



PROCEDIMENTOS E METODOLOGIAS PARA UMA GESTÃO INTEGRADA DA ÁGUA EM GRANDES ÁREAS DE REGADIO

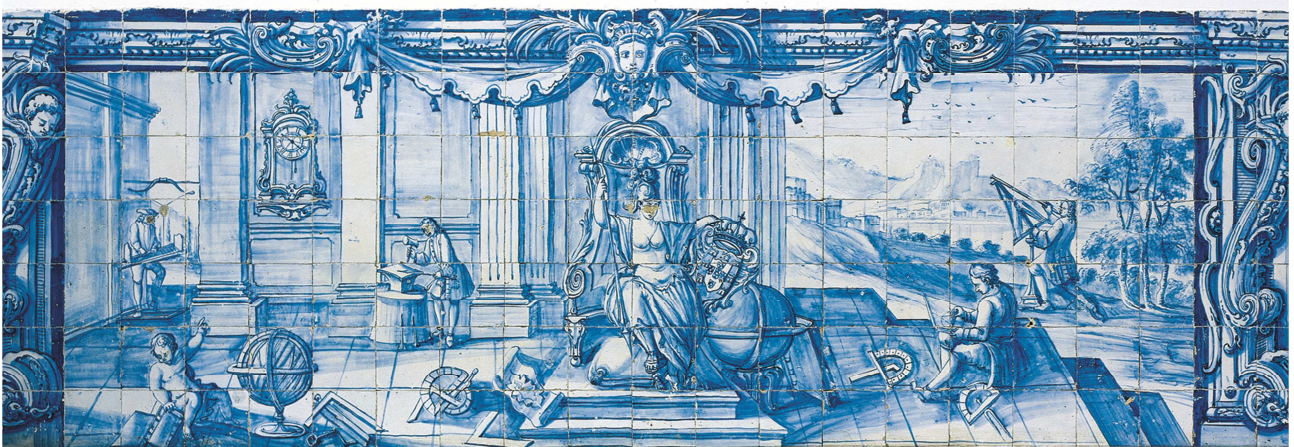
MODELAÇÃO COM TÉCNICAS DE DETECÇÃO REMOTA

Célia do Carmo Toureiro

Tese apresentada à Universidade de Évora
para obtenção do Grau de Doutor em Ciências da Engenharia do Território e do
Ambiente
Especialidade: Engenharia dos Biosistemas

ORIENTADOR: *Ricardo Paulo Serralheiro*

ÉVORA, DEZEMBRO DE 2012



Tese de Doutoramento financiada pelo Ministério da Educação e Ciência
Fundação para a Ciência e a Tecnologia

Bolsa de Doutoramento BD/20134/2004

FCT

Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CIÊNCIA

Aos Meus PAIS

Fonte de Inspiração nos Momentos mais Difíceis

Ao Luís

Pelo estímulo “Querer e Acreditar todos os dias”

Ao Pequeno Luís

Por existir!

AGRADECIMENTOS

Este trabalho de Doutoramento não teria sido possível sem a colaboração e cooperação de várias pessoas e entidades. Registo o meu reconhecido agradecimento a todos os que de alguma forma contribuíram para a sua realização. Fazendo um agradecimento especial aos que de uma forma mais direta ajudaram a concretizar este objetivo:

Ao Professor Ricardo Serralheiro, devo um agradecimento muito especial não só como orientador deste trabalho, mas como responsável pela minha atividade de investigação há mais de uma década. Com ele muito aprendi, os ensinamentos científicos e a ponderação perante a vida. Como doutoranda, muito agradeço a sua orientação, apoio, incentivo e disponibilidade no decorrer deste trabalho. Sem a sua ajuda não teria conseguido chegar até aqui.

À Professora Maria do Rosário Oliveira, professora catedrática do Departamento de Fitotecnia da Universidade de Évora agradeço a sua orientação científica e apoio sempre que solicitado.

À Professora Ana Maria Silva do Departamento de Física da Universidade de Évora, agradeço toda ajuda prestada na análise e tratamento de dados. O seu conhecimento científico e disponibilidade foram uma constante durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Renato Coelho do Departamento de Biologia da Universidade de Évora, agradeço a ajuda prestada na recolha de dados de campo, relativos à monitorização da cultura.

Aos Professores Alfonso Calera, Anna Osann Jochum e Isidriillo Campos do Instituto de Desarrollo Regional da Universidade de Castilla-la-Mancha (UCLM) agradeço a forma desinteressada com que sempre me ajudaram, na disponibilização da informação de satélite e no tratamento e análise de dados. Com eles pode sempre contar no decorrer deste trabalho.

Ao Professor Pablo Zarco-Tejada do Instituto de Agricultura Sostenible de Córdoba (IAS-CSIC), agradeço a disponibilidade para a realização do voo experimental, com plataforma aérea não tripulada.

Ao Professor Soumodip Sarkar e Engenheira Cláudia Marques, do Instituto de Investigação e Formação Avançada, agradeço todo o apoio, incentivo e disponibilidade durante a última fase deste trabalho. A sua ajuda foi preciosa para a concretização deste objetivo.

Aos Docentes do Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora, em especial à Professora Adélia Sousa, aos Professores José Rafael, Shakib Shaihidian, Luís Leopoldo e Lúcio Santos agradeço a sua ajuda sempre que solicitada no decorrer do presente trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Hidrologia do Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora, agradeço o auxílio e ajuda nos trabalhos de campo, o seu apoio foi uma constante durante a realização deste trabalho.

À Associação de Regantes do Divor, Cooperativa Agrícola do Cabido e Agricultores Regantes, em especial ao Engenheiro Pequito, ao Senhor Josué Freixa, ao Sr. Duarte Silva e ao Senhor Joaquim, agradeço todo o apoio e auxílio nos trabalhos de campo. A sua ajuda foi fundamental para a concretização deste trabalho.

Aos meus estagiários João Barradas e Luís Cavaco, agradeço a ajuda na recolha dos dados de campo durante a fase experimental.

Ao Instituto Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrâneas, instituição de acolhimento do meu trabalho de doutoramento, agradeço toda a disponibilidade, apoio e ajuda sempre que solicitado.

Ao Senhor Manuel Junça e Paula Sequeira, que infelizmente já não estão entre nós, um agradecimento muito especial, muito contribuíram para a minha formação académica. O conhecimento, a disponibilidade, a amizade e a boa disposição nunca faltou em muitos momentos que passamos juntos. Ficarão para sempre na minha memória, OBRIGADO.

Aos meus amigos, Custódio Alves, João Roma, Beatriz Castor, Nádia Castanheira, Isabel Laranjeira, Pedro Quartim, António Toureiro, João Reis e Cláudia Gonçalves, com a ajuda de todos foi fácil contornar obstáculos. A amizade e boa disposição foram uma constante durante os anos que trabalhamos juntos.

Aos meus amigos Guilhermina Pias, Rong Zang, Maria João VV, Maria João Marques e Manuel Brandão, agradeço a boa disposição nos momentos de pausa e as palavras de incentivo, importantes à concretização deste trabalho.

Aos meus colegas do Instituto de Investigação e Formação Avançada, Ana Prates, Ana Rita, Carolina, Natália, Felicidade, Domingos e Ângela, agradeço o apoio, incentivo e ajuda em alguns momentos mais difíceis deste trabalho. A sua amizade e boa disposição foram uma constante, sem a sua ajuda tudo teria sido mais complicado.

Aos meus amigos em geral, muito obrigada pelas palavras amigas de incentivo em alguns momentos mais complicados.

Finalmente, à minha família em geral por todo o apoio, ajuda, paciência e incentivo. Sem a sua ajuda não teria conseguido chegar até aqui. Muito sacrificaram o tempo de atenção e convivência familiar em prol do desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Luís, um agradecimento muito especial por tudo, pelo apoio, ajuda, paciência e compreensão, muito nos sacrificamos para conseguir chegar até aqui. Sem a sua ajuda não teria conseguido concretizar muitos objetivos a que me propôs.

Por último, ao pequeno Luís pela sua chegada, foi sem dúvida o estímulo que faltava.

RESUMO

Mediante a utilização de tecnologias de detecção remota, integram-se diferentes fontes de dados da atmosfera e das culturas (imagens da superfície cultivada obtidas por satélite ou por plataforma aérea não tripulada), com os quais se monitorizam, com elevada resolução espacial e temporal, as necessidades hídricas das culturas, calculando a evapotranspiração cultural (ETc), indicadores biofísicos e índices de stress hídrico da vegetação (NDVI, Kc*, Kcb*, CWSI), que indicam a oportunidade e a dotação da rega, facilitando uma eficiente gestão da água, num regadio sustentável. A análise aplicou-se na área regional do Perímetro de Rega do Divor, tendo utilizado 7 parcelas experimentais, que são áreas regadas por rampas rotativas com a cultura do milho, cuja condução agrícola foi da responsabilidade dos respetivos agricultores.

A tecnologia baseada nas imagens obtidas por satélite parece conjugar-se bem com a utilização de sensores (ou câmaras fotográficas), em plataformas voadoras a baixa altitude, resolvendo estas os problemas, inerentes à informação de satélite, nomeadamente à elevada periodicidade e à dependência da nebulosidade.

Toda esta informação é georreferenciada, podendo servir de suporte à elaboração em SIG de mapas da situação hídrica e da oportunidade de rega das culturas, que poderão servir de base a um sistema de avisos de rega aos agricultores e gestão da rega no perímetro ou grande região de regadio.

Palavras-Chave: Detecção Remota, Índices de Vegetação, Coeficientes Culturais, Índice de Stress Hídrico, Balanço Hídrico

PROCEDURES AND METHODOLOGIES FOR INTEGRATED MANAGEMENT OF WATER IN
LARGE IRRIGATION AREAS

MODELLING WITH REMOTE SENSING TECHNIQUES

ABSTRACT

Through the use of remote sense technologies, data from different sources of the atmosphere and crops are integrated (images of the cultivated surface obtained by satellite or by flying unmanned platform), with which crop water requirements are monitored with high spatial and temporal resolution, by calculating evapotranspiration (ET_c), biophysical indicators and indices of water stress of vegetation (NDVI, K_c, K_{cb}, CWSI), indicating the opportunity and the allocation of irrigation, facilitating an efficient water management for a sustainable irrigated agriculture. The analysis applied to Irrigated District of Divor, having used 7 experimental plots, which are areas watered by center-pivot systems, cultivated to corn, the agricultural driving having been the responsibility of the respective farmers.

The technology based on satellite images seems to combine well with the use of sensors (or cameras), located on low altitude flying platforms, by solving some problems inherent to satellite information, in particular to the low frequency and the dependence of cloud cover.

All this information is referenced, and can support the preparation of maps with GIS technology, describing water situation and opportunity of watering crops, which could serve as a basis for a farmers irrigation advice system and the region or the large perimeter irrigation management.

Key-words: Remote Sensing, Vegetation Index, Crop Coefficients, Crop Water Stress Index, Water Balance

ÍNDICE GERAL

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1 Considerações e Objetivos Gerais	1
1.2. Objetivos Específicos.....	4
1.3 Estrutura da Tese.....	6
REVISÃO DE CONHECIMENTOS E ESTADO DA ARTE	9
2.1 Eficiência do Uso da Água em Regadio: produtividade agronómica e produtividade económica.....	9
2.1.1 Enquadramento	9
2.1.2 Relação Água-Produção.....	13
2.2 Gestão da Água em Agricultura de Regadio.....	14
2.2.1 Enquadramento: uso sustentável do recurso água em agricultura de regadio	14
2.3 Indicadores de Gestão da Água em Regadio.....	15
2.3.1. Indicadores do Estado Hídrico do Solo.....	16
2.3.2. Indicadores do Estado Hídrico da Cultura	17
2.3.3. Indicadores Climáticos ou Meteorológicos	18
2.3.4 Balanço de Água no Solo	18
2.4 Técnicas de Gestão da Rega com base no Balanço Hídrico do Solo	21
2.4.1 Modelos de cálculo das Necessidades Hídricas da Cultura baseados no “Método da FAO” ...	21
2.4.2 Utilização de Teledeteção e Sistemas de Informação Geográfica na Gestão das Necessidades Hídricas das Culturas	23
2.4.3 Aplicações: Avisos de Rega e Gestão de Perímetros de Rega	24
2.5 Técnicas de Detecção Remota em Agricultura	25
2.5.1 Enquadramento	25
2.5.2 Principais Aplicações Agronómicas da Teledeteção.....	26
2.6 Metodologias com suporte em Técnicas de Detecção Remota na Gestão da Água em Regadio	28
2.6.1 Enquadramento Geral.....	28
2.6.2 Estimativa da Evapotranspiração e Necessidades Hídricas com base no Balanço Energético da Superfície Terrestre.....	31
2.6.2.1 Enquadramento	31
2.6.2.2 Alguns Modelos de Balanço Energético da Superfície Terrestre mais Utilizados na Estimativa das Necessidades de Água das Culturas.....	33
2.6.3 Estimativa da Oportunidade de Rega com base em Índices de Stress Hídrico.....	37
2.6.3.1 Enquadramento	37
2.6.3.2 Definição Teórica do Índice de Stress Hídrico da Cultura (CWSI)	39
2.6.3.3 Definição Empírica do Índice de Stress Hídrico da Cultura (CWSI).....	42

2.6.3.4 Potencialidades do Índice de Stress Hídrico da Cultura (Crop Water Stress Index, CWSI) na Gestão da Rega.....	44
2.6.4. Estimativa da Necessidades Hídricas com base nos coeficientes culturais calculados com os índices de vegetação obtidos a partir de imagens multiespectrais.....	46
2.6.4.1 Enquadramento	46
2.6.4.2 Estimativa dos Índices de Vegetação (IV) e Determinação dos Coeficientes Culturais	48
2.6.4.3 Vantagens da Determinação das Necessidades Hídricas com os Índices de Vegetação	53
2.6.5 Alguns Projetos com um contributo relevante no Desenvolvimento de Técnicas de Gestão em Agricultura de Regadio com suporte em Técnicas de Detecção Remota.....	53
2.6.6 Limitações e Oportunidades associadas à utilização de Técnicas de Detecção Remota em Agricultura de Regadio	59
2.6.7 Utilização Remota de Sensores em Agricultura de Regadio: Plataformas aéreas não tripuladas.	64
METODOLOGIAS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	67
3.1 Caracterização da Área em Estudo	67
3.1.1 Enquadramento	67
3.1.2 Caracterização Climática	69
3.1.3 Caracterização Pedológica	72
3.2 Delineamento experimental e Parâmetros Monitorizados	73
3.2.1 Parâmetros Agronómicos e Produção Total.....	73
3.2.2 Parâmetros Hidrológicos.....	76
3.2.2.1 Caracterização Hidropedológica da Área em Estudo.....	76
3.2.2.1.1. Informação de Base que caracteriza hidropedologicamente o Perímetro de Rega do Divor	79
3.2.2.2 Dotações Totais de Rega.....	85
3.2.2.3 Disponibilidade de Água no Solo.....	85
3.3 Procedimentos para o Cálculo das Necessidades Hídricas e Balanço Hídrico do Solo (Metodologia FAO 56).....	88
3.3.1 Enquadramento Geral.....	88
3.3.2 Determinação das Necessidades Hídricas (ETc).....	88
3.3.2.1 Cálculo da Evapotranspiração de Referência (ETo).....	88
3.3.2.2 Cálculo da Evapotranspiração Cultural (ETc).....	89
3.3.2.3 Cálculo da Evapotranspiração Cultural Ajustada (ETc _{ajust}).....	95
3.3.2.4 Parâmetros de Base utilizados no Balanço Hídrico do Solo: Agronómicos e Pedológicos...	97
3.3.2.5 Curvas de Retenção de Água no Perfil do Solo e Balanço de Água no Solo	98
3.4 Técnicas de Detecção Remota Utilizadas e Procedimentos	100
3.4.1 Imagens de Satélite Multiespectrais de Alta Resolução: LANDSAT 5 TM	100
3.4.1.1 Características Gerais.....	100
3.4.1.2 Imagens Utilizadas e Pré-Processamento.....	101
3.4.1.3 Interpretação e Análise das Imagens Multiespectrais de Satélite de Alta Resolução.....	103

3.4.1.4 Integração da Informação obtida com as Imagens de Satélite Landsat 5 TM no Balanço Hídrico do Solo	108
3.4.2 Sistema Remoto de Aquisição de Dados da Temperatura de Infravermelhos da Cultura mediante a utilização de Plataforma aérea não tripulada.....	110
3.4.2.1 Caracterização da Plataforma Aérea não Tripulada	110
3.4.2.2 Voo Experimental	112
3.4.2.3 Processamento das Imagens	116
3.4.2.4 Parâmetros Estimados	116
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	119
4.1 Parâmetros Agronômicos, Necessidades Hídricas e Balanço de Água no Solo mediante informação de Satélite (Landsat 5 TM).....	119
4.1.1 Considerações Gerais	119
4.1.2. Índice de Vegetação “NDVI” e desenvolvimento da Cultura	121
4.1.3. Parâmetros Agronômicos: desenvolvimento da cultura do milho na área em estudo	123
4.1.3.1 Índice de Vegetação NDVI “ <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> ” e Desenvolvimento da Cultura (altura da cultura, fração de cobertura do solo pela cultura e índice de área foliar)	123
4.1.3.2. Evapotranspiração Cultural: coeficientes culturais reais, espectrais e da FAO.....	131
4.1.4 Balanço Hídrico do Solo, mediante informação de satélite e metodologia da FAO	144
4.2 Distribuição espacial da Informação obtida com a Imagem de Satélite	154
4.2.1 Índice de Vegetação, NDVI	154
4.2.2 Correlação Distribuição espacial de parâmetros agronômicos (fração cobertura do solo (f_c) e fração da radiação fotossintética activa absorvida (f_{APAR})) e informação experimental – Água no Solo e Produção Total da Cultura:	159
4.2.3 Distribuição Espacial das Necessidades Hídricas da Cultura: Evapotranspiração Cultural.....	166
4.3 Procedimentos e Metodologias de Gestão para a estimativa do Índice de Stress (oportunidade de Rega).....	171
4.3.2 Imagem Térmica de Elevada Resolução obtida por Plataforma aérea não tripulada	171
4.3.2.1 Diferencial Térmico ($T_c - T_a$) e Disponibilidade de Água no Solo	172
4.3.2.2 Cálculo do Índice de Stress Hídrico (CWSI) para a Cultura do Milho, no Perímetro de Rega do Divor, a partir das imagens térmicas obtidas com a plataforma aérea não tripulada.....	176
4.4 Procedimentos e metodologias para a gestão integrada da água de rega na área regional do Divor .	178
4.4.1 Procedimentos e metodologias para uma Gestão integrada da Água de Rega com suporte em técnicas de deteção remota (satélite e plataforma aérea não tripulada).....	178
4.4.1.1 Definição da Área efetivamente regada	179
4.4.1.2 Definição dos parâmetros que caracterizam hidrogeologicamente a área regional de regadio	179
4.4.1.3 Definição dos parâmetros que caracterizam o desenvolvimento da cultura do milho, na área regional do Divor, mediante imagens multiespectrais de alta/elevada resolução.....	180

4.4.2 Procedimentos e metodologias de gestão para a estimativa do Índice de Stress (CWSI) – oportunidade de rega, na cultura do milho, para a área regional do Divor.....	182
CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS	184
PERSPETIVAS FUTURAS	188
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	192

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Esquema Resumo da Tese de Doutoramento.....	7
Figura 2.1 Balanço hídrico do solo no perfil explorado pelo sistema radical da cultura	19
FIGURA 3.1: Localização do Aproveitamento Hidroagrícola do Divor e das áreas experimentais objeto de estudo no presente trabalho.....	68
Figura 3.2: Valores médios da Precipitação Total e Evapotranspiração de Referência (mm), nos anos 1999/2000 a 2008/2009, no Perímetro de Rega do Divor.....	70
Figura 3.3: Registo valores médios da Precipitação Total e Evapotranspiração de Referência (mm), no Perímetro de Rega do Divor, no ano2006/2007 (ano recolha informação) e no ano médio.....	71
Figura 3.4: Mapa de Solos do Perímetro de Rega do Divor (parcelas monitorizadas durante a campanha de 2007).....	72
Figura 3.5: Perímetro de Rega do Divor, parcelas monitorizadas durante a campanha de 2007	73
Figura 3.6: Monitorização da produtividade da cultura durante a colheita.	76
Figura 3.7: Sonda pneumática utilizada na recolha dos monólitos e localização dos pontos de amostragem georreferenciados	78
Figura 3.8: Teor em Argila (%) na camada 0-30 cm.....	80
Figura 3.9: Teor em Argila (%) na camada 30-60 cm.....	80
Figura 3.10: Capacidade de Campo (% vol.) na camada 0-30 cm.....	81
Figura 3.11: Capacidade de Campo (%) na camada 30-60 cm.....	81
Figura 3.12: Coeficiente de Emurchecimento (% vol.) na camada 0-30 cm.....	82
Figura 3.13: Coeficiente de Emurchecimento (%) na camada 30-60 cm.....	82
Figura 3.14: Capacidade Utilizável (mm) na camada 0-30 cm.....	83
Figura 3.15: Capacidade Utilizável (%) na camada 30-60 cm.....	83
Figura 3.16: Localização e ilustração das Estação de Controlo para monitorização dos teores de água no solo, em cada parcela experimental. Equipamento utilizado: Sonda TDR.....	86
Figura 3.17: Calibração da Sonda TDR por camada do perfil do solo.....	87
Figura 3.18a: Curva dos coeficientes culturais e definição dos estádios de desenvolvimento, correspondente ao procedimento do coeficiente cultural simples.....	90
Figura 3.18b: Curva dos coeficientes culturais e definição dos estádios de desenvolvimento, correspondente ao procedimento do coeficiente cultural dual.....	91
Figura 3.19: Delimitações das zonas de rendimento ótimo e de carência hídrica no balanço hídrico do solo (<i>Fonte: Teixeira, 1992</i>).....	98
Figura 3.20: Diagrama de Pré-Processamento das Imagens Landsat 5 TM utilizadas.....	103
Figura 3.21: Diagrama que ilustra os diferentes fatores que interferem na formação de biomassa das plantas.....	107
Figura 3.22: Sistema de Gestão Integrada da Água de Rega mediante informação multiespectral	

de Satélite.....	109
Figura 3.23: Composição da Plataforma Aérea não tripulada utilizada no estudo.....	111
Figura: 3.24a: Início do voo durante a missão no Perímetro do Divor em 2010.....	113
Figura: 3.24b: Veículo Aéreo não tripulado equipado com a câmara térmica de elevada resolução	113
Figura: 3.25a: Lançamento da plataforma aérea	113
Figura: 3.25b: Monitorização do Veículo (UAV) durante a missão realizada em 2010.....	113
Figura 3.26: Área sobrevoada pela Plataforma Aérea não Tripulada.....	114
Figura 3.27: Plano de voo realizado – passagens realizadas pelo veículo não tripulado, equipado com a câmara térmica de elevada resolução.....	115
Figura 3.28: Plano de voo realizado – esquema das posições de recolha de cada imagem térmica pelo veículo não tripulado.....	115
Figura 3.29: Localização dos pontos de controlo – Amostras gravimétricas – nas quatro unidades experimentais.....	117
Figura 4.1: Imagens RGB obtidas com o satélite Landsat 5TM, nas principais fases desenvolvimento da cultura do milho, no Perímetro de Rega do Divor (sete unidades experimentais), durante a campanha de rega de 2007.....	120
Figura 4.2: Imagens RGB dos dias 28 de Maio e 13 de Junho de 2007, eliminadas do estudo pela presença de nebulosidade acentuada.....	121
Figura 4.3: Evolução temporal dos valores de NDVI e registo do início da floração, nas 7 unidades experimentais.....	122
Figura 4.4: Altura da Cultura e NDVI nas 7 unidades experimentais.....	124
Figura 4.5: Curvas de NDVI, f_c , LAI e f_{APAR} verificadas na parcela experimental 1.....	126
Figura 4.6: Curvas de NDVI, f_c , LAI e f_{APAR} verificadas na parcela experimental 2.....	126
Figura 4.7: Curvas de NDVI, f_c , LAI e f_{APAR} verificadas na parcela experimental 3.....	127
Figura 4.8: Curvas de NDVI, f_c , LAI e f_{APAR} verificadas na parcela experimental 4.....	128
Figura 4.9: Curvas de NDVI, f_c , LAI e f_{APAR} verificadas na parcela experimental 5.....	128
Figura 4.10: Curvas de NDVI, f_c , LAI e f_{APAR} verificadas na parcela experimental 6.....	129
Figura 4.11: Curvas de NDVI, f_c , LAI e f_{APAR} verificadas na parcela experimental 7.....	130
Figura 4.12: Correlação o índice de vegetação (NDVI) obtido a partir das imagens de satélite Landsat 5 TM e o índice de área foliar (LAI) obtido a partir de informação experimental.....	131
Figura 4.13: Curvas de K_c e K_{cb} reais nas parcelas experimentais 1 a 7.....	132
Figura 4.14: Relação linear K_c e K_{cb} com NDVI, encontrada para o Perímetro de Rega do Divor.	133
Figura 4.15: Curvas de Coeficiente Cultural Basal (K_{cb}^*) calculado com base no índice de vegetação (NDVI) e tabelado pela FAO (K_{cb}) (Allen <i>et al.</i> , 1998), para a parcela experimental 1...	134
Figura 4.16: Coeficiente Cultural (K_c^*) calculado com base no índice de vegetação (NDVI) e tabelado pela FAO (K_c) (Allen <i>et al.</i> , 1998), para a parcela experimental 1	134
Figura 4.17: Curvas de K_c obtidas mediante a aplicação dos 3 procedimentos utilizados –	

informação experimental (Kc real), FAO (Kc FAO) e Satélite (Kc*), em todas as parcelas experimentais.....	136
Figura 4.18: Evapotranspiração Cultural obtida mediante a aplicação dos 3 procedimentos utilizados – informação experimental (Kc real), FAO (Kc FAO) e Satélite (Kc*), evapotranspiração de referência (ETo), precipitação (P) e Rega (R), na parcela experimental 1.....	137
Figura 4.19: Evapotranspiração Cultural obtida mediante a aplicação dos 3 procedimentos utilizados – informação experimental (Kc real), FAO (Kc FAO) e Satélite (Kc*), evapotranspiração de referência (ETo), precipitação (P) e Rega (R), na parcela experimental 2.....	138
Figura 4.20: Evapotranspiração Cultural obtida mediante a aplicação dos 3 procedimentos utilizados – informação experimental (Kc real), FAO (Kc FAO) e Satélite (Kc*), evapotranspiração de referência (ETo), precipitação (P) e Rega (R), na parcela experimental 3.....	138
Figura 4.21: Evapotranspiração Cultural obtida mediante a aplicação dos 3 procedimentos utilizados – informação experimental (Kc real), FAO (Kc FAO) e Satélite (Kc*), evapotranspiração de referência (ETo), precipitação (P) e Rega (R), na parcela experimental 4.....	139
Figura 4.22: Evapotranspiração Cultural obtida mediante a aplicação dos 3 procedimentos utilizados – informação experimental (Kc real), FAO (Kc FAO) e Satélite (Kc*), evapotranspiração de referência (ETo), precipitação (P) e Rega (R), na parcela experimental 5.....	139
Figura 4.23: Evapotranspiração Cultural obtida mediante a aplicação dos 3 procedimentos utilizados – informação experimental (Kc real), FAO (Kc FAO) e Satélite (Kc*), evapotranspiração de referência (ETo), precipitação (P) e Rega (R), na parcela experimental 6.....	140
Figura 4.24: Evapotranspiração Cultural obtida mediante a aplicação dos 3 procedimentos utilizados – informação experimental (Kc real), FAO (Kc FAO) e Satélite (Kc*), evapotranspiração de referência (ETo), precipitação (P) e Rega (R), na parcela experimental 7.....	140
Figura 4.25: Fração de Cobertura do Solo (fc) obtida a partir da informação de satélite, FAO e informação experimental.....	145
Figura 4.26: Curvas de Kcb* (Kcb NDVI) e Kcb (FAO), em todas as unidades experimentais.....	146
Figura 4.27: Curvas de Kcb*, Kc*real e Kc*potencial em todas as unidades experimentais.....	148
Figura 4.28: Evapotranspiração Cultural, ETc (FAO) e obtida por informação de satélite (ETc*real) em todas as unidades experimentais.....	150
Figura 4.29: Balanço de Água no Solo (mm) obtido mediante informação de satélite e informação da FAO e monitorização direta no solo (sonda TDR), nas 7 unidades experimentais.....	151

Figura 4.30: Correlação entre os valores de água no solo obtidos com o balanço hídrico mediante informação de satélite e a monitorização direta da água no perfil do solo (sonda TDR), nas 7 unidades experimentais.....	153
Figura 4.31: Distribuição espacial do índice de vegetação (NDVI) nas parcelas experimentais 1, 3, 4 e 5, durante a fase de desenvolvimento vegetativo (29 de Junho)	154
Figura 4.32: Distribuição espacial do índice de vegetação (NDVI) nas parcelas experimentais 2, 6 e 7, durante a fase de desenvolvimento vegetativo (29 de Junho)	155
Figura 4.33: Distribuição espacial do índice de vegetação (NDVI) nas parcelas experimentais 1, 3, 4 e 5, durante a fase de floração e formação do grão (31 de Julho)	156
Figura 4.34: Distribuição espacial do índice de vegetação (NDVI) nas parcelas experimentais 2, 6 e 7, durante a fase de floração e formação do grão (31 de Julho)	157
Figura 4.35: Distribuição espacial do índice de vegetação (NDVI) nas parcelas experimentais 1, 3, 4 e 5, durante o início da fase de maturação (1 de Setembro)	158
Figura 4.36: Distribuição espacial do índice de vegetação (NDVI) nas parcelas experimentais 2, 6 e 7, durante o início da fase de maturação (1 de Setembro)	158
Figura 4.37: Distribuição espacial da fração de cobertura do solo (f_c), na parcela experimental 6, durante as fases de desenvolvimento – 1. Desenvolvimento vegetativo (29 de Junho), 2. Floração e Formação do Grão (31 de Julho), 3. Maturação (1 de Setembro).....	160
Figura 4.38: Distribuição espacial da fração da radiação fotossintética ativa absorvida (f_{APAR}), na parcela experimental 6, nas fases de desenvolvimento – 1. Desenvolvimento vegetativo (29 de Junho), 2. Floração e Formação do Grão (31 de Julho), 3. Maturação (1 de Setembro).....	161
Figura 4.39: Distribuição espacial da fração da radiação fotossintética ativa absorvida (f_{APAR}) acumulada – obtida e 5 datas de observação: 29 de Junho, 15 de Julho, 31 de Julho, 16 de Agosto e 1 de Setembro.....	162
Figura 4.40: Distribuição espacial da Produção total da Cultura, na parcela experimental 6	162
Figura 4.41: Distribuição espacial da fração de cobertura do solo (f_c), na parcela experimental 1, durante as fases de desenvolvimento – 1. Desenvolvimento vegetativo (29 de Junho), 2. Floração e Formação do Grão (31 de Julho), 3. Início da Maturação (1 de Setembro).....	163
Figura 4.42: Distribuição espacial da fração da radiação fotossintética ativa absorvida (f_{APAR}), na parcela experimental 1, nas fases de desenvolvimento – 1. Desenvolvimento vegetativo (29 de Junho), 2. Floração e Formação do Grão (31 de Julho), 3. Início da Maturação (1 de Setembro)...	164
Figura 4.43: Distribuição espacial da fração da radiação fotossintética ativa absorvida (f_{APAR}) acumulada – obtida em 5 datas de observação: 29 de Junho, 15 de Julho, 31 de Julho, 16 de Agosto e 1 de Setembro.....	164
Figura 4.44: Distribuição espacial da Produção total da Cultura, na parcela experimental 1.....	165
Figura 4.45: Correlação entre os valores médios de água no solo, monitorizada com recurso à sonda TDR e os valores de NDVI estimados a partir das imagens de satélite, nas parcelas 1 e 6....	166
Figura 4.46: Distribuição espacial da Evapotranspiração Cultural (ET_c^*) nas parcelas	

experimentais 1, 3, 4 e 5, durante a fase de desenvolvimento vegetativo (29 de Junho).....	167
Figura 4.47: Distribuição espacial da Evapotranspiração Cultural (ET_c^*) nas parcelas experimentais 1, 3, 4 e 5, durante a fase de Floração e Formação Grão (31 de Julho).....	167
Figura 4.48: Distribuição espacial da Evapotranspiração Cultural (ET_c^*) nas parcelas experimentais 1, 3, 4 e 5, no início Fase Maturação (1 de Setembro).....	168
Figura 4.49: Distribuição espacial da Evapotranspiração Cultural (ET_c^*) nas parcelas experimentais 2,6 e 7, durante a fase de desenvolvimento vegetativo (29 de Junho).....	168
Figura 4.50: Distribuição espacial da Evapotranspiração Cultural (ET_c^*) nas parcelas experimentais 2,6 e 7, durante a fase de Floração e Formação Grão (31 de Julho).....	169
Figura 4.51: Distribuição espacial da Evapotranspiração Cultural (ET_c^*) nas parcelas experimentais 2,6 e 7, no início Fase de Maturação (1 de Setembro).....	169
Figura 4.52: Distribuição espacial da Evapotranspiração Cultural acumulada (ET_c^*) em todas as parcelas experimentais, em 5 datas de observação, mediante informação de satélite em 5 datas de observação (29 de Junho, 15 de Julho, 31 de Julho, 16 de Agosto e 1de Setembro).....	170
Figura 4.53: Imagem térmica de elevada resolução obtida com a plataforma aérea não tripulada, durante a campanha de 2010, no Perímetro de Rega do Divor.....	172
Figura 4.54: Diferencial térmico (T_c-T_a), em °C, obtido com a plataforma aérea não tripulada, durante a campanha de 2010, no Perímetro de Rega do Divor.....	173
Figura 4.55: Correlação Linear entre o diferencial térmico (T_c-T_a), em °C e a disponibilidade de água no solo (mm).....	174
Figura 4.56: Correlação Linear entre valores de plena disponibilidade hídrica e o diferencial térmico (T_c-T_a), em °C.....	175
Figura 4.57: Distribuição Espacial CWSI em 4 unidades experimentais (P1, P3, P4 e P5) do Perímetro do Divor.....	176
Figura 4.58: Correlação entre os valores de CWSI e água no solo (monitorização por amostragem).....	177
Figura 4.59: Diagrama com os procedimentos de base para a definição do mapa de uso do solo (classificação)	179
Figura 4.60: Diagrama com os procedimentos de base para caracterização hidropedológica de uma área regional regadio (base experimental do Divor).....	180
Figura 4.61: Diagrama com os procedimentos de base para estimar os parâmetros agronómicos, e necessidades hídricas das culturas, a uma escala regional.....	182

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1: Informação necessária à concretização dos modelos de gestão da água na agricultura de regadio.....	22
Tabela 2.2: Indicadores (Parâmetros) obtidos a partir de Técnicas de Detecção Remota.....	29
Tabela 2.3: Índices de Stress Hídrico: cálculo, aplicação e referência bibliográfica.....	39
Tabela 2.4: Revisão aos Índices de Vegetação mais comuns e sua aplicação.....	49
Tabela 2.4 (cont): Revisão aos Índices de Vegetação mais comuns e sua aplicação.....	50
Tabela 2.5: Referência a trabalhos que obtiveram equações matemáticas que permitem calcular valores de Kcb* (coeficiente cultural espectral) a partir de índices de vegetação.....	52
Tabela 3.1: Precipitação Total (mm) registada nos últimos 10 anos hidrológicos, na Estação Meteorológica do Perímetro de Rega do Divor.....	69
Tabela 3.2: Evapotranspiração de Referência (ET _o) (mm) calculada com a fórmula climática de Penman-Monteith, e os registos meteorológicos dos últimos 10 anos hidrológicos, na Estação Meteorológica do Perímetro de Rega do Divor.....	70
Tabela 3.3: Data de sementeira, ciclo cultural e altura média da cultura em cada parcela experimental.....	75
Tabela 3.4: Limites de água útil do solo nas sete unidades experimentais.....	84
Tabela 3.5: Parâmetros pedológicos e agronómicos utilizados na determinação dos coeficientes culturais e no balanço de água no solo, de acordo com os procedimentos descritos pela FAO 56 (Allen <i>et al.</i> , 1998).....	97
Tabela 3.6: Características Principais das imagens LANDSAT 5 TM.....	101
Tabela 3.7: Imagens de Satélite Landsat 5 TM utilizadas.....	101
Tabela 3.8: Expressões Analíticas encontradas em bibliografia.....	108
Tabela 3.8: Limite inferior e superior para estimativa do índice de stress, CWSI (Toureiro <i>et al.</i> , 2008).....	118
Tabela 4.1: Evapotranspiração Cultural (ET _{cr} , ET _c * e ET _c), obtidas com base nos valores de K _{cr} (reais), K _c * (satélite) e K _{cb} (recomendados pela FAO), por unidade experimental.....	142
Tabela 4.2: Necessidades Liquidadas de Rega, obtidas com base nos valores de K _{cr} (reais) – NLR1, K _c * (satélite) – NLR2 e K _{cb} – NLR 3 (recomendados pela FAO), por unidade experimental.....	143

Tabela 4.3: Disponibilidade de água no solo, T_c , $T_c - T_a$, capacidade de campo (C_c) e coeficiente de emurchecimento (C_e).....	174
Tabela 4.4: Expressões matemáticas que relacionam f_c e LAI com valores de NDVI, para a cultura do milho, na área regional do Divor.....	181
Tabela 4.5: Expressões analíticas desenvolvidas por outros autores e validadas para a área regional do Divor, que relacionam LAI e f_c , f_{APAR} e NDVI.....	181
Tabela 4.6: Expressões matemáticas que relacionam K_c^* e K_{cb}^* com valores de NDVI, para a cultura do milho, na área regional do Divor.....	181
Tabela 4.7: Limite inferior e superior para estimativa do índice de stress CWSI (Toureiro <i>et al.</i> , 2008).....	183
Tabela 5.1: Expressões analíticas para cálculo de indicadores biofísicos a partir de informação de detecção remota, para a área regional do Divor e Cultura do Milho.....	185

LISTA DE SÍMBOLOS E ACRÔNIMOS

- γ - Constante Psicométrica ($\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- ρ - Massa volúmica do ar (kgm^{-3})
- Δ - Declive da curva pressão de vapor na saturação ($\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- 1-fc – Fração exposta ao processo evaporativo
- AET – Lâmina de água disponível para evaporação, na camada superficial do solo (mm)
- AFE – Quantidade de Água facilmente evaporada da superfície do solo (mm)
- APAR – Radiação absorvida pelo coberto
- ARG – Teor de argila (%)
- ASTIMwR – Application of Space Technologies for the Management of Water Resources
- C – Comprimento
- CC – Capacidade de Campo (mm)
- CE - Coeficiente de emurchecimento permanente (% vol., mm/m)
- CI – Chlorophyll Indices
- COTR – Centro Operativo e de Tecnologias de Regadio
- C_p – Capacidade Calorífica do ar ($\text{J.Kg}^{-1}\text{C}^{-1}$)
- C_p – Capacidade calorífica do ar ($\text{Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$)
- CR - Ascensão Capilar (mm)
- CR_i - Ascensão capilar proveniente da toalha freática no tempo i (mm)
- CTV – Canopy Temperature Variability
- CWSI – Crop Water Stress Index
- Dap – Densidade Aparente
- Datum ED50 – European Datum 1950
- D_e, i – Quantidade de Água disponível para evaporação na camada superficial do solo no dia i (mm)
- DEMETER – DEMonstration of Earth Observation Technologies in Routine Irrigation advisory Services
- DGADR – Direção Geral do Ambiente e Desenvolvimento Rural
- $D_{pe,i}$ – Perdas de água por percolação profunda no dia i (mm)
- DP_i - Perdas de água por percolação profunda no tempo i (mm)
- $D_{r,i-1}$ - Défice de água na zona radical no final do período anterior, $i-1$ (mm)
- $D_{r,i}$ - Défice de água na zona radical do solo no final do período de tempo, i (mm)
- e – SAIAS® – Space-Assisted Irrigation Advisory Service
- e - SARAS® – Servicio de Asesoramiento de Riego Asistido por Satélite
- e_a – Pressão de vapor real para T_a (kPa)
- E_i – Evaporação no dia i (mm)
- $e^\circ(T)$ – Pressão de vapor de saturação para uma temperatura T (kPa)
- e_s – Pressão de vapor de saturação para T_s (kPa)
- ET - Taxa de Evapotranspiração (mm/dia ou mm)

E_t e *E_{Tr}* - Evapotranspiração real (mm/dia ou mm)
E_{Tc} - Taxa de evapotranspiração cultural (mm/dia ou mm)
E_{Tc_ajust} – Evapotranspiração Cultural ajustada (mm/dia)
E_{Tc,i} - Evapotranspiração da cultura no período i (mm)
E_{Tm} - Evapotranspiração máxima (mm/dia ou mm)
ETM+ - Enhanced Thematic Mapper Plus
E_{To} – Evapotranspiração de Referência (mm/dia ou mm)
E_{Tp} – Evapotranspiração potencial (mm/dia ou mm)
EVI – Enhanced Vegetation Index
f_{APAR} - Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa
f_c - *Ground Cover Fraction*, Fração Cobertura da Vegetação (%)
f_{ew} – Fração do solo exposta e humedecida
f_w – Fração da superfície do solo humedecida
G - Fluxo de calor do solo ($W m^{-2}$)
G – Potencial de Ascensão Capilar
GPS – Global Positioning System
h – Altura da Cultura (m)
H - fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$)
h_{max} – Altura máxima da cultura (m)
h_{min} – Altura mínima da cultura (m)
HR_{máx}, *HR_{min}*- Humidade Relativa Máxima e Mínima (%)
IAF – Índice de Área Foliar
ICAAM – Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrâneas
I_i - Dotação líquida de rega no dia i que infiltra no solo (mm)
INAG – Instituto Nacional da Água
IV - Índices de Vegetação
IVP – Infravermelho Próximo (bandas do espectro)
K_c – Coeficiente Cultural
K_{c}* - Coeficiente Cultural Espectral
K_{cb} - Coeficiente Cultural Basal
K_{c_ini}, *K_{c_med}*, *K_{c_final}* – Coeficientes nas fases: inicial, média e final
K_{c_max} – Coeficiente Cultural Máximo
K_e – Coeficiente da taxa de evaporação da água do solo
K_r – Coeficiente adimensional de redução da evaporação
K_s – Coeficiente de stress hídrico
K_y - Coeficiente de sensibilidade hídrica
L – Largura
LAI – *Leaf Area Index*
LE- Fluxo de calor latente ($W m^{-2}$)

- LRO – Limite do Rendimento Ótimo (mm)
- MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectrometer
- MODTRAN – MODerate Resolution Atmospheric TRANSMission
- NOAA – National Ocean and Atmosphere Administration
- NDVI - *Normalized Difference Vegetative Index*
- NDVI_{max} – NDVI máximo
- NDVI_s – NDVI do solo nu
- NDWI - *Normalized Difference Water Index*
- NHC – Necessidades Hídricas das Culturas
- NHC – Necessidades Hídricas das Culturas
- NIR – Radiância na Banda do Infravermelho próximo
- NASA – National Aeronautics and Space Administration
- NPA – Nível de Pleno Armazenamento
- NRI - *Nitrogen Reflectance Index*
- OSAV - *Optimized SAVI*
- OT – Observação Terrestre
- p – Défice de Gestão Permissível ou fração da reserva utilizável que a cultura pode extrair sem ocorrer stress hídrico
- PAC – Política Agrícola Comum
- PAR I - Radiação incidente
- P_i - Precipitação no período i (mm)
- PLEIADeS – Participatory multi-level EO-assisted tools for irrigation water management and agricultural decision support
- PRI - Photochemical Reflectance Index
- PVI - Perpendicular Vegetative Índice
- R - Teor de água no solo (mm)
- ra – resistência aerodinâmica (sm⁻¹)
- rc – resistência do coberto vegetal (sm⁻¹)
- rcp – resistência do coberto vegetal quando a cultura transpira à taxa máxima (sm⁻¹)
- RDC – Rega Deficitária Controlada
- REW – Readily Evaporable Water (mm)
- RFU – Reserva Facilmente Utilizável
- R_g - Radiação Global (Wm⁻²)
- R_n - Radiação Líquida emitida para a atmosfera (albedo) (W/m²)
- RO_i - Escorrimento superficial no dia i (mm)
- R_s - Radiação de curto comprimento de onda (W m⁻²)
- RU – Reserva Utilizável (mm)
- SAVI - *Soil-Adjusted Vegetative Índice*
- SDD - *Stress Degree Day*

SEBI - *Surface Energy Balance Index*
 SEBS - *Surface Energy Balance System*
 SIG – Sistema de Informação Geográfica
 SMIR – Satellite Monitoring of Irrigation
 SPOT – Systeme Probatoire d’Observation de la Terre Multiestrectral
 S-SEBI - *Simplified Surface Energy Balance System*
 SVAT – Soil Vegetation Atmosphere Transfer Model
 SWIR –
 T – Temperatura do ar (°C)
 Ta – Temperatura do ar (°K)
 Tc – Temperatura do Coberto (°C)
 TDR - Time-Domain Reflectometry
 T_{ew} – Lâmina de água transpirada (mm)
 TEW – Total Evaporable Water (mm)
 TIC – Tecnologias de Informação e Comunicação
 TIR – Thermal Infrared
 TM – Thematic Mapper
 Tmax, Tmin – Temperatura máxima e mínima (°C)
 Ts – Temperatura da superfície (°K)
 TSAVI - *Transformed Soil Ajusted Vegeative Index*
 U₂ – Velocidade do Vento a 2 m de altura (ms⁻¹)
 UAV – Unmanned Aerial Vehicle
 USDA – Soil Conservation Service
 V – Vermelho (bandas do espectro)
 VARI – Visible Atmospherically Resistant Indices
 VDP - Défice de Pressão de Vapor
 VIS – Banda visível do espectro
 WDI - *Water Deficit Index*
 WDRI – Wide Dynamic Range Vegetation Index
 Ya - Produção real (Kg/ha)
 Ym - Produção máxima (Kg/ha)
 Ze – Espessura da superfície Evaporante (m)
 Zr_{max} – Aprofundamento Radical máximo (m)
 α - Albedo da superfície
 ea e es - Emissividade do ar e da superfície
 θFc, θcc – Teor de Humidade do solo à Capacidade de campo (mm)
 θwp, θce – Teor de Humidade do solo ao Coeficiente de Emurchecimento(mm)
 λ_v - Calor latente de vaporização (MJ kg⁻¹)
 σ - Constante de *Stefan-Boltzmann* (W m⁻² K⁻⁴)

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Considerações e Objetivos Gerais

A garantia da produção alimentar a nível mundial está diretamente relacionada com a disponibilidade do recurso água em todo o planeta (FAO, 2002). Neste contexto, importa referir que a agricultura de regadio é responsável por 40% da produção alimentar mundial, ocupando apenas cerca de 17% da superfície agrícola mundial (Martin de Santa Olalla, et al., 2005). Em contrapartida, esta forma de agricultura recorre ao uso intenso de recursos hídricos de qualidade, sempre mais escassos.

Prevê-se que com o aumento populacional, a necessidade de produção alimentar sofra um incremento de cerca de 57 %, entre 1990 e 2025 (Martin de Santa Olalla, et al., 2005). Assim, associada à produção agrícola total estará o aumento da superfície irrigada. Sendo a agricultura de regadio responsável por 70% dos consumos mundiais de água, será necessário e urgente utilizar estratégias que otimizem a utilização deste recurso em regadio, sendo importante e imprescindível o desenvolvimento de ferramentas de gestão operativas e que contribuam para melhorar a eficiência no consumo da água em agricultura de regadio.

Neste sentido, a FAO (2003) refere que nos próximos 30 anos a utilização de técnicas de eficiência de uso da água em regadio poderá ser a solução mais promissora, podendo-se triplicar a área regada com apenas um incremento anual de 292 km³ de água de rega (2.128 km³ em 1998 para 2.420 km³ em 2030).

Segundo o “Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água” (2001) a agricultura portuguesa utiliza cerca de 87% do total de água utilizada em Portugal, dos quais cerca de 40% são desperdiçados devido à baixa eficiência de utilização, representando um custo acrescido do ponto de vista económico, mas também ambiental. Neste sentido, existe uma importância relevante a otimização da utilização dos recursos hídricos, conduzindo a maior eficiência na utilização da água e consequentemente à maximização da sua economia. São objetivos gerais da Lei da Água (Lei nº 52/2005), promover uma utilização sustentável da água, baseada na proteção a longo prazo dos recursos hídricos disponíveis;

assegurar o fornecimento do recurso água em quantidade suficiente e em boa qualidade, conforme necessário para uma utilização sustentável, equilibrada e equitativa da água.

No programa de medidas previsto pela lei da água estão incluídas as medidas destinadas à concretização dos princípios da recuperação dos custos dos serviços da água e do utilizador-pagador, através do estabelecimento de uma política de preços da água e da responsabilização dos utilizadores, em consonância com a análise económica das utilizações da água e com a correta determinação dos custos dos serviços da água associados com as atividades utilizadoras dos recursos hídricos.

Importa também referir que a escassez do recurso água que nos últimos anos se tem feito notar em todo o mundo, como uma realidade dura em regiões com clima Mediterrânico, e em particular na região Alentejo, tem implicações severas na produção agrícola, em particular na agricultura de regadio. Neste sentido, os empresários agrícolas devem estar preparados para aplicar medidas que otimizem a eficiência do uso da água na agricultura, utilizando tecnologias agrícolas adequadas, com atitude conservacionista, ainda que empresarial. Utilizando o recurso água de forma estratégica e eficiente, como recurso escasso e limitado que é, assegura-se a sua disponibilidade futura.

Neste sentido, e segundo o “Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água” (2001), uma das medidas a adotar está diretamente relacionada com a “Adequação dos volumes de rega às necessidades hídricas das culturas”, desenvolvendo a necessidade da implementação de estratégias de condução da água de rega e da criação de sistemas de avisos de rega. Será necessário regar de modo a apenas repor no solo, em tempo oportuno e na zona explorada pelo sistema radical, a quantidade de água evapotranspirada pelas culturas, sendo esta a base de uma boa eficiência do uso da água, maximização da produção por unidade de água consumida e redução dos impactos ambientais associados, a contaminação dos recursos hídricos e a degradação do solo.

É necessário acompanhar com a maior exatidão possível qual a quantidade de água a aplicar e qual o momento para o fazer, definindo a dotação e a oportunidade de rega. Este objetivo de gestão otimizada da rega conseguir-se-á provavelmente através do desenvolvimento de técnicas de gestão da rega em tempo real, pela monitorização (quase) permanente do uso da água e do estado hídrico das culturas e do solo.

Neste sentido, e em primeiro lugar, será necessário determinar o consumo de água pelas culturas – evapotranspiração cultural (ETc), mediante a utilização de procedimentos diretos (que implicam procedimentos de campo caros, de elevado tecnicismo) ou procedimentos indiretos mas estimativos, fornecendo valores com adequado grau de precisão para a condução da rega. Estas estimativas são efetuadas através da utilização de dados climáticos diários (que permitem o cálculo da evapotranspiração de referência “ETo”), combinando com informação agronómica (tipo de cultura e estágio de desenvolvimento) para determinação dos coeficientes culturais (Kc), podendo assim calcular a ETc, através do produto $Kc \cdot ETo$. Todos os procedimentos de cálculo para os valores de ETc encontram-se descritos na publicação FAO 56 (Allen et. al., 1998). Em segundo lugar, será necessário determinar a oportunidade de rega, ou seja, o “quando regar”, o que poderá ser feito recorrendo a modelos de balanço hídrico, conjugando com a informação relativa aos consumos (ETc), informação pedológica (solos) e

método de rega utilizado. Será de toda a importância validar a informação fornecida pelo balanço com dados efetivamente medidos (teores de água no solo e dotações de rega).

Os procedimentos descritos enquadram-se na promoção de práticas de rega eficientes – gestão da água de rega em tempo real – as quais requerem o conhecimento de parâmetros de base: meteorológicos, pedológicos e culturais. A este tipo de informação está naturalmente associada uma grande variabilidade temporal e espacial, própria da informação em causa. A utilização de metodologias que nos permitam conhecer em elevada representação estes parâmetros é de extrema importância para o regadio.

A utilização de tecnologias, como a deteção remota mediante a utilização de imagens de satélite e sensores aerotransportados (radiómetros, espectro radiómetros, etc.), revelou-se nos últimos anos uma peça altamente promissora na recolha de informação base para a gestão eficiente da água de rega à escala regional, ficando assim ultrapassadas as limitações impostas pela variabilidade e dispersão que caracterizam as parcelas de rega dentro de uma região. Os sensores remotos permitem recolher informação sobre variáveis importantes que caracterizam a superfície terrestre e os processos que sobre ela ocorrem, com carácter espacialmente distribuído e com alta-frequência temporal.

A monitorização de parâmetros relacionados com a cultura utilizando técnicas de deteção remota, que traduzam de alguma maneira o estado hídrico das plantas, p.e. índices de refletância e temperatura do coberto vegetal, poderão ser ótimos indicadores (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index; CWSI, *Crop Water Stress Index*) do estado hídrico da cultura em tempo real, com elevado potencial para a integração na prática da gestão da água de rega.

Neste sentido, a prática de uma agricultura de regadio sustentável está diretamente relacionada com a utilização de tecnologias de gestão da rega à escala regional, cuja finalidade é racionalizar a disponibilidade do factor água, no sentido da sua otimização, tendo em vista a maximização dos rendimentos, com minimização dos custos de investimento e de exploração, bem como a redução dos custos de impacte ambiental que estão inerentes à intensificação agrícola.

A gestão da água à escala regional integra e amplia o conhecimento e a tecnologia da gestão desenvolvidos à escala da parcela, habitualmente praticada. Interessará sobretudo às autoridades e entidades gestoras dos perímetros de rega, que passarão a dispor de informação global da sua área de gestão, com rigor e atualização frequente, servindo-lhes de apoio à decisão, para uma otimização do uso global da água. Por outro lado, será essa mesma informação que servirá de base aos sistemas de avisos de rega aos agricultores, permitindo uma execução atempada da rega, igualmente otimizada e eficiente, dos pontos de vista económico e ambiental.

