	370
Irrifrance	1030		100	500
Irrifrance	1030		100	400
Irrifrance	1030		120	380
Irrifrance	1030		125	350
Irrifrance	1035		100	550
Irrifrance	1035		110	500
Irrifrance	1035		110	530
Irrifrance	1035		120	400
Irrifrance	1035		125	385
Irrifrance	1045		110	560
Irrifrance	1045		120	520
Irrifrance	1045		125	500
Irrifrance	1055		110	650
Irrifrance	1055		120	620
Irrifrance	1055		125	600
Irrifrance	2060		125	600

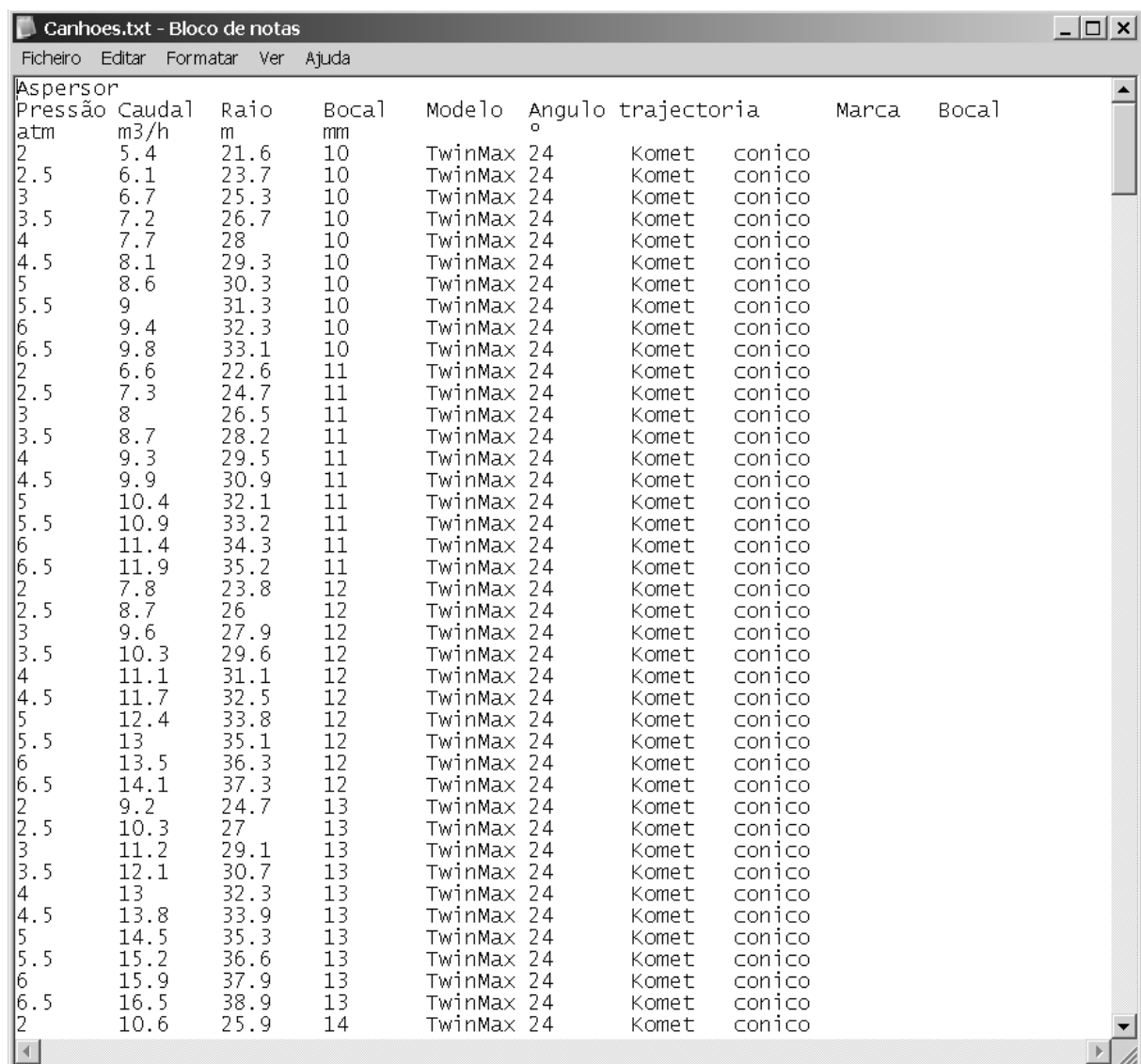
Figura VIII.1 – Ficheiro Enroladores.txt que contém os dados de diversos enroladores obtidos através dos catálogos das marcas Irrifrance (Irrifrance, 2011) e Idrofoglia (Idrofoglia, 2011).