O presente trabalho enquadra-se na linha de trabalho cujo objetivo geral é desenvolver e validar procedimentos e metodologias de gestão que procurem otimizar a eficiência na utilização da água em agricultura de regadio, podendo servir de base ao desenvolvimento de sistemas de avisos de rega.

O presente trabalho de doutoramento pretende dar algum contributo para o desenvolvimento e a validação de metodologias e procedimentos de gestão da água de rega, com aplicação em grandes áreas de regadio,

mediante a utilização de tecnologias de deteção remota e sistemas de informação geográfica. Os procedimentos e metodologias em estudo integram diferentes fontes de dados de teledeteção, com os quais se pretende monitorizar, com elevada representação espacial e temporal, as necessidades reais de rega – necessidades hídricas das culturas, medidas pela evapotranspiração cultural (ET_c) espectral e índices de stress (CWSI) – para a cultura do Milho. Com o presente trabalho procura-se ainda avaliar a operacionalidade e fiabilidade da utilização de técnicas de deteção remota – imagem de satélite de alta resolução (Landsat 5) e dados de sensores instalados em plataforma aérea não tripulada – na gestão da água de rega em grandes áreas de regadio.

1.2. Objetivos Específicos

Para atingir os objetivos gerais do presente trabalho de doutoramento, definidos no ponto 1.1, selecionou-se como área geográfica de estudo o Perímetro de Rega do Divor, por ser uma área onde o Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora desenvolveu durante mais de uma década trabalho de investigação, com vários projetos e atividades de experimentação e desenvolvimento, no âmbito da agricultura de regadio – aspetos tecnológicos, técnicas de conservação e gestão da água e do solo, etc. Assim, é de referir a existência de informação de base importante para o desenvolvimento deste trabalho, e também os contactos já existentes com os agricultores da região e Associação de Beneficiários do Divor.

Para poder avaliar a operacionalidade e fiabilidade das metodologias e procedimentos de gestão da água em grandes áreas de regadio, foram constituídas sete unidades experimentais, com a cultura do milho, regadas por rampa rotativa. Selecionaram-se estas parcelas por constituírem cerca de 50% da área regada em 2007 e pelo facto da cultura do milho ser também a mais representativa da região e com elevado interesse em qualquer região com intensa agricultura de regadio.

Definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Caracterização hidropedológica da área de estudo, neste caso concreto o Perímetro de Rega do Divor, mediante amostragem e tratamento geoestatístico. Este objetivo revela-se importante, na medida em que qualquer técnica de gestão da água no solo requer o conhecimento de base, associado às curvas de retenção de água no solo e à definição dos limites superiores e inferiores de gestão da água de rega, quer seja à escala da parcela ou à escala regional. O conhecimento das propriedades hidropedológicas dos solos do Perímetro do Divor será a base para avaliar o significado da reserva de água no solo em cada instante, por monitorização direta, estimada ou controlada por técnicas remotas.
- Avaliar a disponibilidade de água de sete unidades experimentais, mediante monitorização direta da água aplicada à cultura (dotações totais e precipitação) e controlo dos teores de água no perfil útil do solo, com uma sonda TDR. Estimativa das necessidades globais de rega, mediante utilização da

metodologia de base descrita pela FAO 56 (Allen *et. al.*, 1998) e realização do balanço hídrico do solo por unidade experimental.

- Utilização de técnicas de detecção remota e sistemas de informação geográfica, para estimar necessidades reais de rega e avaliar a disponibilidade de água no solo e estado hídrico das culturas, com elevada representação espacial e temporal. As tecnologias de teledeteção que serão objeto de estudo nesta tese de doutoramento serão:
 - Imagens de satélite de alta resolução (imagens Landsat 5), através das quais se procura estabelecer procedimentos metodológicos para determinar as necessidades hídricas da cultura, por estimativa real dos coeficientes culturais, a partir dos índices de vegetação (IV) obtidos a partir da observação espectral do coberto vegetal. Os procedimentos metodológicos desenvolvidos serão a base para o desenvolvimento de um sistema global de gestão da água de rega, em grandes áreas de regadio.
 - Imagens térmicas de elevada resolução obtidas com plataforma aérea não tripulada, através das quais se procura estimar indicadores de gestão da água de rega, à escala regional, mediante procedimentos metodológicos para a estimativa de indicadores de stress, como metodologia de gestão global da rega. Esta fonte de dados é encarada como uma metodologia de gestão que possibilitará programar as operações de controlo, contornando assim as limitações impostas por condições atmosféricas desfavoráveis à aquisição da informação sobre a superfície terrestre, permitindo assim uma elevada representação espacial e temporal da superfície cultural. Outra limitação que se pretende ultrapassar com a utilização desta plataforma de recolha de dados será a possibilidade que esta oferece em termos de resolução espacial, tanto nas imagens multispectrais e principalmente nas imagens térmicas, ambas com elevada representação espacial, de minimizarem os efeitos introduzidos pela influência da superfície terrestre na refletividade da cobertura.

Este tipo de plataforma de recolha de dados oferece alguma garantia em termos de custos de informação, comparativamente com as plataformas aéreas tripuladas e também as imagens de satélite de elevada resolução.

Faz parte integrante dos objetivos deste trabalho a determinação dos coeficientes culturais a partir da resposta espectral do coberto vegetal, traduzida pelos índices de vegetação, através da relação entre a componente transpiração, coeficiente cultural basal (K_{cb}) e refletividade espectral. Esta metodologia, dos IV, tem-se mostrado consistente e robusta, no seguimento do desenvolvimento das culturas e na estimativa contínua e real da taxa de evapotranspiração, permitindo assim uma gestão mais eficiente da água de rega. Outra questão a que se pretende dar resposta com este trabalho será a estimativa de indicadores de stress – CWSI – mediante a informação remota obtida.

- Validação de equações de cálculo do Kcb basal e Kc derivados a partir do índice de vegetação NDVI, suas limitações e aplicações, na área em estudo – determinação da taxa de evapotranspiração real versus taxa de evapotranspiração potencial.
- Fundamentação da relação empírica Kcb-IV através da determinação dos parâmetros biofísicos: IAF (LAI), fração de cobertura vegetal verde (f_c), função de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (f_{apar}). Este último parâmetro traduz a produção de biomassa relacionada com a quantidade de água transpirada durante o ciclo cultural.
- Estudo comparativo da informação fornecida pelas três tecnologias de detecção remota, a monitorização direta da água aplicada à cultura, a disponibilidade de água no solo e o balanço hídrico do solo, nas sete unidades experimentais. Pode assim avaliar-se a operacionalidade e fiabilidade das metodologias e procedimentos em estudo, para a gestão global de grandes áreas de regadio - monitorização de parâmetros agronômicos que traduzam o estado hídrico e de desenvolvimento das culturas – temperatura do coberto e índices de vegetação.
- Caracterizar os procedimentos e metodologias de base a adotar para uma utilização otimizada das técnicas de detecção remota e tecnologias SIG na gestão da água de rega à escala regional.

Com a presente tese de doutoramento, pretende-se a integração de novas tecnologias que permitam uma melhor monitorização espacial e temporal da utilização da água pelas culturas, procurando fornecer indicação da disponibilidade da água no solo em cada momento e, também, o momento exato de aplicação (oportunidade de rega) do volume de água (dotação) estritamente necessário à melhor resposta das culturas. Poderá constituir um resultado promissor para a economia de água pelas culturas, otimizando-se a utilização do recurso “Água” no regadio.

A disponibilização deste tipo de metodologias aos organismos responsáveis pela gestão da água de rega à escala regional, sendo mecanismos de informação em tempo real e ao longo de toda a campanha de rega, poderá melhorar o desempenho dos Sistemas de Avisos de Rega. Pela introdução de Tecnologia de Informação e de Observação da Terra, possibilitará uma melhor monitorização das necessidades hídricas das culturas em grandes áreas e a avaliação da disponibilidade de água no solo em cada instante, podendo assim estimar em tempo real a quantidade ótima de água necessária às culturas.

1.3 Estrutura da Tese

A presente tese de doutoramento encontra-se organizada em 5 capítulos: 1) Introdução e Objetivos, 2) Revisão de Conhecimentos e Estado da Arte, 3) Caracterização da área em estudo, Procedimentos e Metodologias, 4) Apresentação e Análise de Resultados, 5) Conclusões, seguindo-se as Referências Bibliográficas. A Figura 1.1 esquematiza a sua estrutura de uma forma resumida:

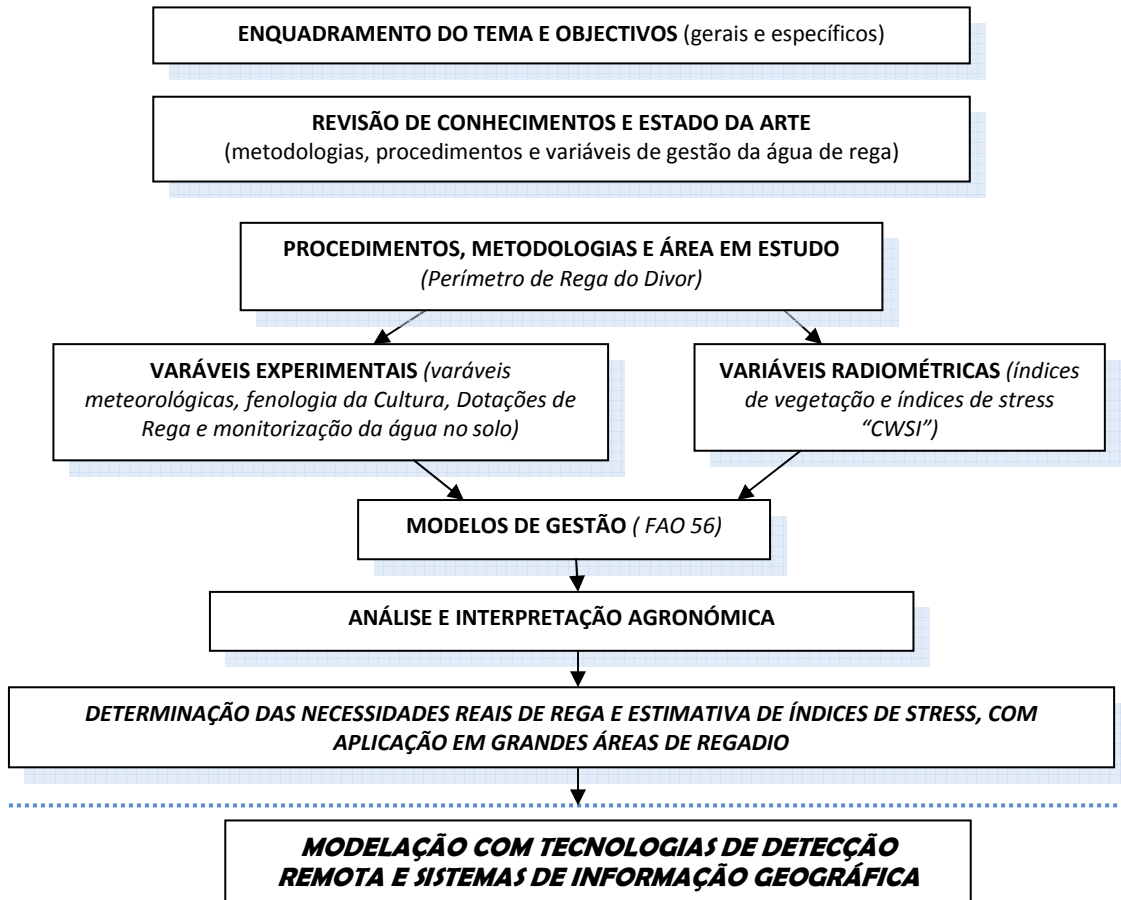


Figura 1.1: Esquema Resumo da Tese de Doutoramento

2.

REVISÃO DE CONHECIMENTOS E ESTADO DA ARTE

O Capítulo 2, Revisão de Conhecimentos e Estado da Arte, está organizado da seguinte forma: na primeira parte, faz-se um enquadramento do uso eficiente da água de rega e das metodologias de gestão da água em agricultura; na segunda parte faz-se uma revisão à aplicabilidade que têm as técnicas de deteção remota na gestão agrícola; na terceira é feita uma revisão pormenorizada à utilização de técnicas de deteção remota na gestão da água em agricultura de regadio, fazendo referência aos procedimentos de cálculo para a definição das necessidades hídricas das culturas e estimativa de índices de stress, assim como uma referência a alguns trabalhos já realizados na temática em estudo “Procedimentos e Metodologias de Gestão em Regadio, mediante as Tecnologias de Deteção Remota”, fazendo referência às oportunidades e limitações destas tecnologias, para a gestão integrada de grandes áreas de regadio.

2.1 Eficiência do Uso da Água em Regadio: produtividade agronómica e produtividade económica

2.1.1 Enquadramento

A escassez do recurso água e o fenómeno das alterações climáticas são uma realidade mundial, com especial incidência nas regiões com características mediterrâneas. Será inevitável a introdução de alterações ao nível do planeamento e gestão dos recursos hídricos, nas quais estão incluídas a gestão do recurso água em agricultura de regadio. Importa aqui referir alguns trabalhos publicados nos últimos anos, cujo objeto de estudo são as alterações climáticas e as suas implicações na agricultura mediterrânea (Wolf e Van Oijen, 2003; Villalobos e Fereres, 2004; Chartzoulakis and Psarras, 2005; Utset, *et al.*, 2006).

Ainda neste contexto, foram realizados e publicados vários trabalhos cujo objeto de estudo foi a modelação do efeito produzido pelas alterações climáticas no desenvolvimento e crescimento das culturas. Neste sentido, foram desenvolvidos vários modelos, os quais relacionam o sistema solo-água-planta-atmosfera, permitindo assim modelar os impactos produzidos pela variabilidade associada às alterações climáticas. Citando alguns desses trabalhos: Hoogenboom, 2000; Semenov e Jamieson, 2001; Utset *et al.*, 2006).

O uso racional da água na agricultura passa pela programação e gestão da rega, garantindo uma aplicação de água otimizada face às necessidades ao longo do ciclo vegetativo das culturas. Esta aplicação otimizada poderá ser, não em função da evapotranspiração total, mas relacionada com níveis de aplicação de água em função dos estádios fenológicos onde se verifica maior sensibilidade hídrica. Assim, será necessário verificar as dotações mínimas que, mesmo existindo períodos de “stress hídrico”, garantem bons índices de eficiência de utilização de água pela cultura com produções elevadas, próximas mesmo dos máximos potencialmente verificáveis, assegurando um nível interessante de rendimento do agricultor.

A prática da gestão da água de rega é tradicionalmente feita no sentido da maximização da produção em função de um determinado objetivo, o qual, por sua vez, depende das condições de cada projeto. Assim, o objetivo da gestão da água de rega assenta essencialmente na determinação do volume de água a ser fornecido em cada aplicação e do intervalo entre aplicações, tendo em conta o défice de gestão permissível previamente fixado, em função da cultura, do seu estágio de desenvolvimento e do nível de produção pretendido. Nos critérios tradicionais de gestão da rega, o objetivo de otimização é a máxima produção total (biomassa) ou a máxima produção agronómica (produto comercializável), ou o máximo lucro, independentemente da quantidade de água gasta. Tomava-se a água como fator não limitado. Numa perspetiva diferente, toma-se cada um daqueles objetivos de maximização, mas relativo à unidade (de volume) de água gasta na rega, isto é, máxima produção de biomassa ou frutos por m^3 de água gasta na rega, etc. Trata-se de uma produtividade líquida, que introduz, pelo menos em parte, um critério de natureza ambiental, a maximização da produtividade do recurso escasso.

Nesta perspetiva, a “maximização do lucro” pode tomar-se como um objetivo de otimização económica, que torna o critério de gestão da rega independente da satisfação integral da ET_c , habitualmente tomada como “necessidade de rega” da cultura. Passa a fornecer-se menos água que a solicitação de ET_c , introduzindo-se o conceito de “rega deficitária controlada” (RDC), de acordo com a sensibilidade hídrica, variável com o tipo e os estádios fenológicos da cultura.

De acordo com Pereira *et al.* (2002), a rega deficitária é uma estratégia de otimização do recurso água em agricultura de regadio, introduzindo a noção de sustentabilidade, em condições de escassez do recurso água. Pretende-se com esta estratégia minimizar os impactos ambientais associados ao regadio, perdas por percolação profunda e escurimento superficial, redução das perdas de fertilizantes e agroquímicos, maximizando a economia da água em regadio. A utilização desta estratégia implica conhecimentos profundos que relacionem valores de evapotranspiração cultural (ET_c) com a resposta das culturas à

quantidade de água aplicada (produtividade), identificando as fases de desenvolvimento das culturas críticas ao déficit de água, podendo assim estimar os impactos económicos introduzidos pelas quebras de produtividade, associadas à prática da “rega deficitária”.

A noção de rega deficitária controlada (RDC) surgiu com os primeiros trabalhos realizados por Mitchell *et al.* (1984) e Chalmers (1990), os quais fundamentam a utilização de estratégias de redução da quantidade de água fornecida às culturas em função dos estados fenológicos em que o stress hídrico controlado não afetará a quantidade e a qualidade da produção final. Hargreaves e Samani (1984) afirmam que a RDC poderá proporcionar um retorno económico por unidade de superfície, igual ou superior à prática da rega em que a óptica de gestão assenta na maximização produtiva, traduzindo-se em eficiência de uso da água também iguais ou superiores.

English e Raja (1996), fizeram uma revisão aos conceitos e perspectivas associados à prática da “rega deficitária”, definindo esta estratégia de otimização do seguinte modo: introdução de um nível de stress hídrico moderado ao qual estará associado uma pequena quebra de produtividade, traduzida em indicadores económicos de apoio à decisão.

English *et al.*, (1990), referiram três fatores como benefícios potenciais que derivam da prática de estratégias com rega deficitária: maximização da eficiência de utilização da água, redução dos custos com a rega e otimização económica do recurso água.

Stockle e James (1989), referem o seguinte: o sucesso da prática de estratégias de gestão com cenários de “rega deficitária” está relacionado com os seguintes fatores – disponibilidade hídrica no solo no momento da sementeira, capacidade utilizável do solo e capacidade de aprofundamento radical da cultura. Também Igbadun *et al.* (2008), referem os parâmetros climáticos e pedológicos que caracterizam a localização do estudo, como os grandes responsáveis pelos resultados associados à prática de cenários de gestão com “rega deficitária”.

A introdução da “Rega Deficitária” requer a adoção de metodologias de gestão apropriadas – modelos de gestão da água de rega e de simulação, devidamente validados com informação de campo (água aplicada vs produtividade). Importa aqui referir algum trabalho já realizado pelos seguintes autores: Teixeira *et al.*, 1995; Oweis, 1997; Liu *et al.*, 2000; Sarwar e Bastiaanssen, 2001; Singh *et al.*, 2006.

Os resultados produzidos pela prática de “rega deficitária” na maioria das vezes estão associados também à aplicação otimizada de fertilizantes, principalmente nitrogénio, traduzindo ao mesmo tempo a eficiência de utilização da água e de fertilizante.

A integração de resultados experimentais em ensaios com estratégias de RDC em modelos água/produção, que como o seu nome indica, permitem estimar a produção da cultura em função da água por ela utilizada, têm vindo a despertar grande interesse nas últimas décadas pelo importante papel que podem desempenhar como auxiliar de gestão e otimização de recursos escassos, sendo de grande utilidade quando se trata de gerir a rega em condições de carência hídrica.

Para avaliar a introdução de estratégias de “rega deficitária” na prática da rega, recorre-se a modelos de simulação, com prévia validação para as condições locais. Este tipo de modelos estabelece funções de produtividade da água, de crescimento das culturas, que traduzem o impacto que a “rega deficitária” tem na produtividade da cultura. É de referir alguns trabalhos com este tipo de modelos, como por exemplo o programa ISAREG, desenvolvido por Teixeira (1992), tendo-se testado a sua aplicabilidade a Países com características mediterrâneas, como ferramenta com elevado potencial para traduzir relações água aplicada e produtividade, em culturas regadas (Teixeira *et al.*, 1995) e (Zairi *et al.*, 2001). Este modelo usa a relação, ETa/ETm , sendo ETm , a evapotranspiração cultural máxima e ETa a evapotranspiração real, cuja diferença para ETm traduzirá a quebra de produtividade (Qy)= $1-Ya/Ym$, sendo Ya a produção real e Ym a produção potencial ou máxima. Esta relação traduz a função de produção da água em cada cultura.

A determinação da produtividade agronómica da água de rega com estratégias de “rega deficitária” numa determinada área, com determinadas características ambientais, pedológicas e agronómicas, obtêm-se por modelação e simulação, mediante a utilização de modelos pré-estabelecidos. No entanto, a sua interpretação só ficará completa após analisar a sua viabilidade económica, com base nos preços do fator de produção água e os preços de mercado do produto.

Para avaliar os impactes económicos da prática da rega com estratégias de “rega deficitária” introduz-se a aplicação de modelos económicos (indicadores económicos). Importa destacar o trabalho desenvolvido por Amami *et al.*, (2001). Este tipo de indicadores (p.e, margem bruta por área produzida e unidade de água aplicada) é de extrema importância na tomada de decisão do agricultor em introduzir a prática de “rega deficitária” no seu esquema de gestão, principalmente em situações de escassez. Uma análise de sensibilidade relativamente ao preço do recurso água e o preço do produto é também de grande importância na tomada de decisão do agricultor.

Vários investigadores analisaram economicamente a prática de rega deficitária, nas mais variadas circunstâncias, concluindo que existe um elevado potencial para a maximização económica da utilização do recurso água (p.e, Dudley *et al.*, 1971; Stewart *et al.*, 1974; Howell *et al.*, 1975; Gulati e Murty, 1979; Kumar e Khepar, 1980; Martin *et al.* 1989; English, 1990; Zairi *et al.*, 2001; Amami *et al.*, 2001).

Segundo English e Rajá (1996), a otimização da utilização da água de rega é traduzida pelos seguintes níveis:

- Maximização da produção por unidade de área;
- Maximização do rendimento líquido por unidade de área;
- Maximização do rendimento líquido por unidade de água aplicada;
- Maximização da produção por unidade de água aplicada.

O estabelecimento destes níveis está associado aos critérios de gestão estabelecidos pelos agricultores regantes e também pela disponibilidade dos recursos para o regadio. Naturalmente, são os dois últimos, que definem a produtividade da água, que fundamentam a prática da RDC.

2.1.2 Relação Água-Produção

Os impactes da rega sobre a produção representam um valor muito significativo para o agricultor, na medida em que é a produção da cultura que permite a obtenção do rendimento agronómico e provavelmente também do rendimento económico.

De acordo com Gonçalves (1997), para quantificar a relação água-produção torna-se necessário, em primeiro lugar, determinar a quantidade de água necessária à rega das culturas e, portanto, estabelecer um plano de programação das regas. Depois, estabelecida a estratégia de se suprir em cada rega o défice de humidade do solo com vista à produção máxima, é necessário conhecer a função que relaciona a quantidade de água colocada ao dispor da cultura com a sua produção. Finalmente, com base nos perfis de infiltração determinados pelo modelo de simulação da rega, pode calcular-se a produção relativa esperada para cada uma das diversas alternativas.

Segundo Pereira (1994), a produção da cultura depende da água que lhe é fornecida sendo, portanto, dependente do sistema de rega e da condução da rega. Um variado número de modelos para estimar os níveis de produção de uma cultura face à quantidade de água aplicada têm sido desenvolvidos e aplicados. O modelo de Stewart S-1 aqui apresentado, sendo matematicamente simples, revela-se de grande importância, pois parece responder bem à realidade, pelo que é o mais genericamente adotado.

Quanto às relações água-produção, os conceitos foram apresentados por Doorenbos e Kassam (1979):

- Evapotranspiração Cultural Potencial (ET_m ou ET_p), que ocorre quando são satisfeitas as necessidades hídricas das culturas, pela rega e precipitação;
- Evapotranspiração real (ET_a), que corresponde à evapotranspiração que ocorre quando as necessidades hídricas podem não ser totalmente cobertas pela água fornecida à cultura, sendo pois igual ou inferior à ET_m .

Quando numa situação se verifica a ET_m , é obtida a máxima produção (Y_m) da cultura para aquelas condições, para ET_a é obtida uma produção real igual ou inferior (Y_a).

A resposta da produção ao fornecimento de água é quantificada pelo coeficiente de sensibilidade hídrica (K_y), que relaciona, de forma linear, a quebra de produção com o défice de evapotranspiração (*modelo de Stewart S-1*):

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right) \quad (2.1)$$

Sendo: Y_a , Produção real, Y_m , Produção máxima, K_y , Coeficiente de sensibilidade hídrica, ET_a , Evapotranspiração real, ET_m , Evapotranspiração máxima.

Os valores de K_y são determinados com base na suposição que a relação entre a produção relativa Y_a/Y_m e a evapotranspiração relativa ET_a/ET_m é linear, e que se mantém constante até défices de água de 50%,

ou $1-ETa/ETm = 0.5$. Os valores de K_y são determinados com base em ensaios realizados em diferentes condições de desenvolvimento das culturas e encontram-se tabelados (Doorenbos e Kassam, 1979).

A aplicação de K_y no planeamento, dimensionamento e operação de projeto de rega permite a quantificação das disponibilidades hídricas e do seu consumo, em termos de produção das culturas e de produção total na área beneficiada. Considerando situações em que a água disponível para rega é limitante e que o stress hídrico é igualmente distribuído em toda a época de rega, a cultura com maior K_y sofrerá maior perda de produção. Deste modo, a consideração deste tipo de relações permite hierarquizar as culturas quanto à atribuição da água disponível, embora de uma forma muito simples e generalizada (Doorenbos e Kassam, 1979).

2.2 Gestão da Água em Agricultura de Regadio

2.2.1 Enquadramento: uso sustentável do recurso água em agricultura de regadio

A agricultura de regadio é reconhecida mundialmente como a atividade maior consumidora de ÁGUA, sendo este recurso cada vez mais escasso, tanto mais que a sua procura, como fator de aumento de produção, é cada vez maior. Neste sentido, as preocupações centradas na sua utilização tendem a adquirir uma relevância crescente (Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água, 2001).

A escassez do recurso água que nos últimos anos se tem feito notar em todo o território português, e em particular na região do Alentejo, é uma realidade das condições do nosso clima Mediterrânico, tendo implicações severas na produção agrícola, em particular na agricultura de regadio. Mas, porque a escassez hídrica e as situações de seca são normais em região Mediterrânea, os agricultores devem contar normalmente com elas, adaptando à escassez hídrica as tecnologias de produção, em vez de se sentirem atingidos pela calamidade de cada vez que ocorre uma seca. Neste sentido, os empresários agrícolas devem aplicar medidas que otimizem a eficiência do uso da água na agricultura, utilizando tecnologias agrícolas adequadas, em atitude conservacionista, sem deixar de ser empresarial. Utilizando o recurso água de forma estratégica e eficiente, como recurso escasso e limitado que é, assegura-se a sua disponibilidade futura

Com o nítido aumento da área de regadio em Portugal, cresce paralelamente a necessidade de conhecimento tecnológico específico, que permita garantir a sustentabilidade desta forma de agricultura. De acordo com Serralheiro (1997), para ser uma atividade sustentável, a agricultura de regadio deve praticar as melhores tecnologias agrícolas, numa atitude sempre conservacionista, ainda que empresarial, mantendo a qualidade dos recursos solo e água que lhe são indispensáveis.

Surge assim a necessidade de desenvolver tecnologias que permitam determinar a disponibilidade da água no solo em cada momento e, também, o momento exato de aplicação (oportunidade de rega) do volume de água (dotação) estritamente necessário à melhor resposta das culturas.

Estas tecnologias permitirão racionalizar a disponibilidade do fator água, no sentido da sua otimização, tendo em vista a maximização dos rendimentos, com minimização dos custos de investimento e de exploração, nomeadamente com o mínimo de consumo de água, bem como a redução dos custos de impacte ambiental que estão inerentes à intensificação agrícola.

A utilização de metodologias eficientes na prática da gestão da água em regadio tem como objetivo genérico: regar de modo a apenas repor no solo, em tempo oportuno e na zona explorada pelas raízes, os consumos das plantas por evapotranspiração. É a base para uma boa eficiência do uso da água, com maximização da produção por unidade de água consumida (INAG, 2001).

A promoção de práticas de rega eficientes – como a condução da água de rega em tempo real numa determinada área - requer o conhecimento de parâmetros de base: parâmetros meteorológicos (precipitação efetiva, evapotranspiração de referência); parâmetros pedológicos (perfil útil do solo explorado pela cultura, curvas de retenção de água no solo, capacidade utilizável do solo, potencial de ascensão capilar); parâmetros culturais (duração dos estádios de desenvolvimento da cultura, coeficientes culturais, capacidade de aprofundamento radical, sensibilidade da cultura à deficiência hídrica, défice de gestão permissível) e os parâmetros que caracterizam a prática da rega (data e dotação de rega efetivamente aplicada, avaliação dos sistemas de rega utilizados).

2.3 Indicadores de Gestão da Água em Regadio

A gestão e programação da rega integram a determinação da oportunidade da rega (momento a partir do qual será necessário regar), diretamente relacionada com o conhecimento da disponibilidade de água no solo e a quantidade de água a aplicar (dotação de rega), diretamente relacionada com a estimativa ou monitorização das necessidades hídricas das culturas intimamente relacionada com a determinação da taxa de evapotranspiração cultural (ETc). Enumeram-se aqui alguns métodos utilizados:

- *Diretos*: Balanço de Água no Solo (monitorização da disponibilidade de água no perfil útil do solo) e Lisímetros;
- *Indiretos* (estimativa ou cálculo): Balanço de energia e razão de Bowen, método aerodinâmico, método do fluxo de seiva, método das câmaras de evapotranspiração, método baseados na temperatura do coberto, métodos baseados na radiação (solar e terrestre), método de Penman-Monteith, método do coeficiente cultural e evapotranspiração de referência ($K_c \cdot ET_o$), modelação do balanço de água no solo, tecnologias de deteção remota.

Segundo Pereira *et al.*, (2002), podem-se agrupar as metodologias e técnicas de gestão da água em regadio, da seguinte forma: indicadores do estado hídrico do solo, indicadores do estado hídrico da planta, indicadores meteorológicos e balanço de água no solo.

2.3.1. Indicadores do Estado Hídrico do Solo

Referem-se à monitorização direta da disponibilidade de água no solo ou do potencial hídrico do solo. São técnicas de monitorização do estado hídrico do solo em profundidade e ao longo do tempo.

Referindo algumas dessas metodologias:

- **Aparência do solo** (técnica mais comum utilizada pelo agricultor regante), a qual consiste na recolha de uma amostra de solo em profundidade, que posteriormente é analisada visualmente e taticamente pelo agricultor;
- **Monitorização direta dos teores de água no solo**, mediante a utilização de técnicas e ferramentas mais sofisticadas (amostragem gravimétrica, tensiómetros, sonda de neutrões, sondas de constante dielétrica – capacitiva, enviroscan, diviner e TDR “Time-Domain Reflectometry”). Estes métodos carecem de uma calibração, prévia à sua utilização, para as condições em que são utilizados (que normalmente divergem das condições padrão).

Neste tipo de métodos de gestão e programação das regas está implícita uma utilização localizada (pontual), não traduzindo com elevada representação espacial a disponibilidade de água numa determinada área regada (parcela), principalmente em parcelas cujas características apresentam alguma heterogeneidade pedológica. Também é de apontar a fraca fiabilidade de representação, principalmente em culturas com grande desenvolvimento radical (Ferreira, 1996; Decroix e Puech, 1985).

A utilização destas técnicas na gestão da água de rega necessita de um estabelecimento prévio dos limites críticos de gestão, isto é, da definição dos limites superior e inferior de gestão da rega (máxima capacidade de retenção de água no solo e défice de gestão permissível), associados às características das culturas e ao tipo de solo. Uma determinação menos rigorosa deste tipo de limites poderá ser prejudicial na utilização dos indicadores do estado hídrico do solo como metodologia de base para a programação das regas.

- **Monitorização indireta dos teores de água no solo:** utilização de sensores remotos e/ou imagem de satélite para recolha de imagens multiespectrais de elevada/alta resolução, que podem traduzir os teores de água disponíveis mediante a informação fornecida por índices de refletividade, índices de vegetação (IV) e por índices de stress (CWSI, *Crop Water Stress Index*). Estas tecnologias são de aplicação mais ampla, em grandes áreas de regadio, carecendo no entanto de desenvolvimento e experimentação. Uma revisão alargada sobre este tipo de métodos é apresentada em Phene *et al.* (1990) e em Chanzy *et al.* (1997).

A presente tese pretende dar o seu contributo, na avaliação do desempenho e fiabilidade da informação fornecida por este tipo de metodologias de deteção remota, na gestão de grandes áreas de regadio.

2.3.2 Indicadores do Estado Hídrico da Cultura

Estes indicadores traduzem de forma indireta a disponibilidade de água no solo em cada instante, fornecendo indicação da oportunidade de rega. No entanto, não permitem quantificar as dotações de rega a aplicar.

A determinação destes indicadores implica a monitorização dos seguintes parâmetros:

- **Aparência da planta** (orientação, cor e enrolamento da folha);
- **Potencial hídrico foliar e resistência estomática;**
- **Temperatura da superfície cultural** (para determinação do Índice de Stress Hídrico da cultura, *Crop Water Stress Index*, CWSI);
- **Variações no diâmetro do tronco, ramos e fruto** (este tipo de indicadores é utilizado com maior incidência em culturas lenhosas);
- **Monitorização do fluxo de seiva** (este tipo de indicadores é utilizado com maior incidência em culturas lenhosas);
- **Monitorização remota do índice de stress** mediante utilização de imagens multiespectrais de elevada/alta resolução (metodologia de satélite e sensores aerotransportados).

O estabelecimento de indicadores de stress hídrico, em função das diferenças de temperatura entre as folhas e o ar merece especial atenção neste trabalho. O stress hídrico numa planta é traduzido pelo fecho estomático, com alteração do balanço energético da superfície cultural, aumentando a temperatura das folhas da cultura. Diversos autores (Jackson *et al.* 1977; Ehrler *et al.* 1978 e Idso *et al.* 1981) utilizam a diferença de temperaturas entre a cobertura vegetal e o ar para desenvolver metodologias de deteção do stress hídrico.

A monitorização da temperatura da superfície cultural (temperatura da folhagem) faz-se recorrendo a um sensor de infravermelhos térmicos. A dificuldade deste tipo de indicador reside no facto de a diferença de temperatura entre as folhas e o ar poder ser influenciada por diversos fatores, tais como a pressão de vapor do ar, a radiação e a velocidade do vento.

Hsiao (1990) aponta ainda este tipo de indicador como sendo pouco sensível na deteção de um défice hídrico moderado. No entanto, outros autores atribuem a esta técnica elevado potencial para a monitorização do uso da água e para a programação da rega, obtendo uma relação entre a diferença de temperatura (folhas e o ar) e o défice de pressão de vapor (VDP), para várias culturas (Idso, 1982). É assim possível estabelecer valores para o Índice de Stress Hídrico “Crop Water Stress Index” (CWSI) (Idso *et al.* 1981).

Os indicadores agronómicos de stress hídrico recorrem na sua maioria a metodologias que necessitam de tempo, equipamentos e conhecimentos técnicos especializados para interpretar a informação recolhida. Alguns deles apenas são utilizados em trabalhos de investigação

2.3.3 Indicadores Climáticos ou Meteorológicos

Os indicadores climáticos ou meteorológicos na gestão da rega são bastante frequentes na estimativa das necessidades de água de rega, em função de variáveis climáticas e meteorológicas. São estas variáveis que se determinam. Os indicadores climáticos mais utilizados são:

- **Evaporação em Tina:** monitorização direta da água evaporada, para estimar a evapotranspiração cultural (ETc), mediante a utilização de um coeficiente que relaciona a água evaporada com a ETc. Este tipo de método é comum para o agricultor, fornecendo informação de quanto regar, no entanto, poderá ser pouco representativo e preciso;
- **Evapotranspiração cultural (ETc),** mediante a utilização de fórmulas climáticas que permitem calcular a evapotranspiração de referência (ETo) que, relacionada com os coeficientes culturais (Kc), permitem estimar qual a quantidade de água a aplicar às culturas para satisfazer as suas necessidades hídricas (ver metodologia FAO, Capítulo 3);
- **Evapotranspiração Real (ETa),** utilizando imagens multiespectrais (radiação na banda do infravermelho, infravermelho próximo e infravermelho térmico) de elevada/alta resolução, obtidas com técnicas de deteção remota (imagem de satélite e câmaras aerotransportadas), permitem estimar através de índices de refletividade da cultura, índices de vegetação (IV) que traduzem o estado de desenvolvimento das culturas (coeficiente cultural basal, Kcb) e conseqüentemente as suas necessidades reais de água. Este tipo de indicador, conjuntamente com a estimativa da taxa de evapotranspiração de referência, utilizando variáveis climáticas, será uma tecnologia de elevado potencial na gestão da água em grandes áreas de regadio.

2.3.4 Balanço de Água no Solo

Refere-se a metodologias que permitem estimar a disponibilidade de água no solo em cada instante, contabilizando todas as entradas e saídas de água do perfil útil (zona radical) do solo, e assim fornece indicação sobre qual a oportunidade de rega (quando regar) e a dotação de rega a aplicar (quanto regar). O balanço hídrico utiliza informação de base que caracteriza o solo (capacidade de retenção, ascensão capilar, percolação profunda), a cultura (tipo, estágio de desenvolvimento) e a precipitação.

Com este processo, poder-se-á conhecer em cada momento o teor de água no solo e a tensão com que ela está retida neste e, assim, comparando estes valores com as características pedológicas da parcela (capacidade de retenção de água no solo), ajuizar da data e volume de água a aplicar.

De acordo com Hillel (1980), o conhecimento do balanço hídrico do solo na zona explorada pelo sistema radical das culturas é fundamental para uma boa gestão da água em regadio e, conseqüentemente, da fertilização. Para a realização do balanço hídrico é necessário conhecer os processos de transferência e de retenção da água no solo. O balanço consiste na aplicação da lei da continuidade a um prisma de solo de área unitária e cuja altura, em cada instante, é igual à profundidade radical. A Figura 2.1 ilustra

esquemáticamente todas as entradas e saídas de água no perfil do solo explorado pelo sistema radical da cultura.

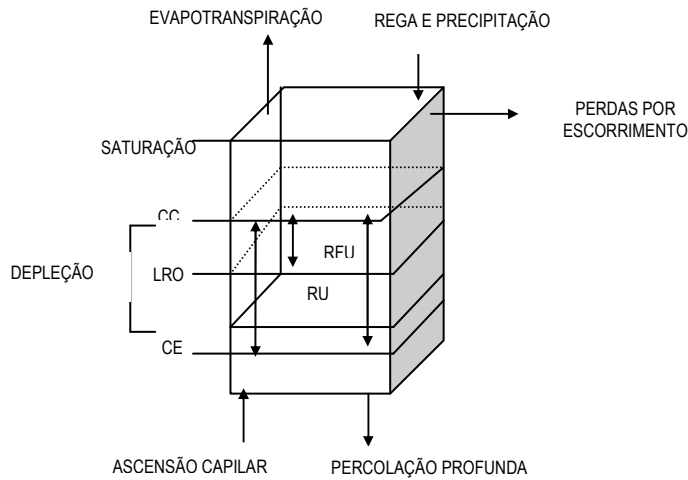


Figura 2.1 Balanço hídrico do solo no perfil explorado pelo sistema radical da cultura

(Fonte: Allen *et al*, 1998)

O balanço hídrico do solo relativo a um período de tempo i , pode ser expresso pela equação 2.2:

$$Dr_i = Dr_{i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ETc_i + DP_i \quad (2.2)$$

onde: $D_{r,i}$, Déficit de água na zona radical do solo no final do período de tempo, i (mm); $D_{r,i-1}$, Déficit de água na zona radical no final do período anterior, $i-1$ (mm); P_i , precipitação no período i (mm); RO_i , escoamento superficial no dia i (mm); I_i , dotação líquida de rega no dia i que infiltra no solo (mm); CR_i , ascensão capilar proveniente da toalha freática no tempo i (mm); ETc_i , evapotranspiração da cultura no período i (mm); DP_i , perdas de água por percolação profunda no tempo i (mm).

Para iniciar o balanço hídrico do solo é necessário estimar o déficit inicial $D_{r,i-1}$, através da monitorização direta dos teores de água no solo. Depois de ocorrer um episódio de precipitação ou uma rega e assumindo que a disponibilidade de água na zona radical está próxima da capacidade de campo, o valor de $D_{r,i-1}$ é aproximadamente zero.

Relativamente aos parâmetros P (precipitação), RO (escoamento superficial) e I (rega), as precipitações inferiores a 20% do valor de ET_o , são normalmente evaporadas na sua totalidade, podendo ser ignoradas no cálculo do balanço hídrico. O escoamento superficial verificado aquando da ocorrência de precipitação pode ser estimado utilizando os procedimentos enunciados em USDA (Soil Conservation Service). A rega equivale à quantidade média de água aplicada que é retida no perfil útil do solo.

A ascensão capilar (CR), é a quantidade de água proveniente da toalha freática que fica à disposição do sistema radical das culturas, dependendo do tipo de solo, profundidade da toalha freática e teor de água na

zona radical. Assume-se que CR é zero quando o nível freático se encontra a mais de um metro abaixo da zona radical.

O cálculo da Ascensão Capilar, faz-se considerando que na zona de rendimento ótimo é nula, e na zona de carência hídrica é inversamente proporcional ao teor de água no solo (R), atingindo o seu valor máximo (potencial de ascensão capilar, G) quando o teor de água no solo é igual ao coeficiente de emurchecimento permanente (CE).

Nesta condição, a equação que permite, em cada instante, calcular CR em função de R, quando $R < LRO$ é:

$$CR = G - \frac{G}{LRO} \cdot R \quad (2.3)$$

A dotação da rega aplicada traduz a quantidade de água aplicada à cultura, tendo em conta o valor da eficiência do método de rega utilizado.

Relativamente à evapotranspiração (ET_c), quando o défice de água no solo é menor que o valor da RU do solo, o valor da evapotranspiração cultural é considerado máximo, sem que ocorram problemas de stress hídrico, quando o défice de água no solo é maior que o valor da RU do solo, então a evapotranspiração da cultura é reduzida e o valor de ET_c é estimado em função do K_s.

A percolação profunda (DP), ocorre quando a disponibilidade de água na zona radical excede a capacidade de campo. Caso o teor de água na zona radical se encontre abaixo da capacidade de campo, não existe drenagem no solo e DP_i será zero.

A condução da rega durante uma campanha é feita com base na informação fornecida pelo balanço diário da água no perfil útil do solo, planeando as dotações e a oportunidade de rega. Devendo-se aplicar no momento exato e em quantidade estritamente necessária ao pleno desenvolvimento das culturas, evitando a ocorrência de stress hídrico. Quando a disponibilidade de água no perfil útil do solo desce abaixo da reserva facilmente utilizável do solo, é necessário regar. Por outro lado, deve-se praticar dotações que evitem as perdas por percolação profunda, dotações nunca superiores ao défice de água no solo verificado (no momento) antes da rega.

A equação do balanço hídrico verifica-se em todas as metodologias de gestão da rega. Incluem-se neste grupo de metodologias os modelos de condução ou programação da rega que, com base em séries temporais de informação meteorológica, permitem estimar o calendário para uma campanha de rega, em função dos dados do solo, cultura e método de rega. Existe ainda outros modelos que permitem fazer a condução da rega em tempo real, com base numa atualização dia a dia dos parâmetros meteorológicos e culturais e das dotações de rega. Neste contexto, podemos referir os modelos desenvolvidos por Teixeira (1992), ISAREG e RELREG, modelo computadorizado para a programação e gestão da rega em tempo real, respetivamente; e os modelos desenvolvidos pela FAO, como o CROPWAT.

2.4 Técnicas de Gestão da Rega com base no Balanço Hídrico do Solo

Neste tipo de modelos de gestão da rega é verificada a equação do balanço hídrico do solo, sendo a metodologia de base para análise e gestão da água em regadio, à qual está diretamente associada a determinação das necessidades hídricas das culturas (NHC). Basicamente, é a metodologia generalizada pela FAO (Allen et al., 1998), cujo procedimento consiste no cálculo da taxa de evapotranspiração de referência (ET_o), mediante utilização da Fórmula de Penman-Monteith, seguindo-se a determinação do valor do Coeficiente Cultural (K_c), segundo o procedimento apresentado pela FAO (Allen et al., 1998), o qual é considerado como sendo a parte débil da aplicação da metodologia da FAO para determinação das NHC, quando não há acesso aos parâmetros culturais que caracterizam a parcela cuja evapotranspiração se pretende determinar. Quando se trabalha à escala regional, utilizam-se os valores de K_c médios, ocorrendo desvios em relação aos valores reais de K_c, associados à diferença nas datas de sementeira efetuadas e ao desenvolvimento das culturas, que nem sempre pode ser considerado idêntico em todas as parcelas. Assim, a utilização dos valores médios de K_c poderá dar uma indicação errada da realidade, parcela a parcela.

2.4.1 Modelos de cálculo das Necessidades Hídricas da Cultura baseados no “Método da FAO”

A problemática da condução da rega tem sido intensamente estudada, o que conduziu ao desenvolvimento de programas de computador que permitem processar os dados em tempo real, com saídas indicando a oportunidade das regas e a respetiva dotação (Teixeira e Pereira, 1992; Teixeira *et al.*, 1995).

Estes modelos de computador poderão ser utilizados como potenciais ferramentas na gestão da água de rega, tanto à escala regional (Teixeira, 1986 e Teixeira, 1990), como à escala local, tendo precisamente como base a equação do balanço hídrico do solo.

Informação publicada pela FAO (1994), refere vários modelos de simulação hidrológica como técnica principal no apoio à gestão da rega. Com estes modelos, é possível avaliar a evolução do estado hídrico do solo por estimativas (Smith, 1992; Teixeira *et al.*, 1993) ou por resolução numérica de equações, contabilizando o movimento de água no sistema solo-planta-atmosfera (Belmans *et al.*, 1983; Santini, 1992). Alguns desses modelos são o ISAREG e RELREG (Teixeira, 1992), desenvolvidos no ISA “Instituto Superior de Agronomia” e CROPWAT, desenvolvido pela FAO (FAO, 2002), são modelos de simulação e condução da rega; modelos como o AQUACROP (FAO, 2009) são modelos de produtividade da água em culturas regadas.

Jacucci et al., (1994) adaptaram modelos numéricos citados na bibliografia (FAO, 1994), integrando-os em Sistemas de Informação Geográfica. Esta técnica de gestão funciona com base na extrapolação espacial e análise dos resultados obtidos graças aos modelos de simulação mencionados (Younos *et al.*, 1993); desta forma podem utilizar-se diferentes níveis de informação – solos, culturas, clima, eficiência de um sistema de rega, etc. (Verhaeghe *et al.*, 1993).

No entanto, são de referir algumas limitações nos modelos clássicos de simulação hidrológica, especialmente no conhecimento da distribuição espacial dos parâmetros do solo e das culturas.

Os modelos de simulação e gestão da rega integram duas categorias de dados:

- Dados referentes a características físicas, morfológicas e topográficas da zona em estudo – características invariáveis no tempo (parâmetros hidropedológicos, topografia das parcelas de rega, etc.);
- Dados que caracterizam a cultura e o clima – características variáveis no tempo (parâmetros culturais, níveis freáticos, volume de água disponível no solo, dados meteorológicos).

A concretização destes modelos exige vários tipos de informação, tal como se apresenta na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Informação necessária à concretização dos modelos de gestão da água na agricultura de regadio

PARÂMETROS	Variáveis Utilizadas
<i>Hidrológicos</i>	Disponibilidade (quantidade e tempo) Qualidade da água
<i>Meteorológicos</i>	Temperatura, radiação solar, velocidade do vento, precipitação, humidade, duração do período diurno
<i>Culturais</i>	Variedade cultural, duração do ciclo cultural, características do sistema radical, tolerância à deficiência hídrica, estádios de desenvolvimento, produção e qualidade, necessidades em nutrientes
<i>Pedológicos</i>	Estrutura do solo, textura do solo, profundidade do solo, impedância mecânica, infiltração, drenagem, arejamento do solo, características de retenção da água pelo solo, lençol freático, salinidade do solo, fertilidade do solo, temperatura do solo, organismos do solo.
<i>Gestão</i>	Datas de plantação/colheita, densidade de sementeira, método de rega, estádios críticos de desenvolvimento, fertilização, proteção das culturas, técnicas culturais

Fonte: Oliveira (1993)

Com os referidos modelos é possível efetuar o balanço da água no solo e prever, em cada momento, o défice de água neste e, comparando-o com o máximo défice permitido, prever a data e o volume de cada rega, tendo em conta a eventual queda pluviométrica, bem como as variações na taxa de evapotranspiração cultural ao longo do ciclo da planta. No entanto, a sua maioria apresenta algumas limitações quando utilizados a uma escala regional de regadio, devido à fraca representatividade espacial.

2.4.2 Utilização de Teledeteção e Sistemas de Informação Geográfica na Gestão das Necessidades Hídricas das Culturas

O facto de o planeamento e a gestão de recursos hídricos recorrer a dados georreferenciados justifica a utilização deste tipo de tecnologias (SIG e teledeteção) para os armazenar e processar, bem como a utilização de modelos matemáticos na análise de recursos hídricos, para representação de fenómenos físicos, ambientais, económicos e sociais em estudo, os quais necessitam de parâmetros de natureza espacial. Contudo, os modelos matemáticos clássicos apresentam geralmente reduzidas capacidades para analisar informação de carácter espacial; muitos deles contornam os aspetos “espaciais” simplificando os pressupostos e os parâmetros utilizados.

A integração de metodologias e procedimentos de gestão com Sistemas de Informação Geográfica e Teledeteção, permitem a organização, o armazenamento, a edição, a análise e a visualização de dados geográficos com maior facilidade, fazendo uma representação mais fiável da realidade (Burrough e McDonnell, 1998). No entanto, estas tecnologias possuem poucas capacidades de modelação, sendo necessário recorrer à integração de expressões matemáticas, podendo assim estimar a informação de base à gestão da água de rega, as necessidades hídricas das culturas (NHC). Assim, as aplicações SIG e tecnologias de deteção remota podem beneficiar com as capacidades de simulação dos modelos, enquanto estes beneficiam com as capacidades de análise espacial dos SIG e tecnologias de deteção remota.

Conjuntamente com as potencialidades de cada um, obtém-se uma poderosa ferramenta para o planeamento e a gestão de recursos hídricos em que a componente de bases de dados de um SIG ou as técnicas de deteção remota, podem fornecer os dados de entrada dos modelos de gestão (Walsh, 1993).

Para além disso, pode aumentar-se o rigor de avaliação, minimizar-se a subjetividade do utilizador na escolha dos parâmetros do modelo, reduzindo-se simultaneamente os custos da análise, devido a um menor consumo de tempo (Ross e Tara, 1993).

Com o desenvolvimento de meios de cálculo, seja através das simples máquinas de calcular programáveis ou através do uso de computadores, é hoje relativamente fácil a aplicação destas técnicas, as quais poderão mesmo ser desenvolvidas em termos comerciais por consultores especializados, cuja função será orientar o agricultor na gestão da água de rega.

No futuro, outras técnicas poderão vir a ser utilizadas, quer à escala regional, quer mesmo local, com a aplicação das técnicas de deteção remota através da utilização de satélites.

Inúmeros estudos evidenciam as técnicas de teledeteção como métodos capazes de fornecer informação acerca das necessidades hídricas das culturas (Menenti *et al.*, 1990; FAO, 1995). A observação da superfície da terra utilizando bandas do espectro eletromagnético permite captar informação acerca da superfície das parcelas de rega, caracterizando o grau de cobertura do solo. Posteriormente, permite a distribuição espacial dos dados agro-meteorológicos e a elaboração das cartas de necessidades hídricas das culturas.

A informação obtida nas imagens de satélite revela-se de grande importância para os modelos de simulação hidrológica. A introdução dos dados em formato *raster* (fruto das imagens de satélite ou imagens multiespectrais obtidas com câmaras aerotransportadas) num SIG favorece a representação espacial de todos os dados de entrada e saída de um modelo hidrológico de simulação em regadio.

2.4.3 Aplicações: Avisos de Rega e Gestão de Perímetros de Rega

A utilização dos resultados do modelo necessita de um controle periódico com informação de campo, a fim de, por aproximações sucessivas, permitir um ajustamento, tão perfeito quanto possível, daquele à realidade em que se aplica.

O uso dos computadores permitirá, assim, em qualquer momento, ter um conhecimento rápido das diversas variáveis implicadas, um acesso imediato a todos os registos, um conhecimento temporal da evolução dos consumos de água, a previsão dos consumos futuros, a elaboração de relatórios parciais e totais. Os computadores poderão ainda, baseados no mesmo princípio, ser utilizados na gestão da água de rega, como instrumento de controlo.

Adaptando o modelo de gestão ao objetivo em causa e entrando com a informação de campo devida (Tabela 2.1), o técnico pode efetuar o balanço entre as entradas e saídas de água do perfil do solo e, assim, definir os indicadores de gestão que orientarão o agricultor na gestão da rega. Segundo Oliveira (1993), esta técnica possibilita ainda, caso se pretenda, uma automatização tão completa quanto a complexidade do modelo o permita. Nestas condições, a gestão do sistema é feita sem a intervenção humana, de acordo com as leituras efetuadas automaticamente nos diversos sensores instalados ao nível da parcela, das estações meteorológicas, dos órgãos de distribuição de água, e transmitidas a um comando central, que as interpreta, de acordo com o critério de gestão previamente definido. Com base na decisão tomada, faz atuar os órgãos de distribuição e aplicação de água, controlando assim o tempo e, conseqüentemente, o volume de água aplicado.

A implementação destes procedimentos ao nível dos agricultores tem encontrado dificuldades, estando lançado o desafio aos serviços e empresas de apoio aos agricultores, nesta questão, que é essencial, da utilização criteriosa da água e da obtenção de elevadas eficiências de rega. São os serviços de apoio que podem ajudar os agricultores a aderirem às práticas de rega mais corretas e mais eficientes.