Tubagens de alumínio

Marca	Diametro (")	Diametro_tubo (mm)	Comprimento (m)	Material
RAESA	2	50.8	9/6/3	Aluminio
RAESA	3	76.2	9/6/3	Aluminio
RAESA	4	101.6	9/6/3	Aluminio
RAESA	5	127	9/6/3	Aluminio
RAESA	6	152.4	9/6/3	Aluminio

Figura VIII.2 – Ficheiro Tubagens.txt com uma listagem de tubagens de alumínio obtida através do catálogo da marca RAESA (RAESA, 2011).



Aspersor

Pressão atm	Caudal m3/h	Raio m	Bocal mm	Modelo	Angulo o	trajectoria	Marca	Bocal
2	5.4	21.6	10	TwinMax	24	Komet conico		
2.5	6.1	23.7	10	TwinMax	24	Komet conico		
3	6.7	25.3	10	TwinMax	24	Komet conico		
3.5	7.2	26.7	10	TwinMax	24	Komet conico		
4	7.7	28	10	TwinMax	24	Komet conico		
4.5	8.1	29.3	10	TwinMax	24	Komet conico		
5	8.6	30.3	10	TwinMax	24	Komet conico		
5.5	9	31.3	10	TwinMax	24	Komet conico		
6	9.4	32.3	10	TwinMax	24	Komet conico		
6.5	9.8	33.1	10	TwinMax	24	Komet conico		
2	6.6	22.6	11	TwinMax	24	Komet conico		
2.5	7.3	24.7	11	TwinMax	24	Komet conico		
3	8	26.5	11	TwinMax	24	Komet conico		
3.5	8.7	28.2	11	TwinMax	24	Komet conico		
4	9.3	29.5	11	TwinMax	24	Komet conico		
4.5	9.9	30.9	11	TwinMax	24	Komet conico		
5	10.4	32.1	11	TwinMax	24	Komet conico		
5.5	10.9	33.2	11	TwinMax	24	Komet conico		
6	11.4	34.3	11	TwinMax	24	Komet conico		
6.5	11.9	35.2	11	TwinMax	24	Komet conico		
2	7.8	23.8	12	TwinMax	24	Komet conico		
2.5	8.7	26	12	TwinMax	24	Komet conico		
3	9.6	27.9	12	TwinMax	24	Komet conico		
3.5	10.3	29.6	12	TwinMax	24	Komet conico		
4	11.1	31.1	12	TwinMax	24	Komet conico		
4.5	11.7	32.5	12	TwinMax	24	Komet conico		
5	12.4	33.8	12	TwinMax	24	Komet conico		
5.5	13	35.1	12	TwinMax	24	Komet conico		
6	13.5	36.3	12	TwinMax	24	Komet conico		
6.5	14.1	37.3	12	TwinMax	24	Komet conico		
2	9.2	24.7	13	TwinMax	24	Komet conico		
2.5	10.3	27	13	TwinMax	24	Komet conico		
3	11.2	29.1	13	TwinMax	24	Komet conico		
3.5	12.1	30.7	13	TwinMax	24	Komet conico		
4	13	32.3	13	TwinMax	24	Komet conico		
4.5	13.8	33.9	13	TwinMax	24	Komet conico		
5	14.5	35.3	13	TwinMax	24	Komet conico		
5.5	15.2	36.6	13	TwinMax	24	Komet conico		
6	15.9	37.9	13	TwinMax	24	Komet conico		
6.5	16.5	38.9	13	TwinMax	24	Komet conico		
2	10.6	25.9	14	TwinMax	24	Komet conico		