Contudo, se se tiver em mente o grau de instrução tecnológica bastante baixo, o pouco conhecimento destas técnicas por parte da maioria dos agricultores e a inexistência de serviços de apoio aos agricultores habilitados para este efeito, facilmente se perceberá a dificuldade, a curto prazo, de uma evolução no sentido do aumento de rendimento da utilização da água.

O trabalho de gestão, para ser eficaz, terá que começar antes da sementeira e continuar até ao fim da colheita; cada rega deverá ser avaliada, para verificar a sua adequação, e permitir ajustar à realidade o método seguido; deverá ser analisado o estado de desenvolvimento da cultura; deverão ser discutidos com o agricultor todos os detalhes e decisões.

Embora neste momento esta técnica não seja utilizada em Portugal, ela poderá ter, num futuro próximo, larga expansão, como forma de apoio rápido ao agricultor, que lhe permita atingir níveis de produção similares aos seus parceiros da União Europeia.

Para isso torna-se urgente desenvolver trabalho de investigação e experimentação, principalmente pelos organismos oficiais, de modo a determinar as metodologias mais adequadas a cada região.

2.5 Técnicas de Detecção Remota em Agricultura

2.5.1 Enquadramento

Nos últimos 100 anos a aplicação de técnicas de deteção remota na gestão agrícola sofreu um incremento muito grande, o desenvolvimento de sensores que medem a refletância espectral e emissividade da superfície terrestre introduzem a crescente possibilidade de descrever e quantificar os parâmetros agronómicos associados ao desenvolvimento cultural, introduzindo assim novas metodologias de gestão em agricultura.

Uma publicação recente agrupou um conjunto de artigos em “Engenharia Fotogramétrica e Detecção Remota” (*Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*) (volume 69), a qual faz referência aos principais avanços na utilização de técnicas de deteção remota em agricultura: Barnes *et al.* (2003) descreve os principais sensores, Kustas *et al.* (2003) as aplicações hidrometeorológicas, Pinter *et al.* (2003) as aplicações na gestão agrícola, Doraiswamy *et al.* (2003) a estimativa de rendimento das culturas, Hunt *et al.* (2003) as aplicações de gestão da terra, Ritchie *et al.* (2003) a qualidade da água, Moran *et al.* (2003) o desenvolvimento de sensores e metodologias de correção. E ainda o desenvolvimento de técnicas de deteção remota na gestão de culturas em sequeiro por Hatfield *et al.* (2004).

A utilização de técnicas de deteção remota na avaliação dos parâmetros agronómicos associados à atividade agrícola, passa inevitavelmente pelo conhecimento de todo o processo de refletância de energia a partir da superfície foliar, isto é, o processo de transformação radiação solar incidente e energia emitida pela cultura. Este processo está inevitavelmente ligado ao vigor das plantas, isto é, à pigmentação da superfície foliar, sendo a mesma traduzida pela quantidade de clorofila existente, sendo este componente o responsável pela quantidade de energia absorvida pela superfície foliar.

Os Índices de Vegetação (IV), traduzem a quantidade de energia refletida (refletância da superfície) pela superfície cultural, nos diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético, em função das características agronómicas (arquitetura da cobertura, infestantes, etc) e ambientais (condições que influenciam a radiação solar, p.e. ângulo inclinação solar). Tirar partido desta informação possibilitará uma melhor condução e gestão da atividade agrícola.

2.5.2 Principais Aplicações Agronômicas da Teledeteção

A aplicabilidade da informação remota na gestão agrícola faz uso de metodologias de tratamento e análise da informação obtida, mais ou menos complexas e diretas, podendo aqui incluir-se a estimativa dos índices de vegetação (IV). O índice de vegetação mais utilizado é o NDVI (*Normalized Difference Vegetative Index*) introduzido por Derrin (1978), o qual mostrou possuir boas potencialidades na tradução da quantidade de energia interceptada pela cultura, sendo o ponto de partida para a estimativa de outros índices. Este índice apresenta no entanto uma fragilidade, a forte interferência que sofre pela refletividade do solo, muito especialmente nos estados de desenvolvimento em que a fração de cobertura do solo é reduzida.

No entanto, existem alguns índices que reduzem a intensidade do efeito do solo: o Índice de Vegetação Perpendicular (*PVI, Perpendicular Vegetative Index*), desenvolvido por Richardson e Wiegand (1977), utilizando uma abordagem estatística; outros índices em que são efetuados ajustamentos, mediante a utilização de coeficientes empíricos - o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*SAVI, Soil-Adjusted Vegetative Index*), descrito por Huete (1988); o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Otimizado (*OSAVI, Optimized SAVI*), proposto por Rondeaux *et al.* (1996), onde o termo “I” (coeficiente de ajustamento à refletância do solo) será igual a 0,16; o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Transformado (*TSAVI, Transformed Soil Adjusted Vegetative Index*), proposto por Baret *et al.* (1989), entre outros.

A partir dos índices de vegetação anteriormente mencionados, foram desenvolvidos algoritmos de cálculo para estimar as características biofísicas das culturas: fração cobertura da vegetação (f_c), fração da radiação fotossinteticamente ativa (f_{APAR}), índice de área foliar (LAI), índice de biomassa vegetal, clorofila total e índices de produtividade (Wiegand e Richardson, 1984; Wiegand *et al.*, 1979; Shanahan *et al.*, 2002; Gitelson *et al.*, 2003, 2005, 2006). Outra potencialidade introduzida por Campbell (2007), foi a possibilidade de quantificar, a partir dos índices de refletância na banda do infravermelho próximo, infravermelho térmico e visível, índices de stress das culturas (*Crop Water Stress Index, CWSI*; *Photochemical Reflectance Index, PRI*), tendo sugerido também a introdução do controlo da fluorescência.

Algumas aplicações da teledeteção na gestão agrícola (Hatfield, *et al.*, 2008):

- Monitorização do estado nutritivo da cultura, quantidades de nitrogénio e fósforo na planta, para posterior aplicação optimizada de fertilizantes, mediante o conhecimento dos índices de refletância da cultura que posteriormente se traduzem no estado nutritivo das plantas. Este tipo de utilização poderá reduzir os custos com a aplicação de fertilizantes e também o impacto ambiental que muitas vezes esta operação agrícola poderá ocasionar. Um trabalho desenvolvido por Bausch e Duke (1996), mediante a utilização do índice de refletância do Nitrogénio (*NRI, Nitrogen Reflectance Index*), que relaciona a quantidade de energia refletida na gama do verde e do infravermelho próximo, estimando assim a quantidade de nitrogénio disponível numa cultura de milho em regadio, será possível otimizar a sua aplicação à cultura, tendo verificado

uma redução na sua aplicação na ordem dos 39 Kg de N/ ha, sem que ocorram quebras produtivas. Relativamente ao fósforo, a sua deficiência traduz-se na alteração da coloração das plantas e na acumulação de biomassa, verificando-se uma elevada correlação entre os níveis de fósforo disponíveis e a quantidade de energia refletida (refletância) na banda do infravermelho próximo e azul (Osborne *et al.*, 2004).

- Monitorização do desenvolvimento cultural, estando integrada a estimativa de alguns parâmetros que traduzem esse desenvolvimento: duração dos estádios de desenvolvimento, índice de área foliar, fração de cobertura do solo, produção de biomassa, evapotranspiração (Bausch, 1993), índices de produtividade (Pinter, 1993). O recurso às técnicas de deteção remota permite avaliar a variabilidade espacial e temporal associada a estes parâmetros, podendo assim identificar antecipadamente estratégias de gestão eficazes. Uma vez que um dos objetivos específicos da presente tese de doutoramento é avaliar a aplicabilidade das imagens multiespectrais de elevada/alta resolução, obtidas por satélite ou por câmaras aerotransportadas em avião não tripulado, na gestão da água em agricultura de regadio, como indicadores reais das necessidades hídricas das culturas, este aspeto merece um desenvolvimento particular no ponto 2.6 deste capítulo.
- Identificação de doenças, pragas e infestantes numa superfície cultural extensa (Brown e Steckler, 1995), permitindo assim atuar em tempo útil, identificando a causa atempadamente e delineando estratégias de atuação.
- A monitorização da variabilidade das características pedológicas e quantidade de água no solo é sem dúvida em fator de importância relevante em decisões agrícolas. A aplicação de técnicas de deteção remota nesta vertente tem tido inúmeros avanços, o desenvolvimento de sensores com sistemas de micro-ondas tem tido bastante relevo, apresentando no entanto algumas limitações na sua utilização, causadas por vários fatores: interferência da vegetação, rugosidade e temperatura do solo, propriedades do solo e emissividade, etc. Podem citar-se alguns estudos neste sentido: Jackson *et al.* (1999), propôs o uso de NDVI no ajustamento de emissão de micro-ondas a partir da densidade da cultura, ainda Jackson *et al.* (2004), comparou o uso do índice NDVI com o outro índice, o NDWI (*Normalized Difference Water Index*), definido por: $(R_{NIR} - R_{SWIR}) / (R_{NIR} + R_{SWIR})$, tendo concluído que o índice NDWI apresenta uma maior robustez na tradução do quantidade de água disponível na planta, do que o índice NDVI.
- Estimativa de Índices de Stress das Culturas em função da energia emitida pela superfície cultural, isto é, a temperatura da superfície cultural na banda do infravermelho térmico (8-14 μ m). Este tipo de utilização já tem um historial de trabalhos bastante vasto, tendo sofrido avanços técnicos e metodológicos bastante significativos. Podem enunciar-se alguns índices de stress que daí resultaram: Graus de Stress Dia (*SDD, Stress Degree Day*), Índice de Stress Hídrico (*CWSI, Crop Water Stress Index*), Limite Inferior de Stress (*Non-Water –Stressed Baselines*), Índice de Deficit Hídrico (*WDI, Water Deficit Index*). O Quadro 2.3 descreve-os

com maior pormenor. É de referir que estes índices surgiram na sequência dos desenvolvimentos tecnológicos dos termómetros de infravermelhos, os quais medem de forma indireta a temperatura da superfície cultural.

2.6 Metodologias com suporte em Técnicas de Detecção Remota na Gestão da Água em Regadio

2.6.1 Enquadramento Geral

A determinação das necessidades de rega, atualmente utilizadas como critérios de gestão em regadio, faz-se hoje pelas metodologias recomendadas pela FAO (Allen *et al.*, 1998), as quais se baseiam em realizações do balanço de água no solo, entre limites de disponibilidade para cada cultura fixados como critérios de gestão, conforme descrito no ponto 2.2.1 deste capítulo, onde se desenvolve esta referência ao método da FAO. No entanto, é de notar que estas metodologias apresentam algumas limitações na sua aplicabilidade a uma escala regional, por serem bastante exigentes em meios humanos e materiais, não permitindo em áreas extensas um seguimento de campo suficientemente intensivo.

Por isso, as estratégias de gestão a implementar estão inevitavelmente associadas à introdução de avanços tecnológicos, como as técnicas de deteção remota, que permitiram uma caracterização espacialmente distribuída da superfície regada: definição da área efetivamente regada, identificação do tipo de cultura, determinação da biomassa vegetal, produtividade da cultura, necessidades hídricas das culturas, evapotranspiração cultural, disponibilidade de água no solo e níveis de salinidade e toxicidade (Bastiannssen e Bos, 1999).

Os avanços tecnológicos em técnicas radiométricas e de deteção remota incluem a utilização de imagens de satélite e sensores ou câmaras aerotransportadas, na recolha de informação base para a gestão eficiente da água de rega à escala regional, ficando assim ultrapassadas as limitações impostas pela variabilidade e dispersão que caracterizam as parcelas de rega a uma escala regional. Podem fornecer informação de grande qualidade e utilidade sobre a superfície terrestre (monitorização e acompanhamento do coberto vegetal e da gestão da água) com adequada resolução temporal e espacial, tendo em conta as necessidades do sector agrícola, os calendários culturais e o desenvolvimento fenológico das culturas, permitindo uma gestão da rega em termos específicos e possibilitando um melhor conhecimento, monitorização e prevenção dos impactes ambientais com eles relacionados.

Bastiannssen e Bos, (1999), agruparam a possibilidade de extração de informação a partir das técnicas de deteção remota em cinco grupos de indicadores, segundo os parâmetros extraídos destas tecnologias: a) Gestão da Água, b) Uniformidade de aplicação c) Variabilidade temporal, d) Produtividade e e) Sustentabilidade, tal como é apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Indicadores (Parâmetros) obtidos a partir de Técnicas de Detecção Remota

Indicadores	Metodologia Utilizada	Trabalhos Pioneiros
Gestão da Água		
Índice de Stress Hídrico (CWSI)	Balanço Energético da Superfície	Jackson (1981)
Necessidades Reais de Rega	Necessidades Hídricas das Culturas	Menenti et al. (1989)
	Balanço Energético da Superfície	Moran et al. (1994)
Índice Déficit Hídrico (WDI)	Balanço Energético da Superfície	Bastiaanssen et al.
Fração Evaporativa	Técnicas com microonda	(1996)
Disponibilidade de Água no Solo		Engman & Chauhan (1995)
Uniformidade de Aplicação		
Água Aplicada por unidade de área	Índice Vegetação	Menenti et al. (1989)
Coefficiente de variação da Evapotranspiração	Balanço Energético da Superfície	Bastiaanssen et al.
Coefficiente de variação da Fração Evaporativa		(1996)
Coefficiente de variação da Depleção de Água	Balanço Energético da Superfície	Bastiaanssen et al.
Geometria Espacial do Rendimento Cultural		(1996)
Geometria Espacial da taxa de Evapotranspiração Real	Balanço Energético da Superfície	Roerink et al. (1997)
		Bastiaanssen et al.
	Índice Vegetação	(1999)
	Balanço Energético da Superfície	Alexandridris et al.
		(1999)
Variabilidade Temporal		
Variação temporal da Fração Evaporativa	Series Temporais da Fração Evaporativa	Alexandridris et al. (1999)
Produtividade		
Evapotranspiração Real vs Água aplicada	Balanço Hídrico	Menenti et al. (1989)
Rendimento vs Água aplicada	Índice Vegetação	Thiruvengadachari & Sakthivadivel (1997)
Rendimento vs Evapotranspiração	Índice Vegetação e Balanço Energético	Bastiaanssen et al. (1999)
Sustentabilidade		
Intensidade Cultural	Classificação Multiespectral	Thiruvengadachari & Sakthivadivel (1997)
Salinidade da superfície do solo	Falsa Cor	Makin (1986)

Adaptado de Bastiaanssen e Bos, (1999)

Á eficiência de uso da água em agricultura está inevitavelmente associada a determinação realística das necessidades de água das culturas, as quais estão diretamente relacionadas com o conhecimento rigoroso da taxa de evapotranspiração (ET), com uma elevada representação espacial e temporal, de forma a servir de base a um sistema global de gestão do recurso água em agricultura de regadio.

A introdução dos referidos avanços tecnológicos na estimativa das necessidades hídricas das culturas prende-se com o cálculo indireto da taxa de evapotranspiração cultural (ET_c) à escala regional, utilizando técnicas de deteção remota, mediante a sua integração com algoritmos de cálculo para estimativa da ET_c

e o estabelecimento de Índices de Stress Hídrico. Existem trabalhos desenvolvidos nesta linha de conhecimento, que se agrupam da seguinte forma:

a) Utilizando o método de balanço energético da superfície (p.e METRIC, SEBAL), mediante a utilização da informação remota sobre os índices de refletância à superfície no espectro eletromagnético, na gama do visível e infravermelho próximo e também na banda do infravermelho térmico (temperatura da superfície). Alguns trabalhos desenvolvidos: Ehrler *et al.*(1978), Jackson *et al.*(1977), Menenti and Choudhury (1993), Jackson *et al.* (1981), Idso *et al.* (1981), Jackson, R. D. (1982), Yazar A., *et al.* (1999), Suat Irmak, *et al.* (2000); Roerink *et al.* (2000), Su (2002), González-Dugo *et al.* (2005), Liming Wang *et al.*(2005); Bastiaanssen *et al.* (1998, 2005), Tasumi *et al.*(2005 a,b, 2006), Allen *et al.* (2002, 2005, 2007a,b), Loheide and Gorelick (2005), Kustas *et al.* (2003, 2007), Neale (2005), Erdem, T. *et al.*(2006), Er-Raki *et al.* (2007), Chavez and Neale (2007), Gontia, N.K., (2008).

b) Obtendo valores reais da taxa de evapotranspiração cultural e estabelecendo coeficientes culturais mediante a utilização de índices de vegetação (NDVI e SAVI) derivados a partir de valores de refletância da superfície cultural, na banda do infravermelho e infravermelho próximo. Alguns trabalhos desenvolvidos: Reginato *et al.*(1985), Neale *et al.* (1989, 1996, 2003, 2005), Jackson *et al.* (1980) Heilman *et al.*(1982), Bausch and Neale (1987), Michael and Bastiaanssen (2000), Jachum *et al.* (2002); Anderson, MC, *et al.* (2004), Hunsaker *et al.* (2005), Calera *et al.* (2005), Zang and Wegehenkel (2006), González-Dugo e Mateos (2008).

A estimativa dos valores da evapotranspiração cultural mediante a utilização dos coeficientes culturais, obtidos a partir dos índices de vegetação multiespectrais, traduzidos com base na informação remota, é relativamente mais simples que os procedimentos descritos pelo método do balanço energético mencionado em a), na medida em que não considera as reduções da evapotranspiração diretas em função da condutância estomática e consequente deficit hídrico. Considerando esta redução de uma forma mais integrada, em função das variações no desenvolvimento da cultura, faz-se a estimativa dos valores dos índices de vegetação.

Os coeficientes culturais estimados a partir do espectro eletromagnético estão diretamente dependentes da relação que existe entre os valores do coeficiente cultural basal (Kcb, componente do coeficiente cultural que representa a transpiração) e os índices de vegetação (IV). Ambos apresentam uma grande sensibilidade às variações dos parâmetros biofísicos – índice de área foliar (*LAI, leaf area index*) e fração de cobertura do solo (*fc, ground cover fraction*) (Choudhury *et al.*, 1994). Alguns autores apresentam relações lineares entre os valores de Kcb e IV (Baush e Neale, 1987; Neale *et al.*, 1989, Gonzalez-Piqueras *et al.* 2003), no entanto existem autores que sugerem a existência de relações não lineares (Hunsaker *et al.*, 2003 e 2005).

Com os trabalhos que se acaba de referir, foram obtidos resultados e ferramentas com elevado potencial científico e também com uma elevada aplicabilidade nas questões relacionadas com o uso sustentável do recurso água em agricultura de regadio. No entanto, são de referir alguns pontos fracos, cujas limitações é

necessário atenuar, apostando no desenvolvimento de soluções compensatórias. Nas alíneas seguintes tratam-se alguns casos com maior interesse:

- Validação e calibração das determinações da temperatura aerodinâmica e da temperatura radiante do coberto vegetal, sendo esta medida pela radiação na banda térmica. Os procedimentos para esta determinação podem incluir o uso de sensores/câmaras da radiação IV na banda térmica, aerotransportados ou ao nível de informação de satélite. Definem-se com os valores medidos índices de stress hídrico, com utilização em agricultura de regadio.
- Ultrapassar as limitações impostas pela resolução espacial e temporal das plataformas de aquisição de dados; aqui podem utilizar-se várias fontes de dados, plataformas aerotransportadas e satélites de alta resolução com diferentes características, obedecendo aos requisitos que o estudo a realizar melhor definirá.
- Diminuir o tempo de processamento de toda a informação, até chegar ao objetivo final – determinação das necessidades de água de rega e gestão global da água à escala regional, devendo tanto quanto possível aproximarmo-nos da sua aplicabilidade em tempo real.
- Validação de um modelo de gestão da água de rega à escala regional, integrando a parametrização dos procedimentos a adoptar, mediante a utilização de técnicas de detecção remota e a aplicação da água de rega à escala da parcela, mediante a utilização de técnicas de telegestão.

É neste enquadramento que surge a presente linha de trabalho, com a qual se pretende contribuir para o desenvolvimento de uma tecnologia integrada e global de gestão dos recursos – clima, água e solo – em agricultura de regadio, à escala regional. A tecnologia que se pretende desenvolver terá como suporte técnicas de telegestão, detecção remota e SIG. A ideia genérica é monitorizar por teledeteção, com elevada frequência temporal e espacial, os parâmetros associados à gestão dos recursos agrícolas – solo e água - isto é, monitorizar parâmetros agronómicos e pedológicos que traduzam o estado hídrico do solo e as necessidades de água das culturas, contribuindo desta forma para a utilização eficiente da água em regadio.

2.6.2 Estimativa da Evapotranspiração e Necessidades Hídricas com base no Balanço Energético da Superfície Terrestre

2.6.2.1 Enquadramento

A utilização de modelos de balanço energético para analisar a informação obtida por detecção remota consiste na conversão de dados de energia emitida pela superfície terrestre, nas diferentes bandas do espectro eletromagnético em parâmetros que caracterizam a superfície terrestre, os quais permitem a estimativa da taxa de evapotranspiração. Alguns desses parâmetros são: albedo, índice de área foliar, índices de vegetação, emissividade e temperatura da superfície.

A determinação da evapotranspiração pela equação do balanço energético estima-se com base no valor residual da energia, ou seja, a quantidade de energia disponível para o processo de evapotranspiração, após o consumo energético no aquecimento do solo e do ar:

$$LE = Rn - G - H \quad (2.4)$$

Onde: Rn representa a radiação líquida, que resulta do balanço entre a radiação de curto e longo comprimento de onda recebida e a radiação emitida; LE representa o fluxo de calor latente; G é fluxo de calor do solo e H é o fluxo de calor sensível (todas as grandezas em $W\ m^{-2}$). O valor de LE é convertido em ET (mm/hora ou mm/dia) quando dividido pelo valor do calor latente de vaporização ($\lambda_v \sim 2,45\ MJ\ kg^{-1}$). Os valores de Rn e G são estimados a partir dos parâmetros meteorológicos, de acordo com a distribuição espacial da radiação emitida e reflectida (Jackson *et al.*, 1985), segundo a equação 2.5.

$$Rn = (1 - \alpha) \cdot Rs + \epsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 - \epsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.5)$$

Onde: α é o albedo da superfície, Rs a radiação de curto comprimento de onda ($W\ m^{-2}$), σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8}\ W\ m^{-2}\ K^{-4}$), ϵ é a emissividade do ar e da superfície e T a temperatura ($^{\circ}K$), do ar e da superfície (a e s , *respectivamente*).

O albedo da superfície (α), quando se está a trabalhar com superfícies vegetais, pode ser calculado pelo modelo de Brest e Goward (1987), baseando-se nos valores da radiância na banda do vermelho (R) e infravermelho próximo (NIR):

$$\alpha = 0,512R + 0,418NIR \quad (2.6)$$

A emissividade do ar (ϵ_a) obtêm-se pela equação de Brutsaert (1975):

$$\epsilon_a = 0,0172 \cdot \left(\frac{ea}{Ta} \right)^{1/7} \quad (2.7)$$

Onde: ea é a pressão de vapor real (kPa).

O fluxo de calor do solo (G) é a fração da radiação da superfície diretamente relacionada com o índice de área foliar (LAI , *leaf area index*) ou $NDVI$. Chávez *et al.* (2005) estabeleceram a seguinte relação linear e logarítmica para as culturas do milho e do sorgo:

$$G = Rn (0,3324 - 0,024\ LAI) (0,8155 - 0,3032\ LN(LAI)) \quad (2.8)$$

O fluxo de calor sensível (H) é estimado a partir do gradiente de temperatura entre a superfície aerodinâmica e a temperatura do ar e a resistência aerodinâmica da superfície. Os modelos de balanço energético mais recentes diferem bastante na maneira como calculam o valor de H (equação 2.10)..

A estimativa da evapotranspiração real a partir das técnicas de detecção remota iniciou-se com o desenvolvimento da técnica do Balanço de Energia simplificado publicada nos trabalhos de Idso *et al*

(1975) e Jackson *et al* (1977). Estes modelos estimam a evapotranspiração a partir da relação empírica com a temperatura, a partir de imagens na banda do visível e infravermelho térmico.

Durante a década dos anos noventa foram desenvolvidas versões mais avançadas do balanço energético da superfície. Modelos como o SEBAL (Bastiaanssen *et al.*, 1998), SEBI-SEBS (Menenti *et al.*, 2003) e Su (2002) e METRIC (Tasumi *et al.*, 1998) estimam o fluxo de calor latente e sensível. Estes modelos são ferramentas mais avançadas e mostram resultados semelhantes com a estimativa dos fluxos de energia por teledeteção. O ponto 2.6.2.2 descreve ainda que com brevidade alguns desses modelos.

Existem inúmeras aplicações das técnicas de detecção remota com base na utilização de modelos de balanço energético para estimativa da taxa de evapotranspiração. Alguns trabalhos pioneiros foram: Brown e Rosenberg (1973), Brown (1974), Stone e Horton (1974), Idso *et al.* (1975), Heilman *et al.* (1976), Verma *et al.* (1976), Kanemasu *et al.* (1977), Jackson *et al.* (1977), Taconet *et al.* (1986), Hatfield *et al.* (1983), Reginato *et al.* (1985), Jackson *et al.* (1985), Jackson *et al.* (1987), Moran *et al.* (1989).

2.6.2.2 Alguns Modelos de Balanço Energético da Superfície Terrestre mais Utilizados na Estimativa das Necessidades de Água das Culturas

Neste ponto são apresentados alguns trabalhos mais recentes, onde se podem mencionar alguns modelos mais utilizados na estimativa das necessidades de água das culturas, assim como os procedimentos que lhe estão associados:

- **SEBI, SEBS e S-SEBS (SEBI, *Surface Energy Balance Index*)** proposto por Menenti e Choudhury (1993), baseia-se no índice de stress hídrico (CWSI, Jackson, et al. 1981) estimado a partir do poder evaporativo da cultura (derivando o valor de ET), mediante o controlo remoto da temperatura da superfície cultural em parcelas com grande disponibilidade de água e em parcelas com níveis de stress severos, podendo assim estabelecer o valor de CWSI com base nas diferenças de temperatura entre a superfície cultural e o ar. O sistema *SEBS, Surface Energy Balance System* (Su, 2002) baseia-se também nos princípios do modelo SEBI. Várias aplicações foram efetuadas com estes modelos, tendo sido possível retirar a seguinte ilação: observou-se um elevado grau de consistência entre os valores de ET estimados a partir de imagens de satélite (MODIS, ASTER, LANDSAT ETM+) mediante a utilização do modelo SEBS e os valores medidos mediante a utilização de lisímetros. A principal limitação associada à utilização deste modelo é a necessidade que existe na determinação da altura da rugosidade aerodinâmica. Esta variável normalmente é obtida a partir de índices de vegetação, altura da cultura ou valores normalizados em função da ocupação cultural.
- **S-SEBI, *Simplified SEBI*** (Roerink et al. 2000), derivado a partir do modelo SEBS, fazendo a estimativa instantânea dos fluxos energéticos da superfície a partir da informação obtida por detecção remota. Baseando-se na fração evaporativa e no contraste entre a temperatura da

superfície de uma parcela bem abastecida de água e uma parcela em stress severo. Uma desvantagem deste método é o facto de ser necessário ter valores extremos da temperatura da superfície, o que muitas vezes não é possível obter. É um método simples que não necessita de muitas variáveis meteorológicas. No entanto, em aplicações práticas com este método realizadas por Gómez *et al.* (2005) em várias culturas, obteve-se um erro na ordem de 26% na extrapolação dos valores de ET instantâneos para valores de ET diários, traduzindo-se numa diferença de 1 mm/dia.

- **TSM**, neste modelo o balanço energético das componentes solo e vegetação faz-se separadamente, estimando-se o valor total de ET por combinação de ambas as componentes (solo e vegetação). Norman *et al.* (1995), Kustas e Norman (1999) operacionalizaram a metodologia (modelo TSM) proposta por Shuttleworth e Wallace (1985), Shuttleworth Gurney (1990). Será necessário fraccionar o compósito radiométrico da temperatura da superfície, nas componentes solo e vegetação. Será necessário definir a transferência de massa e energia solo-vegetação. As trocas de energia no continuum Solo-Planta-Atmosfera baseiam-se na resistência ao calor, momento do transporte e no fluxo de calor sensível, estimado a partir do sistema resistência-gradiente de temperatura. A temperatura radiométrica e os valores das resistências, dos fluxos de calor sensível e de calor latente, nas componentes solo e vegetação, derivam de procedimentos de cálculo que integram os seguintes parâmetros: temperatura radiométrica da superfície terrestre, fração de cobertura do solo pela vegetação e fluxo de calor latente potencial máximo.

Vários trabalhos foram realizados em torno da utilização do modelo TSM: Kustas *et al.* (2004), Gonzalez-Dugo *et al.* (2006), Colaizzi *et al.* (2006).

Houve também algumas adaptações e alterações ao modelo TSM, desenvolvidas por Norman *et al.* (2000), com o objetivo de reduzir o efeito associado a erros de calibração radiométrica, variações da emissividade, variações na temperatura do ar local e velocidade do vento. Estes autores propuseram o cálculo dos fluxos de calor latente e sensível mediante a utilização da diferença de temperatura da superfície e temperatura do ar. Tendo observado uma potencialidade acrescida desta metodologia para aplicações à escala regional, mediante o uso de satélites geoestacionários, Kustas *et al.* (2003) e Norman *et al.* (2003) utilizaram o modelo TSM para desenvolver o modelo designado por “*Disaggregated Atmosphere Land Exchange Inverse Model*” (DisALEXI). Com recurso a imagens de satélite de baixa e alta resolução, os autores estimaram valores de ET, comparando-os com a monitorização local, tendo obtido um valor de RMSD (*Root Mean Square Difference*) na ordem de 10-12%. Um trabalho desenvolvido por Anderson *et al.* (2007) obteve resultados similares.

- **SEBAL** (Bastiaanssen, 1995) e (Bastiaanssen *et al.*, 1998, 2005) é um modelo simples de balanço energético (*single-source model*) com o qual é possível determinar o valor de LE (fluxo de calor latente) que traduz o valor da ET. A radiação líquida (Rn) e o fluxo de calor do solo (G) são calculados a partir da temperatura da superfície (T_s), da refletividade que traduz o albedo, dos índices de vegetação, índice de área foliar e emissividade da superfície. O fluxo de calor sensível (H) é estimado a partir do modelo de resistência aerodinâmica, o qual assume uma relação linear entre diferença (dT) de temperatura da superfície e temperatura do ar e a temperatura radiométrica da superfície (T_s) calculada em pixels com valores extremos (*cold and hot pixels*). Em imagem de satélite, o pixel extremo inferior (*cold pixel*) H assume o valor zero e o pixel extremo superior (*hot pixel*) o valor de LE é zero, sendo $H_{hot}=(Rn-G)_{hot}$.

O modelo SEBAL foi testado em várias partes do mundo. Bastiaanssen *et al.*, (2005) resumiu sua aplicabilidade em ambientes com condições climáticas distintas, tanto à escala local como regional. Tendo obtido níveis de precisão elevados, relativamente à estimativa dos valores de ET, na ordem do 85% para valores diários, 95 e 96% para uma escala temporal sazonal ou anual.

- **METRICTM** (Allen *et al.*, 2002, 2005 e 2007) Este modelo utiliza informação remota na banda do visível, infravermelho próximo e infravermelho térmico do espectro eletromagnético, junto com informação de carácter ambiental – velocidade do vento e temperatura próximo do ponto de orvalho. O algoritmo de cálculo do modelo METRICTM baseia-se no mesmo algoritmo do modelo SEBAL, tendo como principais diferenças o facto do modelo METRICTM não assumir para o pixel extremo inferior o valor $H=0$ e $LE=Rn-G$, assumindo para o balanço de água no solo o valor do pixel extremo superior, sendo o valor ET muito próximo de zero e para o pixel extremo inferior próximo de $1,05 ET_{r,\lambda_v}$, sendo ET_r o valor horário da evapotranspiração da cultura de referência, calculada com a equação standard de Penman-Monteith; outra diferença reside no facto de o modelo METRICTM assumir pixels extremos com características agronómicas (altura da cultura, índice de área foliar) idênticas ao pixel extremo inferior (*cold pixel*) semelhante à cultura de referência (luzerna); a terceira diferença associada ao modelo METRICTM está relacionada com o facto de este modelo basear-se na estimativa da fração de evapotranspiração de referência (luzerna) (ET_r/F), extrapolando valores instantâneos de LE para valores diários de ET, mediante os valores da fração evaporativa ou poder evaporativo.

Vários trabalhos de validação do modelo METRICTM foram desenvolvidos por Tasumi *et al.* (2003), Allen *et al.* (2007, 2005) e Chavez *et al.* (2007).

- **ETMA** (Loheide e Gorelick, 2005) é um modelo que se baseia no balanço energético da superfície mediante a utilização dos seguintes parâmetros: variáveis climáticas, registo dos valores de G e imagens térmicas de alta-resolução da superfície terrestre, obtidas mediante câmaras aerotransportadas. Utiliza registos de temperaturas em dois pontos T_{LE} e T_H , desenvolvendo uma relação linear entre a temperatura da superfície e os valores instantâneos de ET (ET_i). Em algumas aplicações do modelo ETMA foi possível retirar a seguinte relação: é um

modelo com potencialidades elevadas à escala local e em ambientes onde as variáveis temperatura do ar, velocidade do vento, altura da cultura e temperatura do solo, apresentam características uniformes.

- **Balço Energético com base nos valores da temperatura da superfície terrestre (T_s) e temperatura aerodinâmica da superfície (T_a).**

No seguimento do já descrito no ponto 2.6.2.1 deste trabalho, descrevemos a metodologia do balanço energético com base nos valores da temperatura:

Sendo o valor de T_a , estimado a partir da inversão da equação 2.9:

$$LE = Rn - G - \frac{\rho a \cdot Cp(T_s - T_a)}{rah} \quad (2.9)$$

Onde: ρa é a densidade do ar (kg m^{-3}), Cp o calor específico do ar ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$), r_{ah} a resistência aerodinâmica à transferência de calor (s m^{-1}), T_s e T_a são a temperatura radiométrica da superfície e temperatura do ar, respectivamente ($^{\circ}\text{K}$).

Este modelo baseia-se na relação de não linearidade entre o valor de T_a e T_o , sendo possível estimar os valores do fluxo de calor sensível (H) mediante a equação 2.10:

$$H = \frac{\rho a \cdot Cp(T_s - T_a)}{rah} \quad (2.10)$$

Vários trabalhos foram desenvolvidos em torno da diferença entre ($T_s - T_a$) ou ($T_s - T_o$): Kustas e Norman (1996), Kustas *et al.* (2003, 2007), Colaizzi *et al.* (2004), Zibognon *et al.* (2002), Crago *et al.* (2004), Chávez *et al.* (2005).

A estimativa dos valores da ET mediante a utilização do método do balanço energético, estará intimamente ligada à extrapolação dos valores instantâneos de ET em valores diários de ET. Esta extrapolação requer informação característica sobre: latitude geográfica, dia do ano, hora do dia e radiação solar diurna. Neste âmbito, foram realizados vários estudos: Jackson *et al.* (1983), Colaizzi *et al.* (2006) e Chavez e Neale (2007).

As suas principais limitações prendem-se com o seguimento temporal da evapotranspiração, associada muitas vezes à fraca disponibilidade de imagens com ausência de nebulosidade, devido ao ciclo de passagem do satélite (Duchemin *et al.*, 2006) ou câmara aerotransportada, assim como a baixa resolução espacial principalmente na banda térmica, no caso concreto das imagens multiespectrais de satélite; outra limitação associada a estes algoritmos reside no grau de complexidade destes algoritmos físicos, que exigem uma parametrização local para que se consiga obter valores precisos de ET.

2.6.3 Estimativa da Oportunidade de Rega com base em Índices de Stress Hídrico

2.6.3.1 Enquadramento

A radiação emitida pelo coberto vegetal reporta a quantidade de energia do espectro eletromagnético na banda do infravermelho térmico, e a sua magnitude depende da temperatura da folha. Com a termometria de infravermelho é possível monitorizar a temperatura de uma superfície à distância, de um modo fácil, rápido e não destrutivo. Os sensores ou câmaras de infravermelhos captam a radiação emitida pela superfície alvo e relacionam a radiação R (Wm^{-2}) com a temperatura da superfície T_s (K) através da Lei de Stefan-Boltzman (Jackson, 1981):

$$R = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.12)$$

Em que ϵ representa a emissividade da superfície e σ a constante de Stefan-Boltzman.

A radiação emitida pela maior parte das superfícies das plantas varia entre 0,95 e 1, e a das folhas entre 0,97 e 0,98 (Jackson, 1981), mas quando se considera o coberto vegetal a radiação emitida deve ser superior, devido às reflexões internas resultantes da geometria do coberto. Contudo, Jackson (1981) indica que a radiação emitida pelo coberto vegetal (emissividade) deve ser superior a 0,97.

A maioria dos sensores de infravermelhos utilizados para fins agrícolas captam a radiação com um comprimento de onda compreendido entre 8 e 14 μm (Fontes, 1992). A parte de radiação emitida pelo ar, principalmente pelo vapor de água, e a reflectida pela própria superfície, também atingem o sensor, em conjunto à radiação recebida da superfície alvo (Fontes, 1992), o que sobrestima a temperatura da superfície (Fontes, 1992).

Stockle & Douglas (1992) indicam a dificuldade em medir a temperatura do coberto vegetal de culturas em linhas nas fases iniciais do desenvolvimento da cultura, devido à interferência da temperatura da superfície do solo. Nas fases iniciais do desenvolvimento da cultura, quando ainda não se atingiu a cobertura total do solo, o campo de visão do sensor/câmara capta a superfície composta pelo solo e pela cultura, o que torna difícil utilizar termometria de infravermelho para monitorização do estado hídrico da cultura nas fases iniciais do desenvolvimento. Nestes casos é recomendável a utilização de câmaras de infravermelhos de elevada resolução, sendo assim possível obter imagens térmicas que servirão de base à determinação da quantidade de energia emitida pelo coberto vegetal, traduzindo estado hídrico da cultura, mediante a estimativa dos índices de stress hídrico.

O potencial hídrico das plantas é aceite como uma medida fundamental do estado hídrico da planta e a sua comparação com a temperatura do coberto vegetal é importante (Jackson, 1981) para a aplicação da temperatura do coberto vegetal como indicador do estado hídrico da cultura. Bergonci *et. al.* (1999) conclui que a diferença de temperatura entre o coberto vegetal e o ar apresenta uma boa correlação com o potencial hídrico da folha. Enquanto o potencial hídrico da planta diminui, o stress hídrico aumenta e a diferença entre a temperatura do coberto e do ar também aumenta.

Jackson (1981) sugere a temperatura do coberto vegetal como o melhor indicador do stress hídrico nas fases iniciais do stress, mas, à medida que a temperatura do coberto vegetal fica vários graus mais quente que o ar, a diferença de temperatura entre o coberto e o ar fica insensível a alterações ao potencial hídrico da planta.

As medições da temperatura do coberto vegetal são afetadas por condições meteorológicas, nomeadamente a alteração das condições de nebulosidade, que aumentam a variabilidade das medições, tornando muito difícil avaliar o estado hídrico da cultura nessas condições (Jackson, 1981). Assim, é de considerar, como oportunidade de monitorização, dias em que as condições atmosféricas se encontrem estáveis, céu limpo. A velocidade do vento também pode afetar as medições da temperatura do coberto vegetal, mas de um modo pouco significativo (Jackson, 1981)

Utilizando a temperatura do coberto vegetal (T_c) como indicador do estado hídrico da cultura foram desenvolvidos vários índices, dos quais se enumeram:

- Dia Stress Temperatura (Temperature Stress Day, TSD): diferença de temperatura entre a parcela de que se quer avaliar o estado hídrico e outra, com igual cultura e situada nas proximidades, em pleno conforto hídrico, durante o intervalo de tempo i (dias) (Jackson, 1981)
- Variabilidade da temperatura critica (Canopy Temperature Variability, CTV): variabilidade espacial das temperaturas medidas durante um determinado período para a mesma parcela (Moran *et. al.* 2005).
- Dia Stress Grau (Stress Degree Day, SDD): diferença entre T_c e a temperatura do ar, medidas quando existe mais calor, um pouco depois do meio-dia solar, durante o intervalo de tempo i (dias).
- Índice de Stress Hídrico da Cultura (Crop Water Stress Index, CWSI): baseado na diferença entre a T_c e a temperatura do ar.
- Índice de Stress Hídrico (Water Stress index, WSI): semelhante ao CWSI mas com uma componente relativa à cobertura do solo.
- PRI “Photochemical Reflectance Index”, índice proposto por Gamon *et al* (1992) e validado em vários trabalhos já desenvolvidos (Dobrowsky *et al.*, 2005; Pérez-Priego *et al.*, 2005; Suárez *et. al.*, 2008; Thenot *et. al.*, 2002; Suárez *et. al.*, 2009). Como um indicador de stress hídrico, apresenta uma boa correlação com outros parâmetros indicadores de stress: temperatura da superfície, condutância estomática e produtividade. Este indicador é uma alternativa muito credível à utilização da temperatura da superfície foliar, tornando-se assim uma vantagem, uma vez que a informação fornecida pelos satélites possui baixa resolução na banda do infravermelho térmico, não oferecendo grandes garantias para o uso na gestão da água de rega, ao nível da parcela.

A Tabela 2.3 faz referência a alguns índices de stress hídrico estimados a partir dos valores da radiação, na banda do infravermelho térmico, da superfície das culturas, como indicador utilizado na determinação da oportunidade de rega.

Tabela 2.3: Índices de Stress Hídrico: cálculo, aplicação e referência bibliográfica

Índice de Stress (Índice Térmico)	Fórmula	Aplicação	Referência Bibliográfica
Diferencial Térmico	$T_c - T_a$	Balanco energético, Calor Sensível	Tanner (1963)
Graus Stress por Dia SDD "Stress Degree Day"	$(T_c - T_a)$	Rendimento da Cultura	Idso <i>et al.</i> (1977)
Índice de Stress Hídrico CWSI (Empírico)* "Crop Water Stress Index"	$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{\min}}{(T_c - T_a)_{\max} - (T_c - T_a)_{\min}}$	Stress Hídrico com aplicação no regadio	Idso <i>et al.</i> (1981)
Índice de Stress Hídrico CWSI (teórico)** "Crop Water Stress Index"	$CWSI = 1 - \frac{ET_r}{ET_m} = \frac{\gamma(1 + \frac{r_c}{r_a}) - \gamma(1 + \frac{r_{cp}}{r_a})}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})}$	Stress Hídrico com aplicação no regadio	Jackson <i>et al.</i> (1981)

* Conforme descreve a metodologia de Idso *et al.* (1981), na secção 2.6.3.3: $(T_c - T_a)_{\max}$: Limite superior de stress; $(T_c - T_a)_{\min}$: Limite inferior de stress (em função do défice pressão de vapor, DPV), obtido mediante a monitorização direta para o estabelecimento de posterior regressão linear. O valor de CWSI varia entre 0 para condições de conforto hídrico $(T_c - T_a) = (T_c - T_a)_{\min}$ e 1 para stress máximo onde a cultura não transpira $(T_c - T_a) = (T_c - T_a)_{\max}$.

** ETr: evapotranspiração cultural real; ETm: evapotranspiração cultural máxima ou potencial; Δ : declive da curva de pressão de vapor na saturação ($\text{Pa}^\circ\text{C}^{-1}$); γ : constante psicométrica ($\text{Pa}^\circ\text{C}^{-1}$); r_a : resistência aerodinâmica (sm^{-1}); r_c : resistência do coberto vegetal (sm^{-1}) à transferência de vapor, resistência do coberto vegetal quando a cultura transpira à sua taxa máxima (sm^{-1}).

2.6.3.2 Definição Teórica do Índice de Stress Hídrico da Cultura (CWSI)

Jackson *et al.* (1981) apresentam o método teórico para determinação do CWSI, baseado no balanço de energia, estimado com base nos valores da radiação líquida, resistência aerodinâmica, temperatura do coberto, temperatura do ar e défice de pressão de vapor (DPV). Este método integra variáveis ambientais e variáveis agronómicas, relacionadas com o estado hídrico da cultura, isto é, disponibilidade de água no solo, que definem o desenvolvimento das culturas e consequentemente a sua produtividade (Yazar *et al.* 1999).

A razão entre a evapotranspiração cultural real (ET_r) e a evapotranspiração cultural quando a cultura transpira na sua máxima capacidade (ET_m) indica o estado hídrico dessa cultura. Utilizando a equação de Penman-Montheith (Allen *et al.*, 1998) e a relação entre ET_r e ET_m , Jackson (1981) definiu o CWSI por:

$$CWSI = 1 - \frac{ET_r}{ET_m} = \frac{\gamma(1 + \frac{r_c}{r_a}) - \gamma(1 + \frac{r_{cp}}{r_a})}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})} \quad (2.13)$$

Onde: Δ representa o declive da curva de pressão de vapor na saturação ($\text{Pa}^\circ\text{C}^{-1}$), γ a constante psicométrica ($\text{Pa}^\circ\text{C}^{-1}$), r_a a resistência aerodinâmica (sm^{-1}), r_c a resistência do coberto vegetal (sm^{-1}) à transferência de vapor, e r_{cp} a resistência do coberto vegetal quando a cultura transpira à sua taxa máxima (sm^{-1}).

O principal problema para a determinação do CWSI pela abordagem teórica é o conhecimento das resistências r_c e r_a .

Partindo da equação do balanço de energia para um coberto vegetal, Jackson (1981) demonstrou que a diferença entre a temperatura T_C e T_A depende do deficit de pressão de vapor do ar, $e_s - e_A$ (Pa), a radiação líquida, R_n (Wm^{-2}), e as resistências aerodinâmica e de cultura, desprezando o fluxo de calor por baixo da superfície do coberto vegetal (Jackson, 1981):

$$T_C - T_A = \frac{r_a R_n}{\rho C_p} \times \frac{\gamma \left(\frac{1+r_c}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \left(\frac{1+r_c}{r_a} \right)} - \frac{e_s - e_A}{\Delta + \gamma \left(\frac{1+r_c}{r_a} \right)} \quad (2.14)$$

Em que ρ representa a massa volúmica do ar (kgm^{-3}), C_p a capacidade calorífica do ar ($\text{Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$), e_s a pressão de vapor de saturação para T_A (kPa), e_A a pressão de vapor real para T_A (Pa). Sendo assim a $T_C - T_A$ em função das variáveis R_n , DPV, de T_C e T_A incluídos em Δ , e das resistências aerodinâmicas e do coberto.

O deficit de pressão de vapor (DPV) é a diferença entre a pressão de vapor de saturação (e_s) e a pressão de vapor real (e_A), para um dado período de tempo e expresso em kPa (Allen *et al.*, 1998):

$$DPV = e_s - e_A \quad (2.15)$$

Em que a pressão de vapor de saturação em kPa (e_s) é a pressão de vapor do ar quando este está saturado de humidade, para determinada temperatura, em que a função pressão de vapor de saturação $e^\circ(T)$ para uma temperatura T (°C) é dada por (Allen *et al.*, 1998):

$$e^\circ(T) = 0,6108 e^{\left(\frac{17,27T}{T+237,3}\right)} \quad (2.16)$$

A e_s é a média da pressão de saturação de vapor para a temperatura máxima ($T_{máx}$) e para a temperatura mínima ($T_{mín}$), ambas em °C, registadas no intervalo de tempo, considerado (Allen *et al.*, 1998):

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{máx}) + e^\circ(T_{mín})}{2} \quad (2.17)$$

A pressão de vapor real (e_A) em kPa pode ser calculada a partir da equação 2.18 utilizando a temperatura do ponto de orvalho, através de medições da temperatura do termómetro de bolbo seco e de bolbo húmido ou através de medições higrométricas de humidade relativa:

$$e_A = \frac{e^\circ(T_{mín}) \frac{HR_{máx}}{100} + e^\circ(T_{máx}) \frac{HR_{mín}}{100}}{2} \quad (2.18)$$

em que $e^\circ(T_{máx})$ e $e^\circ(T_{mín})$ representam a pressão de vapor de saturação calculada para $T_{máx}$ e $T_{mín}$ respetivamente, $HR_{máx}$ e $HR_{mín}$ a humidade relativa máxima e mínima, em %.

Jackson (1981) define o declive da curva que relaciona a pressão de vapor de saturação com a temperatura Δ ($\text{Pa}^\circ\text{C}^{-1}$), por:

$$\Delta = \frac{(e_c - e_s)}{(T_c - T_A)} \quad (2.19)$$

Em que e_c é a pressão de vapor de saturação à temperatura T_c (Pa).

Os limites de $T_c - T_A$, foram obtidos a partir da equação 2.20 e 2.21, com algumas considerações sobre a resistência do coberto vegetal (r_c). A $T_c - T_A$ será máxima $(T_c - T_A)_{máx}$ para uma cultura que não transpira $ET_r = 0$, tendo Jackson (1981) considerado um r_c infinito, obtendo o limite superior:

$$(T_c - T_A)_{máx} = \frac{r_a R_n}{\rho C_p} \quad (2.20)$$

O limite $(T_C - T_A)_{max}$ é independente do DPV, existindo relação com a radiação solar e a velocidade do vento, que influencia r_a .

A diferença entre T_C e T_A é mínima $(T_C - T_A)_{min}$ nos casos em que a cultura está em condições hídricas ótimas $ET_r = ET_m$, e Jackson (1981) considera que a plantas funcionam como uma superfície livre de água, onde $r_c = 0$, não existindo resistências à transferência de vapor de água:

$$(T_C - T_A)_{min} = \frac{r_a R_n}{\rho C_p} \times \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} - \frac{e_s - e_A}{\Delta + \gamma} \quad (2.21)$$

Contudo, mesmo para uma cultura em pleno conforto hídrico, r_c não é igual a zero, isto é, existe sempre alguma resistência do coberto vegetal à transferência de vapor.

Assim Jackson (1981) introduz a resistência do coberto vegetal quando este transpira à sua taxa máxima, r_{cp} , sendo a resistência verificada para a evapotranspiração quando a transpiração da cultura é máxima ET_m . Esta resistência varia entre culturas e pode variar com as condições ambientais durante o dia.

Jackson (1981) assume $r_c = r_{cp}$ e apresenta uma equação para o limite inferior de $T_C - T_A$.

Pela equação 2.21 constata-se que $(T_C - T_A)_{min}$ é função de r_a , R_n e do DPV ($e_s - e_A$). A $(T_C - T_A)_{min}$ está relacionada linearmente com o DPV, sendo o fator que domina $(T_C - T_A)_{min}$ (Fontes, 1992). Para uma determinada temperatura, a $(T_C - T_A)_{min}$ consiste numa reta entre a interceção do eixo dos yy para o ar completamente saturado, $e_s - e_A = 0$, até ao valor do ar completamente seco, $e_s - e_A = e_s$ (Jackson, 1981).

2.6.3.3 Definição Empírica do Índice de Stress Hídrico da Cultura (CWSI)

Idso *et al.* (1981) apresentam o método empírico para determinação do CWSI, definindo a linha inferior de stress “*non-water-stressed baselines*”, a qual representa valores inferiores da temperatura da superfície cultural, numa cultura em conforto hídrico, traduzida por uma taxa de transpiração potencial, estabelecendo a relação linear entre a diferença de temperatura do coberto para o ar ($T_C - T_A$) e o défice de pressão de vapor (DPV). Este método não integra os efeitos da radiação e da velocidade do vento, assim como as variações associadas ao tipo de cultura e o seu estado de desenvolvimento (Idso 1982; Hatfield *et al.* 1984; Burke *et al.* 1990; Nielsen 1994).

Para uma cultura bem abastecida de água, a taxa de transpiração conduz a que a temperatura das folhas seja inferior à temperatura do ar. Pelo contrário, nas culturas em stress hídrico a transpiração é baixa e a temperatura das folhas aumenta. Este processo também é válido quando se considera o coberto vegetal (Idso & Baker, 1997). Deste modo, a relação entre a temperatura da superfície do coberto vegetal e a temperatura do ar representam a resposta da cultura às condições meteorológicas locais e às condições hídricas do solo (Fontes, 1992).

Idso *et al.* (1981) definem CWSI pela posição da diferença de temperatura entre o coberto vegetal e o ar ($T_c - T_A$), relativamente aos limites máximo e mínimo que $T_c - T_A$ pode atingir. O limite máximo $(T_c - T_A)_{máx}$ corresponde à maior diferença entre as temperaturas da superfície do coberto vegetal (T_c) e a do ar (T_A), que ocorre para uma cultura que não transpira, estando em stress máximo. O limite mínimo $(T_c - T_A)_{mín}$ é definido pela $T_c - T_A$ para uma cultura em pleno conforto hídrico, transpirando a sua máxima capacidade. Idso *et. al.* (1981) e Jackson (1981), entre outros autores, mostraram que $(T_c - T_A)_{mín}$ está correlacionada com o DPV, independentemente de outros fatores meteorológicos (Fontes, 1992). A aplicação do CWSI depende muito das condições de humidade do ar. Em condições de humidade do ar elevadas a temperatura das folhas irá ser igual ou superior à temperatura do ar. Em zonas áridas a temperatura das folhas pode ser inferior 7°C em relação à temperatura do ar (Jackson, 1981), sendo a aplicação deste índice mais adequada a climas áridos.

Idso *et. al.* (1981) verificou a existência de uma correlação linear entre $T_c - T_A$ e o DPV para culturas bem abastecidas de água, específica de cada cultura e de cada fase do seu desenvolvimento. Esta relação é independente de outras variáveis climáticas, excepto das condições de nebulosidade. Assim, para determinar empiricamente os limites do CWSI é necessário apenas recolher dados de T_c e T_A e de DPV, cerca de 1h a 1,5h após o meio-dia solar (intervalo de tempo em que se supõe verificar-se a máxima abertura estomática), em condições de céu limpo.

Então o CWSI é determinado por:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_A) - (T_c - T_A)_{mín}}{(T_c - T_A)_{máx} - (T_c - T_A)_{mín}} \quad (2.22)$$

O valor de CWSI varia entre 0 para condições de conforto hídrico - $(T_c - T_A) = (T_c - T_A)_{mín}$ - e 1 para stress máximo onde a cultura não transpira - $(T_c - T_A) = (T_c - T_A)_{máx}$.