Figura VIII.3 – Ficheiro Canhoes.txt que contém uma listagem de canhões extraída do catálogo da marca Komet (Komet, 2011).


```

*****Avaliação do canhão*****
Dados Canhão*****
DiametroMolhado(aspersor)(m) = 125
LarguraFaixa(m) = 80
AnguloSector(º) = 220
Sobreposicao(%DiamMolhado) = 0.64

Dados colectores*****
EspacamentoColectores(m) = 2
DiametroColectores(m) = 0.15

Velocidades de avanço medições*****
EspacoPercorrido(m)      Tempo(s)
14.9      3600

Caudal medições*****
Pressão(kPa)      Volume(m3) Tempo(s)
600      82.9      3600

Volumes recolhidos nos colectores*****
LadoEsquerdo(ml)      LadoDireito(ml)
977.5990      977.599
995.6381      995.6381
1001.664      1001.664
1015.393      1015.393
1016.812      1016.812
1025.927      1025.927
1023.154      1023.154
1017.933      1017.933
1019.950      1019.95
1009.779      1009.779
1006.7500      1006.75
991.8457      991.8457
983.3757      983.3757
963.0783      963.0783
948.8906      948.8906
923.1967      923.1967
902.5525      902.5525
871.2197      871.2197
836.5422      836.5422
806.2674      806.2674
764.8060      764.806
727.0886      727.0886
678.4355      678.4355
631.5800      631.58
574.2478      574.2478
517.2717      517.2717
449.0577      449.0577
377.1591      377.1591
291.0024      291.0024
183.8374      183.8374
62.35573      62.35573
0      0

```

Figura VIII.6 – Ficheiro Avalia_enrol.txt em que se introduzem os dados relativos às avaliações de campo. No caso de enroladores a serem projectados os dados do canhão são obtidos através do ficheiro saída_Enrolador.txt (Fig. VIII.7), e os volumes recolhidos nos colectores são obtidos através do ficheiro saída_simulador.txt (Fig. VIII.8)

VIII.2. Ficheiros relativos aos dados de saída

```

saida_Enrolador.txt - Bloco de notas
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda
*****Relatório de dimensionamento do Enrolador*****

****Aspersor/Canhão seleccionado****
Caudal (m³/h): 82,9
Pressão (kPa): 600
Alcance (m): 62,5
Ângulo de sector (°): 220
Marca: Komet
Modelo: Twin160
Bocal (mm): 30
Tipo de Bocal: conico
Ângulo de trajectória (°): 24
Restrições de caudal e pressão no hidrante (True/False): False
*****

****Enrolador seleccionado****
Marca      Modelo      Diâmetro Tubo (mm)      Comprimento Tubo (m)
hidrofolia 110 G 200      110                    200
*****

****Parâmetros da rega****
Dotação líquida (mm): 52
Dotação bruta (mm): 69,3
Intervalo entre regas (dias): 5
*****

****Operação e características do canhão seleccionado****
Pluviometria (mm/h)      Taxa infiltração solo nú (mm/h)      Taxa infiltração solo coberto (mm/h)
13,6                      12                      25
Nº de bandas: 5
Espaçamento entre bandas (m): 80
Espaçamento em (%) do diâmetro molhado      (%) do diâmetro molhado recomendado
0,64      0,65
Distância da posição inicial ao extremo da parcela (m): 41,7
Tempo de rega com o canhão parado
Tempo ao início (h)      Tempo no final (h)
1,71      1,09
Nº de horas para regar cada banda (h): 10,06
Velocidade de avanço (m/h): 14,9
Velocidade mínima de avanço (m/h): 5
Velocidade máxima de avanço (m/h): 50
Comprimento da mangueira (m): 106,3
*****

**** Pressões de funcionamento e diâmetros das tubagens possíveis****
Diâmetro seleccionado (mm): 110

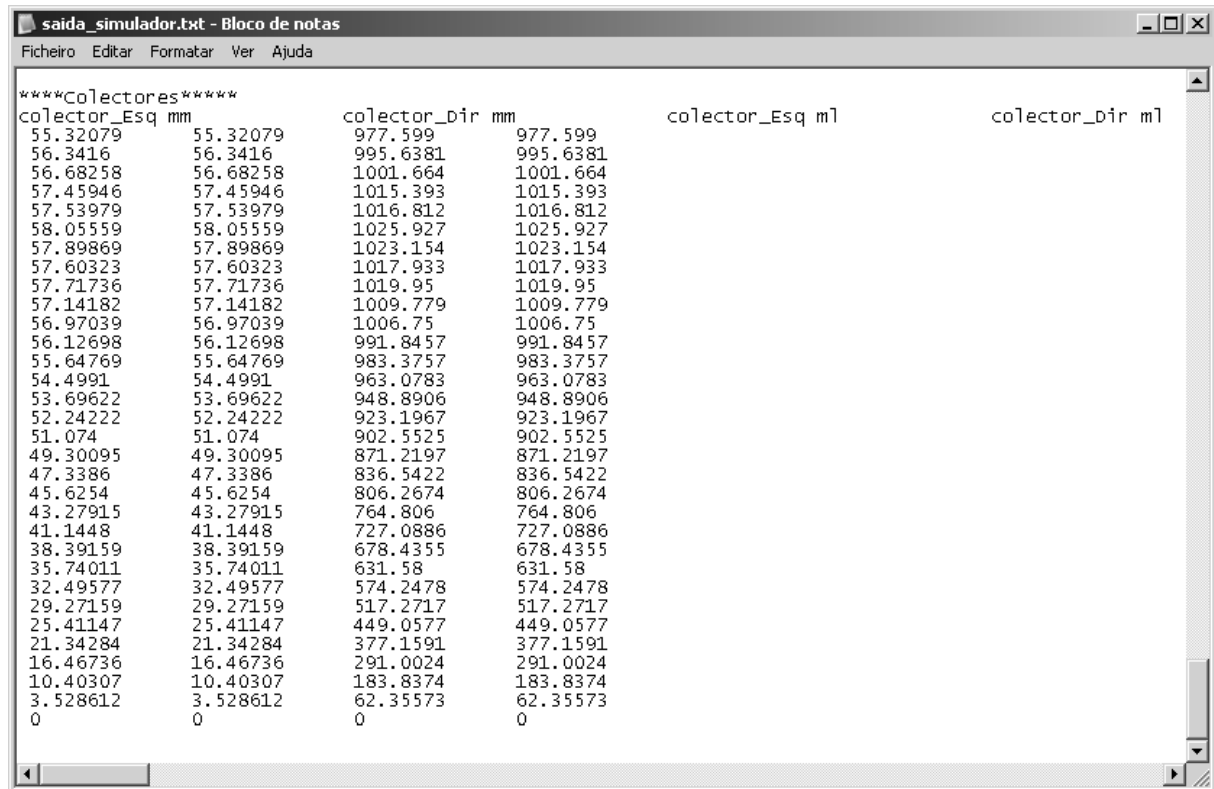
Diâmetro Tubo (mm)      Comprimento (m)      Pressão entrada enrolador teorica (kPa)      Pressão entrada enrolador escolhido(kPa) Pr
100      200      868      1018      1063      2,93
110      200      813      905      950      2,42
125      200      787      856      901      1,88
*****

**** Conduta Principal seleccionada****
Marca      Diâmetro Tubo (")      Diâmetro Tubo (mm)      Comprimento conduta (m)      Perda carga (kPa)      Velocidade esco
Alumínio      6      152,4      360      45      1,26
*****

****Dados de entrada utilizados no dimensionamento****
lagura (m): 300
comprimento (m): 400
Profundidade raiz (cm): 43
Necessidades de ponta (mm/dia): 10,4
MAD: 0,55
Textura do solo: Franco
Declive (%): 2
Capacidade de armazenamento do solo (mm/cm): 2,4
Eficiência de aplicação (%): 0,75
Tempo de rega diário (h): 22
Velocidade média do vento (m/s): 3,2
Margem de segurança (%): 10
Hidrante no meio da parcela: True
Perda de carga na turbina (kPa): 100
Perda de carga nas singularidades e altura do canhão ao solo (kPa): 30
*****

```

Figura VIII.7 – Ficheiro saída_Enrolador.txt onde são guardados os resultados produzidos pelo módulo de dimensionamento. Os dados de saída consistem nos equipamentos seleccionados (canhão, enrolador e conduta principal) e nos seus parâmetros de funcionamento.