Para a utilização do CWSI na condução da rega apenas é necessário medir T_c , T_A . Os limites $(T_c - T_A)_{máx}$ e $(T_c - T_A)_{mín}$ são previamente estabelecidos e calibrados para a cultura em causa e as condições ambientais locais.

A determinação do limite inferior do CWSI $(T_C - T_A)_{\min}$ em função do DPV, efetuado com base em medições de uma cultura mantida em conforto hídrico, é obtida por uma regressão linear negativa:

$$(T_C - T_A)_{\min} = a - b.DPV \quad (2.23)$$

Em que a e b são os coeficientes de regressão linear, representando a interceção com o eixo dos yy e b o declive da reta. O sinal negativo da equação 2.23 indica que o poder evaporativo da atmosfera aumenta, $T_c - T_A$ diminui ficando o coberto vegetal mais frio que o ar.

O limite superior $(T_C - T_A)_{\max}$ pode ser determinado utilizando medições de uma cultura sujeita ao máximo stress hídrico, ou utilizando a metodologia proposta por Howell *et al.* (1986):

$$(T_C - T_A)_{\max} = a + b.GPV \quad (2.24)$$

Em que a e b têm o mesmo significado que para $(T_C - T_A)_{\min}$, e GPV representa o gradiente de pressão de vapor de ar necessária para que o gradiente de pressão de vapor entre o coberto vegetal e do ar seja zero (Howell *et al.*, 1986).

A diferença entre as pressões de saturação de vapor correspondentes a T_A e a $(T_A + a)$ é ($GPV = e^\circ(T_A) - e^\circ(T_A + a)$), sendo este limite superior função apenas da temperatura do ar. Assim a equação (2.22) toma a forma:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (a - bDPV)}{(a - bGPV) - (a + bDPV)} \quad (2.25)$$

2.6.3.4 Potencialidades do Índice de Stress Hídrico da Cultura (Crop Water Stress Index, CWSI) na Gestão da Rega

Vários estudos têm sido desenvolvidos para a aplicação do CWSI na condução da rega. Alderfasi *et al.* (2001) indicam que o CWSI é uma “ferramenta importante para monitorizar e quantificar o estado hídrico de uma cultura e para a programação da rega”. Howell *et al.*, (1999) concluem que o “CWSI oferece uma medida independente e direta do estado hídrico da cultura, que pode facilmente ser utilizado quer para complementar as medições de teor de humidade e/ou a modelação do balanço hídrico da cultura, quer para indicar o desenvolvimento da cultura ou em modelos de evapotranspiração que otimizam a programação da rega”. Por sua vez, Irmak *et al.* (2000) relatam que o CWSI pode ser utilizado para determinar “quando” regar e prever a produção, o que é “importante em regiões semiáridas onde os custos de aplicação de água levam a que os máximos rendimentos não estejam associados a altas produções e que a eliminação de regas desnecessárias torna a produção mais económica” e com menores impactos ambientais.

O CWSI fornece informação sobre o estado hídrico da cultura, indicando “quando” regar, não fornecendo indicação das quantidades a aplicar. Esta é uma das principais desvantagens do CWSI para a sua utilização na condução da rega, devendo ser utilizado conjuntamente com outros métodos de programação da rega como o balanço hídrico. Contudo, vários estudos têm sido desenvolvidos neste sentido. Kjelgaard *et. al.* (1996) desenvolveu um modelo que complementa o CWSI determinando o “quanto” regar, requerendo ambos a mesma informação.

Jackson, (1981) indica que o CWSI aumenta de modo linear com a diminuição da água facilmente utilizável, mas que não existe uma relação única entre o CWSI e o teor de humidade do solo devido à existência de um período de recuperação. Uma cultura em stress hídrico demora algum tempo a recuperar, devido à necessidade que as folhas têm em se reidratarem. Uma possível relação entre o CWSI e o teor de humidade do solo tem que contabilizar a distribuição e crescimento radicular, já que estes determinam a disponibilidade em água e outros fatores do solo e da atmosfera, como a disponibilidade de nutrientes e poder evaporativo da atmosfera.

Em algumas culturas, o limite superior e inferior do CWSI variam consoante o seu estado de desenvolvimento, tal como indicado por Idso (1982), devido ao aparecimento de estruturas que alteram a arquitetura do coberto vegetal e conseqüentemente a temperatura do coberto vegetal. A cultura de milho para a produção de grão mostra um comportamento diferente ao stress hídrico consoante a fase em que este se verifica (Fontes, 1992), sendo a floração uma fase crítica. Idso (1982) sugere, para o trigo, a definição de limites para antes e depois da formação da espiga.

Quando o CWSI atinge o valor crítico, deverá ser iniciada a rega, para que as condições de teor de água do solo se mantenham num nível ótimo e a cultura transpire na sua máxima capacidade. Jackson (1981) indica que, para um valor de CWSI superior a 0,3, uma redução no desenvolvimento da cultura está iminente e para um CWSI=0,5 não existe crescimento da cultura. O autor recomenda que a rega deve ser efetuada quando o CWSI se encontra entre 0,3 e 0,5, sendo o valor preciso determinado pela disponibilidade de água para regar e outros fatores de gestão.

Para uma elevada taxa evaporativa da atmosfera o valor de CWSI pode ser elevado, mesmo para culturas bem abastecidas de água. O principal fator que conduz ao aumento do CWSI nestas condições é devido ao sistema radicular da cultura não estar suficientemente desenvolvido para permitir uma taxa de absorção que responda ao grande poder evaporativo da atmosfera (Howell *et. al.*, 1999).

Inúmeros estudos foram efetuados para avaliar as potencialidades que o índice CWSI poderia ter relativamente à tradução real da disponibilidade de água nas culturas, incluindo também as possíveis variáveis associadas ao controlo da temperatura do coberto vegetal (Gardner *et al.* 1992). Podem enumerar-se alguns deles, assim como a tendência dos resultados encontrados: Wanjura *et al.* (1990) verificou uma fraca sensibilidade nos valores de CWSI para as culturas do sorgo e algodão; Wanjura e Upchurch (2000) compararam o cálculo de CWSI empírico e teórico, na cultura do milho e algodão, tendo obtido resultados ligeiramente mais satisfatórios com a metodologia empírica proposta por Idso *et al.* (1981). Na sequência deste trabalho surgiram muito outros cuja base de estudo foi a metodologia

empírica para determinação dos valores CWSI (Hatfield, *et al.*, 1987), com os quais foi possível retirar a seguinte ilação: a resposta das culturas à disponibilidade de água no solo varia de acordo com as suas características agronómicas, sendo difícil estabelecer uma relação universal entre o défice de água na superfície cultural e o estado hídrico do solo.

Relativamente à cultura do milho, uma situação que causa incoerência nos dados da temperatura da superfície cultural é o facto desta desenvolver uma panícula no seu estado de floração (Hatfield *et al.*, 1984), tendo-se observado um incremento de 2°C na temperatura da superfície cultural. Uma solução possível para atenuar esta limitação será o controlo da temperatura da superfície com medição zenital, isto é, com o sensor na vertical de cada ponto monitorizado.

Os desenvolvimentos tecnológicos que recentemente surgiram vieram aumentar a variabilidade de técnicas disponíveis para monitorizar a radiação emitida pela superfície cultural na banda do infravermelho térmico, mais especificamente os sensores/câmaras aerotransportados (por veículos tripulados ou não) e algumas imagens de satélite de alta resolução (p.e Landsat TM 5 e 7), poderão oferecer ótimas possibilidades de gestão no controlo do défice hídrico nas culturas.

Uma aplicação valiosa dos valores da temperatura da superfície cultural está relacionada com a possibilidade de integração na equação do balanço energético da superfície para estimativa dos valores da evapotranspiração (ET), os quais se traduzirão na estimativa das necessidades hídricas das culturas (Hatfield *et al.*, 1984).

2.6.4. Estimativa da Necessidades Hídricas com base nos coeficientes culturais calculados com os índices de vegetação obtidos a partir de imagens multiespectrais

2.6.4.1 Enquadramento

O cálculo da Evapotranspiração cultural (ET_c) é a base para a estimativa das necessidades de rega e consequentemente a prática de uma gestão sustentável da água de rega.

A Organização para a alimentação e Agricultura das Nações Unidas (FAO, *Food and Agriculture Organization*) elaborou sucessivas publicações onde descreve as metodologias mais adequadas para calcular a evapotranspiração das culturas (necessidades hídricas das culturas), mediante a metodologia de base denominada “ $K_c \cdot ET_o$ ”, onde ET_o representa a evapotranspiração de referência, calculada apenas com dados meteorológicos, estando o consumo da água nas culturas associado ao denominado valor de K_c , coeficiente cultural (Doorenbos e Pruitt, 1977; Allen *et al.*, 1998). Utilizando esta expressão calcula-se o valor da evapotranspiração cultural em condições ótimas, numa cultura de referência. O coeficiente cultural pode dividir-se na componente transpiração, denominada pelo valor de K_{cb} , e a componente evaporativa denominada por K_e (Wright, 1982). Os valores de K_{cb} , são valores tabelados apresentados em FAO 56 (Allen *et al.*, 1998), diferenciados por tipo de cultura e estado de desenvolvimento. O valor de K_e será calculado mediante metodologia recomendada na referida publicação, de acordo com a

disponibilidade de água e taxa de cobertura da superfície do solo. Os procedimentos descritos carecem muitas vezes de validação de campo, reportando as condições potenciais de necessidades de água das culturas, afastando-se muitas vezes da realidade de campo.

No entanto, para uma prática eficiente da gestão da água em regadio, é necessário que a metodologia utilizada na estimativa da taxa de evapotranspiração cultural traduza a realidade a uma escala local ou regional, e num intervalo de tempo relativamente curto. É neste sentido que a utilização das técnicas de detecção remota pode dar o seu contributo, fornecendo informação com elevada representação espacial e temporal acerca das necessidades hídricas das culturas.

A definição dos valores da Evapotranspiração cultural a partir de dados de detecção remota faz-se mediante o cálculo da evapotranspiração de referência (E_{To}), com a aplicação de fórmulas climáticas (Allen *et al.*, 1998) com base em variáveis climáticas da região: radiação solar, temperatura do ar, humidade relativa e velocidade do vento e a estimativa dos coeficientes culturais (K_c) faz-se a partir dos índices de refletância da superfície terrestre (índices de vegetação).

Os índices de vegetação têm-se mostrado uma metodologia robusta e consistente no seguimento do coberto vegetal, garantindo a descrição da curva da componente transpiração das culturas.

As técnicas de teledeteção serão uma metodologia chave no âmbito da gestão e avaliação dos recursos hídricos, uma vez que permitem a observação de forma simultânea de grandes áreas, periodicamente e com a possibilidade de diferentes resoluções espaciais (preferencialmente elevada/alta resolução).

A gestão da água em regadio faz-se comumente mediante modelos de acompanhamento baseados na transferência de água entre solo-planta-atmosfera (Olioso *et al.*, 2003) e também mediante os modelos hidrológicos que utilizam o balanço de água no solo (Engman, 1995). A combinação destes com os dados de teledeteção proporciona estimativas contínuas do balanço de água e energia distribuídos espacialmente. O principal inconveniente que apresentam estes modelos é o grau de complexidade e a sua validação no contexto operacional (Verhoef e Bach, 2003; Olioso *et al.*, 2003; Kimes *et al.*, 2000; Jacquemand *et al.*, 2000).

A determinação a partir de imagens multiespectrais, obtidas por satélite ou por câmaras aerotransportadas, dos valores de K_c , permite fazer uma estimativa contínua da evapotranspiração e uma previsão das necessidades hídricas do coberto vegetal. Neste sentido, o desenvolvimento de metodologias de gestão com base nesta determinação parece ser a base para a implementação de um sistema global de gestão da água, à escala regional. É neste contexto que se insere o presente trabalho, cujo objetivo principal se insere na validação de procedimentos e metodologias para a determinação das necessidades reais de rega, com elevada representação espacial e temporal, baseando-se nas tecnologias de detecção remota e sistemas de informação geográfica.

Autores como Choudhury *et al.* (1994), Neale *et al.* (1989) entre outros relacionaram a componente transpiração com o coeficiente cultural basal e a reflectividade espectral através de índices de vegetação.

Allen (2000b), Kite and Droogers (2000), obtiveram valores comparáveis com modelos físicos e dados de campo, no que se refere ao uso do coeficiente cultural basal derivado da resposta espectral para determinação das necessidades hídricas das culturas.

Muitos foram os autores (González Piqueras *et al.*, 2003; Bausch, 1995; Neale *et al.* (1989) que mencionaram a estimativa do Kc a partir dos índices de vegetação, como metodologias precisas para a gestão de grandes áreas de regadio, permitindo uma determinação rigorosa das necessidades hídricas das culturas.

2.6.4.2 Estimativa dos Índices de Vegetação (IV) e Determinação dos Coeficientes Culturais

Os índices de vegetação traduzem o índice de reflectividade das culturas entre as regiões espectrais do espectro eletromagnético nas bandas do vermelho (0.62 -0.70 μm) e infravermelho próximo (0.70-1.1 μm), refletindo o teor em clorofila de uma superfície vegetal.

Atualmente consideram-se os índices de vegetação como ferramentas valiosas e consistentes para acompanhar o desenvolvimento das culturas a diferentes escalas. Desde os anos 70, múltiplas definições de índices de vegetação foram formuladas a partir de diversas combinações entre bandas, tendo especial cuidado com a minimização do efeito do solo, da atmosfera e da configuração angular de observação.

Foram selecionados vários índices de vegetação entre os mais utilizados na bibliografia com aplicação no estudo do desenvolvimento das culturas, mais especificamente na comparação temporal entre transpiração do coberto e índices de vegetação. Esta comparação segue uma relação linear com outras variáveis biofísicas: fração de cobertura (f_c), índice de área foliar (IAF) e outros parâmetros relacionados com o ritmo de crescimento, como por exemplo a biomassa.

Hatfield *et al.* (2004) efetuaram uma revisão a esta temática, resumindo a sua descrição e alguns trabalhos de referência, apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Revisão aos Índices de Vegetação mais comuns e sua aplicação

Índice de Vegetação	Formula (em função das bandas do espectro eletromagnético)	Aplicação	Referência
	$R_{800}-R_{680}$	Biomassa	Jordan (1969)
	$R_{800}-R_{550}$	Biomassa	Bushman and Nagel (1993)
	R_{550}	Clorofila	Carter (1994)
	R^{-1}_{700}		Gitelson et al. (1999)
	$\log(I/R_{737})$	Clorofila	Yoder and Pettigrew-Crosby (1995)
“Simple Ratio”	$R=R_{NIR}/R_{red}$	Biomassa, LAI e Fração Cobertura	Birth and McVey (1968); Jordan (1969)
“Photochemical Reflectance Index”	$PRI=(R_{550}-R_{531})/(R_{550}+R_{531})$	Eficiência Captação de Luz	Gamon et al. (1992)
“Pigment-specific normalized difference”	$(R_{800}-R_{470})/(R_{800}+R_{470})$	LAI	Blackburn (1998)
“Normalized Difference Vegetation Index”	$NDVI=(R_{NIR}-R_{red})/(R_{NIR}+R_{red})$	Fração Cobertura e Radiação fotossintética ativa PAR	Deerin (1978) Rouse et al. (1974)
“Perpendicular Vegetative Index”	$PVI=(R_{NIR}-aR_{red}-b)/(1+a^2)^{1/2}$	LAI	Richardson and Wiegand (1977)
“Wide Dynamic Range Vegetation Index”	$WDRI=(0.1R_{NIR}-R_{red})/(0.1R_{NIR}+R_{red})$	LAI, Fração cobertura e biomassa	Gitelson (2004)
“Soil Adjusted Vegetation Index”	$SAVI=(R_{NIR}-R_{red})/(1+L)/(R_{NIR}+R_{red}+L)$	LAI	Huete (1988)
“Transformed Soil Adjusted Vegetative Index”	$TSAVI= a(R_{NIR}-aR_{red}-b)/(R_{red}+aR_{NIR}-ab)$	LAI e Biomassa	Baret et al (1989)
“Enhanced Vegetation Index”	$EVI=2.5(R_{NIR}-R_{red})/(R_{NIR}+6R_{red}-7.5R_{blue}+1)$	LAI e Biomassa	Huete et al. (2002)
“Green NDVI”	$(R_{NIR}-R_{green})/(R_{NIR}+R_{green})$	Radiação fotossintética ativa PAR, fração de cobertura	Bushman e Nagel (1993); Gitelson e Merzlyak (1994) e Gitelson et al. (1996)
“Red Edge NDVI”	$(R_{NIR}-R_{red\ edge})/(R_{NIR}+R_{red\ edge})$	Radiação fotossintética ativa PAR, fração de cobertura	Gitelson e Merzlyak (1994)

Tabela 2.4: Revisão aos Índices de Vegetação mais comuns e sua aplicação (Continuação)

Índice de Vegetação	Formula (em função das bandas do espectro eletromagnético)	Aplicação	Referência
“Visible Atmospherically Resistant Indices”	$\text{VARI}_{\text{green}} = (R_{\text{green}} - R_{\text{red}}) / (R_{\text{green}} + R_{\text{red}})$ $\text{VARI}_{\text{red edge}} = (R_{\text{NIR}} - R_{\text{red edge}}) / (R_{\text{NIR}} + R_{\text{red edge}})$	Fração Cobertura	Gitelson <i>et al</i> (2002)
“Chlorophyll Indices”	$\text{CI}_{\text{green}} = (R_{\text{NIR}} / R_{\text{green}}) - 1$ $\text{CI}_{\text{red edge}} = (R_{\text{NIR}} / R_{\text{red edge}}) - 1$	LAI, Índices Produtividade e Índice de clorofila	Gitelson <i>et al</i> (2003, 2005)
PRI “Photochemical Reflectance Index”	$(R_{570} - R_{531}) / (R_{570} + R_{531})$	Indicador de Stress Hídrico e de Clorofila	Suárez <i>et al</i> (2009)

A estimativa dos coeficientes culturais com base na informação remota faz-se com a aplicação de algoritmos de cálculo, a partir da determinação de índices de vegetação (IV), calculados com os índices de refletância da superfície cultural na banda do vermelho e infravermelho próximo, mais especificamente os índices PVI (Jackson *et al.* 1980; Heilman *et al.* 1982), NDVI (Rouse *et al.* 1974; Bausch e Neale 1987; Neale *et al.* 1989) e SAVI (Huete, 1988; Bausch 1993; Neale *et al.* 1996). Outra metodologia para estimar analiticamente os valores dos coeficientes culturais foi descrita por D.’Urso e Santini (1996), sendo baseada na informação remota de satélite, a estimativa dos valores do albedo, rugosidade da superfície e resistência aerodinâmica (a partir LAI).

Muitos trabalhos foram realizados para avaliar o grau de fiabilidade da estimativa dos valores de K_c , mediante a utilização dos índices de refletância da superfície terrestre obtidos a partir de dados de detecção remota. Neste sentido, importa referir os trabalhos desenvolvidos por Neale *et al.* (1996) que utilizou imagens aéreas digitais multiespectrais para estimar os coeficientes culturais de uma cultura de algodão, mediante o índice de vegetação SAVI. Utilizou os valores de K_c estimados no cálculo do balanço hídrico do solo, em três parcelas experimentais, como termo comparativo, e realizou o mesmo balanço utilizando os valores de K_c obtidos mediante a metodologia proposta pela FAO 56 (Allen *et al.* 1998). Os resultados obtidos mostram uma tendência para o balanço hídrico realizado com os valores de K_c estimados pela FAO subestimarem os valores de ET obtidos mediante a informação remota, principalmente nas fases de desenvolvimento inicial e final da cultura, em cerca de 12%. De forma similar, Harikishan *et al.* (2006) estimaram os valores do coeficiente cultural basal (K_{cb}) a partir dos valores de refletância da superfície, tendo concluído ser uma metodologia prática e um indicador muito fiável na estimativa da evapotranspiração real das culturas. Neale *et al.* (2003) fizeram uma retrospectiva a vários trabalhos realizados no mesmo âmbito – técnicas de detecção remota e estimativa dos valores da evapotranspiração -

tendo concluído existirem enormes potencialidades na estimativa dos coeficientes culturais em culturas de produção de grão, culturas sem produção de grão e culturas forrageiras.

Outros trabalhos foram realizados por Michael e Bastiaanssen (2000) tendo derivado valores de coeficientes culturais baseados na refletância da superfície (K_{cr} , *Reflectance Based Crop Coefficient*) a partir de imagens de satélite Landsat. Tasumi *et al.* (2005, 2006) estimaram os coeficientes culturais baseados na refletância da superfície (K_{cr}), mediante modelo de balanço energético e parametrização dos valores de K_{cr} (*neste caso representando valores de K_c*) utilizando os valores de NDVI calculados, podendo assim estimar a taxa de ET_c . Uma aproximação diferente foi estudada por Zhang e Wegehenkel (2006) que desenvolveram uma metodologia regional para a determinação de ET, mediante a utilização de informação MODIS na banda do infravermelho próximo e visível do espectro eletromagnético. Para o cálculo de ET_o , usaram a metodologia de Allen *et al.* (1998). Os valores de K_c são estimados a partir da altura da cultura (h_c) e da fração de cobertura do solo (f_c), calculados com base nos valores de NDVI. Er-Raki *et al.* (2007) comparam os valores da ET calculados a partir do coeficiente cultural basal (K_{cb}) obtidos mediante a metodologia da FAO, dados de detecção remota (K_{cb} e f_c derivados com base nos valores de NDVI) e monitorização local (Estações de “*Eddy-Covariance*”). Os resultados obtidos mostram bem as potencialidades existentes com a estimativa dos valores de K_{cb} e cálculo da ET a partir de informação de satélite, principalmente com aplicação à escala regional. Os resultados que suportam esta afirmação foram: valores de K_{cb} locais (registados nas câmaras de “*eddy covariance*”) muito semelhantes aos valores de NDVI estimados, observando um erro de precisão no cálculo de ET na ordem dos 0,16 e 0,45, correspondendo a 0,33 e 0,51 mm/dia, respetivamente, traduzindo um nível de eficiência de 79 a 70%; para valores de ET estimados com K_{cb} obtidos mediante a metodologia da FAO e obtidos a partir de informação remota, o nível de eficiência verificado foi de 44%.

No caso da cultura do milho, estabeleceu-se o seguinte (Bauch e Neale, 1987): quando K_{cb} atinge o valor máximo, os valores de LAI e f_c são 3,2 e 77,6%, respetivamente, alcançando também o IV o valor máximo.

A radiação absorvida pelo coberto vegetal é o fator determinante no processo de transpiração quando a cultura não está limitada pela disponibilidade de água no solo (Tanner e Jury, 1979). Os IV descrevem o ritmo de crescimento, a fotossíntese e a transpiração com valores absolutos de parâmetros biofísicos. O ritmo a que uma cultura assimila a radiação incidente está em relação com a fração de radiação absorvida fotossintética ativa (f_{APAR}), também relacionada com o ritmo da evapotranspiração.

Diferentes estudos mostram uma relação quase linear entre f_{APAR} e os índices de vegetação (Asrar *et al.*, 1984).

$$f_{APAR} = a \cdot NDVI + b \quad (2.26)$$

Onde a e b são parâmetros de regressão.

A relação entre transpiração da cultura e atividade fotossintética é suportada pela correlação entre K_{cb}^* (espectral) e os IV. A disponibilidade de água no solo influencia esta correlação da seguinte forma:

quando o solo está seco, a transpiração da planta é maior, apresentando maiores valores de K_{cb}^* . Quando o solo está húmido os valores de K_{cb}^* são menores, devido à contribuição de K_e (evaporação do solo). Vários estudos têm sido desenvolvidos no sentido de avaliar o efeito da disponibilidade de água no solo na relação K_{cb}^* e IV (Choushury *et al.*, 1994).

A relação entre IV e K_{cb}^* mostra uma forte dependência com os indicadores biofísicos do coberto, com a evapotranspiração a determinar a taxa de produtividade da biomassa. Fazendo uso das funções de produção que relacionam biomassa com ET_c acumulada e dos modelos de eficiência, que relacionam ritmos de crescimento e ritmos de absorção da radiação, traduz-se a relação linear entre K_{cb}^* e IV.

A ET_c^* determinada através dos IV representa o valor de ET do coberto no momento da observação e sob as condições reais de determinada parcela ou região. Os fatores determinantes na relação IV e K_{cb} , integram fatores: tipo de coberto, solo, fatores climáticos, sendo estes fatores característicos de uma determinada zona, reorientando desta forma as condições reais de determinada área regional.

A Tabela 2.5 faz referência a alguns trabalhos com os quais foi possível estabelecer equações matemáticas que permitem calcular valores de K_{cb}^* (coeficiente cultural espectral) a partir de índices de vegetação para algumas culturas de regadio.

Tabela 2.5: Referência a trabalhos que obtiveram equações matemáticas que permitem calcular valores de K_{cb}^* (coeficiente cultural espectral) a partir de índices de vegetação

CULTURA	REFERÊNCIA
Luzerna	Heilman <i>et al.</i> , 1980
Trigo	Jackson <i>et al.</i> , 1980
Milho	Bausch and Neale, 1987
Milho	Neale <i>et al.</i> , 1989
Milho	Bausch, 1993
Herbáceas	Choundhury <i>et al.</i> , 1994
Herbáceas	D`Urso, 2001
Algodão	Hunsaker <i>et al.</i> , 2003
Herbáceas	Cuesta <i>et al.</i> , 2005
Trigo	Duchemin <i>et al.</i> , 2006
Trigo e Milho	González-Piqueras, 2006
Trigo	Er-Raki <i>et al.</i> , 2007
Batata	Jayanthi <i>et al.</i> , 2007
Algodão e Beterraba	González-Dugo and Mateos, 2008
Culturas Anuais	Rafn <i>et al.</i> , 2008
Milho e Feijão	González-Dugo <i>et al.</i> , 2009
Sorgo, Feijão, Milho e Luzerna	Singh and Irmak, 2009
Vinha	Campos <i>et al.</i> , 2010

2.6.4.3 Vantagens da Determinação das Necessidades Hídricas com os Índices de Vegetação

A determinação das necessidades hídricas mediante a utilização dos coeficientes culturais obtidos com os índices de vegetação, a partir de imagens multiespectrais de elevada/alta resolução, tem inúmeras vantagens:

- Observação periódica do coberto através dos índices de vegetação permite descrever a evolução temporal dos coeficientes culturais (curva de crescimento da cultura);
- O índice de vegetação é sensível às alterações do coberto, ocasionadas por doenças, falta de nutrientes e disponibilidade hídrica;
- A estimativa das necessidades hídricas da cultura pode fazer-se à escala local (parcela) ou escala regional através de um método não destrutivo e de baixo custo;
- O índice de vegetação permite descrever o coberto no instante da observação, logo, os parâmetros que derivam do IV, será o coeficiente da cobertura vegetal, K_{cb} , em que $K_{cb} \cdot E_{To}$ representará uma estimativa da taxa de evapotranspiração da cultura no instante da observação, representando o valor real de necessidades de água da cultura.

2.6.5 Alguns Projetos com um contributo relevante no Desenvolvimento de Técnicas de Gestão em Agricultura de Regadio com suporte em Técnicas de Detecção Remota

Importa referir alguns projetos de investigação e desenvolvimento no âmbito da temática em estudo, as metodologias de gestão em regadio mediante a utilização de técnicas de deteção remota, com os quais foi possível obter importante conhecimento científico e tecnológico, com interesse para a prática de uma agricultura de regadio sustentável. É de referir os seguintes: ASTIMwR, ERMOT, IRRIMED, TESORO, MIPAIS, HIDROMORE, DEMETER, PLEIADES, SPIDER e AguaSTAR Alqueva e SIRIUS.

- **Projeto ASTIMwR (Application of Space Technologies for the Management of Water Resources):** foi um projeto financiado pela Direção Geral XII, dentro do programa Meio Ambiente e Clima, do 4º Programa Quadro da Comissão Europeia, durante o período de 1997 a 1999, tendo como entidade coordenadora o Organismo GEOSYS de Madrid, em conjunto com outras entidades de quatro Países Europeus, tendo como objetivo geral o desenvolvimento de aplicações operativas para a gestão dos recursos hídricos, mediante a utilização de técnicas de observação da terra.

Participaram no projeto utilizadores finais da informação que se pretendia desenvolver: *Confederación Hidrográfica del Guadiana*, *Instituto Nacional da Água (INAG)*, *Consorzio di Irrigazione e Bonifica di Paestum (Itália)*.

As zonas piloto envolvidas no projeto foram duas: o rio Guadiana e uma zona de regadio em Itália, designada “Paestum”.

No âmbito do referido projeto desenvolveu-se e implementou-se uma aplicação informática, composta por quatro módulos: quantificação das extrações de água subterrâneas (baseia-se na integração das superfícies culturais regadas, identificadas a partir de informação remota de alta resolução, com o cadastro inscrito no Registo de Águas Privadas da Bacia em causa), controlo da eficiência de rega (análise comparativa entre distribuição da água, dados meteorológicos, pedológicos e necessidades hídricas, mediante a análise de imagens multiespectrais), acompanhamento das zonas húmidas (baseia-se na relação entre os dados meteorológicos e piezométricos da zona inundada, com base na cartografia de uso do solo, obtida por satélite) e cartografia da evapotranspiração, mediante aplicação do modelo SEBAL (Bastiaansen, 1995), relativamente alterado, melhorando a sua operacionalidade e aplicabilidade em regiões semiáridas, mediante a utilização de informação de satélite de baixa resolução (imagens NOAA-AVHRR) à escala da bacia hidrográfica e imagens de alta resolução (imagens LANDSAT) à escala zona regável.

- **Projeto IRRIMED “Euro-Mediterranean Research project on Improved management tools for water-limited irrigation: Combining ground and satellite information through models”** <http://www.irrimed.org>: financiado pelo programa INCO-MED, da Comissão Europeia, tendo sido coordenado por uma instituição europeia “Institut de Recherche pour Le Developpement”, IRD-CESCIO de Toulouse (France), durante o período de 2003 a 2007.

O projeto IRRIMED teve como objetivo principal o desenvolvimento de ferramentas e metodologias para uma gestão eficiente da água em agricultura de regadio e avaliar o estabelecimento de cenários de gestão sustentáveis. Avaliou-se a variabilidade espacial e temporal dos consumos totais de água em agricultura de regadio, em condições de escassez do recurso água. Neste sentido, foram utilizadas as seguintes metodologias: equipamento micro-meteorológicos (estações de “eddy-covariance”), informação de satélite de alta resolução e modelos de interpretação e análise robustos, que permitem assegurar o cálculo da evapotranspiração em grandes áreas.

Importa referir que a informação produzida no projeto IRRIMED servirá de base ao projeto PLEIADeS.

- **Project DEMETER “DEMONstration of Earth observation Technologies in Routine irrigation advisory services”** <http://www.demeter-ec.net/>: surgiu no âmbito do V Programa Quadro de I&D da União Europeia (2003-2005), concebido para demonstrar a eficiência dos Serviços de Avisos de Rega e uma sua relação custo-eficácia, indispensáveis para a Gestão Sustentada da Água, através da introdução de técnicas de Observação da Terra nas suas tarefas diárias e recorrendo à utilização de novas Tecnologias da Informação, de forma a torná-las acessíveis aos agricultores.

Este projeto foi constituído por uma equipa envolvendo entidades dos seguintes países: Espanha, Itália, Portugal, França, Grécia, sendo a coordenação do projeto da responsabilidade do Instituto de Desarrollo Regional, da Universidade de Castilla-la-Mancha de Albacete (Espanha).

Estabeleceu-se uma Zona Piloto em Portugal, na área abrangida pelo Aproveitamento Hidroagrícola do Caia, utilizando-se as potencialidades do Sistema de Informação Geográfica, desenvolvido nessa Associação de Beneficiários, cuja implementação, conceção e desenvolvimento foi da responsabilidade do IDRHa.

Nesta Zona Piloto procurou-se implementar de raiz um Serviço de Avisos de Rega assistido por Tecnologias Espaciais e de Informação, sendo o objetivo principal encontrar soluções que permitam a implementação numa forma simples e amigável de cada um dos componentes de um Serviço de Avisos de Rega, tarefa esta cuja coordenação foi atribuída no quadro do consórcio ao IDRHa, em colaboração com a Associação de Beneficiários do Caia e em interligação com tarefas desenvolvidas pelo Instituto de Meteorologia.

A Comissão Europeia considerou este projeto como um dos mais importantes nesta temática, tendo nele as maiores expectativas, nomeadamente tendo em conta: a melhoria da Eficiência da Utilização de Água para Rega; a possibilidade de transferência para outras regiões do mundo; a sua utilização em condições ambientais díspares, apoiar o desenvolvimento de Sistemas de Alta Resolução Espacial; generalização e sua expansão fora da Europa; a sua contribuição direta para se atingir os objetivos das Diretivas da UE para a Água; ser uma ferramenta para a economia da água mantendo ou aumentando a produtividade; demonstrando assim uma potencialidade de cruzamentos com aspetos relacionados com as ajudas da PAC; que os produtos que forem desenvolvidos incluam os parâmetros previstos pela nova geração de recomendações da FAO; potencial de standardização; que contribuam para a redução do consumo de água; que os agricultores possam estabelecer uma ligação em tempo real com o SAR; que as ferramentas desenvolvidas possam ajudar os gestores dos recursos e os políticos a melhor monitorar e controlar o uso da água em situações de restrições ou de seca.

O projeto na sua globalidade, revelou-se como um dos mais importantes em desenvolvimento atualmente na gestão da água para a agricultura, integrando competências e sensibilidades de diferentes áreas científicas, nomeadamente e especificamente, tendo em conta o sector científico envolvido, que varia desde áreas relacionadas com as Necessidades de Água das Culturas, a

Tecnologias de Observação da Terra e de Informação, integrando numa só equipa as melhores competências que neste momento se encontram disponível no sector.

No final do projeto foi disponibilizado online o seguinte sistema de apoio à gestão da rega, assistido por satélite: e-SARAS[®] (*e-Servicio de Asesoramiento de Riego Asistido por Satélite*) ou: e-SAIAS[®] (*online Space-Assisted Irrigation Advisory Service*), cuja característica principal é a disponibilização de informação de base para a gestão da água em regadio, com suporte em informação de satélite de alta-resolução, podendo essa informação ser disponibilizada ao agricultor em tempo quase real. O sistema desenvolvido baseia-se na metodologia que integra a estimativa dos coeficientes culturais a partir da informação de satélite, desenvolvendo um sistema integrado e operacional que contempla a análise e visualização dos dados espaciais, constituindo uma ferramenta de gestão com elevado potencial para apoiar um Sistema de Avisos de Rega aos Agricultores. Fornecendo informação relativa à evolução do desenvolvimento das culturas e necessidades hídricas, com uma elevada representação espacial, temporal e gráfica. A informação numérica acerca da evolução temporal das necessidades hídricas das culturas permitirá ao técnico e agricultor fazer uma planificação eficaz da prática da rega.

Relativamente às metodologias de cálculo utilizadas para a estimativa dos coeficientes culturais e evapotranspiração cultural é de referir o método do balanço energético da superfície – METRICTM e MSSEBS (Rubio *et al*, 2006; D' Urso e Calera, 2006, Colin *et al*. 2006) e os procedimentos de cálculo mediante os índices de vegetação, a partir dos índices de refletância da superfície terrestre.

- **Projeto MIPAIS “Methods and tools for the sustainable management of irrigation in water scarcity conditions”**: financiado pela Comissão Europeia, integrado no programa INTERREG III, tendo sido coordenado pelo Instituto de Agricultura Sostenible, em Córdoba, durante o período de 2005 a 2007. O objetivo geral do projeto foi o desenvolvimento de metodologias de gestão da água em regadio, mediante a informação remota e de sistemas de informação geográfica, que auxiliem a gestão sustentável do recurso em situações de escassez.

O referido projeto avaliou as potencialidades de determinação da evapotranspiração real das culturas mediante aplicação dos valores dos coeficientes culturais estimados a partir de informação de satélite LANDSAT, em vinte parcelas de algodão. Os coeficientes culturais eram estimados a partir dos índices de vegetação obtidos a partir da refletância de diferentes bandas do espectro eletromagnético. A evapotranspiração real das culturas estimada foi integrada nos modelos de balanço hídrico, sendo assim possível retirar ilações acerca da gestão da rega, determinado a oportunidade de rega e dotação real de rega a aplicar.

As metodologias testadas e desenvolvidas tiveram em linha de conta as necessidades dos regadios da Andaluzia.

- **Projecto HIDROMORE “Modelo hidrológico operativo de estimación de recarga y evapotranspiración a escala regional”**: financiado pelo Plano Nacional Ciência e Tecnologia do Ministério da Educação e Ciência de Espanha, sendo coordenado pela Universidade de Castilla la Mancha, durante o período de 2003 a 2007. Tendo como objetivo geral desenvolver um modelo operativo para fazer a estimativa da evapotranspiração e recarga (percolação profunda) a uma escala temporal e espacial adequada à gestão do recurso água, mediante o uso de técnicas de teledeteção e de Sistemas de Informação Geográfica.

O projeto foi desenvolvido em duas áreas piloto, uma em Castilla la Mancha, no aquífero 08.29 e outra na Universidade de Salamanca.

Uma das principais vantagens do modelo desenvolvido – HIDROMORE – é a aplicação da metodologia da FAO 56 conjugada com a utilização de sensores remotos, na determinação da disponibilidade de água na superfície vegetal, mais concretamente a determinação dos coeficientes culturais (K_{cb}), por aproximação $NDVI-K_{cb}$. Avaliando assim a disponibilidade de água com uma elevada distribuição espacial e temporal, permitindo uma estimativa mais precisa e rigorosa da evapotranspiração.

Outro projeto desenvolvido pela Universidade de Castilla la Mancha, durante o período de 2005 e 2008, foi o projeto TESORO “**Teledetección en la Gestión Sostenible en el Regadío**”

- **Projecto ERMOT “Estudio sobre la Evolución de Superficies de Regadio mediante Teledetección en el ámbito del Acuífero de la Mancha Oriental”**: surgiu no seguimento de um convenio assinado entre a Confederación Hidrográfica del Júcar, a Consejería de Agricultura y Medio Ambiente de la Junta de Comunidades de Castilla la Mancha e a Universidade de Castilla la Mancha, assinado em 1998 e actualmente ainda em vigor.

Relativamente ao trabalho a desenvolver, são tarefas do contrato a identificação das culturas regadas no aquífero 08-29, mediante teledeteção, tendo como objetivo a regularização e seguimento da superfície regada. A elaboração de mapas anuais das parcelas regadas em análise comparativa com a informação cadastral de base em ambiente SIG, potenciando as entidades gestoras de ferramentas para proceder à regularização dos direitos do regadio e seguimento do plano de exploração de grandes áreas regadas em tempo quase real.

A técnica de teledeteção integrada com sistemas de informação geográfica e informação cadastral foi considerada uma ferramenta poderosa adequada ao acompanhamento contínuo da evolução dos regadios.

Relativamente aos custos associados a este contrato, é de referir cerca de 80 000 €/anuais, cerca de 08 €/ha de área.

- **Projecto PLEIADeS “Participatory multi-level EO-assisted tools for irrigation water management and agricultural decision support”** <http://www.pleiaades.es>: financiado pelos Fundos do 6º Quadro Comunitário da Comissão Europeia, sendo coordenado pelo Instituto de Desenvolvimento Regional da Universidade de Castilla la Mancha, em consorcio com 24 entidades especialistas de 12 países diferentes, de origem Mediterrânea e também Americana: Espanha, Portugal, Itália, França, Grécia, Malta, Turquia, Marrocos, Peru, México, Brasil e Estados Unidos. O período de execução foi 2006 a 2009.

O projeto PLEIADeS visa um eficiente e sustentável uso da água na agricultura em zonas onde exista escassez hídrica. Neste projeto, são consideradas as dimensões económica, ambiental, técnica social e política. Por outro lado, tenta-se alcançar uma sinergia entre a inovação tecnológica (a qual facilita uma participação ativa) e uma abordagem participatória, sendo que esta exige informação espacial distribuída e tecnologia de rede.

O PLEIADeS ambiciona um melhor desempenho dos esquemas de rega através de um grande leque de medidas. As inovações técnicas mais importantes são alcançadas pela compreensão da cobertura espaço-temporal dos dados de Observação Terrestre (OT) e também pela capacidade interativa existente nas Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC).

No âmbito do referido desenvolveu-se e implementou-se um sistema de informação de apoio à decisão e de conhecimento especializado para a gestão da água em regadio e ao nível da bacia hidrográfica, designado SPIDER “*System of Participatory Information, Decision support, and Expert knowledge for irrigation and River basin water management*”, sendo orientado para uma aplicação generalizada, de forma a permitir uma gestão eficiente da água em regadio, dos pontos de vista agrónomico, ambiental e socioeconómico. No final do projeto foi implementada uma versão operacional do sistema desenvolvido em todas as zonas piloto.

- **Projecto águaSTAR-Alqueva “Assistência Técnica à Rega com Recurso a Satélite: Aplicação ao Alqueva”**: foi financiado pelo Programa PEDIZA, coordenado pelo Centro Operativo e de Tecnologias de Regadio (COTR), em colaboração com o grupo coordenador do projeto DEMETER – Universidade de Castilla-la-Mancha de Albacete, Instituto de Desenvolvimento Rural. Decorreu durante os anos de 2007 e 2008. O objetivo geral foi criar e proporcionar, aos organismos com competências na gestão de um perímetro de rega, um mecanismo de informação em tempo real e ao longo da campanha de rega, sobre a quantidade de água evapotranspirada a uma escala regional.

O projeto tinha ainda como objetivo melhorar a performance e a relação custo-eficácia nos Sistemas de Aviso de Rega através da introdução de Tecnologias de Informação e de Observação da Terra nas operações diárias, possibilitando uma melhor monitorização das

necessidades hídricas das culturas em grandes áreas, bem como a incorporação de Tecnologias da Informação na organização e distribuição, de uma forma mais acessível da informação disponível, aos Serviços de Aviso de rega e aos agricultores regantes.

Como procedimentos de trabalho, recorreu-se à adaptação, calibração e aplicação da metodologia de gestão da rega concebida no projeto europeu DEMETER (Jochum, A.M. *et al.* 2005), numa área piloto, localizada no Perímetro de Rega denominado Infraestrutura 12, como forma de criar uma ferramenta de gestão da rega que possa futuramente ser aplicada a toda a zona do Alqueva, e mesmo do Alentejo, e permitir, em tempo real, no campo de um agricultor, num perímetro de rega, ou numa zona mais vasta, uma bacia hidrográfica: estimar o consumo de água pelas culturas; determinar os coeficientes culturais; detetar as zonas de défice hídrico; possibilitar a identificação das culturas regadas e determinar a uniformidade da rega.

- **SIRIUS “Sustainable Irrigation Water Management and River-basin Governance”:** Projecto internacional do 7º Programa- Quadro, em desenvolvimento no Instituto de Desarrollo Regional (IDR) da Universidade de Castilla-la-Mancha (UCLM). Neste projeto participam 18 grupos de trabalho, provenientes de 12 países diferentes de 4 continentes, formando uma equipa de 60 a 80 investigadores.

O objetivo central visa o desenvolvimento e a implementação de ferramentas com base na informação de satélite, para uma gestão otimizada da água à escala da bacia hidrológica – cartografia da ocupação cultural, necessidades de água, recarga dos aquíferos, etc. A base de trabalho é o estudo, análise e gestão das necessidades dos sistemas agrícolas. O projeto também integrará um módulo para a gestão da seca.

O projeto SIRIUS utilizará satélites de alta e média resolução espacial – Landsat 5, SPOT, DEIMOS 8-1, após a concretização do lançamento dos satélites SENTINEL, previsto pela Agência Espacial Europeia, finais de 2012, o projeto também fará uso dele. Com este projeto, também está previsto o lançamento de outros satélites, que nos permita obter informação espacial de qualidade superior, para aplicação na gestão da água ao nível de uma área regional.

2.6.6 Limitações e Oportunidades associadas à utilização de Técnicas de Detecção Remota em Agricultura de Regadio

A utilização de técnicas de deteção remota na gestão da atividade agrícola, mais especificamente na gestão de recursos em agricultura de regadio, tem associadas algumas limitações ou particularidades que importa ter bem presentes na sua aplicabilidade, as quais se podem especificar:

- **Temperaturas Aerodinâmica e Radiométrica:** existe alguma dificuldade associada à definição rigorosa da temperatura radiométrica e aerodinâmica da superfície terrestre, limitações

associadas à grande sensibilidade desta variável a fatores que caracterizam a superfície terrestre: estrutura da arquitetura da copa (Kimes, 1980), distribuição vertical da temperatura da vegetação (Kimes *et al.*, 1980), espaçamento de plantação e temperatura solo-vegetação (Kimes, 1983), variando em função do tipo de plataforma utilizado (sensores aerotransportados, satélite ou monitorização pontual) e as características do sensor (tempo de resposta, ângulo de medição ou campo de observação e calibração). Esta dificuldade encontrada na determinação rigorosa da temperatura aerodinâmica ou radiométrica da superfície, está bem presente na determinação da taxa de ET a partir de modelos de balanço energéticos “*single-source*”. Os resultados obtidos por Alves *et al.* (2000) na estimativa do fluxo de calor sensível a partir de determinações da temperatura radiométrica da superfície e de valores de temperatura aerodinâmica mostram bem a existência de diferenças significativas entre a temperatura radiométrica e a aerodinâmica.

- **Resolução Espacial e Temporal:** existe uma enorme diversidade de resoluções espaciais (dimensão pixel) e temporais (frequência de passagem) associada às plataformas de satélite; por exemplo: o satélite LANDSAT tem um ciclo de passagem de 16 dias e uma resolução espacial de 30-120 m comparativamente com o satélite MODIS que tem uma frequência de passagem diária, mas uma resolução espacial de 250 a 1000 m. Relativamente à variabilidade resolução espectral, a banda térmica apresenta em geral uma resolução espacial maior, comparativamente com a resolução de outras bandas do espectro eletromagnético, com a banda do visível e do infravermelho próximo, p.e, no satélite LANDSAT TM 5, a resolução espectral da banda térmica é de 120 m, comparativamente com os 30 m das outras bandas do espectro. Esta variabilidade espacial e temporal associada aos satélites poderá ser ultrapassada com a utilização de plataformas aéreas (veículos tripulados ou não) equipadas com câmaras multiespectrais de elevada resolução, oferecendo a possibilidade de programação das missões a realizar, ultrapassando desta forma as limitações impostas por condições atmosféricas adversas (presença de nuvens), à utilização de técnicas de deteção remota

Os mapas de ET derivados a partir de dados de deteção remota obtidos por satélite de baixa resolução mas com elevada representação temporal, isto é, com uma cobertura diária, como é o caso dos sensores: MODIS, GOES e AVHRR, podem muitas vezes ter associado a si um erro elevado, introduzido pela dimensão elevada de pixel, incompatível com a dimensão de muitas parcelas à escala regional (Tasumi *et al.* 2006). Os erros associados à estimativa dos valores da ET estão na sua maioria associados à existência de diferentes ocupações culturais no mesmo pixel, diferentes tipos de vegetação significam diferentes coberturas, com diferente comportamento de rugosidade e necessidades hídricas (Kustas *et al.* 2004). Neste sentido, existe uma grande necessidade de desenvolver trabalho, cujo objetivo é estudar a combinação mais favorável entre utilização remota de satélite e a utilização de plataforma aérea de dados, estabelecendo algoritmos de cálculo de ET com resolução temporal e espacial coincidente.

Outro aspeto importante a ter em conta, com a utilização de técnicas de deteção remota na determinação da ET é a existência de informação remota isenta de qualquer máscara de nebulosidade, situação difícil de obter em algumas regiões, p.e. em regiões semiáridas.

A possibilidade de utilizar informação micro-ondas para estimar os fluxos da superfície do solo, mediante as temperaturas do solo e da superfície cultural (Moran *et al.* 1997), apresentando algumas limitações relativamente à sua aplicabilidade à escala global, associadas à sua resolução espacial que varia de 10-100 Km, a utilização de sensores de micro-ondas com uma resolução espacial elevada poderá ser uma mais-valia.

Calera, *et al.* (2007), no final do projeto DEMETER, apontam as seguintes limitações técnicas: disponibilidade de satélites de alta resolução operacionais e custo das imagens. Ainda na sequência do projeto DEMETER, as condições mínimas exigidas para a resolução temporal e espacial da informação de satélite, deverá ter uma periodicidade semanal e uma resolução espacial 10-30 m. Neste sentido, é de considerar a utilização conjugada de várias constelações com diferentes escalas de observação, dando especial atenção à calibração entre sensores, para que se possa utilizar informação fiável e comparável acerca da refletância da superfície para posterior tradução dos índices de vegetação.

No entanto, são de considerar outras possibilidades, com a inclusão de novas constelações de satélites (*Deimos, Sentinel, Landsat Data Policy*) que permitam conjugar de forma conveniente a resolução espacial e temporal necessária à prática da gestão da água em regadio, mediante a informação de satélite. O satélite *Diemos*, integrado no Plano Nacional de Teledeteção foi lançado em 2009 e terá um intervalo de passagem semanal e uma resolução espacial de 20 m. Tal como já foi referido, a utilização de plataformas aéreas equipadas com câmaras multiespectrais em veículos não tripulados (Berni, *et al.*, 2009), será outra possibilidade a estudar (sendo um dos objetivos específicos da presente tese de doutoramento).

- **Grau de Precisão da Informação Remota:** a determinação rigorosa dos valores extremos de T_s numa imagem é sem dúvida a limitação principal, quando se utiliza a informação de satélite em modelos de balanço energético – METRIC, SEBAL, SEBS, SEBI, S-SEBI e ETMA. A ausência de informação de satélite em condições extremas (p.e pixéis em que a cultura está sob condições de elevada disponibilidade de água) torna difícil a determinação de dois valores extremos de temperatura da superfície, traduzindo-se em erros na determinação da ET. No entanto, importa referir que estes tipos de modelos de balanço energético não necessitam de correção atmosférica e de dados da emissividade da superfície para a estimativa rigorosa do fluxo de calor sensível (H). O modelo do balanço energético TSM, não requer informação das temperaturas dos pixéis extremos, apresentando boas potencialidades para ser utilizado em superfícies heterogéneas. No entanto, requer muitos dados de entrada e uma rigorosa correção atmosférica.

Os erros introduzidos com a calibração dos valores da temperatura radiométrica, estão diretamente relacionados com o registo das variáveis ambientais locais – humidade relativa e visibilidade, no momento da aquisição da informação remota. Outra fonte de erro, associada aos modelos energéticos, é a variabilidade espacial dos dados registados nas estações meteorológicas – temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, velocidade do vento.

- **Intervalo de Tempo entre a aquisição da Informação Remota e os Utilizadores finais:** este aspeto está relacionado com o intervalo de tempo necessário entre a aquisição da informação de satélite, o cálculo das necessidades hídricas (taxa de ET) e a disseminação dessa informação junto dos agricultores regantes. Esse intervalo de tempo depende da plataforma de aquisição de dados utilizada (satélite/plataforma aérea), o algoritmo de cálculo utilizado, e o conhecimento técnico disponível. A referida resolução temporal, na estimativa da ET – necessidades hídricas das culturas, para a gestão da água em agricultura de regadio, deverá ser o mais reduzido possível, horário ou mesmo instantâneo, mais especificamente em tempo real.

Neste sentido, existe já muito trabalho de investigação que contribuiu para a consolidação de algoritmos e aplicações para processamento e análise da informação de origem remota, traduzindo a partir desta informação preciosa para a determinação das necessidades de água das culturas, para a gestão sustentável do recurso água. Os modelos de balanço energético anteriormente descritos revelaram-se complexos e morosos. No entanto, a parametrização dos coeficientes culturais a partir de índices de vegetação, determinados a partir de informação remota, revelaram grande simplicidade e precisão na determinação da ET a uma escala regional. Ainda neste contexto, é de referir a estimativa de valores da evapotranspiração potencial a partir de valores extremos da temperatura da superfície terrestre.

- **Modelo de Validação:** neste ponto é de referir a necessidade de validação dos modelos de balanço energético regionais, baseados na informação remota, com a utilização de metodologias de estimativa direta – razão de Bowen, estações de “*eddy-covariance*” e lisímetros. É de referir aqui alguns trabalhos realizados por Chávez *et al.* (2005).

Resumindo, a utilização da informação remota na determinação regional da evapotranspiração e distribuição espacial das necessidades hídricas das culturas integra as seguintes ilações (Gowda *et al.* 2008):

- Balanço energético da superfície terrestre a partir de informação remota obtida por sensores aerotransportados com diferentes resoluções espaciais, introduzem a possibilidade de obter informação com uma distribuição temporal frequente, na escala local e regional;
- A estimativa da ET a partir dos coeficientes culturais usando os índices de vegetação obtidos com os valores de refletância da superfície terrestre, revelou-se uma metodologia mais fácil e expedita que a metodologia de balanço energético. No entanto, a estimativa dos coeficientes

culturais não integra a possível existência de stress hídrico e necessita de uma calibração para cada tipo de cultura. Apresenta também algumas limitações relativamente à variabilidade espacial associada á determinação da taxa de evapotranspiração de referência (*ET_o*).

- Os modelos de ET baseados em informação de teledeteção (deteção remota) para estimativa regional da ET, possuem ainda de algumas fragilidades que será necessário ultrapassar: desenvolvimento de metodologias rigorosas para determinação da temperatura da cobertura vegetal; validação espacial da informação meteorológica, que integra a informação de base dos modelos de balanço energético – temperatura do ar e velocidade do vento; validação da metodologia utilizada na estimativa do fluxo de calor do solo, índice de área foliar, altura da cultura etc., em diferentes condições agro meteorológicas e ambientais; desenvolvimento e avaliação de métodos para extrapolar a informação instantânea de ET em taxas diárias e sazonais de ET. Nesta vertente, existe uma pressão muito grande por parte dos utilizadores destas técnicas, para lançamento de um satélite com características espaciais, espectrais e temperais, adaptadas às necessidades de gestão da água em regadio.
- A resolução espacial e temporal dos satélites de observação da terra, não se encontra bem adaptada às necessidades da estimativa das necessidades hídricas das culturas e sua integração num esquema de gestão global da água em regadio, a uma escala regional. Assim, é necessário considerar a utilização de informação remota, proveniente de diferentes satélites de alta resolução, que forneçam informação na banda do visível, infravermelho próximo e infravermelho de curto comprimento de onda. Neste sentido, deverá ser realizado trabalho no sentido de desenvolver algoritmos de cálculo similares.

O trabalho desenvolvido nesta tese de doutoramento pretende dar o seu contributo, no sentido de ultrapassar algumas das limitações apontadas nesta secção:

- Definição das relações NDVI-K_{cb}, K_c para as condições mediterrâneas particulares do Perímetro de Rega do Divo e para a cultura do Milho.
- Experimentação e validação da técnica de teledeteção- utilização remota de sensores com plataforma aérea não tripulada – com a qual se pretende ultrapassar as limitações associadas à resolução espacial e temporal das imagens de satélite.
- Determinação da oportunidade de rega mediante informação remota de elevada resolução, CWSI.
- Operacionalizar todos os procedimentos associados à determinação das necessidades reais de rega, mediante informação remota, de forma a disponibilizar a informação ao utilizador em tempo útil.

2.6.7 Utilização Remota de Sensores em Agricultura de Regadio: Plataformas aéreas não tripuladas

A utilização remota de sensores tem como objetivo principal recolher informação espacialmente distribuída da superfície terrestre, com uma elevada resolução espacial e temporal que nos permita estimar e monitorizar parâmetros associados ao estado de desenvolvimento das culturas.

Uma resolução espacial e espectral adequada e uma elevada frequência temporal são o ponto fraco da utilização de informação de satélite na gestão agrícola e monitorização das culturas (Moran *et al.*, 1997). São ainda de salientar os custos elevados que a metodologia de satélite ainda acarreta. No entanto, esforços recentes têm sido feitos na tentativa de colocar em órbita novos satélites com características compatíveis com a gestão agrícola e em particular com a agricultura de regadio.

Relativamente às imagens da banda térmica, nitidamente será necessário ter informação com elevada representação espacial, pois a maioria dos sensores fornecem informação com uma resolução espacial reduzida - 90 m (TERRA-ASTER), 120 m (LANDSAT), e outros simplesmente não recolhem informação nesta banda do espectro.

A utilização remota de sensores utilizando plataformas aéreas tripuladas permitirá disponibilizar informação compatível com as aplicações agrícolas, monitorizando com uma elevada resolução espacial, espectral, variando entre 0.5 e 2 m por pixel, com dimensão 2-20 nm, e alcance espectral de 400-2500 nm. Encontramos em bibliografia muitos trabalhos cujo objetivo geral está centralizado na aplicação desta metodologia na monitorização agrícola, estimativa de stress hídrico, níveis de clorofila, produção das culturas, índice de área foliar, índices de vegetação (Zarco-Tejada, *et al.*, 2001; Zarco-Tejada, *et al.*, 2004; Roberts, *et al.*, 1997; Cheng, *et al.*, 2006; Sims, 2002; Jacquemound, *et al.*, 1996; Riano, *et al.*, 2005; Sepulcre-Cantó, *et al.*, 2005). No entanto, os elevados custos operacionais, associados ao processamento da informação e a falta de empresas prestadoras de serviços nesta área, implica um custo efetivo deste tipo de produtos muito elevado, o que limita a sua utilização pelos agricultores e técnicos, sendo utilizados na sua maioria para fins de investigação.

Desenvolvimentos recentes em deteção remota introduziram as plataformas aéreas não tripuladas em aplicações civis., tendo despoletado um interesse muito grande sobre este tipo de plataformas. A NASA desenvolveu bastante trabalho neste âmbito, tendo realizado os primeiros testes em aplicações agrícolas (Herwitz, *et al.*, 2002; Herwitz, *et al.*, 2004; Johnson, *et al.*, 2003; Everaerts, 2005). Sensores de reduzida dimensão e custos relativamente baixos, impulsionaram o desenvolvimento de uma nova geração de plataformas não tripuladas, a um custo relativamente reduzido (Sugiura, *et al.*, 2005; Lamberts, *et al.*, 2007), introduzindo a possibilidade de recolher imagens com elevada representação espectral (imagens multiespectrais e térmicas), espacial e temporal, com elevada potencialidade para a aplicação em agricultura. A informação obtida por este tipo de plataformas conduz a resultados similares aos obtidos mediante plataformas aéreas tripuladas (Berni, *et al.*, 2009a; Berni, *et al.*, 2009b).

O principal problema associado à utilização deste tipo de plataformas é a caracterização geométrica e espectral que este tipo de micro sensores requer, exigindo o conhecimento de grandezas físicas associadas à superfície terrestre (refletância, temperatura da superfície, etc.).

3. METODOLOGIAS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

No Capítulo 3 faz-se uma breve caracterização da área em estudo – Perímetro de Rega do Divor – nos pontos de vista cadastrais, pedológicos, climáticos, topográficos e agronómicos. Neste capítulo descreve-se o delineamento experimental, as metodologias e os procedimentos utilizados neste trabalho, consta também alguma informação de base à análise dos resultados experimentais objeto de estudo na presente tese de doutoramento – informação remota que traduza a monitorização das culturas regadas – parâmetros agronómicos, necessidades de rega, balanço hídrico e índices de stress hídrico.

3.1 Caracterização da Área em Estudo

3.1.1 Enquadramento

A área onde foram aplicados os procedimentos e metodologias experimentais para a gestão integrada da água em grandes áreas de regadio foi o Perímetro de Rega do Divor. Situa-se nos terrenos da margem direita da ribeira do Divor, na freguesia de Igrejinha, do concelho de Arraiolos (38° 44' N, 7° 56' W, 309 m), no distrito de Évora. Beneficia uma área de aproximadamente 500 hectares, pertencente a 7 regantes diferentes. Se o ano hidrológico o permitir, o Aproveitamento Hidroagrícola do Divor poderá beneficiar uma área maior, mediante bombagens localizadas na ribeira do Divor.

Relativamente à sua localização na carta de Portugal, este aproveitamento hidroagrícola encontra-se localizado na folha 438 na escala 1:25 000 e na folha 36 C na escala 1:50 000.

A Figura 3.1 ilustra a localização e área beneficiada pelo Aproveitamento Hidroagrícola do Divor.

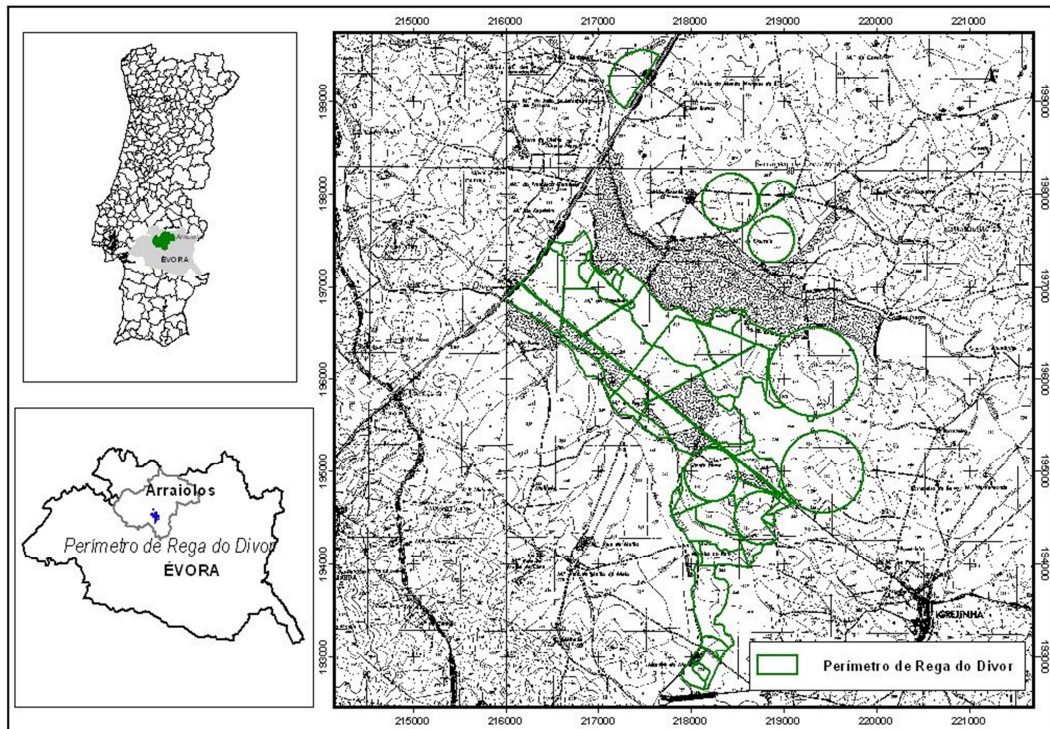


Figura 3.1: Localização do Aproveitamento Hidroagrícola do Divor e das áreas experimentais objeto de estudo no presente trabalho

O aproveitamento de rega do Divor é abastecido pela Albufeira da Barragem do Divor, integrada na Bacia Hidrográfica do Tejo, com uma capacidade de armazenamento útil de 11 890 (dam³) e uma área inundada de 265 ha ao NPA.

Relativamente à distribuição da água de rega, o Perímetro é constituído por uma rede de rega com um total de 17.359 metros, dos quais 5.900 metros constituem a rede primária e os restantes 11.459 metros a rede secundária.

O desenvolvimento total da rede de enxugo construída neste aproveitamento hidroagrícola é de 15.951 metros.

O Perímetro de Rega selecionado para o trabalho em questão apresenta algumas características particulares:

- Não dispõe de um controlo de todas as entradas de água na rede de distribuição e na parcela do agricultor;
- Dispõe de uma estação meteorológica automática completa, com registos periódicos (característica fundamental para a gestão integrada de qualquer área de regadio).

Relativamente à ocupação cultural do Perímetro, reportando ao ano de 2007, a cultura dominante é o milho para grão e para aproveitamento forrageiro, seguindo-se a cultura do tomate e em menor área o girassol e o arroz.

Quanto às tecnologias de rega utilizadas no Perímetro, é de referir a predominância da rega por aspersão – Center-Pivot - seguindo-se a rega localizada (gota a gota).

3.1.2 Caracterização Climática

O Perímetro de Rega do Divor insere-se numa região com clima naturalmente mediterrâneo ou subtropical seco (Feio, 1991). Apresenta uma temperatura do ar anual média de 15 a 17°C, insolação média anual de 2600 a 2800 horas, humidade relativa do ar média anual de 70 a 75% e uma velocidade do vento anual média de 15 a 20 Km^h⁻¹ (4,17 a 5,56 ms⁻¹). A precipitação anual média varia entre 500 e 600 mm, verificando-se cerca de 65% da precipitação total anual no Inverno, durante os meses mais chuvosos (Novembro, Dezembro e Janeiro). É frequente ocorrerem irregularidades anuais de precipitação entre os meses de Março e Maio que, conjuntamente com a concentração da precipitação no Inverno, causa deficiências hídricas, principalmente no Verão. Outras características climáticas são as elevadas amplitudes térmicas diárias e anuais, e a ocorrência de geadas no Inverno.

O Perímetro do Divor está equipado com uma estação meteorológica automática (*latitude 38° 44' 16" N; longitude 07° 56' 10" W; altitude 246 m*), a qual é pertença do Centro Operativo e de Tecnologias de Regadio (COTR) e do Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrâneas (ICAAM) da Universidade de Évora, sendo explorada e mantida pelo COTR e pelo ICAAM.

As Tabelas 3.1 e 3.2 resumem os dados meteorológicos registados na Estação Meteorológica Automática do Perímetro, durante o período de 1999/2000 a 2008/2009. Os valores apresentados são registos médios mensais, para os seguintes parâmetros: precipitação (P) em mm e evapotranspiração de referência calculada com a fórmula de Penman-Monteith (ET_0) em mm.

Tabela 3.1: Precipitação Total (mm) registada nos últimos 10 anos hidrológicos, na Estação Meteorológica do Perímetro de Rega do Divor

Precipitação Total (mm)													
ANOS/MESES	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	TOTAL
1999/2000	158	24	33	12	86	13	130	92	3	3	1	9	564
2000/2001	40	101	250	131	88	145	7	32	18	0	0	56	868
2001/2002	78	17	13	71	15	102	87	27	1	0	0	112	524
2002/2003	74	123	163	102	82	41	57	5	4	5	0	47	701
2003/2004	165	108	67	50	56	33	26	28	0	0	4	44	582
2004/2005	183	11	4	2	7	30	6	25	0	0	8	2	277
2005/2006	233	68	55	30	63	83	33	0	34	1	3	41	644
2006/2007	164	191	57	12	85	11	29	59	43	1	2	99	753
2007/2008	13	37	15	68	48	18	112	57	1	0	1	19	387
2008/2009	42	25	56	117	80	24	39	24	37	2	0	6	450
ANO MÉDIO	118	52	56	59	71	32	36	28	3	0	1	42	573

Tabela 3.2: Evapotranspiração de Referência (ET_o) (mm) calculada com a fórmula climática de Penman-Monteith, e os registos meteorológicos dos últimos 10 anos hidrológicos, na Estação Meteorológica do Perímetro de Rega do Divor

Evapotranspiração de Referência (Penman-Monteith) (mm)													
ANOS/MESES	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	TOTAL
1999/2000	71	46	27	31	72	92	80	110	184	192	190	137	1233
2000/2001	79	43	31	34	47	68	114	141	201	197	177	118	1250
2001/2002	65	38	29	32	47	74	103	144	182	213	182	93	1201
2002/2003	64	31	29	35	39	74	94	170	185	185	177	129	1211
2003/2004	73	30	30	32	43	72	110	132	217	230	171	122	1262
2004/2005	72	40	32	41	51	85	113	153	181	202	180	136	1288
2005/2006	78	40	30	33	45	67	97	156	160	191	189	131	1216
2006/2007	70	35	30	31	40	84	100	137	147	188	167	118	1147
2007/2008	77	51	32	33	45	78	100	99	173	190	185	115	1175
2008/2009	80	45	28	25	46	94	99	135	154	205	189	133	1233
ANO MÉDIO	72	40	30	32	45	76	100	139	182	195	181	125	1225

A Figura 3.2, ilustra os valores registados nas Tabelas 3.1 e 3.2, relativos à Precipitação Total e Evapotranspiração de Referência (mm), verificados na Estação do Perímetro de Rega do Divor, nos anos 1999/2000 a 2008/2009.

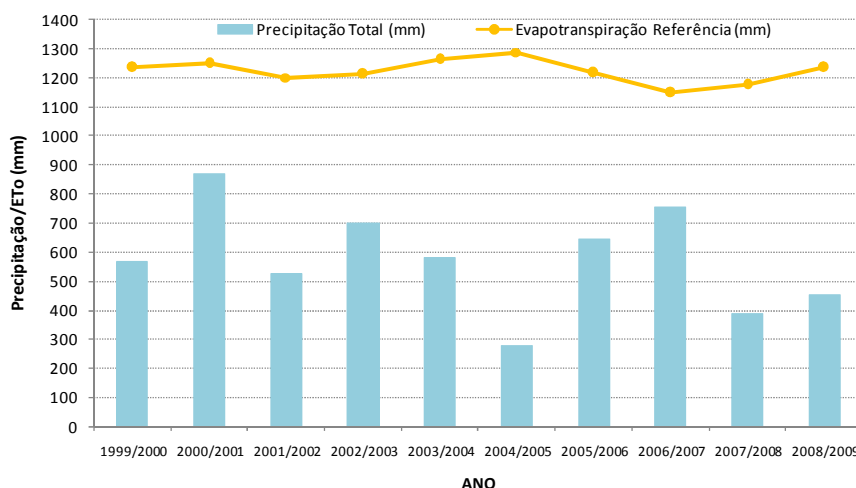


Figura 3.2: Valores médios da Precipitação Total e Evapotranspiração de Referência (mm), nos anos 1999/2000 a 2008/2009, no Perímetro de Rega do Divor.

Durante 10 anos hidrológicos, foram registados os seguintes valores médios: 573 mm de precipitação total e 1225 mm de evapotranspiração de referência.

Em 2004/2005, 2007/2008 e 2008/2009 foram registados os anos mais secos, com menor taxa de precipitação. Em 2004/2005, foi o ano em que se registou maiores valores da taxa de evapotranspiração.

A Figura 3.3 ilustra os valores médios mensais da precipitação total e evapotranspiração de referência no ano de 2007, ano em que foram realizados os ensaios que constituem o objeto de estudo desta tese, e no ano médio da última década.

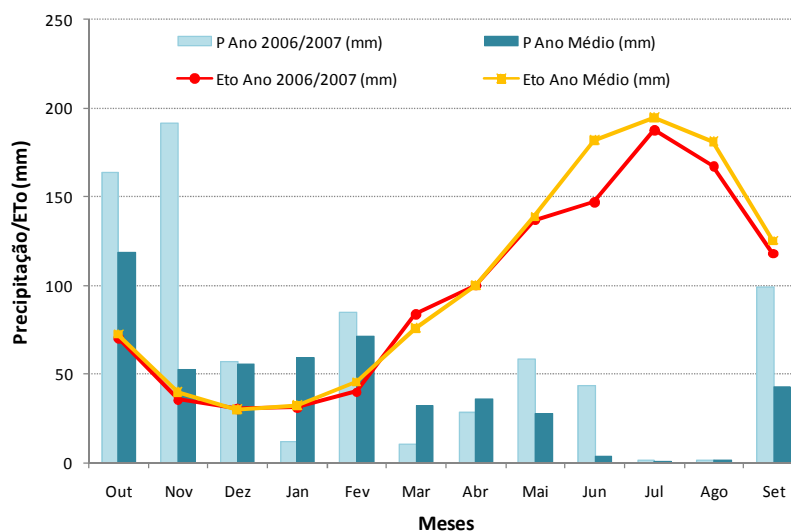
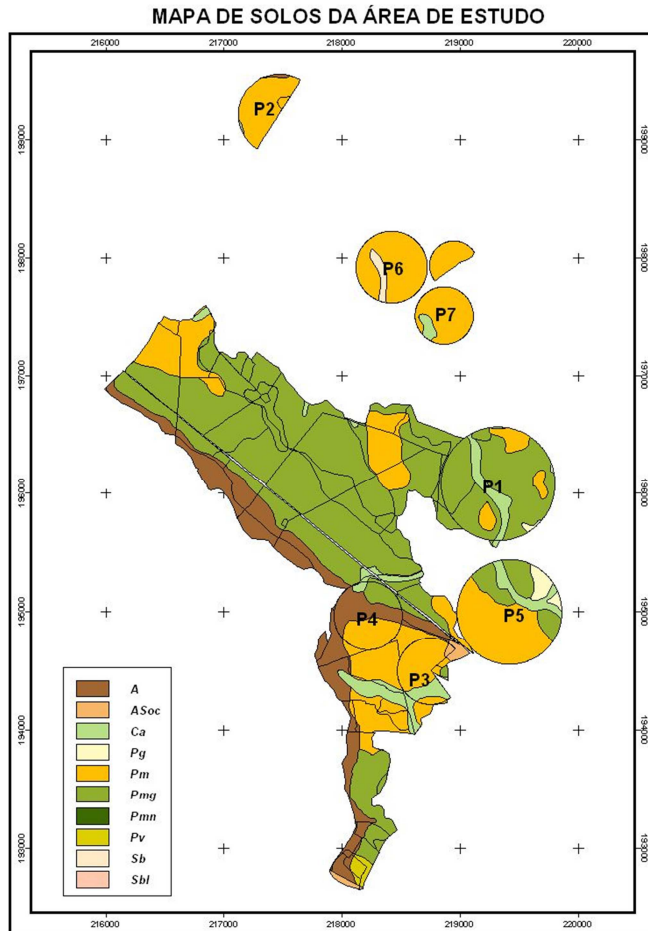


Figura 3.3: Registo valores médios da Precipitação Total e Evapotranspiração de Referência (mm), no Perímetro de Rega do Divor, no ano 2006/2007 (ano recolha informação) e no ano médio.

É de salientar o seguinte: no ano de 2006/2007, durante os meses de Outubro, Novembro, Fevereiro, Maio, Junho e Setembro foram verificados valores médios mensais da precipitação superiores aos verificados no ano médio da década em análise 1999/2009. Relativamente, à evapotranspiração de referência os valores registados no ano de 2006/2007, durante os meses de Verão, Junho, Julho, Agosto e Setembro, foram ligeiramente inferiores aos verificados para o ano médio da década 1999/2009. Tendo-se registado os seguintes valores para os parâmetros precipitação total (mm) e evapotranspiração de referência (mm): 753 e 1147 mm, respetivamente.

De acordo com o referido nos parágrafos anteriores, o clima da área de estudo é naturalmente mediterrâneo, os valores verificados na Estação do Divor enquadram-se na perfeição nas características mediterrâneas, já referidas nesta secção.

3.1.3 Caracterização Pedológica



Relativamente à caracterização pedológica da área beneficiada pelo perímetro de rega do Divor, é de referir o seguinte: dominância dos solos Mediterrâneos Pardos (Pmg e Pm) em cerca de 81%, estando também representados os Aluviossolos Modernos de Textura Mediana (A) em cerca de 14% da área e os solos Hidromórficos de Aluvião (Ca) em cerca de 5%.

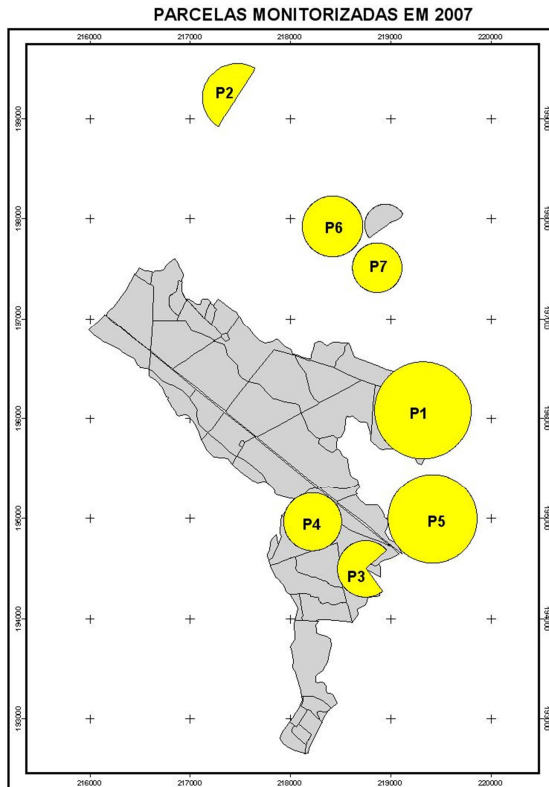
Figura 3.4: Mapa de Solos do Perímetro de Rega do Divor (parcelas monitorizadas durante a campanha de 2007)

A Figura 3.4, ilustra o mapa de solos do Perímetro de Rega do Divor, representando as principais classes de solo. Esta representação geográfica foi obtida após algumas operações de geoprocessamento (união de fases) sobre a Carta de Solos 1:25 000 original (Cardoso *et al.*, 1973), digitalizada pela DGADR (2003), mediante a utilização de ferramentas SIG (ArcGIS).

É de salientar que os principais solos regados nos perímetros do Alentejo, os atuais e os previstos no esquema de Alqueva, são do tipo Mediterrâneo, com problemas delicados de manejo hidroagrícola, com implicações em potenciais impactes ambientais negativos, e requerem soluções tecnológicas inovadoras, que contribuam para a sustentabilidade do uso hidroagrícola (Serralheiro, 1999). Relativamente à prática da rega, estes solos requerem uma gestão da água de rega extremamente cuidadosa, devido às suas características pedológicas, resultantes do processo argiluviação que lhes deu origem, e do uso não conservativo a que tradicionalmente têm sido sujeitos.

3.2 Delineamento experimental e Parâmetros Monitorizados

De forma a concretizar os objetivos gerais do presente trabalho, foi necessário integrar uma componente experimental, com monitorização de sete unidades experimentais, que teve lugar durante a campanha de rega de 2007, sendo estas sete parcelas regadas do Perímetro de Rega do Divor. Foram selecionadas as parcelas com características tecnológicas e agronómicas semelhantes, caracterizando-se da seguinte forma: a cultura foi o milho para forragem e o método de rega utilizado foi a rega por aspersão (center-pivot).



A Figura 3.5 mostra a área beneficiada pelo Perímetro de Rega do Divor, evidenciando as parcelas experimentais monitorizadas durante a campanha de 2007, uma área total de cerca de 245 ha (P1: 73 ha; P2: 18 ha; P3: 18 ha; P4: 26 ha; P5: 62 ha, P6:29 ha, P7: 19 ha).

Figura 3.5: Perímetro de Rega do Divor, parcelas monitorizadas durante a campanha de 2007

Os parâmetros monitorizados e estimados foram agrupados em: **parâmetros agronómicos** – observação das fases de desenvolvimento, altura da cultura, índice de área foliar, capacidade de aprofundamento radical e produção média espacialmente distribuída; **parâmetros hidrológicos** – caracterização hidropedológica do Perímetro, dotações totais de rega e disponibilidade de água no solo.

3.2.1 Parâmetros Agronómicos e Produção Total

Foram monitorizados os seguintes parâmetros agronómicos: identificação dos principais estados fenológicos da cultura (duração das diferentes fases de desenvolvimento da cultura), através da observação direta da cultura: germinação, número de folhas, início da floração, polinização, formação e

maturação do grão), monitorização da altura da cultura e estimativa do índice de área foliar (*IAF*) e fração de cobertura do solo (*fc*).

Foram definidos os seguintes locais de amostragem: 6 pontos de controlo por unidade experimental (conforme ilustra a Figura 3.16 da secção 3.2.2.3. As metodologias e procedimentos utilizados foram os seguintes:

- Altura da cultura (*h*): monitorização direta da altura da cultura, com uma periodicidade semanal
- Índice de Área Foliar (*IAF*): mediu-se o comprimento (*C*) e largura (*L*) de todas as folhas de 3 plantas por local de amostragem, em todas as parcelas experimentais, com uma periodicidade semanal, para posterior estimativa dos valores do *IAF*, mediante a utilização da expressão analítica que relaciona o *C* e *L* com o valor de *IAF* obtida por Cavaco (2007), para a cultura do Milho.

Com o comprimento (*C*) e largura (*L*) pode calcular-se a área foliar em cm^2 através da seguinte expressão:

$$AF = c \times \sum (C \times L) \quad (3.1)$$

Sendo *c* um coeficiente de ajustamento, obtido por uma regressão linear entre valores de (*C***L*) e o *IAF*, medidos em laboratório com um medidor de área foliar (*Licor Li-3000*).

O valor de *c* encontrado por Cavaco (2007), para a cultura do milho, no Perímetro do Divor, foi: 0.76 e o coeficiente de determinação 95%, significando uma boa correlação entre o produto (*C***L*) e área foliar medida em laboratório.

Para definir o valor do Índice de Área Foliar (*IAF*) médio por planta, será necessário fazer o somatório da área foliar de todas as folhas de uma planta e dividir pela área ocupada pela mesma, traduzindo-se em:

$$IAF = \frac{AF}{RL \times RW} \quad (3.2)$$

Onde (*AF*) é expresso em cm^2 , a distância entre as plantas na linha *RL* (*row length*) e a distância na linha *RW* (*row width*) são expressas em cm. Para a experimentação em causa considerou-se um compasso de $15\text{cm} \times 75\text{cm}$, ocupando cada planta uma área de 1125cm^2 .

- Fração de cobertura do solo pela cultura (*fc*): foi estimada a partir da expressão matemática que relaciona *IAF* com a *fc* obtida por González *et al* (2006) para a cultura do milho, em regiões mediterrâneas.

$$fc = 0,142.(IAF) + 0,113 \quad (3.3)$$

A Tabela 3.3 é feita referência à data de sementeira, duração dos estádios de desenvolvimento e altura média da cultura, de cada unidade experimental.

Tabela 3.3: Data de sementeira, ciclo cultural e altura média da cultura em cada parcela experimental

Parcela	Data Sementeira	Duração Fases do Ciclo Cultural (Dias)				Duração Total Ciclo	Altura máxima da Cultura (m)
		1	2	3	4		
1	01-06-2007	25	42	30	30	127	2,15
2	23-05-2007	25	45	30	45	145	2,28
3	31-05-2007	25	43	28	40	136	2,22
4	18-05-2007	30	45	30	35	140	2,32
5	18-05-2007	25	43	35	40	143	2,45
6	11-05-2007	30	40	30	40	140	2,15
7	18-05-2007	25	43	30	30	128	2,20

Fase 1: Início Desenvolvimento Vegetativo; Fase 2: Desenvolvimento Vegetativo Rápido; Fase 3: Floração e Formação do Grão; Fase 4: Maturação

Duração Fases de Desenvolvimento publicado pela FAO (Allen et al, 1998): Fase 1:30, Fase 2: 40, Fase 3: 50, Fase 4: 30 - Duração Total do Ciclo 150 dias – Sementeira em Abril em zonas clima mediterrâneo

Relativamente à monitorização do desenvolvimento radical da cultura durante o ciclo cultural, durante a campanha de 2007 não foram efetuadas quaisquer observações. Os registos utilizados relativamente ao perfil útil a considerar na implementação do balanço hídrico do solo baseiam-se em observações anteriores efetuadas mediante a utilização do método do minirizotrão, o qual permitirá acompanhar as variações temporais do desenvolvimento radical da cultura, tornando possível a determinação do perfil útil do solo explorado pela cultura. Alguma informação disponível em Toureiro *et al.* (2007).

As operações culturais e condução da cultura em cada unidade experimental, seguiram o plano tradicional da região, sendo na sua totalidade da responsabilidade do agricultor.



No final do ciclo cultural, monitorizou-se também a produtividade da cultura, mediante uma amostragem espacialmente distribuída, realizada durante a colheita, com um Sistema GPS acoplado à ceifeira (tal como ilustra as fotos apresentadas). Posteriormente, procedeu-se à análise de dados e representação espacial mediante a interpretação geostatística da informação obtida, podendo no final estabelecer-se uma correlação entre a produtividade e a disponibilidade de água no solo, durante a campanha de rega.

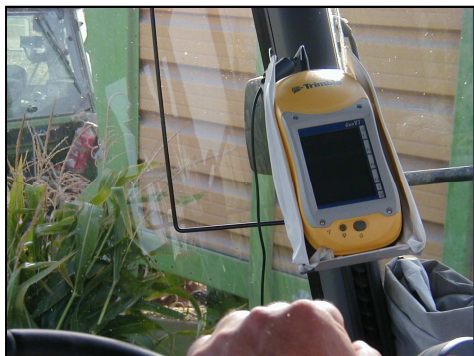


Figura 3.6: Monitorização da produtividade da cultura durante a colheita.

3.2.2 Parâmetros Hidrológicos

O objetivo geral do presente trabalho – metodologias e procedimentos de gestão da água em regadio, mediante técnicas de deteção remota e SIG - integra a realização do balanço de água em cada unidade experimental. Neste sentido, será uma prioridade o conhecimento de todos os parâmetros que caracterizam o comportamento hidrológico de cada unidade experimental, integrando: caracterização hidropedológica da área em estudo, dotações totais de rega e disponibilidade de água no solo, durante a campanha de rega.

3.2.2.1 Caracterização Hidropedológica da Área em Estudo

A gestão da água em agricultura de regadio requer o conhecimento de parâmetros pedológicos de base importantes para determinação das curvas características de água no solo, isto é, parâmetros que traduzam o limite máximo e mínimo de retenção de água no perfil do solo permitindo, assim, determinar a dotação e oportunidade de rega a praticar.

Babalola (1978) refere que existe uma grande variabilidade associada às propriedades físicas do solo, que determinam a caracterização hidropedológica de uma parcela. Essa variabilidade é própria dos fatores de formação que lhe deram origem, assim como da Ação dos fatores externos, como as práticas agrícolas pouco conservativas. Neste sentido, é importante em agricultura de regadio determinar o comportamento espacial dos parâmetros que caracterizam a dinâmica da água no solo, numa determinada área regional.

A recolha de amostras de solo em pontos de coordenadas conhecidas, numa determinada área, e o tratamento geoestatístico dessa informação, possibilitarão a representação espacial dos parâmetros analisados, em toda a área. Isto é, uma vez quantificada a dependência espacial das variáveis em estudo, poder-se-á proceder à classificação dos solos numa determinada área. A interpolação por *Krigagem* entre os pontos amostrados permitirá representar a distribuição espacial das propriedades do solo, em toda a área, estimando-se valores para os pontos não amostrados. Esta técnica permite a estimativa de valores de forma não tendenciosa e com variância mínima.

A caracterização hidropedológica da área de estudo – Perímetro de Rega do Divor – enquadra-se nas considerações anteriores, na medida em que utiliza procedimentos semelhantes para constituir a base de dados dos solos para o Perímetro de rega do Divor, onde estarão presentes os parâmetros pedológicos de base essenciais para apoiar a gestão da água de rega em cada uma das parcelas regáveis do Perímetro.



Relativamente à amostragem, durante a Primavera de 2004 e 2005, procedeu-se à recolha de 70 monólitos de solo, até à profundidade de 60 cm, nas manchas de solo mais representativas do Perímetro do Divor. Estas amostras foram analisadas pelo laboratório de hidrologia do Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora e posteriormente interpretada geoestatisticamente no software ARGIS.

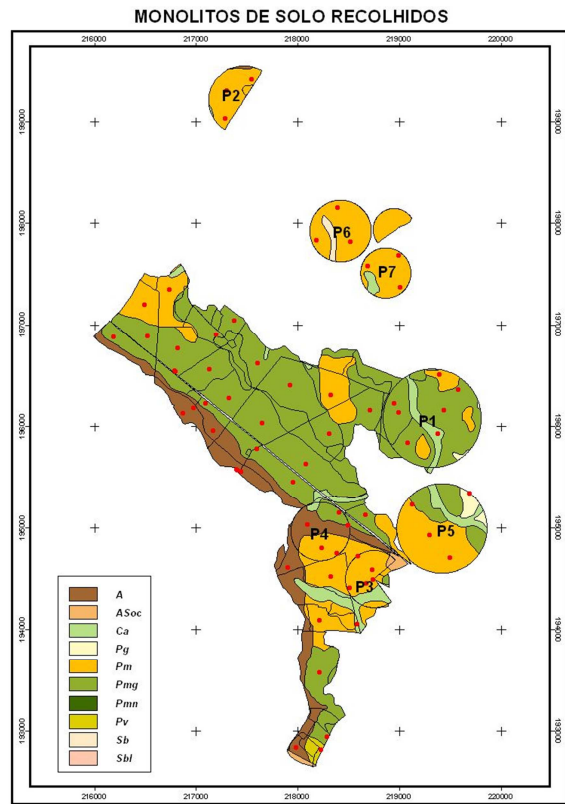
Os parâmetros analisados e representados espacialmente foram os seguintes: frações granulométricas do perfil do solo (areia grossa, areia fina, limo e argila), capacidade de campo, coeficiente de emurhecimento, densidade aparente e capacidade utilizável, em duas camadas do perfil do solo (0-30 cm e 30-60 cm).

A Figura 3.7 ilustra a localização dos pontos de amostragem georreferenciados, onde foram recolhidos os 50 monólitos de solo sujeitos às seguintes determinações laboratoriais: análise granulométrica, determinação das curvas de retenção de água no solo (pF's 2, 2.54, 3, 3.5, 4.2) e densidade aparente.

A recolha dos monólitos de solo foi realizada com o auxílio de uma sonda pneumática, tal como ilustra a Figura 3.7.



Figura 3.7:Sonda pneumática utilizada na recolha dos monólitos e localização dos pontos de amostragem georreferenciados



Os dados obtidos após determinação laboratorial foram sujeitos a interpretação geoestatística, mediante a utilização do *software ARCGIS, extensão de Análise Geoestatística*.

Utilizou-se a interpolação por *Krigagem Ordinária Simples* (Soares, 2006) em locais não amostrados, permitindo assim gerar mapas de distribuição espacial dos atributos analisados, para todo o Perímetro de Rega do Divor. Os parâmetros de base utilizados foram: semivariograma esférico, raio de krigagem variável – máx 800 metros, com uma amostragem de pelo menos 3 monólitos.

A secção seguinte apresenta os resultados obtidos que caracterizam os solos do Perímetro de Rega do Divor, quanto à distribuição espacial, das seguintes variáveis: teor em argila (ARG), densidade aparente (dap), retenção máxima de água (capacidade de campo, CC), retenção mínima de água (coeficiente de emurhecimento, CE) e capacidade utilizável do perfil do solo (CU).

Para quantificar e avaliar a disponibilidade de água no solo durante toda a campanha de rega, em cada parcela experimental, foi necessário, caracterizar as curvas tensão-humidade de cada parcela, isto é, definir a capacidade de campo (CC) e o coeficiente de emurhecimento (CE).

O estudo hidropedológico dos solos do Perímetro de Rega do Divor foi objeto de estudo em Toureiro *et al.*(2007).

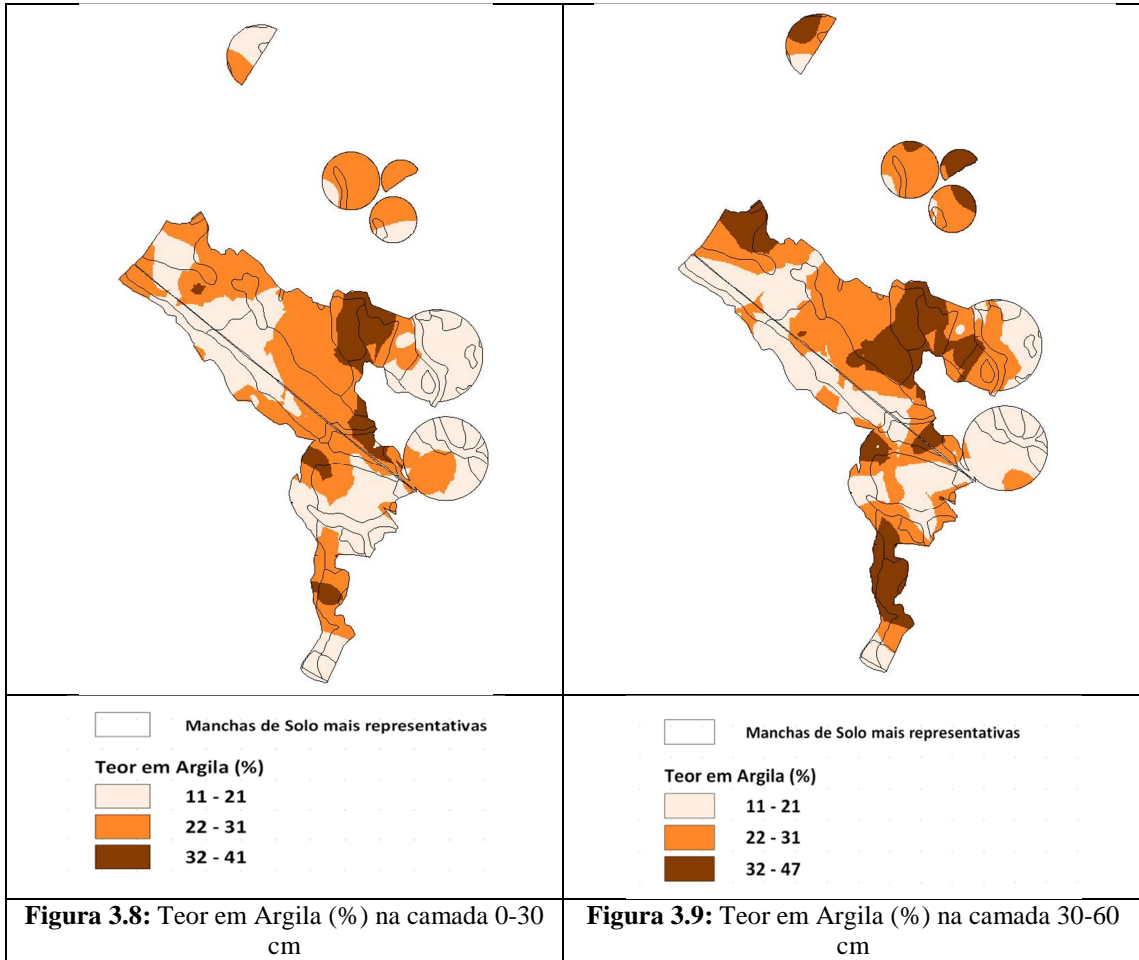
3.2.2.1.1. Informação de Base que caracteriza hidropedologicamente o Perímetro de Rega do Divor

Neste ponto são apresentados e analisados os resultados obtidos com a recolha de amostras nas manchas de solo mais representativas da área de estudo – Perímetro de Rega do Divor – dando especial atenção aos parâmetros que caracterizam a capacidade de armazenamento de água destes solos. As sete unidades experimentais serão objeto de estudo mais detalhado, uma vez que serão estas unidades o meio para a validação das metodologias e procedimentos de gestão da água em regadio, em estudo nesta tese.

Esta caracterização está associada ao facto da gestão da água em agricultura de regadio requerer o conhecimento de parâmetros pedológicos de base importantes para determinação das curvas características de água no solo, isto é, parâmetros que traduzam os limites máximo e mínimo de retenção de água no perfil do solo, permitindo assim determinar a dotação e oportunidade de rega a praticar.

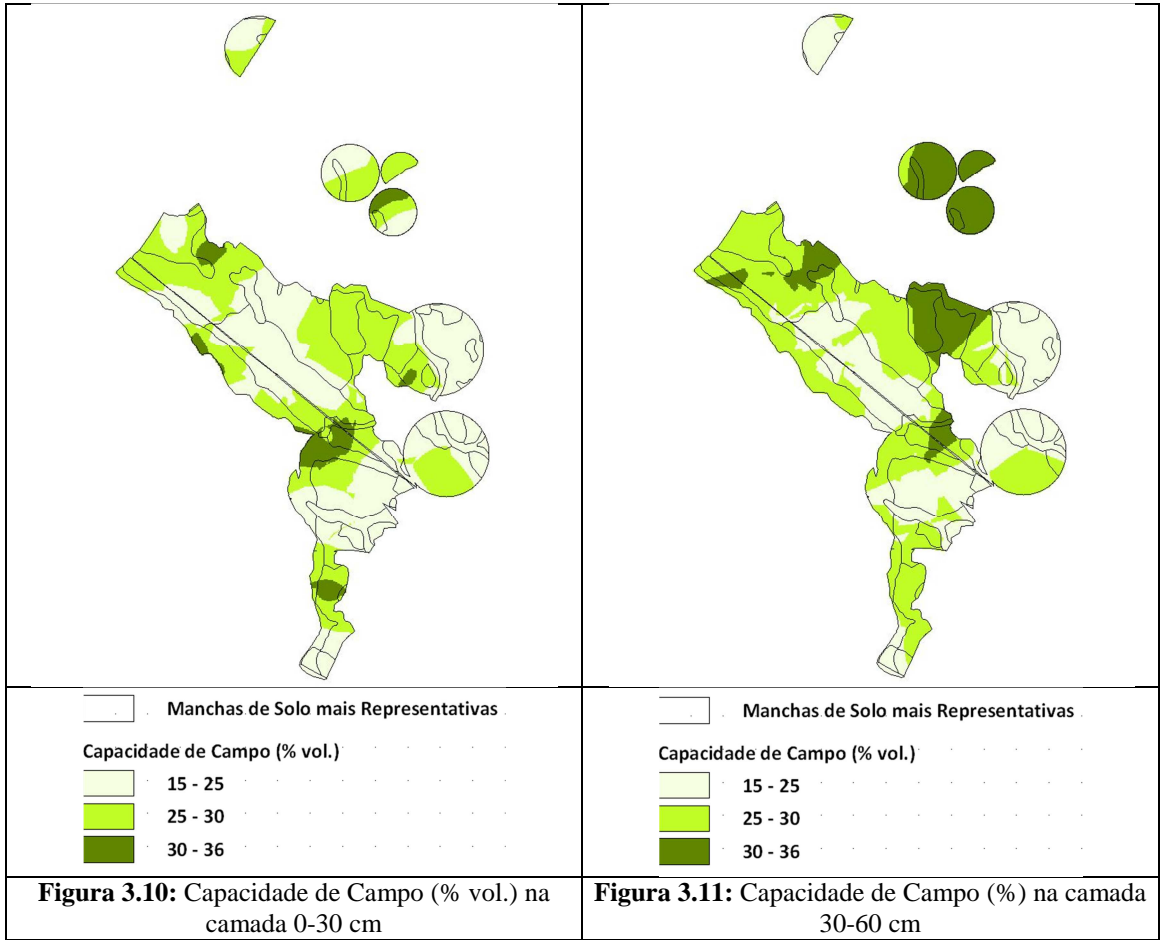
Os resultados apresentados caracterizam os solos do Perímetro de Rega do Divor, quanto à distribuição espacial, das seguintes variáveis: teor em argila (ARG), retenção máxima de água (capacidade de campo, CC), retenção mínima de água útil (coeficiente de emurchecimento, CE) e capacidade utilizável do perfil do solo (CU).

As Figuras 3.8 e 3.9, ilustram a representação espacial do teor em argila (%), nas duas camadas do perfil do solo (0-30 cm) e (30-60 cm).



Os resultados obtidos ilustram bem a existência de um aumento do teor em argila a partir dos 30 cm de profundidade, comportamento característico dos solos mais representativos do Perímetro do Divor, os solos mediterrâneos. Relativamente aos primeiros 30 cm do perfil do solo, apresentam teores em argila na classe dos 11 a 21% (cerca de 70% da área total do Perímetro), e uma densidade aparente entre 1,5 e 1,7; para a camada 30-60 apresentam teores em argila na classe dos 22-31 % (50% da área total do Perímetro), e uma densidade aparente entre 1,4 e 1,6.

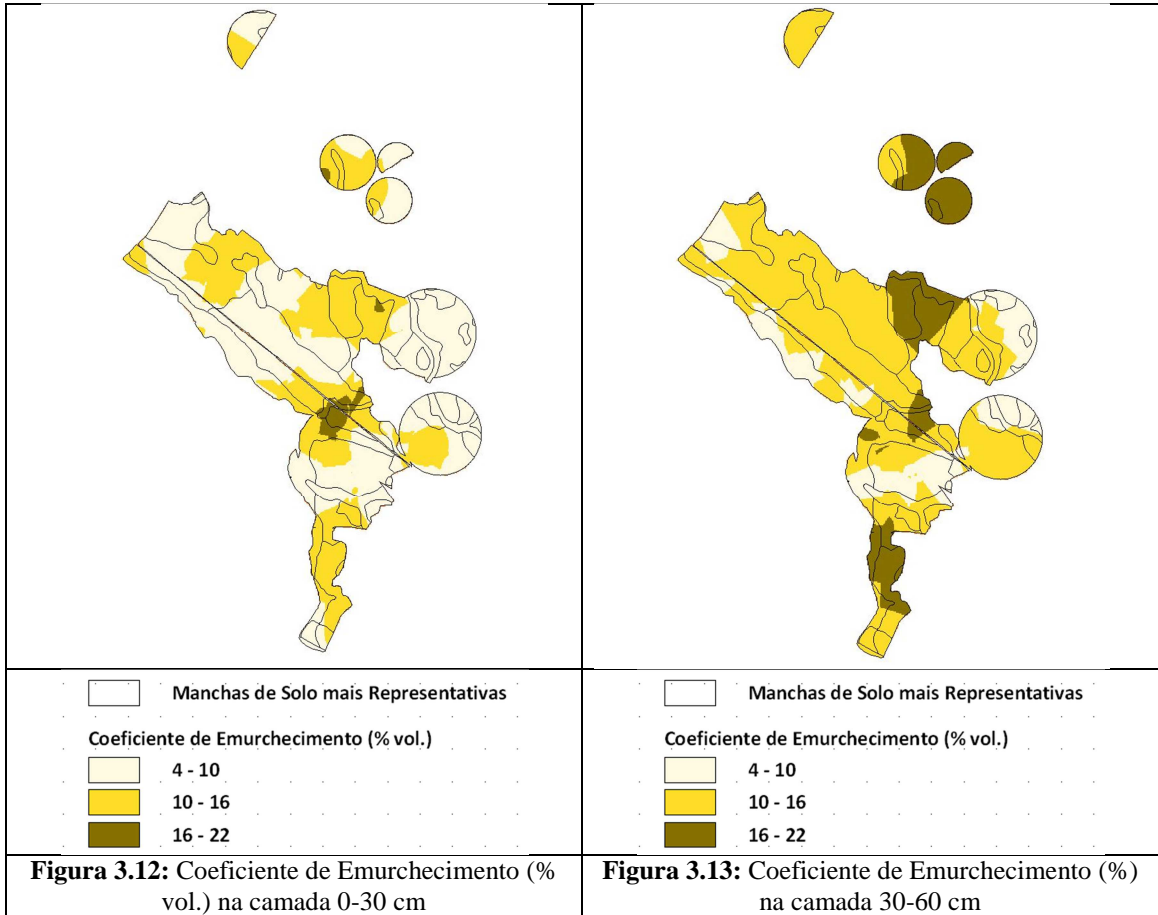
As Figuras 3.10 e 3.11, ilustram a representação espacial da capacidade de campo (% vol.), nas duas camadas do perfil do solo (0-30 cm) e (30-60 cm).



Verificou-se um ligeiro aumento na capacidade de retenção do solo na camada 30-60 cm, próprio do maior teor de argila, nesta camada.

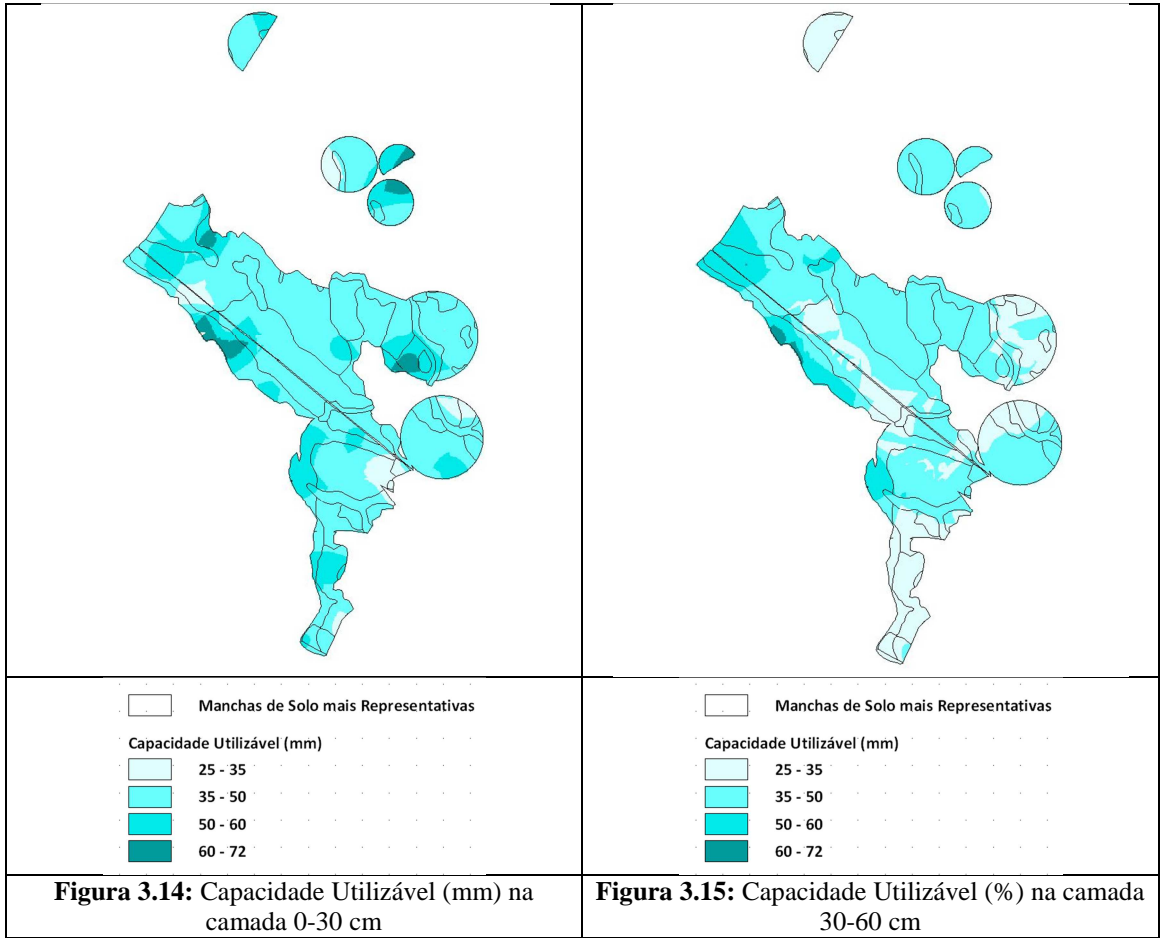
As Figuras 3.12 e 3.13, ilustram a representação espacial do coeficiente de emurchecimento (% vol.), nas duas camadas do perfil do solo (0-30 cm) e (30-60 cm).

Verifica-se um acentuado aumento dos valores do coeficiente de emurchecimento, cerca de 95 % da área total do Perímetro: valores na classe 10 e 22 % vol., na camada 30-60 cm.



As Figuras 3.14 e 3.15, ilustram a representação espacial da capacidade utilizável (mm), nas duas camadas do perfil do solo (0-30 cm) e (30-60 cm).

Relativamente às características hidropedológicas dos solos do perímetro do Divor, capacidade de campo, coeficiente de emurchecimento e reserva utilizável os resultados mostram que cerca de 90% dos solos apresentam uma capacidade utilizável moderada, situando-se na classe 35-50 mm, até 60 cm do perfil do solo.



Os resultados apresentados mostram uma grande variabilidade espacial, mesmo em locais cujo tipo de solo é idêntico. Este facto poderá estar relacionado com a forte pressão agrícola, que cerca de 80% dos solos deste Perímetro sofreram, em virtude de terem estado sujeitos à prática continuada de canteiros de arroz. No entanto, embora a malha de amostragem, constituída por 70 monólitos, tenha amostrado as manchas de solo mais representativas do perímetro, é de considerar em trabalhos futuros uma intensificação regular da malha de amostragem. O aumento do número de pontos de amostragem, em malha regular, poderá ser uma vantagem no produto final de uma nova estimação das variáveis analisadas.

No entanto, é de considerar que a base de dados dos solos do Perímetro de rega do Divor constituída será muito útil, para integrar num esquema de gestão global da água de rega, nesta área regional.