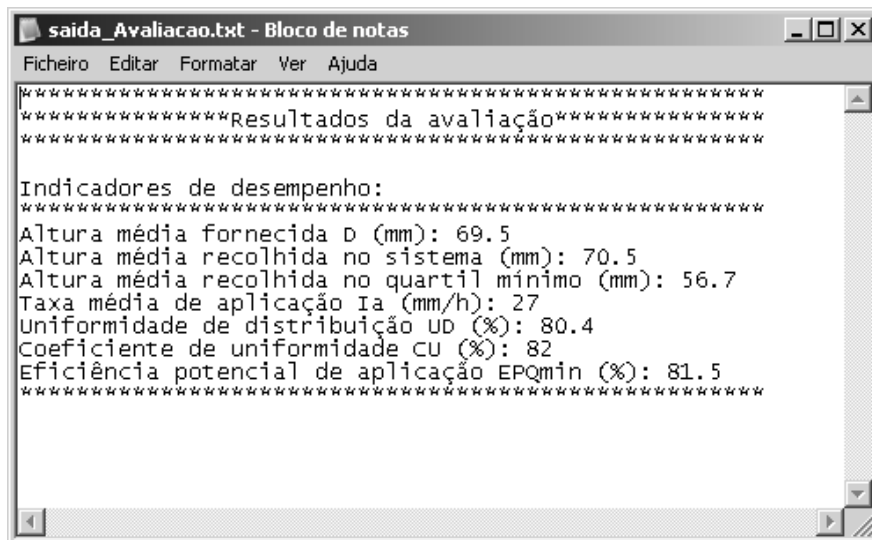
saida_simulador.txt - Bloco de notas

Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda

```

****Colectores****
colector_Esq mm      colector_Dir mm      colector_Esq ml      colector_Dir ml
55.32079            977.599            977.599            977.599
56.3416             995.6381           995.6381           995.6381
56.68258            1001.664           1001.664           1001.664
57.45946            1015.393           1015.393           1015.393
57.53979            1016.812           1016.812           1016.812
58.05559            1025.927           1025.927           1025.927
57.89869            1023.154           1023.154           1023.154
57.60323            1017.933           1017.933           1017.933
57.71736            1019.95            1019.95            1019.95
57.14182            1009.779           1009.779           1009.779
56.97039            1006.75            1006.75            1006.75
56.12698            991.8457           991.8457           991.8457
55.64769            983.3757           983.3757           983.3757
54.4991             963.0783           963.0783           963.0783
53.69622            948.8906           948.8906           948.8906
52.24222            923.1967           923.1967           923.1967
51.074              902.5525           902.5525           902.5525
49.30095            871.2197           871.2197           871.2197
47.3386             836.5422           836.5422           836.5422
45.6254             806.2674           806.2674           806.2674
43.27915            764.806            764.806            764.806
41.1448             727.0886           727.0886           727.0886
38.39159            678.4355           678.4355           678.4355
35.74011            631.58             631.58             631.58
32.49577            574.2478           574.2478           574.2478
29.27159            517.2717           517.2717           517.2717
25.41147            449.0577           449.0577           449.0577
21.34284            377.1591           377.1591           377.1591
16.46736            291.0024           291.0024           291.0024
10.40307            183.8374           183.8374           183.8374
3.528612            62.35573           62.35573           62.35573
0                   0                   0                   0
  
```

Figura VIII.8 – Ficheiro saída_simulador.txt onde são armazenados os dados da simulação das alturas de água recolhidas nos colectores fictícios.



saida_Avaliacao.txt - Bloco de notas

Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda

```

*****
*****Resultados da avaliação*****
*****
Indicadores de desempenho:
*****
Altura média fornecida D (mm): 69.5
Altura média recolhida no sistema (mm): 70.5
Altura média recolhida no quartil mínimo (mm): 56.7
Taxa média de aplicação Ia (mm/h): 27
Uniformidade de distribuição UD (%): 80.4
Coeficiente de uniformidade CU (%): 82
Eficiência potencial de aplicação EPQmin (%): 81.5
*****
  
```

Figura VIII.9 – Ficheiro saída_Avaliacao.txt que contém os resultados do cálculo dos indicadores de desempenho.