Quanto à fiabilidade dos resultados apresentados, é de considerar uma análise à variância média de krigagem, para que se possa identificar quais os pontos onde existe maior carência de informação, para que em trabalho futuro se proceda à amostragem de mais alguns monólitos de solo.

Conclui-se que a geoestatística é uma ferramenta com um potencial muito forte no conhecimento da variabilidade espacial das características do solo, determinantes para a prática da gestão da água em regadio, propriedades hidropedológicas do perfil do solo, responsáveis pela produtividade das culturas. Tal conhecimento é fator decisivo na sustentabilidade da agricultura de regadio.

Os resultados apresentados nas figuras anteriores foram a base para a definição das curvas de retenção de água no solo das sete unidades experimentais. Será, assim, definido o limite superior e inferior de gestão da água, nestas parcelas, sendo a base para a avaliação do balanço de água no solo, durante a campanha de 2007, nas sete unidades experimentais, segundo as diferentes metodologias de cálculo e tecnologias de deteção remota a estudar com a realização deste trabalho.

A Tabela 3.4 resume os valores considerados para as curvas de retenção de água no solo em cada unidade experimental, para o perfil útil do solo considerado, até 60 cm de profundidade.

Tabela 3.4: Limites de água útil do solo nas sete unidades experimentais

Parcela	Camada (cm)	CC (mm)	CE (mm)	CU (mm)	RFU (mm)	LRO (mm)
1	0-30	81	21	60	33	48
	30-60	81	39	42	23	58
Total		162	60	102	56	106
2	0-30	75	30	45	25	50
	30-60	63	39	24	13	50
Total		138	69	69	38	100
3	0-30	60	21	39	21	39
	30-60	66	36	30	17	50
Total		126	57	69	38	88
4	0-30	99	45	54	30	69
	30-60	81	39	42	23	58
Total		180	84	96	53	127
5	0-30	60	30	30	17	44
	30-60	69	39	30	17	53
Total		129	69	60	33	96
6	0-30	75	39	36	20	55
	30-60	99	57	42	23	76
Total		174	96	78	43	131
7	0-30	90	30	60	33	57
	30-60	99	57	42	23	76
Total		189	87	102	56	133

CC: capacidade de campo (limite superior de gestão da água de rega); CE: coeficiente de emurchecimento; CU: capacidade utilizável; RFU: reserva facilmente utilizável; LRO: limite do rendimento ótimo (limite inferior de gestão da água de rega).

$CU = CC - CE$; $RFU = CU * p$ ($p = 0,55$, para a cultura do milho); $LRO = CC - RFU$;

Importa salientar o seguinte: as parcelas experimentais com maior capacidade de armazenamento de água no perfil foram as parcelas 1, 4 e 7. Este facto está associado à maior percentagem de argila nestes perfis. As parcelas 2, 3 e 5 apresentam uma capacidade de armazenamento de cerca de 60 mm de água, comparativamente com os cerca de 100 mm de água nas parcelas 1, 4 e 7. A parcela 6 apresenta uma capacidade de retenção intermédia na ordem dos 80 mm.

Os valores apresentados na Tabela 3.4, serão a base para avaliar a disponibilidade de água no perfil do solo e o estado hídrico da cultura, durante a campanha de rega de 2007, mediante as metodologias e

procedimentos em estudo nesta tese: monitorização direta, balanço hídrico do solo pelo método da FAO e metodologias de deteção remota

3.2.2.2 Dotações Totais de Rega



Foram monitorizadas as dotações totais de rega durante toda a campanha, em todas as parcelas experimentais, mediante o controlo da água de rega num sistema de recolha (tal como ilustra a foto), constituído por um pluviómetro ligado a um reservatório, onde ficará retida a água aplicada, para posteriormente ser efetuado o registo de todos os valores observados. Com o objetivo de poder ter o hidrograma das dotações de rega em todo o raio da rampa rotativa, foram instalados dois sistemas de recolha por torre, com um espaçamento de cerca de 30 m entre si, permitindo obter uma distribuição espacial das dotações aplicadas à cultura em toda a parcela monitorizada.

A informação obtida com o hidrograma das dotações de rega permite avaliar a uniformidade de aplicação da água de rega, em cada unidade experimental, sendo possível correlacionar esta informação com a monitorização da água disponível no solo e ao mesmo tempo comparar com a informação obtida com o satélite, relativa ao desenvolvimento da cultura.

3.2.2.3 Disponibilidade de Água no Solo

Para quantificar e avaliar a disponibilidade de água no solo durante toda a campanha de rega, em cada parcela experimental, monitorizou-se o armazenamento de água no solo, durante a campanha de rega, com a uma periodicidade semanal, em 6 pontos de controlo por parcela experimental, um total de 42 pontos de controlo, nas sete unidades experimentais. A Figura 3.16 representa os pontos de controlo instalados por unidade experimental.

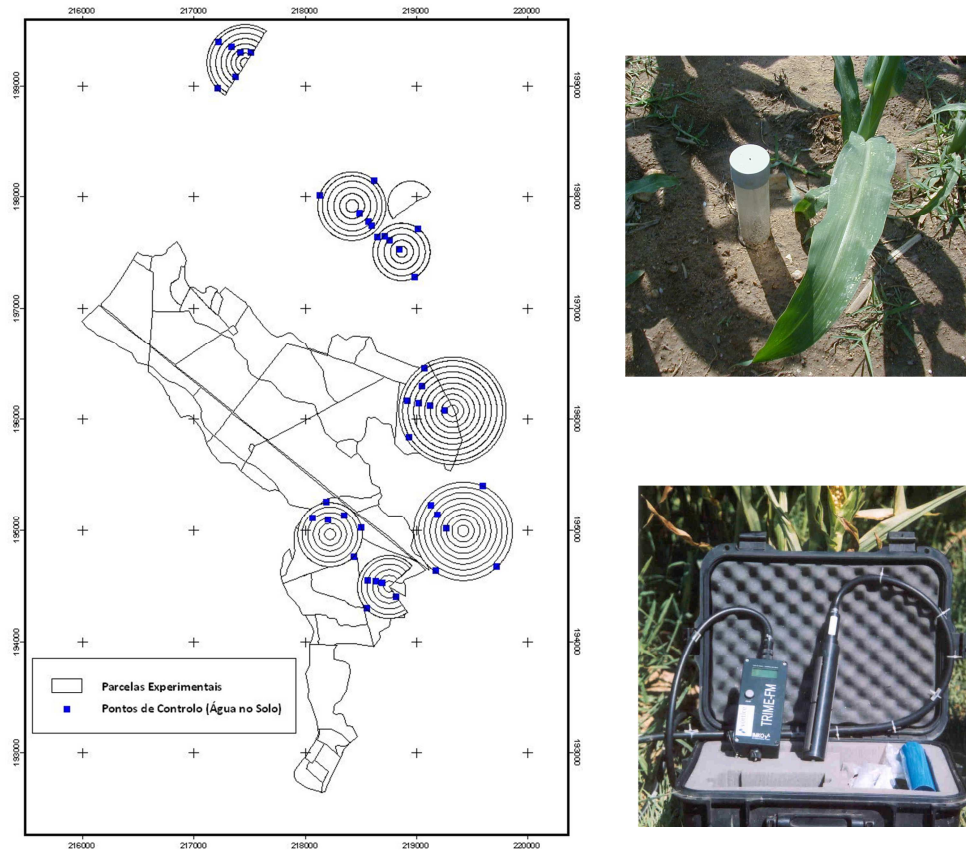


Figura 3.16: Localização e ilustração das Estação de Controle para monitorização dos teores de água no solo, em cada parcela experimental. Equipamento utilizado: Sonda TDR

Cada estação de controlo era constituída por um tubo de acesso à sonda TDR (*TRIME – FM 3*), instalado até cerca de 60 cm de profundidade (Figura 3.16).

Qualquer equipamento de monitorização dos teores de água no solo – métodos indiretos - requer uma função de calibração que relacione o teor de água determinado pelo método gravimétrico e a contagem normalizada do equipamento. Para este efeito, recolheram-se amostras gravimétricas na proximidade dos tubos de acesso à sonda TDR, tendo-se obtido uma curva de calibração para cada unidade experimental, para posteriormente se obter uma curva de calibração para as manchas de solo mais representativas das parcelas a monitorizar no Perímetro do Divor.

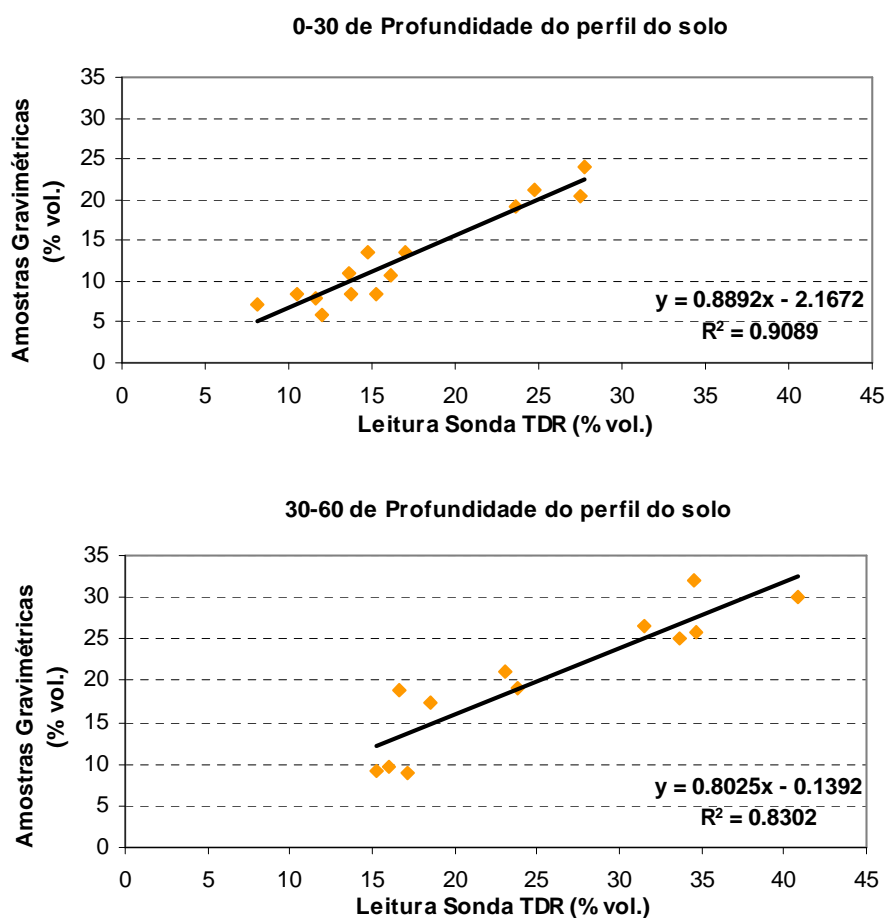


Figura 3.17: Calibração da Sonda TDR por camada do perfil do solo

Com esta informação foi possível avaliar a disponibilidade de água no solo, durante a campanha de rega, permitindo uma representação fiável do estado hídrico do solo em cada momento, podendo assim correlacionar esta informação com a estimativa hídrica a partir das tecnologias de deteção remota.

A informação obtida serviu para a realização do estudo comparativo entre as metodologias de balanço de água no solo, utilizadas no presente trabalho: monitorização direta (sonda TDR), metodologia da FAO (Allen *et al.*, 1998) e balanço hídrico com recurso às tecnologias de deteção remota (monitorização remota índices de vegetação a partir de imagens de satélite LANDSAT, temperatura de infravermelhos da superfície cultural mediante sistema de aquisição de dados com plataforma aérea não tripulada).

3.3 Procedimentos para o Cálculo das Necessidades Hídricas e Balanço Hídrico do Solo (Metodologia FAO 56)

3.3.1 Enquadramento Geral

A estimativa da evapotranspiração (ET) é o indicador mais utilizado no cálculo das necessidades hídricas das culturas em agricultura de regadio, fornecendo uma estimativa bastante precisa da quantidade de água a aplicar à cultura (quanto regar).

A determinação das necessidades hídricas das culturas (ETc) está implícita na equação do balanço hídrico do solo, sendo a metodologia de base para análise e gestão da água em regadio, a qual segue a metodologia generalizada pela FAO (Allen *et al.*, 1998), cujo procedimento consiste no cálculo da taxa de evapotranspiração de referência (ETo), mediante utilização da Fórmula de Penman-Monteith, seguindo-se a determinação do valor do Coeficiente Cultural (Kc), segundo o procedimento apresentado pela FAO (Allen *et al.*, 1998).

Nesta secção descreve-se a metodologia e os procedimentos teóricos da FAO (Allen *et al.*, 1998) utilizada na determinação das necessidades hídricas e balanço hídrico do solo. Para atingir um dos objetivos específicos do presente trabalho - estudo comparativo dos resultados obtidos segundo as metodologias da FAO, monitorização de campo e tecnologias de deteção remota, desenvolveu-se uma folha de cálculo com os procedimentos descritos nesta secção, os quais foram a base de cálculo para este estudo comparativo.

3.3.2 Determinação das Necessidades Hídricas (ETc)

3.3.2.1 Cálculo da Evapotranspiração de Referência (ETo)

A estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), recorre à utilização de fórmulas climáticas e registos meteorológicos. Estes valores da ETo, quando multiplicados pelos valores dos coeficientes culturais (Kc), em função da cultura e estágio de desenvolvimento, permitem calcular a evapotranspiração cultural (ETc), que traduz as necessidades hídricas das culturas (NHC).

A equação de Penman-Monteith é recomendada pela FAO (Allen *et al.*, 1998) como sendo o método standard para o cálculo da evapotranspiração de referência, ETo, com base nas variáveis meteorológicas: temperatura e humidade relativa do ar, radiação (líquida ou global) e velocidade do vento.

A fórmula de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) para o cálculo diário dos valores de ETo é:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3.4)$$

Onde: E_{To} - Evapotranspiração de referência, em mm/dia; R_n - Radiação líquida em $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$; G - Fluxo de calor do solo em $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$; T - Temperatura do ar em $^{\circ}C$; U_2 - Velocidade do vento a 2 m do solo em ms^{-1} ; $(e_s - e_a)$ - Défice da tensão de vapor em kPa; Δ - Declive da curva de tensão de vapor em $kPa.^{\circ}C^{-1}$; γ - Constante psicrométrica em $kPa.^{\circ}C^{-1}$.

3.3.2.2 Cálculo da Evapotranspiração Cultural (E_{Tc})

Nesta secção faz-se referência à metodologia de cálculo descrita na FAO (Allen et. al., 1998) para obter os valores da Evapotranspiração Cultural (E_{Tc}).

Tal como foi referido, o primeiro passo é calcular os valores da evapotranspiração de referência (E_{To}), mediante a aplicação da equação climática de Penman-Monteith. Esta variável faz referência a uma superfície de relva, com valores fixos para a resistência de superfície, o albedo e a altura da cultura. Os aspetos que distinguem a cultura de referência dos outros tipos de culturas são traduzidos pelos coeficientes culturais (K_c), integrando três características primárias que distinguem a cultura em causa da cultura de referência. Essas características são (Allen *et al.*, 1998):

- a altura da cultura, que afeta a rugosidade e a resistência aerodinâmica;
- a resistência da superfície solo-cultura, influenciada pela superfície foliar, percentagem de solo coberto pela cultura, idade e estado das folhas, o grau de regulação estomática e da humidade da superfície do solo;
- o albedo da superfície solo-cultura, que depende da proporção de solo coberto pela cultura e a humidade do solo.

A evapotranspiração cultural (E_{Tc}) é calculada através do produto $E_{To}.K_c$. A evapotranspiração de referência (E_{To}), traduz os indicadores climáticos e o valor do coeficiente cultural (K_c), traduz as características particulares da cultura.

Os valores standard de K_c encontram-se publicados em Allen *et al.* (1998) - Tabela 12 da referida publicação, por cultura e fase de desenvolvimento. Estes valores são médios e resultaram de um enorme trabalho experimental, em condições agronómicas e climáticas específicas (HR_{min} 45% e U 2m/s).

Os fatores que determinam os valores de K_c são: o tipo de cultura e seu estágio de desenvolvimento (associados às variações do albedo, altura da cultura, propriedades aerodinâmicas); fatores climáticos (humidade relativa do ar e velocidade do vento), que diferem das condições standard, fazem variar as propriedades aerodinâmicas da cultura; variáveis que afetam a evaporação superficial do solo (humidade do solo).

Segundo a metodologia descrita em Allen *et al.* (1998), podem estimar-se os valores da E_{Tc} em função de um coeficiente cultural simples (K_c), o qual traduz e integra as duas componentes da evapotranspiração, a evaporação e a transpiração, incorporando as características da cultura e os efeitos provocados pela evaporação da superfície do solo, ou então, dividindo segundo as componentes, em dois fatores (K_{cb} e

K_e). A escolha de um ou outro procedimento dependerá do objetivo do cálculo, da precisão requerida e da disponibilidade de dados climáticos.

Utiliza-se o coeficiente cultural simples (K_c), para estudos ao nível da planificação e dimensionamento de sistemas de rega, em que a variável tempo integra períodos superiores a uma semana.

Relativamente à utilização do coeficiente cultural dual (K_{cb} e K_e), coeficiente cultural basal da cultura e coeficiente de evaporação da água do solo, respetivamente, é um procedimento mais complicado e moroso, usado no estabelecimento de calendários de rega em tempo real, para cálculos do balanço de água no solo e em estudos de investigação, onde é importante contabilizar as variações diárias do humedecimento da superfície do solo, da disponibilidade de água no perfil e fluxos de percolação profunda, que implicam variações no cálculo dos valores ETc.

Pode representar-se por:

$$K_c = K_{cb} + K_e \tag{3.5}$$

Sendo: K_{cb} o coeficiente cultural basal; K_e o coeficiente que representa a taxa de evaporação de água do solo.

As Figuras 3.18a e 3.18b ilustram as variações dos valores de K_c em função da duração dos estádios de desenvolvimento da cultura - curva dos coeficientes culturais, para uma cultura anual, segundo os dois procedimentos descritos anteriormente, coeficiente cultural simples e dual.

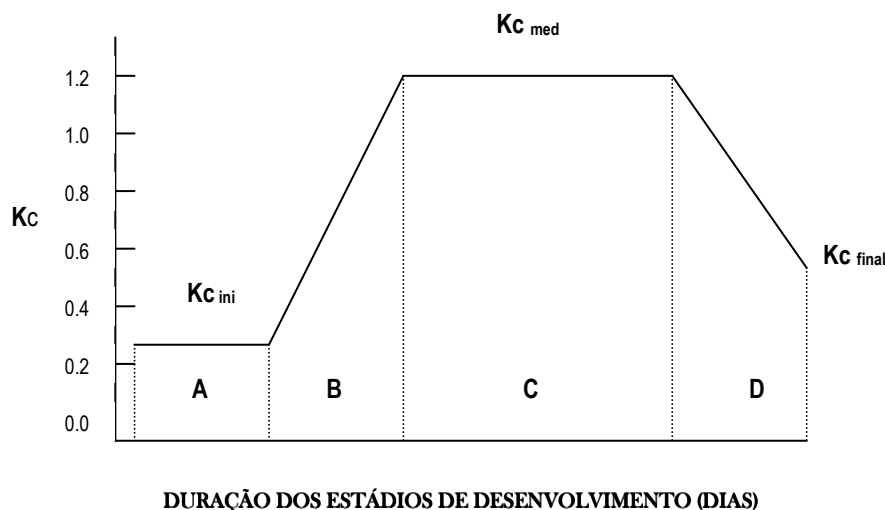


Figura 3.18a: Curva dos coeficientes culturais e definição dos estádios de desenvolvimento, correspondente ao procedimento do coeficiente cultural simples

(A – Estádio inicial, B - Estádio do desenvolvimento vegetativo rápido, C– Floração, D – Estádio final do ciclo cultural) Adaptado de Allen et al, 1998

No início do ciclo vegetativo da cultura, os valores de K_c , $K_{c\text{ ini}}$, são baixos. Começam a aumentar na fase do desenvolvimento vegetativo rápido, atingindo o seu valor máximo no final desta fase, $K_{c\text{ med}}$. Quando $K_c = K_{c\text{ med}}$ atinge-se a metade do ciclo total da cultura. Na fase final do ciclo da cultura, quando as folhas mudam a sua coloração natural, o valor K_c começa a baixar até atingir o valor de $K_{c\text{ final}}$ no fim do ciclo da cultura.

Os valores de $K_{c\text{ ini}}$, $K_{c\text{ med}}$ e $K_{c\text{ final}}$ são valores tabelados na publicação da FAO (Allen *et al*, 1998). Os valores de $K_{c\text{ ini}}$ apresentados são apenas valores indicativos, variando muito com a humidade da superfície do solo no estágio inicial do ciclo cultural.

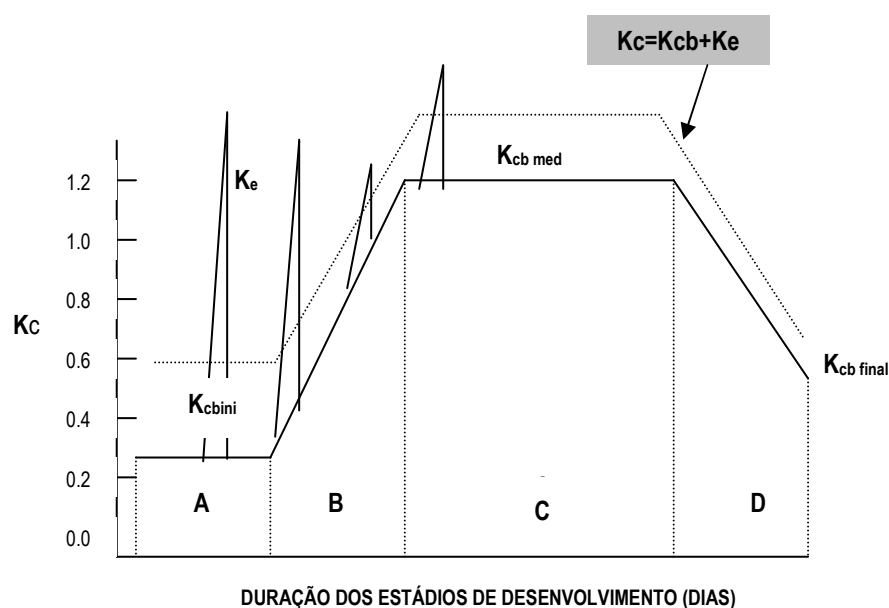


Figura 3.18b: Curva dos coeficientes culturais e definição dos estádios de desenvolvimento, correspondente ao procedimento do coeficiente cultural dual

(A – Estádio inicial, B - Estádio do desenvolvimento vegetativo rápido, C– Floração, D – Estádio final do ciclo cultural). Adaptado de Allen *et al*, 1998)

A maior diferença entre os valores de K_c e K_{cb} ocorre no estágio de desenvolvimento inicial, onde a evapotranspiração é constituída principalmente pela componente evaporativa do solo, sendo a fração transpiração da cultura muito pequena. Durante a fase intermédia (Floração), quando a cobertura do solo pela cultura é aproximadamente 100%, existem pequenas diferenças entre os valores de K_c e K_{cb} , associadas às pequenas variações da componente evaporativa.

Os picos de K_e , ilustrados na Figura 3.13b, representam o incremento da evaporação da superfície do solo, a seguir a uma chuvada ou uma rega, aumentando o valor de K_c e conseqüentemente a taxa de evapotranspiração cultural.

A duração das fases de desenvolvimento de várias culturas, para os distintos tipos de clima e localização foram tabelados pela FAO em (Allen *et. al.*, 1998). Estes valores são úteis como guia geral, servindo para

propósitos comparativos. Deve-se utilizar informação local acerca da duração de cada etapa de crescimento, com o objetivo de incorporar os efeitos da variedade da cultura, o clima e as práticas culturais.

Os valores de K_c apresentados em Allen *et al.* (1998) são uma aproximação, devendo ser utilizados para estimar ET_c em estudos preliminares ou de planificação. Para obter estimativas mais precisas e rigorosas, os valores de K_c apresentados necessitam de ser submetidos a procedimentos de cálculo, que permitam ajustar à realidade de ensaio.

Para estimar $K_{c_{ini}}$ e calcular a evapotranspiração cultural no estágio de desenvolvimento inicial em culturas anuais, deve-se considerar a frequência com que a superfície do solo é humedecida, com precipitação ou rega. Quando a superfície do solo é humedecida frequentemente, a evaporação que ocorre pode ser significativa, sendo o valor de $K_{c_{ini}}$ mais elevado; caso a superfície do solo se mantenha seca, a evaporação será mínima e o valor de $K_{c_{ini}}$ será pequeno. O valor de $K_{c_{ini}}$ depende de: poder evaporante da atmosfera, magnitude do evento de humedecimento e intervalo de tempo entre eventos de humedecimento.

$$K_{c_{ini}} = f_w, K_{c_{ini}} \quad (3.6)$$

onde: f_w : fração da superfície do solo humedecida (0-1); $K_{c_{ini}}$ tabelado pela FAO (Allen *et al.*, 1998).

Para estimar $K_{c_{med}}$ e $K_{c_{final}}$ e calcular a evapotranspiração cultural no estágio de desenvolvimento intermédio e final, para culturas anuais, é necessário ajustar os valores tabelados, em função das variáveis climáticas humidade relativa mínima do ar e velocidade média do vento e da altura da cultura, de acordo com a seguinte fórmula:

$$K_{c_{med, final}} = K_{c_{med, final}} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(HR_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (3.7)$$

onde: $K_{c_{med, final}}$: valor de $K_{c_{med}}$ e $K_{c_{final}}$ tabelado pela FAO (Allen *et al.*, 1998); u_2 : valor médio diário da velocidade do vento (m/s) a 2 m de altura; HR_{min} : valor médio diário da humidade relativa mínima (%) (se $HR_{min} > 45\%$) e h : altura média das plantas (m).

Depois de escolher o procedimento de cálculo mais adequado, determina-se qual a duração dos estádios de desenvolvimento da cultura e os coeficientes culturais correspondentes. Pode estabelecer-se a curva do coeficiente cultural ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento e maturação (Figura 3.18a e 3.18b). A partir da curva dos coeficientes culturais pode-se determinar o valor de K_c para qualquer período, podendo assim calcular-se a evapotranspiração cultural em cada instante, multiplicando os valores de K_c por os correspondentes valores da ET_o .

Considerando as componentes transpiração e evaporação separadamente, coeficiente cultural dual (K_{cb} e K_e), também aqui a FAO publica valores de K_{cb} em função do tipo de cultura e estágio de desenvolvimento ($K_{cb_{ini}}$, $K_{c_{med}}$ e $K_{c_{final}}$), específicos para climas sub-húmidos e velocidades do vento moderadas ($HR_{min} 45\%$ e $u_2 2m/s$). Será necessário validar os valores aplicando a equação 3.4.

Relativamente ao cálculo do coeficiente de evaporação, K_e , está associado à quantidade de energia disponível responsável pelo processo evaporativo da superfície do solo, sendo $K_{cb} + K_e \leq K_{cmax}$ ou $K_e \leq (K_{cmax} - K_{cb})$, então:

$$K_e = K_r (K_{cmax} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{cmax} \quad (3.8)$$

onde: K_e , coeficiente de evaporação do solo; K_{cb} , coeficiente basal da cultura; K_{cmax} , valor máximo de K_c depois da rega ou precipitação; K_r , coeficiente adimensional de redução da evaporação, de acordo com a lâmina de água acumulada à superfície do solo (que é evaporada) (quando ocorre uma rega ou precipitação o valor de K_r é igual a 1, a evaporação está limitada à quantidade de energia disponível, K_r é igual a zero quando não existe água no solo para ser evaporada); f_{ew} , fração do solo que se encontra simultaneamente exposta e humedecida, ou seja, a fração da superfície do solo a partir da qual ocorre a maior parte da evaporação.

O procedimento de cálculo consiste em determinar: o limite superior K_{cmax} ; o coeficiente de redução da evaporação do solo, K_r e a fração exposta e humedecida do solo, f_{ew} .

Para o cálculo do K_{cmax} :

$$K_{cmax} = \max \left\{ \left[1.2 + [0.04(u - 2) - 0.004(HR_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right] \left\{ K_{cb} + 0.05 \right\} \right\} \quad (3.9)$$

onde: h , altura máxima da cultura durante o período de cálculo considerado (etapa inicial, desenvolvimento, maturação e final) (m); K_{cb} , coeficiente basal da cultura; $\max ()$, valor máximo dos parâmetros entre parênteses.

O coeficiente de redução da evaporação do solo, K_r , varia em função da disponibilidade de água à superfície do solo, sendo igual a 1 quando a superfície do solo está humedecida e podendo chegar a zero quando se esgota na totalidade.

Para o cálculo de K_r :

$$K_r = \frac{AET - D_{e,i-1}}{AET - AFE}, \text{ para } D_{e,i-1} > AFE \quad (3.10)$$

onde: K_r , coeficiente adimensional de redução da evaporação, em função da quantidade de água disponível para evaporação, na camada superior do solo ($K_r=1$ quando $D_{e,i-1} \leq AFE$); $D_{e,i-1}$, quantidade de água disponível para evaporação na camada superficial do solo, no final do dia anterior (i-1), em mm; AET, lâmina de água disponível para evaporação, na camada superficial do solo, quando $K_r=0$ (quantidade total de água evaporada), em mm; AFE, quantidade de água facilmente evaporada na etapa 1 do processo evaporativo, quando a superfície do solo está quase à capacidade de campo, em mm.

Neste procedimento, são de referir os valores dos parâmetros de evaporação (AFE e AET) publicados pela FAO (Allen *et al.*, 1998), em função da capacidade de retenção de água no solo para diferentes tipos de solos:

$$AET = 1000 (\Theta_{cc} - 0,5\Theta_{ce})Z_e \quad (3.11)$$

onde: AET, quantidade total de água evaporada, quando a camada superficial do solo é humedecida por completo, em mm; Θ_{cc} , capacidade de campo, em $m^3 m^{-3}$; Θ_{ce} , coeficiente de emurchecimento, em $m^3 m^{-3}$; Z_e , profundidade da camada de solo sujeita ao processo evaporativo (0,10-0,15 m).

Para determinar a fração de solo exposta ao processo evaporativo, f_{ew} :

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w) \quad (3.12)$$

sendo: $1-f_c$, fração exposta ao processo evaporativo, não coberta pela vegetação (0,01-1); f_w , fração da superfície do solo humedecida pela rega ou precipitação (0,01-1).

Para determinar f_w , recorre-se à metodologia descrita por Allen *et al.* (1998), considerando os seguintes princípios: se a superfície é humedecida pela rega e chuva em quantidade insignificante (< 3 a 4 mm), f_w será igual a f_w do sistema de rega considerado (valores tabelados pela FAO); se a superfície do solo é humedecida pela rega e chuva significativa (> 3 a 4 mm), f_w será igual a 1 (precipitação); se a superfície é humedecida pela rega, f_w é igual a f_w do sistema de rega considerado; se a superfície do solo é humedecida por chuva significativa, sem presença de rega, f_w será igual a 1; quando não existe rega ou chuva significativa, f_w é igual ao f_w do dia anterior.

Para determinar a fração do solo exposta ao processo evaporativo ($1-f_c$), deve-se assumir um valor de f_c (fração cobertura do solo) para cada fase de desenvolvimento da cultura (valores tabelados), podendo no entanto ser estimada da seguinte forma:

$$f_c = \left(\frac{K_{cb} - K_{cmin}}{K_{cmax} - K_{cmin}} \right)^{(1+0,5h)} \quad (3.13)$$

onde: f_c , fração efetiva da superfície do solo coberta pela cultura (0-0,99); K_{cb} , coeficiente cultural basal para um determinado dia ou período; K_{cmin} , valor mínimo de K_c para o solo sem cobertura e seco (0,15-0,20); K_{cmax} , valor máximo de K_c imediatamente depois do evento de humedecimento (equação 3.3); h , altura média da cultura (m).

A equação 3.13, deve ser utilizada com alguma precaução e mediante uma validação de campo.

Para estimar o valor de K_e , será necessário efetuar o balanço diário da água na camada superficial do solo, determinando assim qual a lamina de água evaporada ou um possível défice ocorrido. A equação de balanço utilizada é a seguinte:

$$De_i = De_{i-1} - (P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{ew}} + Te_{w,i} + DPe_i \quad (3.14)$$

Onde: $D_{e,i-1}$, lâmina acumulada de evaporação, depois de um humedecimento completo, originada a partir da fração de solo exposta e humedecida, no final do dia $i-1$ (mm); $D_{e,i}$, lâmina acumulada de evaporação depois de um humedecimento completo no final do dia i (mm); P_i , precipitação no dia i (mm); RO_i , escoamento da água precipitada na superfície do solo (mm); I_i , lâmina de água de rega que infiltra no dia i (mm); E_i , evaporação no dia i ($E_i=K_e E_{to}$) (mm); $T_{ew,i}$, lâmina de água transpirada que ocorre na fração de solo exposta e humedecida da camada superficial do solo no dia i (mm); $DP_{e,i}$, perdas de água por percolação profunda que ocorrem a partir da camada superficial do solo no dia i , quando a disponibilidade de água à superfície do solo excede a capacidade de campo (mm); f_w , fração de superfície do solo humedecida através da rega (0,01-1); f_{ew} , fração exposta e humedecida do solo (0,01-1).

Quando a superfície do solo se encontra à capacidade de campo, assume-se que o valor de $D_{e,i}$ é igual a zero; à medida que a superfície do solo seca, aumenta o valor $D_{e,i}$, aumentado progressivamente até atingir o valor máximo, AET (quantidade total de água evaporada) (equação 3.11); neste momento K_r é igual a zero, pois não existe água disponível para que ocorra o processo evaporativo.

No início do balanço de água na superfície evaporante, deve-se considerar que esta está à capacidade de campo, ou seja, $D_{e,i-1}$ igual a zero.

Resumidamente, para realizar os cálculos correspondentes ao procedimento $K_c=K_{cb}+K_e$, para posterior determinação dos valores da ET_c , deve-se seguir as seguintes determinações:

- Estimar E_{to} (de acordo com a equação 3.4);
- Determinar a duração dos estádios de desenvolvimento da cultura (informação tabelada pela FAO 56), validando com informação de campo;
- Calcular o coeficiente basal da cultura para cada dia (valores tabelados e ajustados em função da equação 3.6 e 3.7);
- Calcular o valor de K_e (K_{cmax} , f_c , f_w , f_{ew} , D_e , K_r , K_e);
- Calcular $ET_c=(K_{cb}+K_e) E_{to}$.

Nos procedimentos de cálculo da ET_c , descritos anteriormente, considerou-se que a cultura se encontra em condições standard, em plenas condições hídricas e de toxicidade, isenta de qualquer condicionante que reduza os valores da evapotranspiração cultural, traduzindo a taxa de evapotranspiração cultural máxima ou potencial (ET_{cmax}).

3.3.2.3 Cálculo da Evapotranspiração Cultural Ajustada (ET_{cajust})

Caso se verifiquem condições de carência de água disponível no solo, será necessário ajustar os valores de ET_{cmax} em função da disponibilidade de água no solo. Considera-se necessário ajustar os valores de K_{cb} , em função do stress hídrico ocorrido, mediante a utilização da seguinte expressão:

$$ETc_{ajust} = (K_s.K_{cb} + K_e)ETo \quad (3.15)$$

Onde: K_s , coeficiente de stress hídrico; K_{cb} , coeficiente cultural basal; K_e , coeficiente de evaporação e ETo , evapotranspiração de referência.

Quando existem limitações de disponibilidade de água no solo é $K_s < 1$. Quando não existem condições de stress $K_s = 1$. Este coeficiente descreve o efeito do stress hídrico na transpiração da cultura.

Quando se utiliza o coeficiente cultural único (K_c), o efeito do stress hídrico é calculado de forma análoga:

$$ETc_{ajust} = K_s.K_c.ETo \quad (3.16)$$

Como o coeficiente de stress hídrico afeta somente o processo de transpiração, considera-se mais apropriada a utilização da equação 3.15.

Para estimar K_s (coeficiente de stress hídrico), tem de se realizar o balanço de água na zona radical.

Quando a disponibilidade de água no solo é inferior à reserva facilmente utilizável (RFU), o valor de K_s é calculado com a seguinte expressão:

$$K_s = \frac{RU - Dr}{RU - RFU} = \frac{RU - Dr}{(1 - p).RU} \quad (3.17)$$

onde: K_s , fator adimensional de redução da transpiração, dependendo da quantidade de água disponível (0-1); Dr , disponibilidade de água no solo na zona radical (mm); RU , reserva utilizável na zona radical (mm); p , fração da reserva utilizável que a cultura pode extrair da zona radical sem que ocorra stress hídrico; RFU , reserva facilmente utilizável de água na zona radical (mm).

A evapotranspiração real (ETr) traduz a variação da taxa de evapotranspiração cultural máxima (ETc ou ETc_{max}) de acordo com o volume de água utilizável (R) armazenado no perfil do solo explorado pelo sistema radical da cultura. O valor de ETa vai diminuindo à medida que a cultura perde o seu poder evapotranspirante. A equação 3.18 traduz a hipótese de linearidade introduzida pela determinação de ETa , quando $ETa < ETc_{max}$ e $R < LRO$:

$$ETc_{ajust} = \frac{ETc_{max}.R}{LRO} \quad (3.18)$$

onde : ETc_{max} , evapotranspiração cultural potencial ou máxima; R , volume de água disponível no solo e LRO , limite do rendimento ótimo.

3.3.2.4 Parâmetros de Base utilizados no Balanço Hídrico do Solo: Agronômicos e Pedológicos

A Tabela 3.5 estão organizados os parâmetros pedológicos e culturais de base para a determinação dos coeficientes culturais e balanço de água do solo. Os parâmetros apresentados traduzem os valores recomendados por Allen *et al.* (1998), adaptados às condições das parcelas experimentais.

Tabela 3.5: Parâmetros pedológicos e agronômicos utilizados na determinação dos coeficientes culturais e no balanço de água no solo, de acordo com os procedimentos descritos pela FAO 56 (Allen *et al.*, 1998)

Parâmetro	Símbolo FAO 56	Valor e Unidade
Teor de humidade do Solo à Capacidade de Campo	θ_{FC}	Variável com Tipo Solo (mm)
Teor de Humidade do Solo ao Coeficiente de Emurchecimento	θ_{wp}	Variável com Tipo Solo (mm)
Espessura da Superfície Evaporante	Z_e	0,1 m
Evaporação Total de Água na camada superficial (Total Evaporable Water)	TEW	Tabela 19 (Allen <i>et al.</i> , 1998)
Água Facilmente Evaporada (Readily Evaporable Water)	REW	Tabela 19 (Allen <i>et al.</i> , 1998)
Fração da Superfície do Solo exposta à rega	f_w	1
Coeficiente Cultural Basal Máximo	$K_{cb_{max}}$	Tabela 12(Allen <i>et al.</i> , 1998)
Depleção de Água no solo (milho)	P	0,55 (Allen <i>et al.</i> , 1998)
Aprofundamento Radical Máximo	$Z_{r_{max}}$	0,55 m (valor de referência para os solos mediterrâneos)
Capacidade de Aprofundamento radical no estágio de desenvolvimento inicial	$Z_{r_{min}}$	0,15 m
Altura da Cultura (máxima)	h_{max}	2,30 m (valor médio, verificar capítulo resultados)
Altura da Cultura (mínima)	h_{min}	0,15m
Défice de Água no Solo no início do Balanço	D_i	0 mm

Relativamente ao cálculo do balanço de água no perfil do solo, utilizar-se-á a equação do balanço traduzida pela FAO, sendo traduzido pela seguinte expressão:

$$Dr_{,i} = Dr_{,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ETc_{,i} + DP_i \quad (3.19)$$

onde: $D_{r,i}$, Déficit de água na zona radical do solo no final do dia i (mm); $D_{r,i-1}$, Déficit de água na zona radical no final do dia anterior, $i-1$ (mm); P_i , precipitação no dia i (mm); RO_i , escoamento superficial no dia i (mm); I_i , dotação líquida de rega no dia i que infiltra no solo (mm); CR_i , ascensão capilar proveniente da toalha freática no dia i (mm); $ETc_{,i}$, evapotranspiração da cultura no dia i (mm); DP_i , perdas de água por percolação profunda no dia i (mm).

Consultar procedimentos descritos no ponto 2.3.3.1 deste trabalho, relativos ao Balanço Hídrico do solo.

3.3.2.5 Curvas de Retenção de Água no Perfil do Solo e Balanço de Água no Solo

Para a gestão da água de rega é importante definir a capacidade de retenção de água do solo que caracteriza a parcela a regar. Esta caracterização permite contabilizar três categorias de valores da água no solo acima do limite inferior de água utilizável, ou “zonas” de disponibilidade hídrica (Figura 3.19):

- De água em excesso, quando o teor de água no solo é superior à capacidade de campo (CC); por definição, não é armazenada no solo;
- RFU, que define uma zona de utilização com rendimento ótimo, definida pelos teores de água máximo (CC) e o denominado Limite de Rendimento Ótimo (LRO), até ao qual a cultura não tem dificuldades na extração da água, não havendo por isso carência hídrica;
- De carência hídrica, em que a água no solo é já reduzida o suficiente para que a cultura entre em sofrimento hídrico; ou seja, quando o teor de água no solo se situa abaixo do LRO.

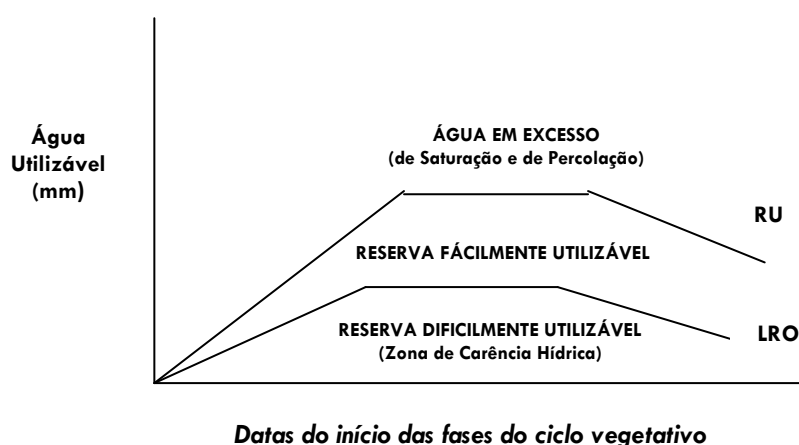


Figura 3.19: Delimitações das zonas de rendimento ótimo e de carência hídrica no balanço hídrico do solo (Fonte: Teixeira, 1992)

Estas três zonas de reserva hídrica, variam com o tipo de cultura, o estágio de desenvolvimento, a profundidade radical, a sensibilidade hídrica da cultura e o tipo de solo.

A disponibilidade de água no solo é traduzida pela capacidade de retenção de água no perfil útil do solo. Para estimar a capacidade de retenção de um solo (reserva utilizável do solo), recorre-se à seguinte expressão:

$$RU = 1000.(\Theta_{cc} - \Theta_{ce}).Z_r \quad (3.20)$$

onde: RU, reserva utilizável do solo ou disponibilidade total de água na zona radical (mm); Θ_{cc} , capacidade de campo (mm); Θ_{ce} , coeficiente de emurchecimento (mm); Z_r , profundidade máxima das raízes (mm).

O valor da RU, varia com o tipo de solo e a capacidade de aprofundamento radical da cultura.

A fração de RU que a cultura pode extrair da zona radical sem que ocorra stress é denominada reserva facilmente utilizável, traduzida pela seguinte expressão:

$$RFU = p.RU \quad (3.21)$$

onde: RFU, reserva facilmente utilizável (mm); p , fração da reserva utilizável que a cultura consegue extrair, sem que ocorra stress hídrico (redução do valor ET) (0-1).

O fator p varia em função da cultura e tipo de solo, normalmente entre 0,30 para culturas com raízes pouco profundas e valores de ETc superiores a 8 mm/dia e 0,70 para culturas com raízes profundas e taxas baixas de ETc (3 mm/dia). O valor 0,50 é o mais utilizado para a maioria das culturas. Allen *et al.* (1998), apresentam os valores de p tabelados em função do tipo de cultura, para uma ETc=5 mm/dia, podendo ser ajustados em função das condições atmosféricas, pela seguinte expressão:

$$p = p_{\text{tabeladoFAO}} + 0,04.(5 - ETc) \quad (3.22)$$

A separação entre as zonas de conforto hídrico e de stress é determinada pelo parâmetro p , que indica a percentagem da reserva utilizável da água no solo (RU) que a planta consegue extrair sem sofrer carências de água (depleção máxima de água do solo).

O volume de água no solo (mm) a partir do qual começa a zona de carência hídrica é traduzido pelo Limite do Rendimento Ótimo (LRO) ou limite inferior de gestão, traduzido pela seguinte expressão:

$$LRO = RU.(1 - p) \text{ ou } LRo = RU - RFU \quad (3.23)$$

O limite do rendimento ótimo, convencionalmente definido como sendo o limite abaixo do qual se situa a zona de carência hídrica das culturas, tendo como objetivo de rega a maximização da produção, apresenta alguma fragilidade na sua definição. É neste sentido que ensaios experimentais com modalidades de

“Rega Deficitária” pretendem averiguar situações em que o “ótimo” se situe na zona dita “zona de carência hídrica”, no sentido de se poder definir diferentes cenários ou critérios de gestão da água de rega, nomeadamente em condições de escassez de água.

Na presente tese de doutoramento será feita uma estimativa diferenciada das necessidades reais de rega, mediante informação espacialmente distribuída obtida a partir de técnicas de deteção remota. Será possível avaliar com algum rigor a relação evapotranspiração cultural – disponibilidade de água – produtividade.

3.4 Técnicas de Deteção Remota Utilizadas e Procedimentos

Tal como foi referido no capítulo 1, o objetivo geral desta tese insere-se na validação de procedimentos e metodologias para a gestão integrada de grandes áreas regadas, mediante a utilização de técnicas de deteção remota. É neste sentido que a autora interpretou e analisou a informação fornecida por duas técnicas de deteção remota, para estimar as necessidades hídricas e avaliar o estado hídrico das culturas.

As duas fontes de dados objeto de estudo foram:

- Informação multiespectral de alta resolução obtida a partir de imagens de satélite Landsat 5 – contributo para a determinação das necessidades de rega das culturas e parâmetros agronómicos que traduzam o seu desenvolvimento e produtividade.
- Utilização Remota de Sensores
 - Informação remota de elevada resolução espacial obtida com câmara térmica aerotransportada com avião não tripulado – contributo para a definição da oportunidade de rega e índice de stress hídrico da cultura.

3.4.1 Imagens de Satélite Multiespectrais de Alta Resolução: LANDSAT 5 TM

3.4.1.1 Características Gerais

O satélite Landsat 5 TM, é um satélite de alta resolução espacial, lançado a 1 de Março de 1984, mantendo-se ainda operacional. Caracterizado por uma órbita quase circular, com uma altitude de 705 km e uma inclinação de 98,2°, a sua resolução temporal é de 16 dias, varrendo uma faixa da superfície terrestre de aproximadamente 185 km por 185 km. A resolução espectral destes dados divide-se em 7 bandas, distribuídas pelo espectro eletromagnético (Tabela 3.6).

A Tabela 3.6 estão enunciadas as características padrão das imagens Landsat 5 TM utilizadas.

Tabela 3.6: Características Principais das imagens LANDSAT 5 TM

Satélite	Frequência Ciclo Passagem	Dimensão da Imagem	Número Bandas do Espectro	Resolução Espacial
Landsat 5 TM	16 dias	185x185 km	VIS (3) NIR (1) SWIR (2) TIR (1)	30 m (bands 1- 5,7) 120 m (banda 6 Térmico)

VIS – Visível (azul, verde e vermelho, banda 1, 2 e 3); NIR – Infravermelho próximo (banda 4); SWIR – Infravermelho médio (banda 5 e 7); TIR – Infravermelho térmico (banda 6)

Banda	Região do espectro eletromagnético	Amplitude espectral (μm)
1	Azul	0,45-0,52
2	Verde	0,52-0,60
3	Vermelho	0,63-0,69
4	Infravermelho Próximo	0,76-0,90
5	Infravermelho Médio	1,55-1,75
6	Térmico	10,4-12,5
7	Infravermelho Médio	2,08-2,35

3.4.1.2 Imagens Utilizadas e Pré-Processamento

O presente estudo beneficiou da informação de satélite (imagens Landsat 5 TM) cedida pela equipa do Projecto DEMETER (Calera *et al.*, 2005).

A Tabela 3.7 faz referência às imagens de satélite disponíveis, fase do ciclo da cultura em que foram obtidas e as condições atmosféricas do momento, muito importantes para avaliar a qualidade da informação disponível.

Tabela 3.7: Imagens de Satélite Landsat 5 TM utilizadas

Data da Imagem	Fase do Ciclo da Cultura	Condições Atmosféricas
09.03.2007	-----	Favoráveis (céu limpo)
28.05.2007	Desenvolvimento Vegetativo (Inicial)	Desfavoráveis (presença de nuvens)
13.06.2007	Desenvolvimento Vegetativo (Pleno/Final)	Desfavoráveis (presença de nuvens)
29.06.2007	Desenvolvimento Vegetativo (Pleno/Final)	Favoráveis (céu limpo)
15.07.2007	Plena Floração	Favoráveis (céu com pouca nebulosidade)
31.07.2007	Formação Grão	Favoráveis (céu limpo)
16.08.2007	Formação Grão/Maturação	Favoráveis (céu limpo)
01.09.2007	Maturação	Favoráveis (céu limpo)

A base de trabalho foram as imagens Landsat 5 TM apresentadas no Quadro 3.6. Importa referir que as imagens correspondentes aos dias 28 de Maio e 13 de Junho foram excluídas do estudo, devido à existência de nuvens, mascarando os índices de refletância das imagens, condicionando assim as consequentes determinações. Também a imagem do dia 15 de Julho apresentava algumas nuvens, tendo sido necessário excluir parte da informação, onde era localizada a nebulosidade.

Os trabalhos de pré-processamento das imagens – correção geométrica e atmosférica das imagens – foram da responsabilidade da equipa de trabalho do projeto DEMETER, tendo seguido os seguintes procedimentos (Martinez, 2010):

- **Software utilizado:** ERDAS Imagine 9.1;
- **Correção Geométrica e Georreferenciação:** este procedimento é muito importante quando se pretende comparar sequências temporais de imagens, de forma a garantir a correta correspondência de determinadas zonas de análise, em diferentes intervalos de tempo. É com este procedimento que se procura corrigir deformações da própria imagem, originadas com o próprio processo de obtenção das imagens (originadas pela plataforma, pela curvatura terrestre e o tempo de varrimento). O método de correção utilizado baseou-se em pontos de controlo, uniformemente distribuídos pela imagem. Este método consiste na localização de pontos facilmente identificáveis (cruzamentos de estradas, rotundas, vias de comunicação, pontos de água, etc.) tanto na imagem a corrigir, como na referência. As coordenadas da imagem corrigida obtêm-se mediante um algoritmo matemático que recalcula as novas coordenadas do ponto de controlo, transformando os valores digitais de cada pixel antigo, numa nova localização na imagem já corrigida. O sistema de georreferenciação utilizado foi UTM (*Universal Transversal de Mercator*) e com o Datum ED50 (*European Datum 1950*), fuso 30.
- **Correção Radiométrica:** a radiação eletromagnética que chega do satélite é armazenada em números digitais (*ND*), traduzindo as propriedades radiométricas da superfície terrestre, não representando a magnitude física. Será necessário transformar esses valores em radiância recebida pelo satélite, neste caso o Landsat-5 TM, mediante metodologia descrita por Chander and Markham (2003); Chander *et al* (2007); Chander *et al* (2009).
- **Correção Atmosférica:** a interação da atmosfera, tanto a radiação solar direta como a radiação reflectida pela superfície influenciam a informação obtida pelo satélite, sendo necessária uma correção atmosférica. As alterações que produzem, denominados efeitos atmosféricos, dependem tanto das características ópticas da atmosfera como das características da própria superfície terrestre. As imagens utilizadas foram corrigidas mediante o modelo de correção absoluta desenvolvido por Guanter *et al* (2007).

O diagrama apresentado na Figura 3.20 resume as operações de pré-processamento realizadas na sequência temporal das imagens de satélite consideradas no presente trabalho.

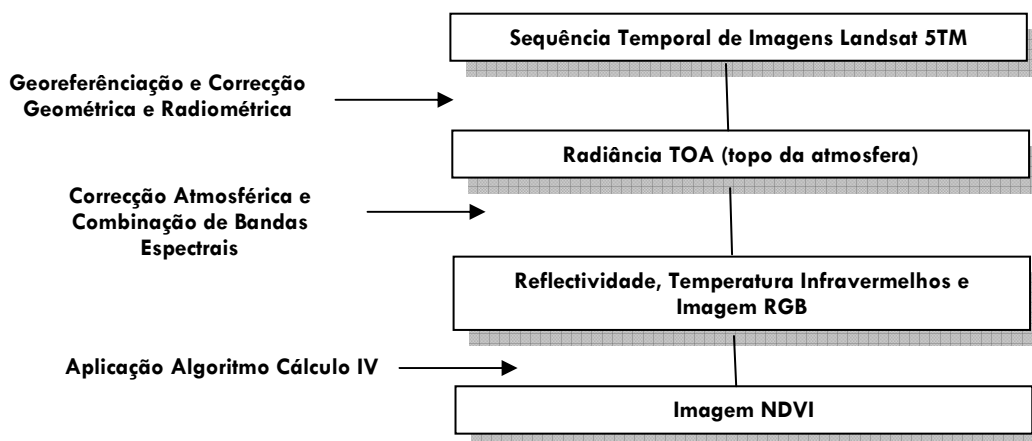


Figura 3.20: Diagrama de Pré-Processamento das Imagens Landsat 5 TM utilizadas

3.4.1.3 Interpretação e Análise das Imagens Multiespectrais de Satélite de Alta Resolução

Um dos objetivos específicos da presente tese de doutoramento é validar os procedimentos metodológicos utilizados na determinação das necessidades hídricas da cultura, a partir de imagens de satélite multiespectrais de alta resolução. Os procedimentos metodológicos desenvolvidos serão a base para o desenvolvimento de um sistema global de gestão da água de rega, em grandes áreas de regadio.

As metodologias de análise utilizadas baseiam-se nos conhecimentos teóricos apresentados no capítulo 2 deste trabalho, na secção 2.6.4. Baseiam-se em expressões analíticas que relacionam índices de vegetação (IV); neste caso concreto o índice de vegetação utilizado será NDVI “*Normalized Difference Vegetation Index*”, com parâmetros biofísicos e estimativa das necessidades hídricas para a cultura em estudo: o milho.

$$NDVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V)} \quad (3.25)$$

Onde: IVP e V são os valores de refletância da banda do infravermelho próximo e da banda do vermelho, respetivamente. O intervalo de variação deste índice é de -1 a 1. Os valores positivos, próximos de 1, ocorrem em zonas com vegetação densa e vigorosa, onde a refletância do IVP é elevada e a do V é baixa. Este comportamento deve-se à elevada absorção de radiação no comprimento de onda do vermelho pelos pigmentos fotossintéticos da vegetação verde e à baixa absorção de radiação na região do infravermelho próximo pela estrutura celular das folhas. Nas zonas onde a vegetação é menos densa e vigorosa, o NDVI assume valores próximos de zero. Os valores negativos, surgem quando se está na presença de superfícies de água e de nuvens, cuja refletância é elevada na região do espectro correspondente ao visível e baixa na banda do infravermelho próximo.

Os procedimentos metodológicos utilizados no presente trabalho para analisar a informação obtida a partir da imagem de satélite, baseiam-se na determinação de expressões analíticas, para determinação de parâmetros que caracterizem o desenvolvimento e estado das culturas, mediante a correlação com outras metodologias - monitorização direta dos parâmetros experimentais, cálculo do balanço hídrico do solo e monitorização de água no solo. As expressões analíticas utilizadas neste trabalho seguem a informação encontrada em bibliografia, obtidas por outros investigadores, para a cultura do milho, mediante a correlação com outras metodologias de monitorização da taxa de evapotranspiração: lisímetros e modelos balanço energético. Aplicadas em outros trabalhos de investigação, obtiveram-se boas correlações, superiores a 90%. No entanto, optou-se por personalizar essa determinação para as condições particulares do Perímetro de Rega do Divor – condições mediterrâneas.

As variáveis agronómicas estudadas a partir das imagens de satélite Landsat 5 TM, foram:

- **Fração de Cobertura do Solo (f_c):** define a proporção da superfície do solo intersectada pela projeção vertical da vegetação. É um parâmetro de grande importância no acompanhamento do ciclo cultural, na medida em que está relacionado diretamente com a taxa de evapotranspiração, através da relação direta cobertura vegetal-coeficiente cultural (fases de desenvolvimento da cultura), reproduzindo a necessidades reais de rega em cada instante.

A relação entre NDVI e fração de cobertura vegetal descrevem uma relação linear (Quadro 3.8). Também se pode descrever de uma forma mais geral como:

$$f_c = 1,19 \cdot (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{solo}}) \quad (3.26)$$

$\text{NDVI}_{\text{solo}}$: é o valor de NDVI para solo totalmente descoberto (solo nu), igual a 0.14.

As relações anteriores são válidas para cobertos inferiores a 80%. A partir deste valor, existe um efeito de saturação, em que o NDVI não apresenta um incremento com relação linear. Neste sentido, alguns autores propõem uma relação não linear entre f_c e NDVI.

- **Coefficiente Cultural (K_c^*) e Coeficiente Cultural Basal (K_{cb}^*):** K_c^* , define o coeficiente cultural espectral entre a evapotranspiração da cultura (ET_c) e a evapotranspiração de referência (ET_o); K_{cb}^* , define o coeficiente cultural basal espectral que representa a componente da evapotranspiração que define apenas a transpiração da cultura, não estando representada a componente evaporativa do solo (K_e). No presente trabalho utilizam-se expressões analíticas que relacionam o índice de vegetação, NDVI, com o valor do coeficiente cultural espectral (K_c^*) e o coeficiente cultural basal espectral (K_{cb}^*).

As equações lineares apresentadas no Quadro 3.8, as quais serão objeto de estudo do presente trabalho, baseiam-se em algumas referências bibliográficas já apresentadas no capítulo 2.

Jackson et al. (1980) e outros autores observaram a semelhança entre a evolução temporal do NDVI e os coeficientes culturais.

Bausch e Neale (1987) e Neale *et al.*(1989) obtiveram uma relação linear entre o coeficiente cultural basal e o NDVI para a cultura do milho. A determinação do coeficiente cultural basal faz-se de acordo com Wright (1982), mediante os valores da fração de cobertura e do LAI, permitindo determinar o período de cobertura total. Outros índices como o SAVI, foram utilizados para estabelecer a relação entre o coeficiente cultural, minimizando assim o impacto dos diferentes tipos de solo no valor de NDVI (Bausch, 1993, 1995). A fundamentação teórica que justifica a relação linear entre o coeficiente cultural basal e o valor de NDVI baseia-se nas trocas radiativas da cobertura vegetal.

Os coeficientes culturais obtidos a partir da resposta espectral do coberto vegetal traduzem em tempo real o desenvolvimento da cultura (Bausch e Neale (1987).

Uma relação operativa, para obter o Kc a partir do valor de NDVI obtido das imagens de satélite, passa pela determinação da componente evaporativa do solo.

- **Índice de Área Foliar (IAF):** corresponde ao coeficiente entre a área total das folhas verdes e a área da superfície que ocupam. É um parâmetro semelhante à variável superfície foliar verde por unidade de radiação solar disponível, traduzindo de forma indireta a capacidade fotossintética de uma superfície cultural. Os valores do IAF variam com o tipo de cultura e com o estágio de desenvolvimento, sendo comum o valor de 3 a 5 em culturas cujo coberto vegetal atinge os 100% na fase de maior desenvolvimento, isto é, normalmente na fase de floração.

A relação entre o NDVI e o IAF, definida e analisada por Baret e Guyou (1991), Gilbert *et al.* (1996), traduz-se matematicamente por uma equação exponencial similar à *Lei de Beer*, a qual representa a incidência da radiação num meio absorvente (coberto vegetal):

$$NDVI = A - B e^{(-C IAF)} \quad (3.27)$$

Onde: os valores de A e B variam com a cultura e o estágio de desenvolvimento, traduzindo um maior ajuste no estágio de crescimento (Gilbert *et al.*, 1996). A corresponde ao valor do $NDVI_{max}$, quando o IAF tende para infinito, alcançando o valor limite quando os valores do IAF correspondem a 8,0. O valor de B é estimado mediante a diferença do valor de NDVI correspondente a um IAF máximo, $NDVI_{max}$, e o valor de NDVI que corresponde ao solo nu. O valor de C está relacionado com o valor da radiação dentro do coberto vegetal. Este valor chama-se coeficiente de extinção ou absorção, por analogia com a *Lei de Beer*, o qual traduz a variação relativa da intensidade da radiação quando esta atravessa uma espessura elementar. O produto $C*IAF$ é análogo ao efeito do campo óptico.

A expressão anterior também se pode escrever da seguinte forma:

$$NDVI = NDVI_{max} - (NDVI_{max} - NDVI_s) \exp(-C IAF) \quad (3.28)$$

Onde: $NDVI_{max}$ correspondente ao valor do NDVI quando o coberto vegetal atinge 100% e $NDVI_s$ quando o solo está totalmente descoberto (nu).

Assim:

$$LAI = -\frac{1}{C} \ln\left(\frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_s}\right) \quad (3.29)$$

Para o caso dos sensores TM e ETM⁺ é de considerar os seguintes valores típicos: $NDVI_{max}$ (0.91); $NDVI_s$ (0.14) e C (0.8). Estes valores de $NDVI_{max}$, $NDVI_s$ e C, são valores de referência obtidos por González-Piqueras (2006).

- **Fração da Radiação Fotossintética activa Absorvida (f_{APAR}):** corresponde à proporção da radiação incidente (400 a 700 nm) (P_{ARi}) que é absorvida pela cultura ($f_{APAR} = A_{PAR}/P_{ARi}$) (Asrar *et al.*, 1992). Este parâmetro traduz de forma indireta o desenvolvimento da cultura, através da quantidade de energia consumida no processo fotossintético.

Relativamente ao albedo (α), ele é um parâmetro importante que traduz a radiação solar incidente que é reflectida, isto é, a radiação absorvida pela superfície cultural e/ou solo nu, contabilizada no balanço da radiação. Valores típicos para o albedo são 15% e 30% para cultura e solo nu, respetivamente (Monteith e Unsworth, 1990). A superfície de referência assume um valor de 0,23, variando com o tipo de cultura, a fase de desenvolvimento e as características ambientais, nutricionais e disponibilidade de água no solo.

Como os satélites medem valores de reflectividade em diferentes bandas, desenvolveram-se procedimentos para obter a partir destes valores o valor total do albedo (D'Urso, 1996 e Menenti, 2000). O procedimento consiste numa média ponderada das reflectividades, em que cada banda assume um peso diferente em função do comprimento de onda, variável com o satélite. D'Urso (1996) estabeleceu a seguinte relação para calcular o albedo da superfície:

$$\alpha = 0,221TM1 + 0,256TM2 + 0,178TM3 + 0,229TM4 + 0,081TM5 + 0,032TM7 \quad (3.30)$$

Sendo: α , albedo ou reflectividade da superfície ao espectro solar, TM1...TM7, reflectividade da superfície nas bandas 1 a 7 do satélite TM-ETM⁺.

Relativamente ao cálculo da fração da radiação fotossintética absorvida pelo coberto vegetal (f_{APAR}), importa referir o seguinte: a radiação fotossintética activa (PAR) é a parte da radiação solar disponível para a fotossíntese e representa aproximadamente 48% da radiação solar (Monteith e Unsworth, 1990), sendo a radiação que se encontra na banda de 400-720 nm (Sellers *et al.*, 1997) que praticamente coincide com a zona do visível.

A fração da radiação fotossintética activa absorvida, f_{APAR} , é o cociente entre a radiação absorvida pelo coberto vegetal, APAR e a radiação incidente, PAR_i (Asrar *et al.*, 1989):

$$f_{APAR} = \frac{APAR}{PAR_i} \quad (3.31)$$

Este parâmetro está relacionado diretamente com o crescimento e desenvolvimento das plantas, pois indica a energia absorvida necessária para realizar o processo fotossintético (Gardner *et al.*, 1990). Os parâmetros biofísicos estão relacionados entre si, traduzindo de forma geral o crescimento e desenvolvimento da cultura, tal como ilustra a Figura 3.21.

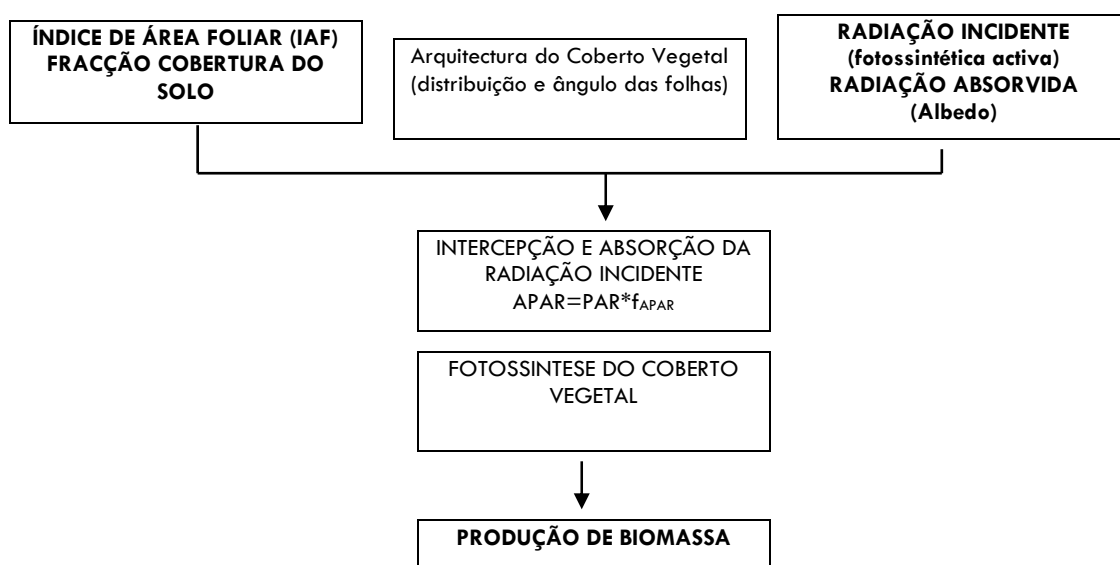


Figura 3.21: Diagrama que ilustra os diferentes fatores que interferem na formação de biomassa das plantas (adaptado de Garner *et al.*, 1990)

Considera-se que a relação entre o NDVI e a fração da radiação fotossintética activa interceptada pelas plantas, f_{APAR} , é uma relação linear (Asrar *et al.*, 1989).

$$f_{APAR} = aNDVI + b \text{ ou } f_{APAR} = a(NDVI - NDVI_s) \quad (3.32)$$

Sendo: a, 1,25 (Asrar *et al.*, 1984) e $NDVI_s$, o valor de NDVI para o solo nu, obtido a partir dos valores de reflectividade da superfície para os sensores TM-ETM+, tipicamente 0,14.

A primeira equação sugere que o NDVI pode ser utilizado para estimar a fração f_{APAR} , apesar da influência que o solo tem sobre o valor de NDVI, especialmente nos primeiros estádios de desenvolvimento da vegetação, as alterações do ângulo de iluminação solar e as condições da atmosfera (Asrar, 1989).

É necessário ter em conta que durante a fase de crescimento da cultura os fenómenos: intercepção e absorção relativos à interação da radiação com o coberto vegetal são praticamente equivalentes, devido à escassa dispersão e à forte absorção da radiação luminosa pelos elementos verdes da planta. Durante a fase de maturação e senescência produz-se intercepção da luz no coberto vegetal, mas somente uma parte é absorvida, devido ao desaparecimento progressivo de elementos verdes (clorofila).

A Tabela 3.8, regista as expressões analíticas obtidas por outros investigadores, com as quais é possível ter termo de comparação com os resultados obtidos no presente trabalho. Relativamente ao parâmetro Fração da Radiação Fotossintética Activa (f_{APAR}) utilizar-se-á a expressão encontrada por González-Piqueras (2006).

Tabela 3.8: Expressões Analíticas encontradas em bibliografia

PARÂMETRO A ESTIMAR	EXPRESSÃO ANALÍTICA	REFERÊNCIA
Coefficiente Cultural Espectral (Kc^*) ou Coeficiente Cultural Basal (Kcb)	$Kcb^*=1.36 (NDVI) - 0.06$	Bausch e Neale (1987)
	$Kcb^*=1.81 (NDVI) + 0.026$	Neale (1989)
	$Kc^*=1.15 (NDVI) + 0.17$ $Kcb^*=1.46 (NDVI) - 0.19$	González-Piqueras (2006)
	$Kc^*=1.25 (NDVI) + 0.2$ $Kcb^*=1.56 (NDVI) - 0.1$	Calera <i>et al</i> (2003); DEMETER (2007)
Fração de Cobertura do Solo (f_c)	$f_c= 1.19 (NDVI) - 0.16$ $f_c= 1.35 (NDVI) - 0.2011$	González-Piqueras (2006) Calera <i>et al</i> (2006)
	$LAI=-1/0.8 \ln (0.91-NDVI/0.91-0.14)$ $LAI=0.0287 e^{(5.0819 \cdot NDVI)}$	González-Piqueras (2006)
Fração da Radiação Fotossintética activa Absorvida (f_{APAR})	$f_{APAR}=1.25(NDVI-0.14)$	González (2006)

3.4.1.4 Integração da Informação obtida com as Imagens de Satélite Landsat 5 TM no Balanço Hídrico do Solo

A informação obtida a partir das imagens multiespectrais de satélite (Landsat 5 TM), conforme descrito na secção anterior 3.4.2.3 – parâmetros agronómicos – faz nesta secção parte integrante dos dados de entrada nos procedimentos de cálculo das necessidades hídricas das culturas (ET_c) e Balanço Hídrico do Solo, mediante metodologia da FAO, descrita na secção 3.3 deste trabalho.

Conforme programado nos objetivos específicos deste trabalho, é feito um estudo comparativo entre a determinação das necessidades hídricas da cultura e disponibilidade de água no perfil do solo, nas sete unidades experimentais, segundo a aplicação das diferentes metodologias de gestão em análise: monitorização direta (sonda TDR), balanço hídrico do solo mediante a aplicação da metodologia da FAO com e sem a informação obtida a partir das imagens de satélite Landsat 5 TM. Os resultados obtidos serão a base para a definição dos procedimentos a adoptar para a gestão integrada da água, em grandes áreas de regadio.

A operacionalidade e fiabilidade das metodologias e procedimentos em estudo – imagens multiespectrais de satélite vs índices de vegetação - para a gestão global de grandes áreas de regadio – será abordada com a seguinte informação e a monitorização de parâmetros agrónómicos que traduzam o desenvolvimento das culturas e as suas necessidades reais de rega.

A Figura 3.22 ilustra de forma esquemática o Sistema Global de Gestão da Rega, que se pretende constituir e avaliar neste trabalho, mediante a utilização das imagens de satélite Landsat 5TM.

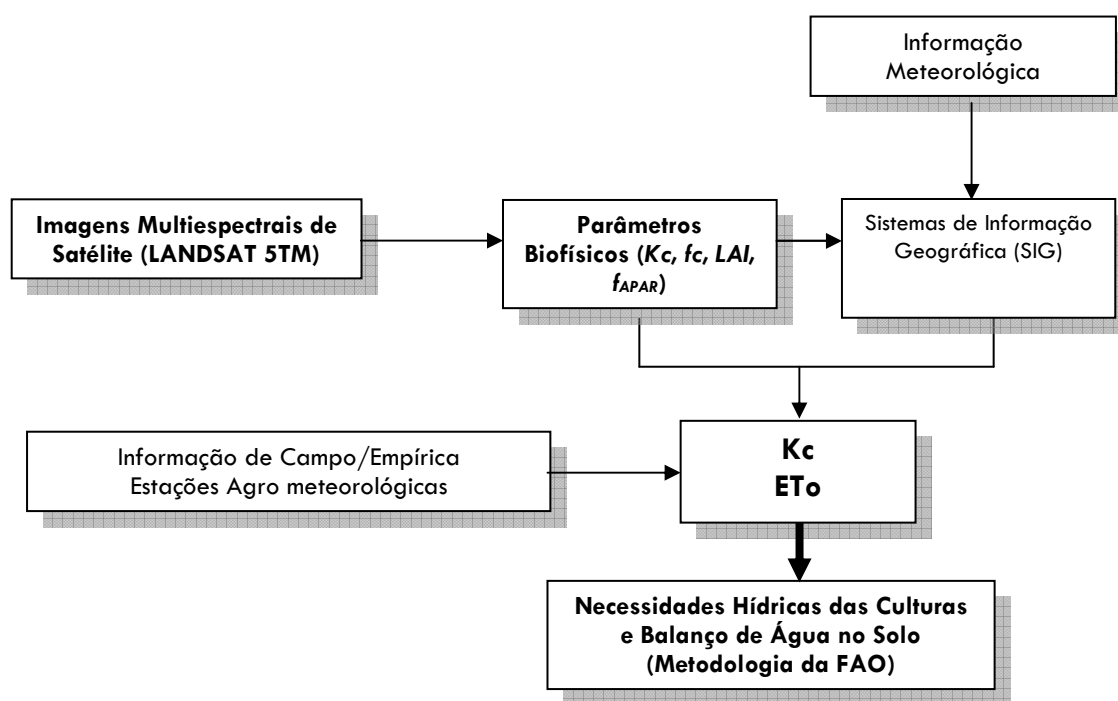


Figura 3.22: Sistema de Gestão Integrada da Água de Rega mediante informação multiespectral de Satélite

3.4.2. Sistema Remoto de Aquisição de Dados da Temperatura de Infravermelhos da Cultura mediante a utilização de Plataforma aérea não tripulada

3.4.2.1 Caracterização da Plataforma Aérea não Tripulada

Conforme definido nos objetivos específicos do presente trabalho, será objeto de estudo a informação remota fornecida por imagens multiespectrais e térmicas de elevada resolução obtidas com plataforma aérea (avião) não tripulada, através das quais se procura estimar indicadores de gestão da água de rega, à escala regional, mediante procedimentos metodológicos para a estimativa de necessidades globais de rega e indicadores de stress, como metodologia de gestão global da rega.

Esta fonte de dados é encarada como uma metodologia de gestão que possibilitará programar as operações de controlo, ao contrário das imagens multiespectrais de satélite, contornando assim as limitações impostas por condições atmosféricas desfavoráveis à aquisição da informação sobre a superfície terrestre, permitindo assim uma elevada representação espacial e temporal da superfície cultural. Outra limitação que se pretende ultrapassar com a utilização desta plataforma de recolha de dados é a que se prende com a baixa resolução espacial das imagens obtidas por satélite. Ao contrário do satélite, a plataforma aérea não tripulada oferece grandes possibilidades em termos de resolução espacial das imagens multiespectrais e principalmente das imagens térmicas, ambas com elevada representação espacial, minimizando os efeitos introduzidos pela influência da superfície terrestre, na reflectividade da cobertura.

Para atingir os objetivos expostos, estabeleceu-se contacto com a equipa de investigação do Laboratório de Investigação em Deteção Remota do *Instituto de Agricultura Sostenible (IAS) do Conselho Superior de Investigación Científica (CSIC)* em Córdoba, liderada pelo Professor Pablo Zarco-Tejada, para realizar a componente experimental desta linha de trabalho. Esta linha só foi possível realizar durante a campanha de 2010, em quatro unidades experimentais do Perímetro de Rega do Divor.

A plataforma aérea não tripulada utilizada foi desenvolvida pelo Laboratório de Investigação em Deteção Remota do IAS (Berni *et al.*, 2009) e está equipada com câmaras multiespectral e térmica, permitindo recolher imagens multiespectrais e térmicas da superfície terrestre com uma elevada representação espacial e temporal. A plataforma aérea não tripulada é controlada por um sistema de autopilotagem (*modelo AP04H, UAV Navigation, Madrid, Spain*) possibilitando uma navegação autónoma baseada num planeamento da missão (voo), baseado em pontos de controlo.

A Figura 3.23 esquematiza os componentes que constituem a plataforma utilizada, assim como o seu sistema de controlo (Berni *et al.*, 2009).

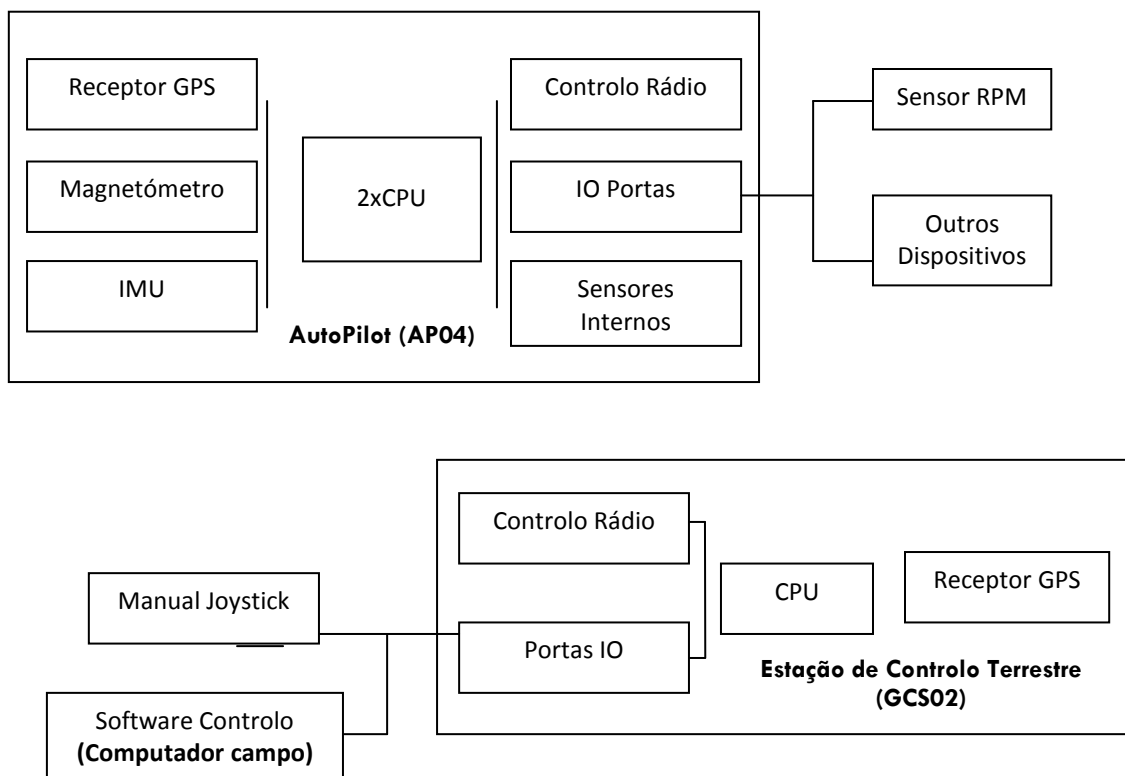


Figura 3.23: Composição da Plataforma Aérea não tripulada utilizada no estudo

A câmara multiespectral (*MCA-6, Tetracam, Inc., CA, U.S.*) instalada na plataforma aérea é constituída por seis bandas espectrais recolhendo 6 imagens independentes, com uma resolução de 1280 x 1024 pixel, nos 490, 550, 670, 700, 750 e 800 nm, do espectro eletromagnético. As imagens obtidas ficam armazenadas num formato próprio na Estação de Controlo Terrestre, para posterior correção e processamento.

A câmara térmica é do tipo *Thermovision A40M (FLIR, U.S.)*, com 40° FOV (*field of view*), com uma resolução 320 x 240 pixel e uma resposta espectral 7.5-13 μm .

O sistema integra ainda uma câmara para calibração geométrica da informação obtida, a partir dos parâmetros intrínsecos da câmara - distância focal, coordenadas dos pontos principais e distorções radiais das lentes. Esta calibração consiste na recolha de uma série de imagens em diferentes localizações e orientações, das quais é extraída de forma automática a imagem de referência para a correção geométrica das imagens multiespectrais, obedecendo a um modelo próprio “Bouguet’s Model” (Bouguet, 2001). As distorções da lente serão corrigidas com o modelo estudado por Worf (1983).

Relativamente à correção atmosférica da informação obtida – refletância e temperatura da superfície – baseia-se no modelo MODTRAN (*MODerate Resolution Atmospheric TRANSmission*). Utilizando para o efeito informação atmosférica do local na hora do voo (temperatura e humidade do ar, pressão atmosférica), proveniente de uma estação climática portátil (*Model WXT510, Vaisala, Finland*)

A plataforma aérea não tripulada desloca-se de forma autónoma, segundo um plano de voo pré estabelecido, habitualmente a uma velocidade fixa de 70 km/h, com uma produtividade média de 70 ha/voo, recolhendo imagens multiespectrais com uma resolução de 15 cm e imagens térmicas com uma resolução de 40 cm, a uma altura sobre o solo de 150-200 m

3.4.2.2 Voo Experimental

Apenas foi possível realizar uma missão com a plataforma aérea não tripulada, para a campanha de 2010, no Perímetro de Rega do Divor, em quatro parcelas experimentais, na fase de maturação da cultura. Devido a um problema com a câmara multiespectral, o qual não foi possível reparar durante toda a campanha de rega, apenas foram obtidas imagens térmicas de elevada resolução, uma vez que a plataforma aérea apenas esteve equipada com a câmara térmica. A tecnologia desenvolvida pelo IAS/CSIC – Laboratório de Métodos Quantitativos de Teledeteção (*QuantaLab*), parece oferecer um elevado potencial para a gestão da água em áreas extensas de regadio.

A operação desta plataforma foi da inteira responsabilidade da equipa de investigação do IAS (*QuantaLab*), assim como a calibração e correção da informação obtida.

A missão realizada ocorreu quase no final do ciclo da cultura do Milho, no início da fase de maturação – 21 de Setembro de 2010.

De acordo com os procedimentos expostos por Berni *et al* (2009). Importa referir que no momento da realização do voo o céu encontrava-se limpo, com ausência de nebulosidade.

As Figuras 3.24 e 3.25 referem-se ainda à tecnologia utilizada – veículo aéreo não tripulado (UAV), equipado com câmara térmica e equipamento auxiliar - aquando da realização da operação no Perímetro de Rega do Divor.



Figura: 3.24a:Início do voo durante a missão no Perímetro do Divor em 2010



Figura: 3.24b:Veículo Aéreo não tripulado equipado com a câmara térmica de elevada resolução



Figura: 3.25a: Lançamento da plataforma aérea



Figura: 3.25b:Monitorização do Veículo (UAV) durante a missão realizada em 2010

A Figura 3.26 mostra a área sobrevoada pela plataforma aérea não tripulada.

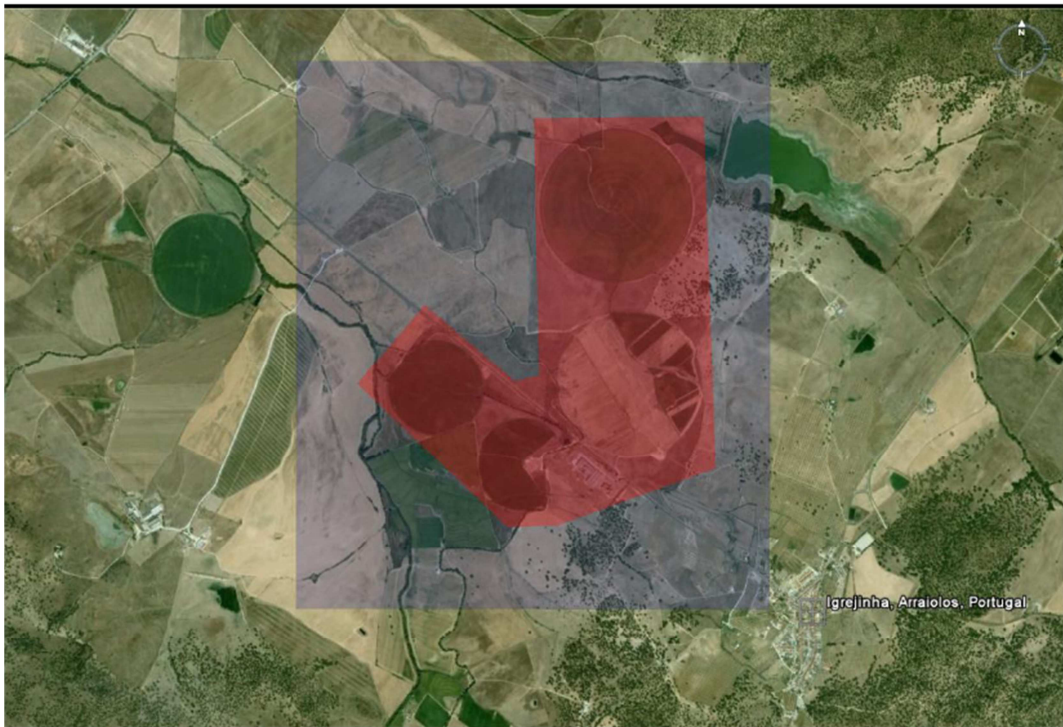


Figura 3.26: Área sobrevoada pela Plataforma Aérea não Tripulada

As unidades experimentais utilizadas no estudo correspondem a quatro parcelas que também foram objeto de estudo em 2007 – Parcela 1 (73 ha), 3 (18 ha), 4 (26 ha) e 5 (62 ha). A cultura instalada é o milho e o método de rega a rampa-rotativa.

Tendo em conta a resolução requerida para as imagens, o ângulo de visão da câmara usada (FOV) e a área das parcelas experimentais a sobrevoar, determinou-se a altura do voo, 500 metros sobre o nível do solo. O voo realizou-se às 12 horas, com uma duração de 39 min para recolher imagens de uma área de 179 ha e uma velocidade média do veículo UAV de 70 km/h.

As Figuras 3.27 e 3.28 ilustram o plano do voo realizado, composto por 9 passagens, as primeiras quatro com uma longitude de 1.7 km e uma separação entre elas de 180 m; as cinco seguintes com uma longitude de 2,5 km e uma separação entre elas de 230 m. A orientação das passagens foi nas 1^{as} a 209° (direção noroeste) /219° (direção sudeste) e as últimas de 357° (direção norte) /177° (direção sul).

A Figura 3.28 mostra o esquema das posições de recolha de cada imagem térmica pelo veículo não tripulado.

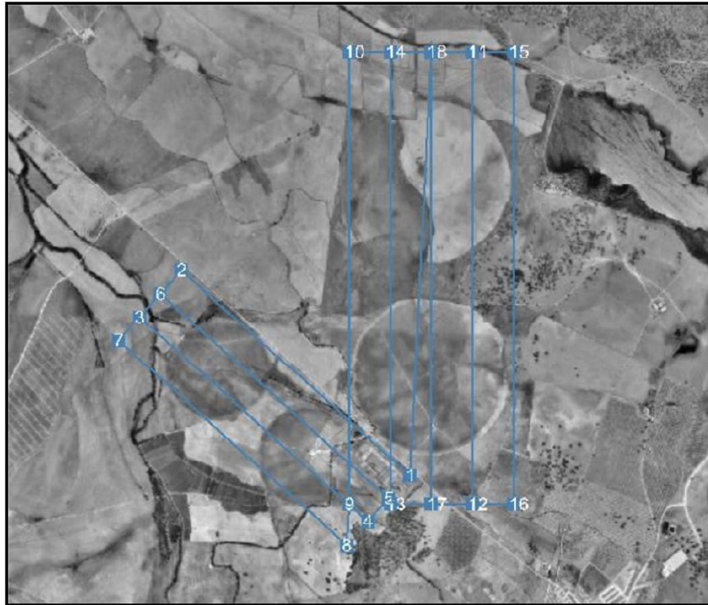


Figura 3.27: Plano de voo realizado – passagens realizadas pelo veículo não tripulado, equipado com a câmara térmica de elevada resolução



Figura 3.28: Plano de voo realizado – esquema das posições de recolha de cada imagem térmica pelo veículo não tripulado.

Durante a realização do voo, foi efetuada a monitorização de alguns parâmetros atmosféricos, para posterior correção atmosférica das imagens. Com este objetivo foi instalada uma estação meteorológica portátil – Modelo Vaisala VXT 510 - junto ao campo experimental, com a qual foi possível fazer registos

da temperatura (°C) e humidade do ar (%), pressão atmosférica (mbar) e velocidade (m/s) e direção do vento (grados), durante o voo.

A câmara térmica utilizada na recolha das imagens foi calibrada radiométrica e geometricamente no Laboratório de Óptica de Quantalab (IAS/CSIC). A câmara utilizada tem uma resolução de 640x480 pixel, dimensão do pixel 25 µm e resolução radiométrica de 16 bits.

3.4.2.3 Processamento das Imagens

As imagens térmicas de elevada resolução obtidas durante o voo foram calibradas radiometricamente usando os coeficientes de calibração obtidos em laboratório mediante esfera integrante e corrigidos atmosféricamente mediante um modelo atmosférico de transferência radiativa.

Para obter imagens térmicas com os valores da temperatura (°K) a partir das imagens recolhidas, foi necessário fazer a correção atmosférica utilizando um modelo de transferência radiativa – MODTRAN (Berni *et al.*, 2009) para simular o espectro de irradiância.

Para a correção geométrica e georreferenciação recorreu-se a técnicas fotogramétricas de aerotriangulação, ajustando a posição e orientação dos dados obtidos com o sistema de navegação do veículo aéreo não tripulado (UAV). Para a aerotriangulação e geração do mosaico de imagens utilizou-se a aplicação *LPS da Leica*.

O sistema de referência em que foram geradas as imagens foi WGS 84 UTM Fuso 30N, que posteriormente será convertido no sistema de referência nacional Hayford Gauss Militar. Uma vez completo o processo de aerotriangulação, procede-se à orto-retificação de todas as imagens e à posterior geração do ortomosaico. Para a geração do mosaico, recortam-se as imagens utilizando um algoritmo de máximo nadir de forma a minimizar os efeitos direcionais causados pela geometria de visão.

O produto final é apresentado no seguinte formato: imagens de temperatura (°K.100), GeoTIFF 16 bits (*unsigned int*), resolução espacial de 40 cm (pixel).

3.4.2.4 Parâmetros Estimados

Obtiveram-se imagens térmicas com elevada representação espacial, após calibração e correção das imagens originais. Pode utilizar-se estas imagens na estimativa do índice de stress da cultura, aquando da realização da missão, informação útil que traduza a disponibilidade de água no solo em cada instante, traduzida por indicadores de stress hídrico, diferencial térmico entre a temperatura do coberto e a temperatura do ar.

A validação da informação traduzida pelas imagens térmicas, obtidas com a plataforma aérea não tripulada, foi feita com base na informação de campo monitorizada no dia e hora em que as missões (voos) foram realizadas. Esse controlo de campo consistiu na recolha de amostras de solo, especialmente

distribuídas, para posterior determinação laboratorial da disponibilidade de água no solo. Esta amostragem foi feita recorrendo ao método gravimétrico, pelo facto de esta componente experimental já ter sido programada tardiamente, o que impossibilitou a instalação de um sistema de tubos de acesso à sonda TDR semelhante ao utilizado no ano de 2007. Assim, devido à morosidade associada ao método gravimétrico, apenas foram recolhidas amostras em 7/6 pontos de controlo por parcela experimental (um total de 26 pontos monitorizados), com a seguinte representatividade do perfil de solo considerado: uma amostra por cada camada de 20 cm até à profundidade de 60 cm.

A Figura 3.29 representa a localização dos pontos monitorizados nas quatro parcelas experimentais, onde foram obtidas as imagens térmicas de elevada resolução.

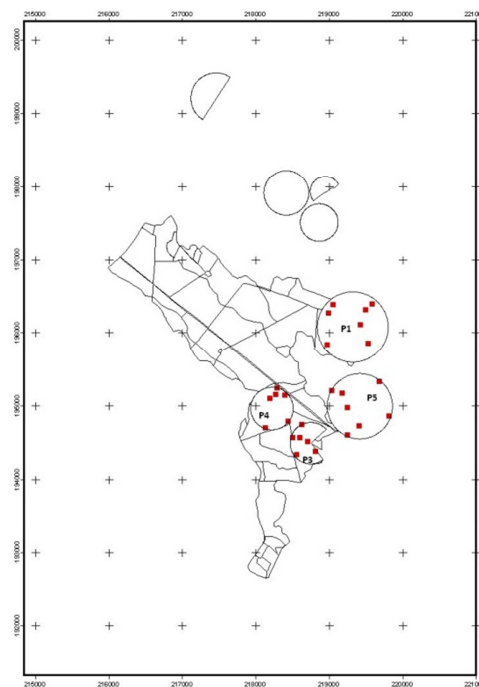


Figura 3.29: Localização dos pontos de controlo – Amostras gravimétricas – nas quatro unidades experimentais.

A interpretação e análise da informação obtida com as imagens térmicas de elevada resolução, seguiu os procedimentos e metodologias descritos por Idso *et al.* (1981), conforme descreve o capítulo 2 deste trabalho, estimando desta forma o índice de stress, CWSI. Tendo por base o limite inferior e superior de stress definidos por Toureiro *et al.* (2008), obtidos para a cultura do milho no Perímetro de Rega do Divor, mediante utilização de plataforma remota com viatura TT.

Tabela 3.9: Limite inferior e superior para estimativa do índice de stress, CWSI (Toureiro *et al.*, 2008)

Limite Inferior	$(T_c - T_a)_{Min} = -1.85(DPV) - 2.55$
Limite Superior	$(T_c - T_a)_{Max} = 2.51$

DVP: Déficit Pressão de Vapor (KPa); Ta: Temperatura do Ar (°C); Tc – Temperatura do Coberto (°C)

4**APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS**

No Capítulo 4, são apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos no presente trabalho de doutoramento, tendo como objetivo geral a definição de metodologias de gestão da água, para a determinação das necessidades reais de rega, em grandes áreas de regadio, mediante utilização de informação remota e sistemas de informação geográfica.

Organizou-se a informação obtida em três secções: a primeira relativa à informação de satélite- índices de vegetação – parâmetros agronómicos, evapotranspiração e balanço de água no solo – definição das dotações de rega; a segunda tratará a informação obtida com a utilização remota de sensores de infravermelhos (informação térmica), aerotransportados em plataforma não tripulada – definição de Índice de Stress (CWSI) e oportunidade de rega; na terceira faz-se uma análise crítica à informação obtida nas secções anteriores, com o objetivo de definir os procedimentos e metodologias de gestão da água em regadio mediante informação remota, com aplicação à escala regional – gestão da água, avisos de rega e economia da água.

4.1 Parâmetros Agronómicos, Necessidades Hídricas e Balanço de Água no Solo mediante informação de Satélite (Landsat 5 TM)**4.1.1 Considerações Gerais**

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos a partir das imagens multiespectrais de alta resolução, obtidas com o satélite Landsat 5 TM, conforme descrito no capítulo 3 deste trabalho. Os resultados apresentados reportam: os parâmetros agronómicos, as necessidades hídricas e o balanço de

água no solo, estimados a partir da relação linear com o índice de vegetação, NDVI, conforme os procedimentos descritos no capítulo das metodologias.

A Figura 4.1 ilustra as imagens RGB, obtidas com o satélite Landsat 5TM, em três datas distintas, correspondentes aos estádios de desenvolvimento principais da cultura do milho, nas sete unidades experimentais.

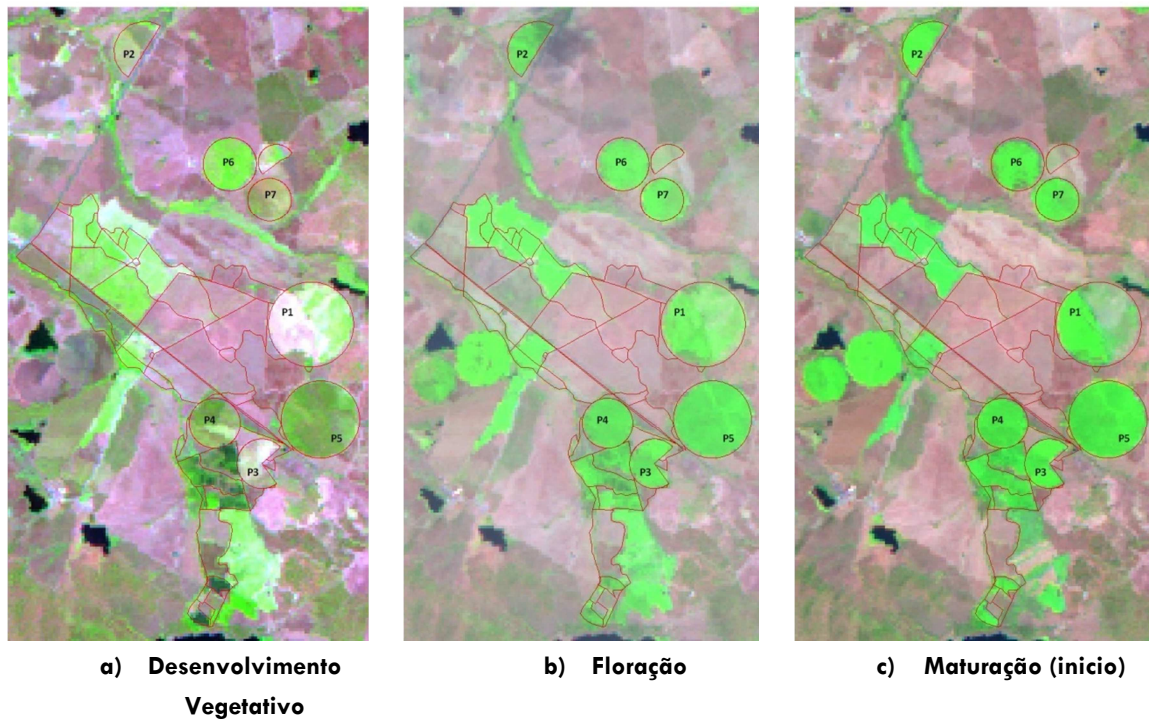


Figura 4.1: Imagens RGB obtidas com o satélite Landsat 5TM, nas principais fases desenvolvimento da cultura do milho, no Perímetro de Rega do Divor (sete unidades experimentais), durante a campanha de rega de 2007

As imagens RGB apresentadas comprovam a informação que consta no Quadro 3.3 relativamente às datas de sementeira, das sete unidades experimentais: as parcelas 1 e 3 foram as últimas a serem semeadas (1 de Junho e 31 de Maio, respetivamente), a parcela 6 foi a primeira a ser semeada (11 de Maio). As parcelas 2, 4, 5 e 7 foram semeadas na mesma altura (18 e 23 de Maio). Relativamente à duração do ciclo da cultura, as parcelas 1, 3 e 7 registaram variedades de ciclos mais curtos, cerca de 128 e 145 dias.

É ainda de salientar o seguinte, na parcela 1 apenas metade da área foi ocupada pela cultura do milho, na restante área a ocupação cultural era Girassol, tal como é possível verificar na Figura 4.1.

A Figura 4.2 ilustra duas imagens RGB que tiveram de ser anuladas do estudo, devido à presença de nebulosidade no dia em que passou o satélite, nas seguintes datas: 28 Maio e 13 de Junho. Para obter informação durante o período inicial do desenvolvimento da cultura do milho, seria necessário recorrer à interpolação entre as imagens disponíveis, durante os dias: 09 de Março e 29 de Junho. No caso de estudo, esta alternativa não se revelou uma solução eficaz pois a imagem do dia 09 de Março não

representará com fiabilidade a evolução do crescimento da cultura do milho, uma vez que a sua instalação no Perímetro só começou em Maio, seria necessário ter disponível uma imagem do início de Maio para poder interpolar com a imagem do dia 29 de Junho. A imagem do dia 09 de Março representa sim a vegetação natural, pois nesta data os agricultores ainda não tinham iniciado os trabalhos de preparação da terra.

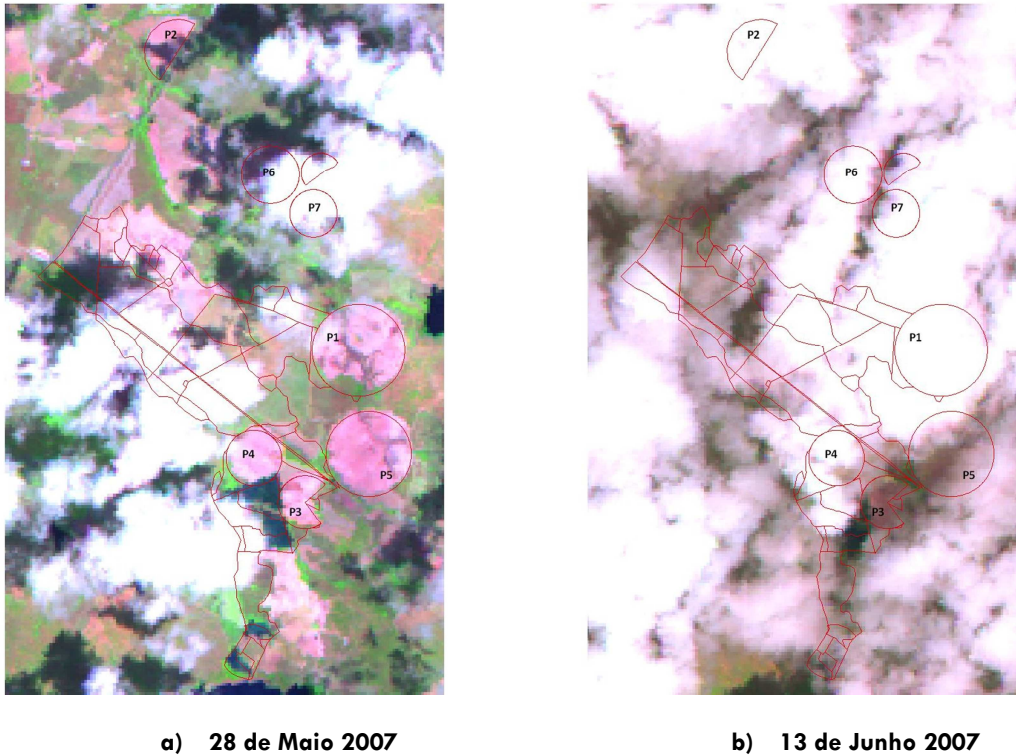


Figura 4.2: Imagens RGB dos dias 28 de Maio e 13 de Junho de 2007, eliminadas do estudo pela presença de nebulosidade acentuada

A ocorrência de condições atmosféricas desfavoráveis à captação das imagens multiespectrais de satélite é uma limitação desta técnica de deteção remota, pelo facto da maior parte dos satélites de alta resolução terem ciclos de passagem superiores a 16 dias e a impossibilidade de programação das missões, leva a que muitas vezes fiquemos sem informação durante períodos significativos, tendo de recorrer à interpolação da informação disponível, ou então, caso seja possível, recorrer a outro tipo de imagens, provenientes de outro satélite.

4.1.2. Índice de Vegetação “NDVI” e desenvolvimento da Cultura

A Figura 4.3 ilustra o valor médio de NDVI nas 7 unidades experimentais durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, assim como a definição das 3 principais fases de desenvolvimento da cultura do milho.

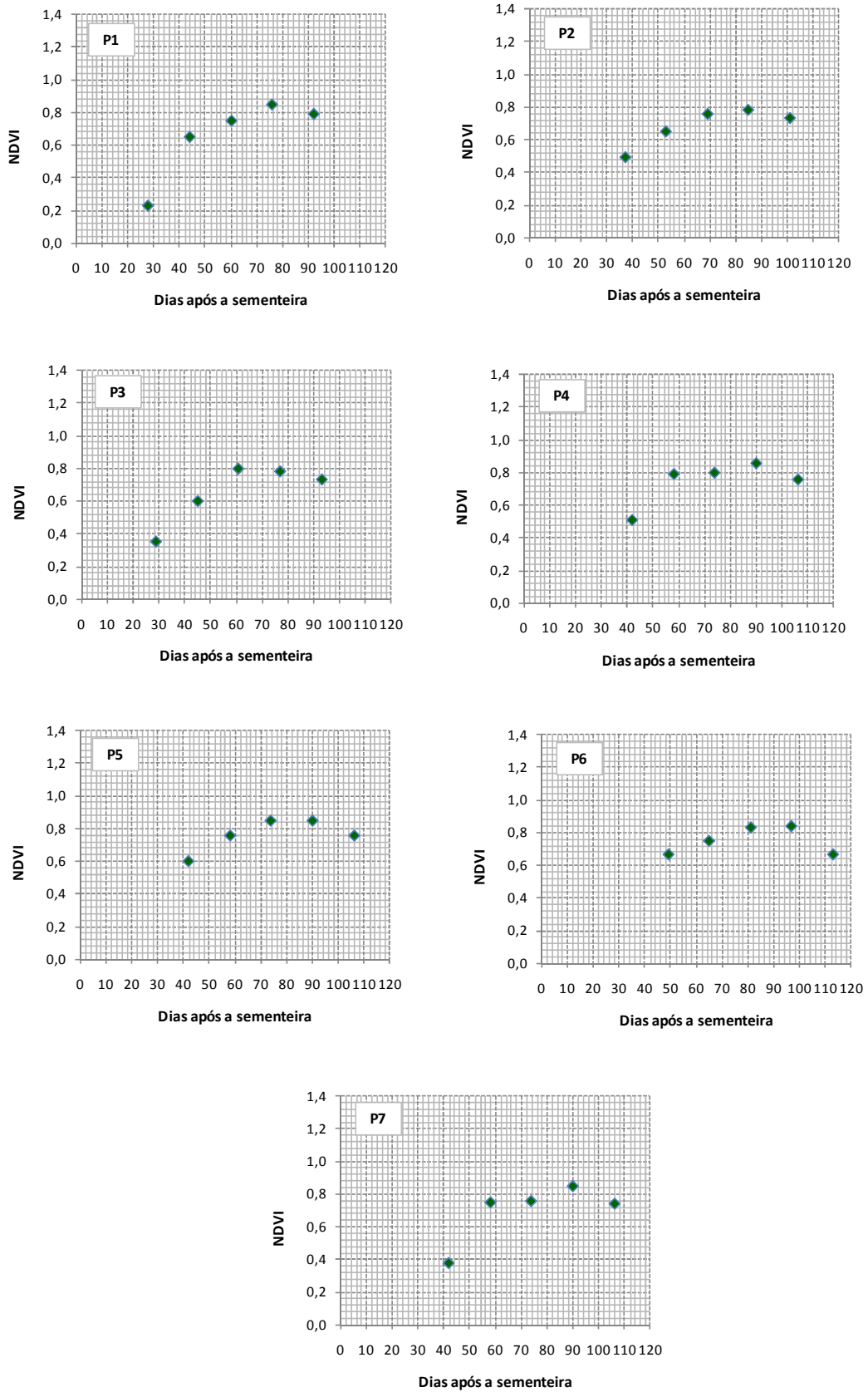


Figura 4.3: Evolução temporal dos valores de NDVI e registo do início da floração, nas 7 unidades experimentais

Os valores de NDVI obtidos a partir da informação de satélite Landsat 5, nas datas 29 de Junho, 15 de Julho, 31 de Julho, 16 de Agosto e 1 de Setembro, definem com clareza as principais fases de desenvolvimento da cultura: desenvolvimento vegetativo (quando os valores de NDVI vão aumentando até atingirem o máximo), floração (quando os valores de NDVI atingem o valor máximo) e início da maturação (quando os valores de NDVI sofrem um decréscimo).

É de referir o seguinte: as parcelas experimentais onde o início da floração ocorreu mais cedo foram as parcelas 3 e 5, eventualmente relacionado com a variedade da cultura, diferentes nestas parcelas. As parcelas 2, 4 e 7 registaram um início da floração mais tardio, 90 dias após a sementeira, e as parcelas 1 e 6 aos 80 dias após a sementeira.

Se relacionarmos as observações verificadas com os valores de referência registados pela FAO (Allen *et al.*, 1998) para duração das fases de desenvolvimento da cultura do milho, facilmente concluímos o que outros autores já referiram: a duração das fases registadas pela FAO, apenas nos servem de indicação aproximada, sendo variáveis em função da variedade da cultura, condições ambientais e técnicas agrícolas em que se desenvolve.

O Quadro 3.3 do ponto 3.2.1 deste trabalho regista a duração das fases de desenvolvimento da cultura, nas 7 unidades experimentais, onde se pode constatar que de uma forma geral a duração total do ciclo da cultura, nas 7 unidades experimentais é mais curto que o valor de referência (150 dias), a fase 3 – floração e formação do grão inicia-se mais tarde, que os valores de referência, à exceção das parcelas 3 e 4, tal como referido, e a senescência das folhas aconteceu relativamente cedo, muito provavelmente associado a alguma carência hídrica com adiante termos oportunidade de verificar.

Conclui-se o seguinte: o conhecimento da duração das fases de desenvolvimento das culturas é muito importante para a definição das necessidades hídricas das culturas regadas. A realização de trabalho experimental à escala local e a sua relação com a informação traduzida por as técnicas de deteção remota parece ser a forma mais eficaz de acompanhar a evolução das culturas à escala regional.

4.1.3. Parâmetros Agronómicos: desenvolvimento da cultura do milho na área em estudo

4.1.3.1 Índice de Vegetação NDVI “*Normalized Difference Vegetation Index*” e Desenvolvimento da Cultura (altura da cultura, fração de cobertura do solo pela cultura e índice de área foliar)

A Figura 4.4, ilustra os valores médios da altura da cultura medidos nas 7 unidades experimentais, e os valores de NDVI obtidos a partir das imagens Landsat 5.

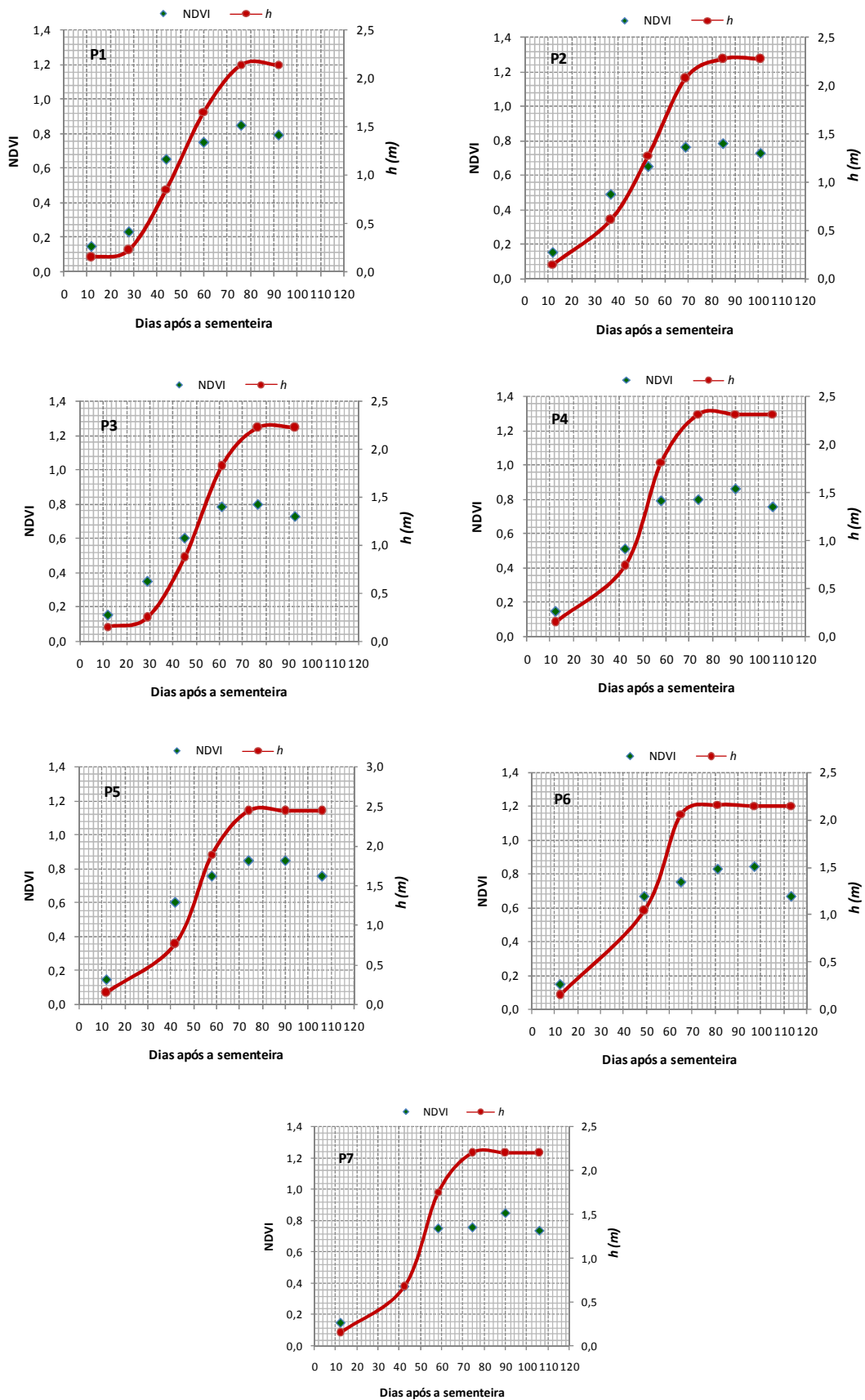


Figura 4.4: Altura da Cultura e NDVI nas 7 unidades experimentais

De acordo com os resultados apresentados em bibliografia (Rouse *et al.*, 1974; Bausch e Neale, 1987; Neale *et al.* (1989), selecionou-se o índice de vegetação (IV), NDVI para análise dos parâmetros agronômicos que caracterizam o desenvolvimento da cultura do milho, mediante imagens multiespectrais de alta resolução, Landsat 5 TM. Os parâmetros agronômicos medidos e estimados mediante informação experimental e informação de satélite foram: altura da cultura, fração de cobertura (f_c), índice de área foliar (IAF) e outros parâmetros relacionados com o ritmo de crescimento, como por exemplo a fração da radiação fotossintética activa absorvida (f_{APAR}).

As Figuras 4.5 a 4.11 ilustram a curva de NDVI e parâmetros agronômicos: fração de cobertura do solo pela cultura (f_c), índice de área foliar (IAF ou LAI) e a fração da radiação fotossinteticamente activa absorvida (f_{APAR}). O IAF foi obtido por controlo de campo mediante a metodologia descrita no capítulo 3, a f_c foi estimada mediante procedimento descrito no capítulo 3, a partir de uma relação linear traduzida por González-Piqueras (2006), para a cultura do milho, a qual relaciona IAF e f_c , a f_{APAR} é estimada a partir da relação matemática f_{APAR} com NDVI obtida por González-Piqueras (2006), tal como se descreve no capítulo 3. Os valores apresentados resultaram de uma média entre os valores verificados nos pontos de controlo (Figura 3.16), em cada unidade experimental (42 estações de controlo).

Os parâmetros altura da cultura e índice de área foliar foram obtidos mediante informação experimental, a fração de cobertura do solo e a radiação fotossintética activa absorvida, foram estimados com base nas expressões analíticas disponíveis em bibliografia (González-Piqueras, 2006). Para a fração de cobertura do solo (f_c) utilizou-se a expressão matemática que relaciona índice de área foliar e fração de cobertura do solo, obtida por González *et al.* (2006); a fração da radiação fotossintética activa absorvida (f_{APAR}) foi estimada pela expressão matemática $f_{APAR}/NDVI$ traduzida também por González-Piqueras (2006).

Para analisar as ilustrações apresentadas, importa ter presente o seguinte: os valores de referência apresentados pela FAO (Allen *et al.*, 1998) para a duração das fases de desenvolvimento da cultura e duração do ciclo cultural, com sementeira em Abril, nas regiões mediterrâneas, são meramente indicativos, variando em função da variedade, práticas agronômicas e de rega, parâmetros meteorológicos, pragas e doenças, etc.

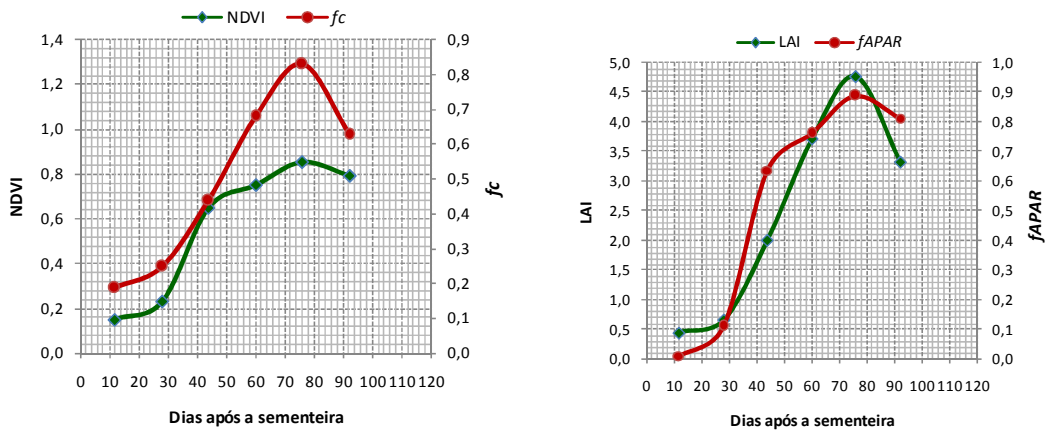


Figura 4.5: Curvas de NDVI, f_c , LAI e f_{APAR} calculadas na parcela experimental 1

No capítulo 3 é feita referência às fases de desenvolvimento verificadas no campo. Confrontando esta informação com as curvas dos parâmetros agronômicos ilustradas na Figura 4.3, verifica-se o seguinte, para a parcela experimental 1: as principais fases de desenvolvimento da cultura do milho são identificadas pelo valor de NDVI, estando de acordo com as fases observadas no campo, com o máximo valor de NDVI (0.85) a corresponder à fase de plena floração (fase C, entre 65 e 95 dias após a sementeira). É de referir que apenas existe informação de satélite até dia 1 de Setembro. Nessa altura já se verifica o início da fase de maturação, quando o valor de NDVI começa a baixar, assim como todos os outros parâmetros agronômicos representados (f_c , LAI, F_{APAR}). Na parcela 1, verificou-se cerca de 85% de fração de cobertura do solo, quando a cultura atingiu o máximo Índice de Área Foliar (4.77) e a máxima fração da radiação fotossintética activa absorvida (89%). É de referir que a cultura, logo a seguir à fase de máximo LAI, inicia a senescência foliar (menores valores de NDVI e parâmetros agronômicos que caracterizam a taxa de coberto fotossinteticamente activa). Este fenómeno poderá estar associado ao défice hídrico verificado durante a fase de maiores necessidades de água (floração e formação do grão).

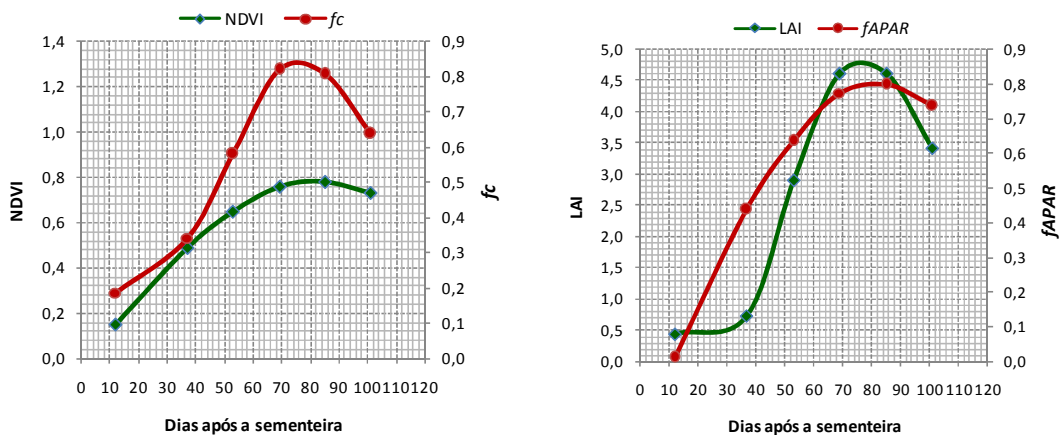


Figura 4.6: Curvas de NDVI, f_c , LAI e f_{APAR} calculadas na parcela experimental 2

Verifica-se o seguinte, para a parcela experimental 2: à semelhança da parcela 1, as principais fases de desenvolvimento da cultura do milho são identificadas pelo valor de NDVI, fazendo coincidir com a duração das fases observadas no campo, com o máximo valor de NDVI (0.78) a corresponder à fase de plena floração (fase C, entre 70 e 95 dias após a sementeira). Na parcela 2, verificou-se cerca de 82% de fração de cobertura do solo, quando a cultura atingiu o máximo Índice de Área Foliar (4,60) e a máxima fração da radiação fotossintética activa absorvida (80%). É de referir o seguinte: a duração da fase C (floração e formação do grão) foi mais curta (30 dias), que os valores padrão apresentados pela FAO (50 dias). A fase B (desenvolvimento vegetativo rápido) foi mais longa (45 dias), pelo facto da cultura na parcela 2 ter sido instalada mais cedo do que na parcela 1, quando as temperaturas ainda estavam amenas (importa referir que o valor padrão apresentado pela FAO, refere uma duração de 40 dias, para esta fase). Relativamente ao estudo comparativo entre o desenvolvimento da cultura e disponibilidade de água no solo, durante ao ciclo cultural, será objeto de estudo mais adiante.

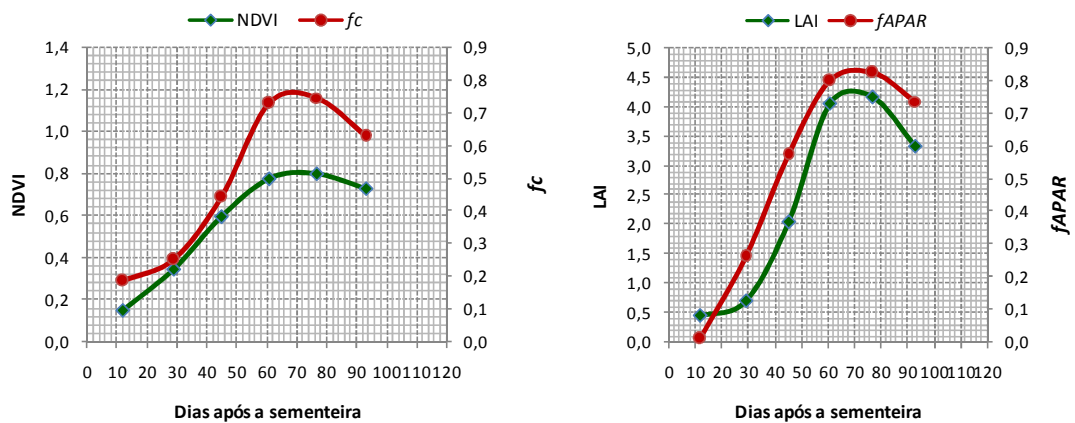


Figura 4.7: Curvas de NDVI, fc , LAI e f_{APAR} calculadas na parcela experimental 3

Verifica-se o seguinte, para a parcela experimental 3: as principais fases de desenvolvimento da cultura do milho são identificadas pelo valor de NDVI, fazendo coincidir com a duração das fases observadas no campo, com o máximo valor de NDVI (0.80) a corresponder à fase de plena floração (fase C, entre 60 e 88 dias após a sementeira). Na parcela 3, verificou-se cerca de 80% de fração de cobertura do solo, quando a cultura atingiu o máximo Índice de Área Foliar (4,18) e a máxima fração da radiação fotossintética activa absorvida (88%). É de referir o seguinte: a fase C ocorreu mais cedo (60 dias após a sementeira), pelo facto de a cultura instalada na parcela 3 ter um ciclo mais curto (semeada mais tarde, a 31 de Maio). Relativamente ao estudo comparativo entre o desenvolvimento da cultura e disponibilidade de água no solo durante o ciclo cultural, será objeto de estudo mais adiante. No entanto, já é possível verificar que a senescência acelerada das folhas, aos 85 dias, ainda durante a fase de floração e formação do grão (redução dos valores de NDVI e consequentemente dos parâmetros agrónomicos que

caracterizam a área foliar, fc e LAI), deverá estar associada ao déficit hídrico verificado na parcela, durante as fases de maiores necessidades hídricas.

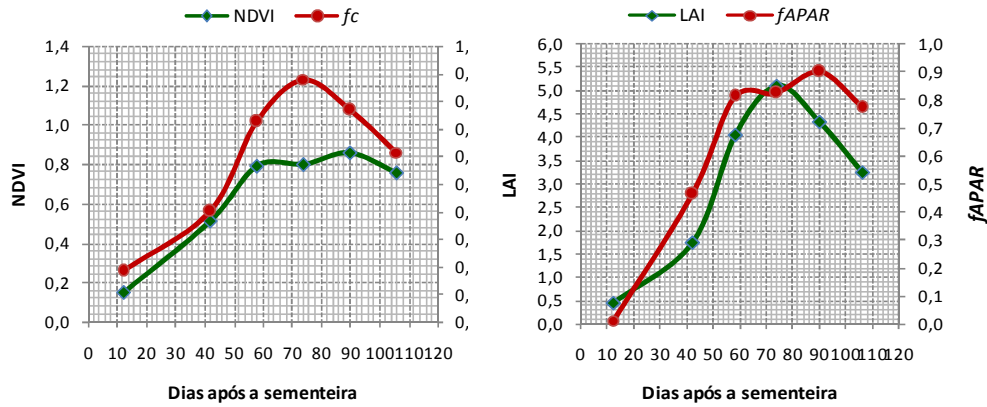


Figura 4.8: Curvas de NDVI, fc , LAI e f_{APAR} calculadas na parcela experimental 4

Verifica-se o seguinte, para a parcela experimental 4: as principais fases de desenvolvimento da cultura do milho são identificadas pelo valor de NDVI, coincidindo com a duração das fases observadas no campo, com o máximo valor de NDVI (0.86), a corresponder à fase de plena floração (fase C, entre 70 e 95 dias após a sementeira). Na parcela 4, verificou-se cerca de 88% de fração de cobertura do solo, quando a cultura atingiu o máximo Índice de Área Foliar (5.11) e a máxima fração da radiação fotossintética activa absorvida (90%). É possível verificar que a senescência acelerada das folhas, aos 80 DAS, ainda na fase de floração e formação do grão (redução dos valores de NDVI e consequentemente dos parâmetros agrónomicos que caracterizam a área foliar, fc e LAI), deverá estar associada ao déficit hídrico verificado na parcela, durante as fases de maiores necessidades hídricas. Os pontos de inflexão observados também estão associados ao stress hídrico verificado.

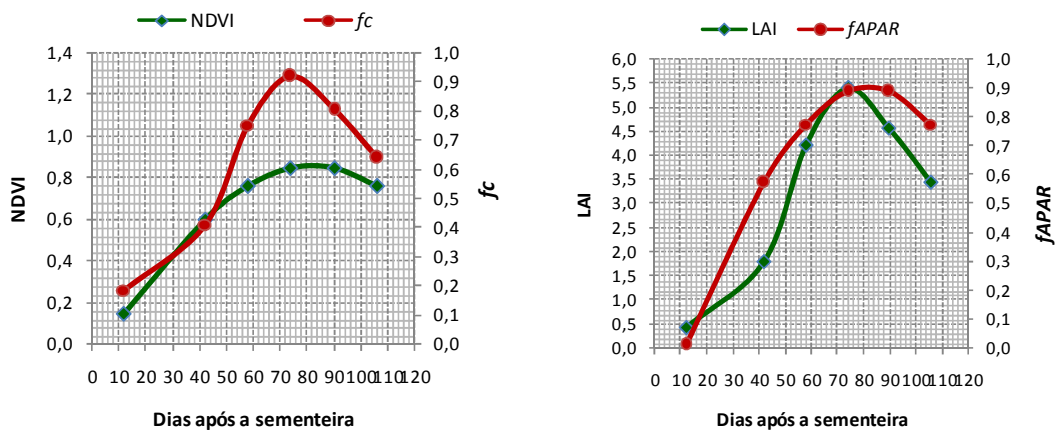


Figura 4.9: Curvas de NDVI, fc , LAI e f_{APAR} calculadas na parcela experimental 5

Verifica-se o seguinte, para a parcela experimental 5: as principais fases de desenvolvimento da cultura do milho são identificadas pelo valor de NDVI, coincidindo com a duração das fases observadas no campo, com o máximo valor de NDVI (0.85), a corresponder à fase de plena floração (fase C, entre 70 e 100 dias após a sementeira). Na parcela 5, verificou-se cerca de 86% de fração de cobertura do solo, quando a cultura atingiu o máximo Índice de Área Foliar (5.39) e a máxima fração da radiação fotossintética ativa absorvida (91%). Nesta parcela também se verifica uma senescência acelerada das folhas (redução dos valores de NDVI e consequentemente dos parâmetros agrónomicos que caracterizam a área foliar, fc e LAI), facto que será comprovado com o estudo da disponibilidade de água durante o ciclo, mais adiante.

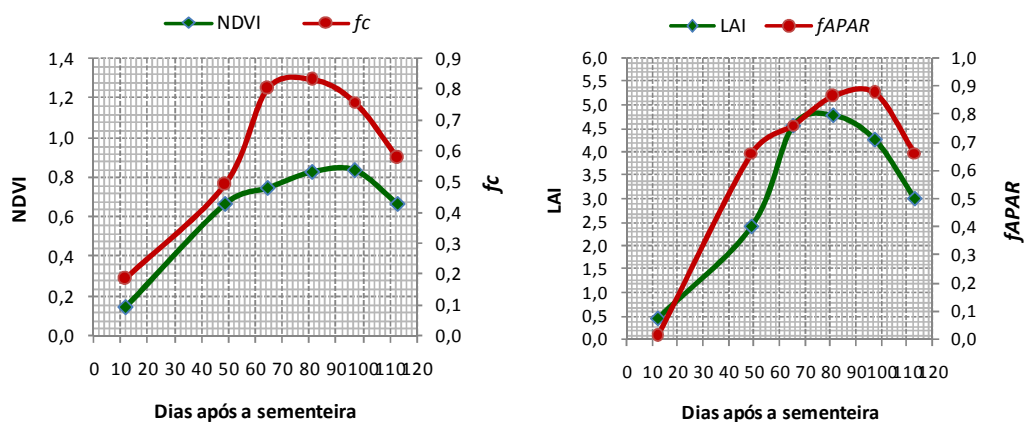


Figura 4.10: Curvas de NDVI, fc , LAI e f_{APAR} calculadas na parcela experimental 6

Verifica-se o seguinte, para a parcela experimental 6: as principais fases de desenvolvimento da cultura do milho são identificadas pelo valor de NDVI, coincidindo com a duração das fases observadas no campo, com o máximo valor de NDVI (0.84) corresponde à fase de plena floração (fase C, entre 65 e 100 dias após a sementeira). Na parcela 6, verificou-se cerca de 82% de fração de cobertura do solo, quando a cultura atingiu o máximo Índice de Área Foliar (4.78) e a máxima fração da radiação fotossintética activa absorvida (90%). É de referir o seguinte: a fase C, ocorreu mais cedo (60 dias após a sementeira), pelo facto de variedade instalada na parcela 6 ter um ciclo mais curto, foi semeada mais cedo, a 11 de Maio. A duração da fase 3, também foi mais curta (30 dias) que a duração apontada pela FAO (50 dias).

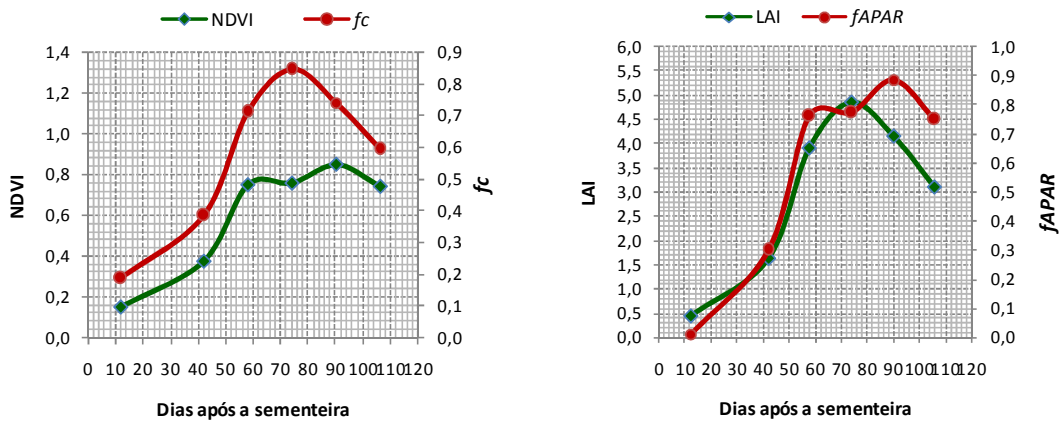


Figura 4.11: Curvas de NDVI, fc , LAI e f_{APAR} calculadas na parcela experimental 7

Verifica-se o seguinte, para a parcela experimental 7: as principais fases de desenvolvimento da cultura do milho são identificadas pelo valor de NDVI, coincidir com a duração das fases observadas no campo, com o máximo valor de NDVI (0.85) a corresponder à fase de plena floração (fase C, entre 80 e 105 dias após a sementeira). Na parcela 7, verificou-se cerca de 85% de fração de cobertura do solo, quando a cultura atingiu o máximo Índice de Área Foliar (4.87) e a máxima fração da radiação fotossintética activa absorvida (91%). É de referir o seguinte: a fase C ocorreu mais tarde (80 dias após a sementeira), com prolongamento da fase inicial de desenvolvimento vegetativo, devido a problemas no estabelecimento da cultura, com dificuldades de germinação, pelo facto de existirem demasiados resíduos da cultura anterior.

Nas parcelas experimentais 2, 4, 5, 6 e 7, portanto à exceção das parcelas 1 e 3, a fase inicial de desenvolvimento vegetativo não se mostra evidente nas curvas de desenvolvimento ilustradas nas figuras anteriores, porque o intervalo entre a 1ª informação de satélite e a 2ª é demasiado longo, muitas vezes superior a 30 dias, não permitindo evidenciar esta fase de desenvolvimento, com duração aproximada de 25 dias.

De uma forma geral, em todas as parcelas experimentais a duração das fase de desenvolvimento vegetativo foi mais longa que o valor de referência registado pela FAO. A fase 3 – floração e formação do grão – mais curta (cerca de 20 dias em relação aos valores de referência), este facto deverá estar associado à data em que ocorreu a sementeira, em todas as parcelas aconteceu depois de Abril.

A Figura 4.12 traduz a relação encontrada para a região – Perímetro de Rega do Divor - entre NDVI e LAI, para a cultura do Milho. Apesar de os dados mostrarem uma forte linearidade entre estas duas variáveis, a curva que melhor se ajustou foi do tipo exponencial, tal como ilustra a Figura.

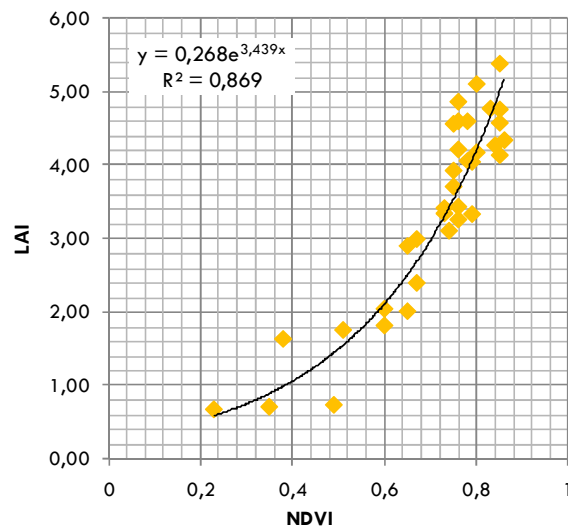


Figura 4.12: Correlação o índice de vegetação (NDVI) obtido a partir das imagens de satélite Landsat 5 TM e o índice de área foliar (LAI) obtido a partir de informação experimental

É de referir o seguinte: são geralmente lineares as relações encontradas em bibliografia (Quadro 3.7, capítulo 3) entre NDVI e f_c , como por exemplo em González *et al.* (2006) e Calera *et al.* (2006). No entanto, para a unidade experimental do Divor, a curva que melhor se ajustou aos dados de campo foi do tipo exponencial, com um coeficiente de determinação de 89%.

À semelhança da relação encontrada no projeto PLEIADeS, a expressão matemática que relaciona NDVI e LAI para a área experimental do Divor, com a cultura do milho, é do tipo exponencial, com um coeficiente de determinação de 87%. Outras relações encontradas em bibliografia mostram relações do tipo logaritmo (González *et al.*, 2006), como se descreve no ponto 3.4.1.3 deste trabalho.

4.1.3.2. Evapotranspiração Cultural: coeficientes culturais reais, espectrais e da FAO

A Figura 4.13 ilustra as curvas de K_c reais em cada parcela experimental, obtidas mediante os procedimentos de cálculo da FAO, para a realização do balanço hídrico, descritos no capítulo 3 deste trabalho. A base de cálculo foi a equação do balanço hídrico do solo, os teores de água no solo (monitorizados com a sonda TDR, durante a campanha de rega), as dotações de rega e os dados meteorológicos (precipitação e evapotranspiração de referência).

Os valores de K_{cb} foram determinados mediante a metodologia descrita no capítulo 3, tendo-se determinado os valores de K_e , para cada unidade experimental.

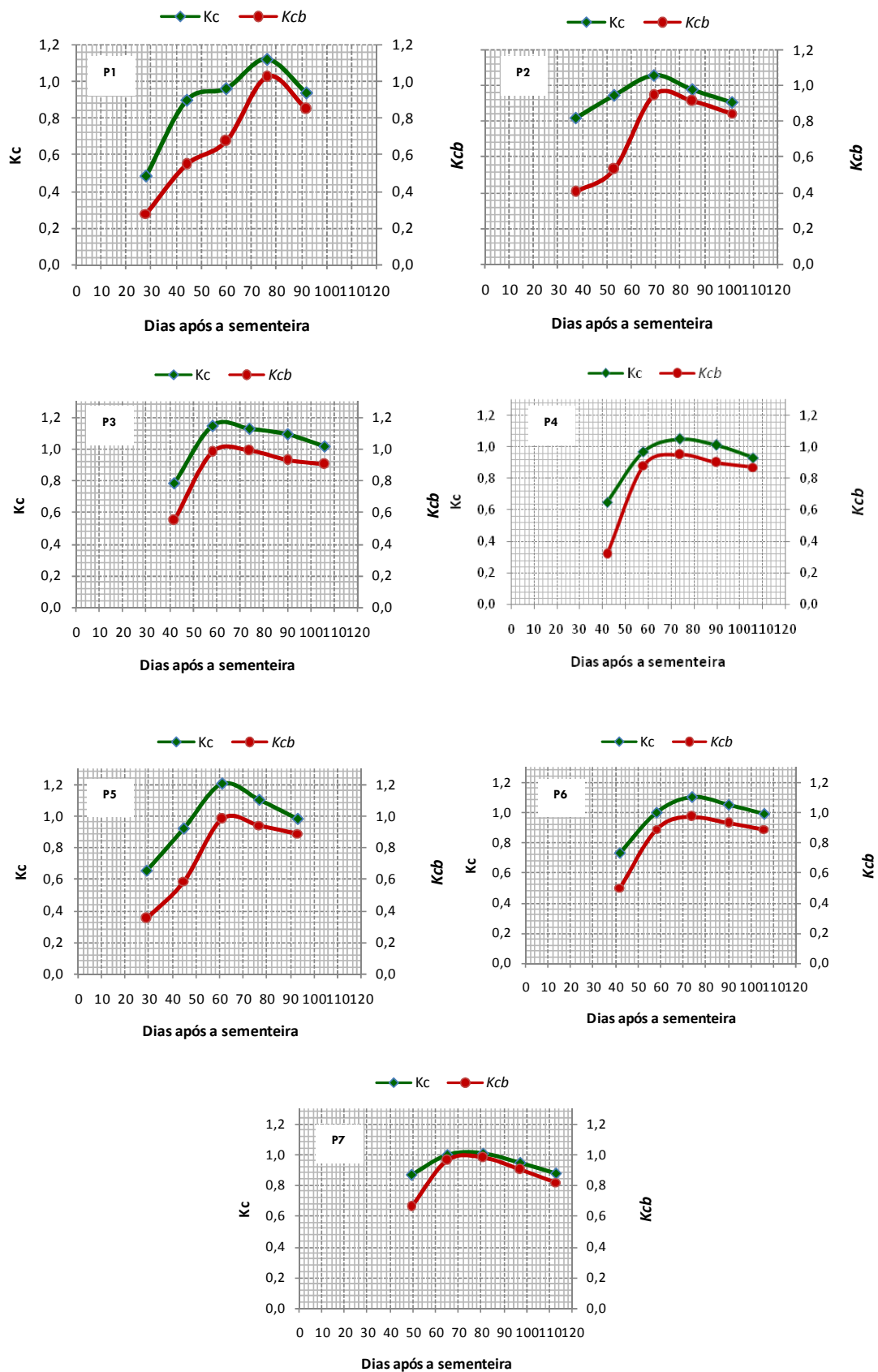


Figura 4.13: Curvas de K_c e K_{cb} reais nas parcelas experimentais 1 a 7

A Figura 4.14 traduz as expressões matemáticas que relacionam os valores de Kc e Kcb reais, obtidos mediante balanço hídrico do solo, para cada unidade experimental do Perímetro de rega do Divor, com os valores de NDVI obtidos a partir das imagens de satélite Landsat.

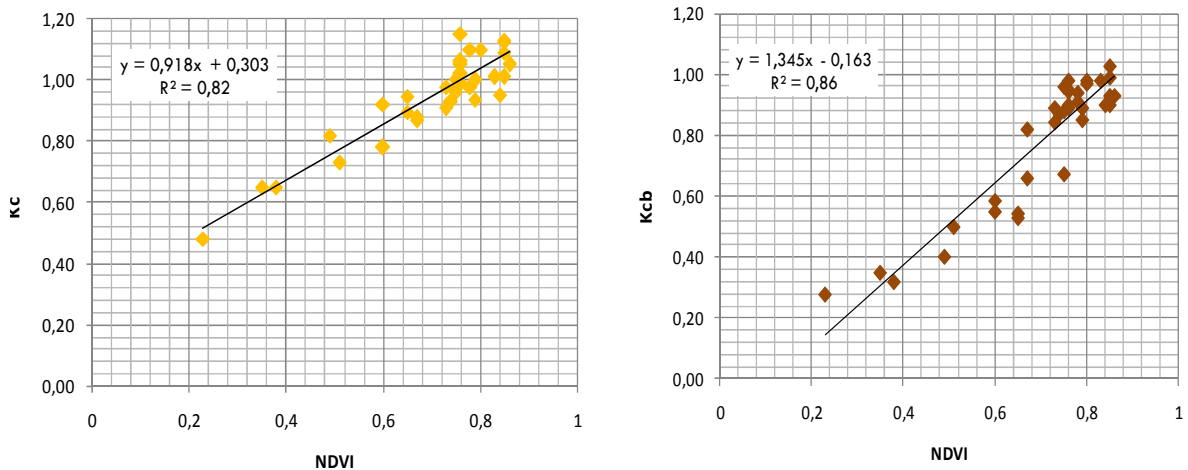


Figura 4.14: Relação linear Kc e Kcb com NDVI, encontrada para o Perímetro de Rega do Divor

À semelhança de outros autores, as expressões obtidas são do tipo linear, com coeficiente de determinação na ordem dos 80%. Estas expressões serão a base para a determinação dos coeficientes culturais a partir das imagens de satélite, cujo objetivo central será apoiar um esquema de gestão da água de rega no Perímetro de Rega do Divor.

As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam as diferentes curvas de Kcb* e Kc, calculadas mediante as expressões analíticas (conforme registado no Quadro 3.8 do capítulo 3) dos autores Bausch e Neale (1987), Neale (1989), González-Piqueras (2006) e Calera *et al.* (2005), na parcela experimental 1. Representa-se as curvas de Kc e Kcb real obtidas para a região do Divor, mediante informação experimental (balanço de água no solo e monitorização da disponibilidade hídrica) e as curvas padrão indicadas pela FAO (Allen *et al.*, 1998).

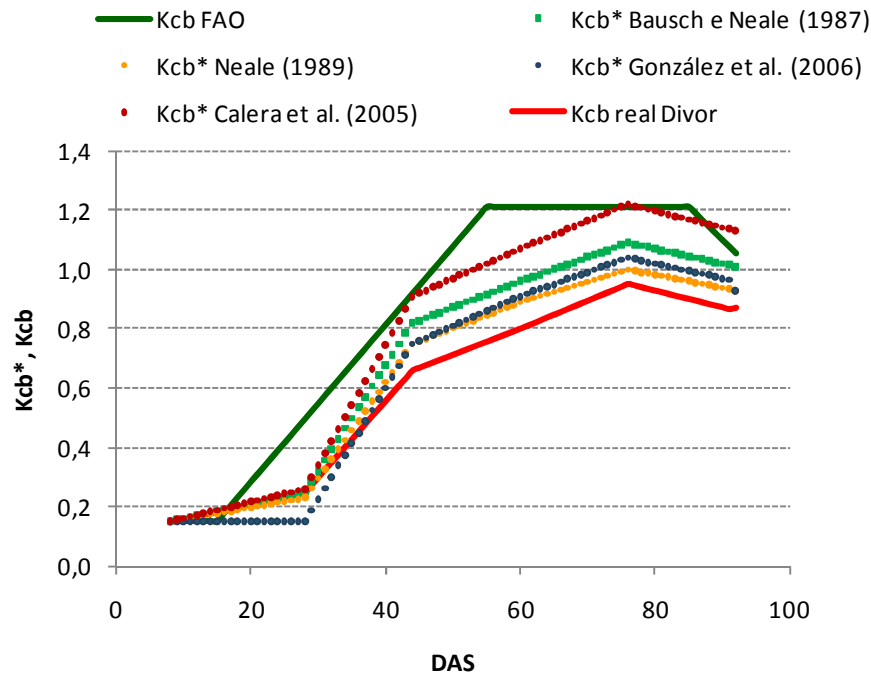


Figura 4.15: Curvas de Coeficiente Cultural Basal (K_{cb}^*) calculado com base no índice de vegetação (NDVI) e tabelado pela FAO (K_{cb}) (Allen *et al.*, 1998), para a parcela experimental 1

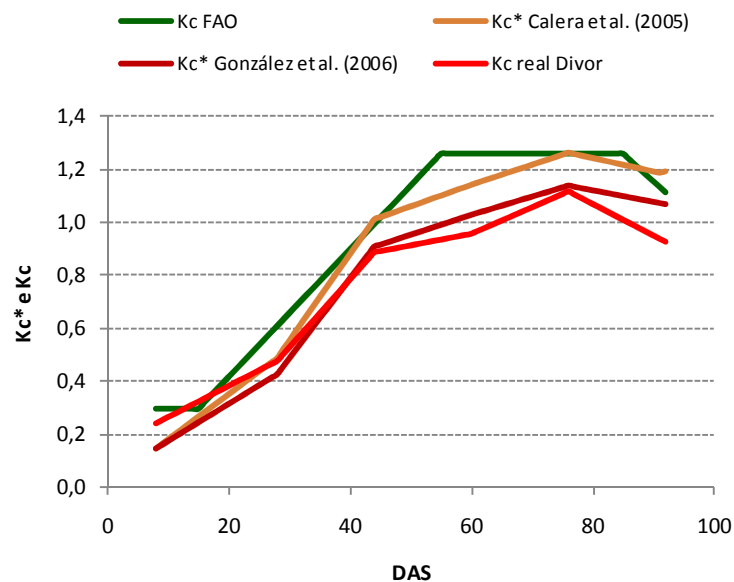


Figura 4.16: Coeficiente Cultural (K_c^*) calculado com base no índice de vegetação (NDVI) e tabelado pela FAO (K_c) (Allen *et al.*, 1998), para a parcela experimental 1

As diferentes curvas de K_{cb}^* , obtidas com base nas expressões dos diferentes autores (Quadro 3.8, capítulo 3), apresentam uma tendência semelhante, com ligeiras diferenças na fase do desenvolvimento vegetativo, acentuando-se no final desta fase e na floração e formação do grão. Dos valores apresentados, os obtidos com a expressão analítica de Calera *et al.* (2005), são os que se destacam mais em relação aos restantes autores. As curvas de K_c e K_{cb} obtidas para a região do Divor registaram valores inferiores aos obtidos pelas expressões disponível em bibliografia, próprio das condições agronómicas e ambientais, da nossa área experimental.

A relação K_c^* com $NDVI$, mostra uma linearidade menos definida, devido à taxa de evaporação do solo, especialmente na fase inicial do desenvolvimento vegetativo, quando a fração de cobertura do solo é mais baixa. Assim, será necessário um cuidado especial na sua utilização para a estimativa das necessidades reais de água pelas culturas. Esta perda de linearidade é ainda maior na relação K_{cb}^*-NDVI . Neste caso, o cálculo semanal de K_c^* reduzirá o efeito das flutuações diárias dos valores de K_e (coeficiente de evaporação) (DEMETER, 2007).

A Figura 4.17 ilustra as curvas de K_c obtidas mediante as 3 metodologias consideradas no presente estudo – K_c real (calculado a partir da informação experimental – balanço hídrico e monitorização de água no solo), K_c^* (obtido mediante satélite, com base nos valores de $NDVI$ e expressão Figura 4.14) e K_c FAO (valores extraídos da publicação da FAO (Allen *et al.*, 1998)), em todas as unidades experimentais.

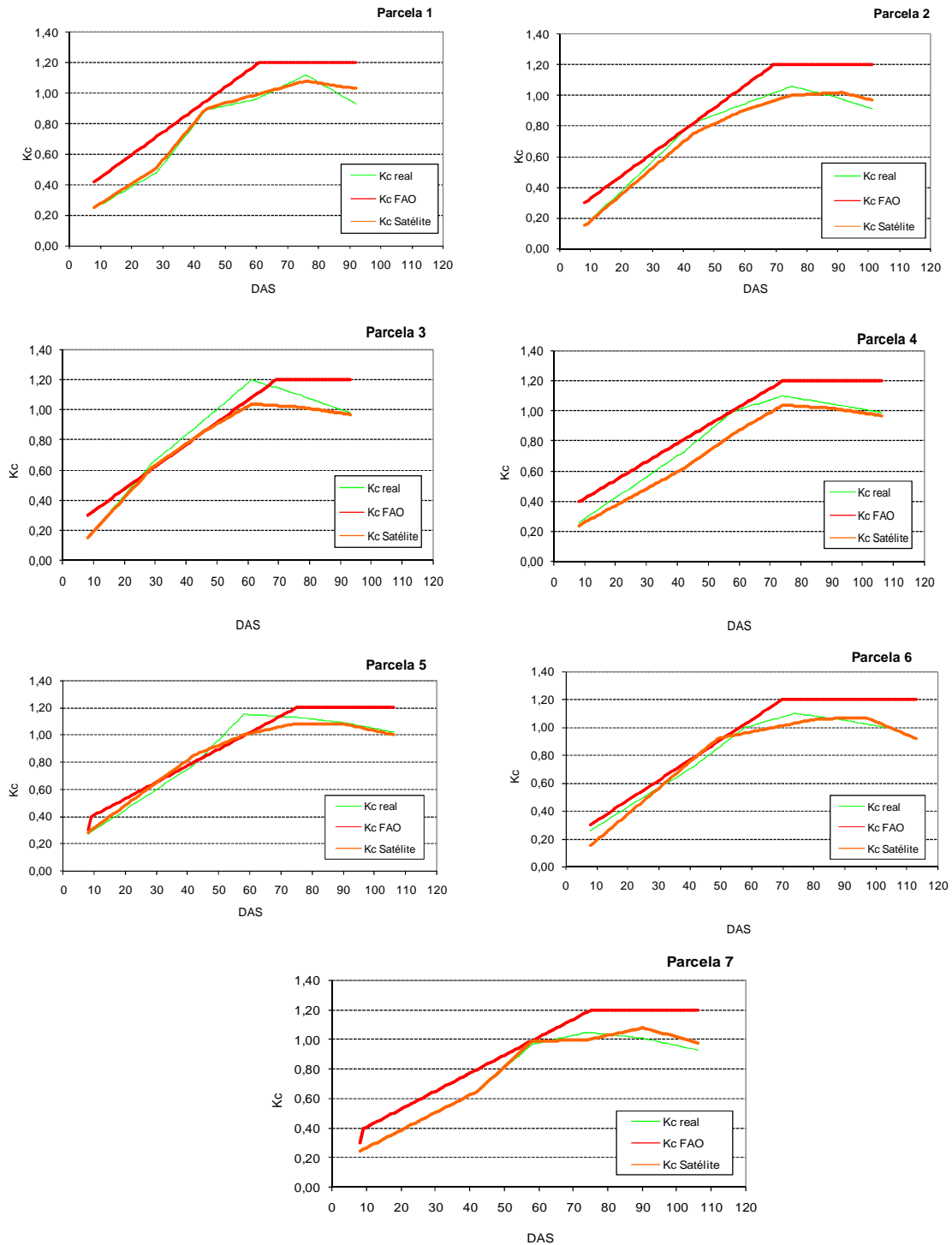


Figura 4.17: Curvas de Kc obtidas mediante a aplicação dos 3 procedimentos utilizados – informação experimental (Kc real), FAO (Kc FAO) e Satélite (Kc*), em todas as parcelas experimentais

Os valores reais (obtidos a partir do balanço hídrico do solo) e espectrais (traduzidos a partir da informação de satélite) de Kc, apresentam valores distintos comparativamente com os valores recomendados pela FAO, principalmente durante a fase de desenvolvimento vegetativo, apresentando valores inferiores, em procedimento de cálculo de ETC. Traduzirá naturalmente um menor valor de

evapotranspiração da cultura (ET_c). Este comportamento está mais evidente nas parcelas 1 e 7, porque a informação disponível pelo satélite em Junho (29 de Junho), ainda conseguiu acompanhar o início do estado vegetativo da cultura, o que já não aconteceu em algumas das parcelas, à exceção da parcela 7, onde a fase de desenvolvimento se prolongou devido a problemas de germinação, permitindo assim acompanhar o início desta fase com a informação de satélite de Junho. Este facto vem comprovar uma questão importante na utilização da informação de satélite para a determinação das necessidades hídricas das culturas, o período temporal entre disponibilização da informação de satélite deverá no mínimo, ser de 15 dias (para avaliação do estado fenológico da cultura), sendo recomendável para a condução da rega a existência de informação semanal.

As curvas de K_c apresentadas também mostram que a fase de floração e formação do grão (máximo valor de K_c^*) acontece mais tarde (à exceção das parcelas 3, 4 e 5), comparativamente com a previsão da FAO, mostrando ainda a diminuição antecipada dos valores de K_c associada à senescência das folhas da cultura. Este facto poderá estar associado ao stress hídrico ocorrido nas fases de maiores necessidades hídricas, como a seguir se pode comprovar.

Os valores de K_c apresentados na Figura 4.17, serviram de base ao cálculo dos valores de ET_c apresentados na Figuras 4.18 a 4.24.

As figuras seguintes ilustram a taxa de evapotranspiração cultural mediante os 3 procedimentos de cálculo: a) determinação experimental por balanço hídrico do solo e monitorização direta dos teores de água no solo; b) imagem de satélite; e c) cálculo mediante os coeficientes disponíveis pela FAO (Allen *et al.*, 1998). Os gráficos também representam os valores da evapotranspiração de referência (obtidos pelo método de Penman-Monteith, conforme referido no capítulo 3 das metodologias), da precipitação e rega em cada unidade experimental.

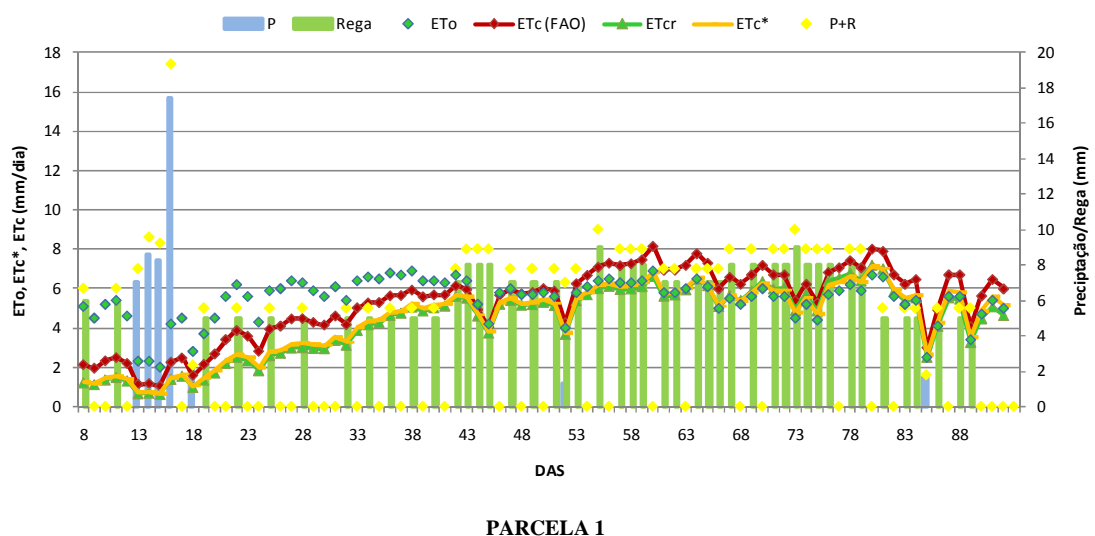
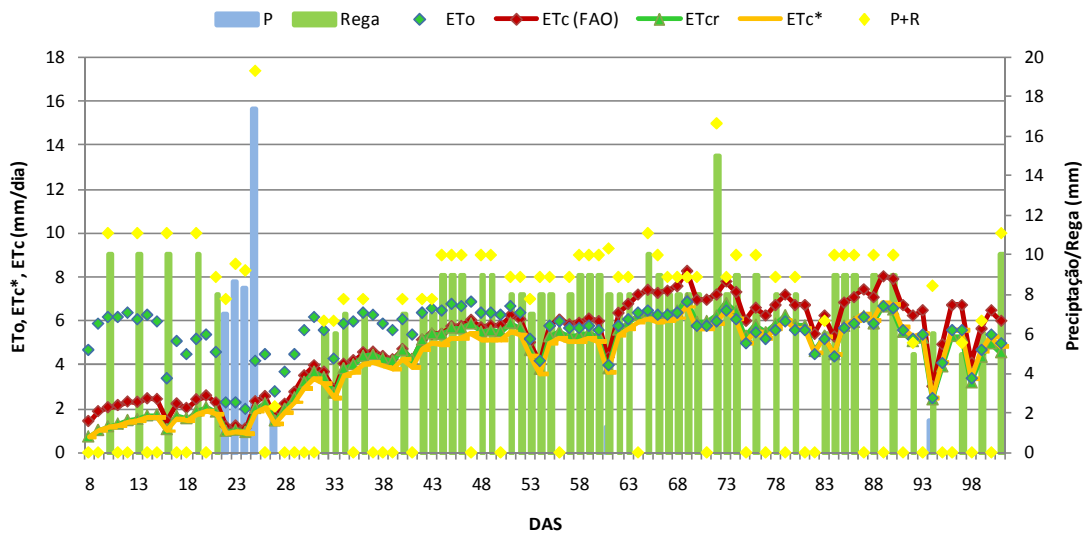
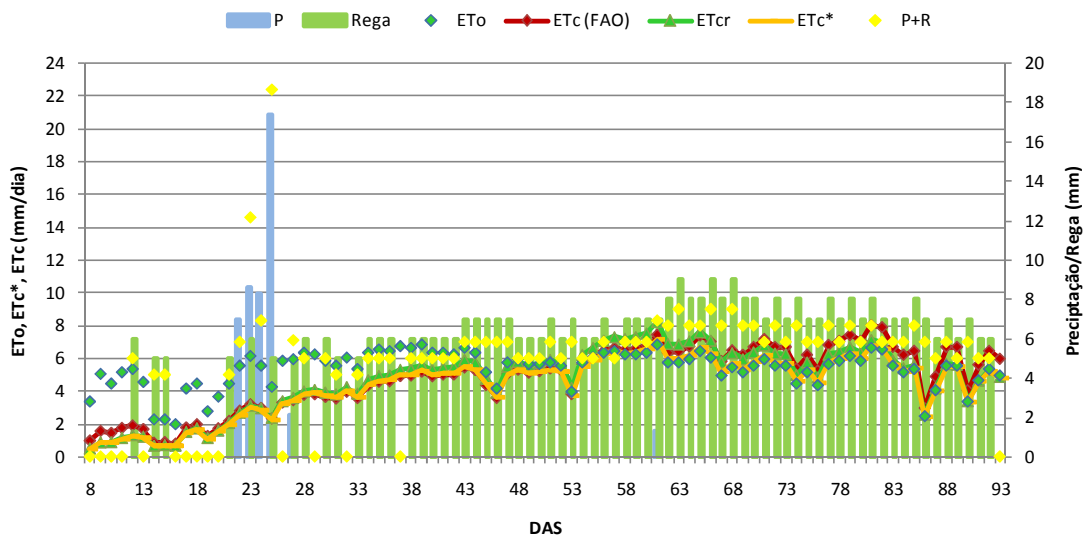


Figura 4.18: Evapotranspiração Cultural obtida mediante a aplicação dos 3 procedimentos utilizados – informação experimental (K_c real), FAO (K_c FAO) e Satélite (K_c^*), evapotranspiração de referência (ET_o), precipitação (P) e Rega (R), na parcela experimental 1



PARCELA 2

Figura 4.19: Evapotranspiração Cultural obtida mediante a aplicação dos 3 procedimentos utilizados – informação experimental (Kc real), FAO (Kc FAO) e Satélite (Kc*), evapotranspiração de referência (ETo), precipitação (P) e Rega (R), na parcela experimental 2



PARCELA 3

Figura 4.20: Evapotranspiração Cultural obtida mediante a aplicação dos 3 procedimentos utilizados – informação experimental (Kc real), FAO (Kc FAO) e Satélite (Kc*), evapotranspiração de referência (ETo), precipitação (P) e Rega (R), na parcela experimental 3

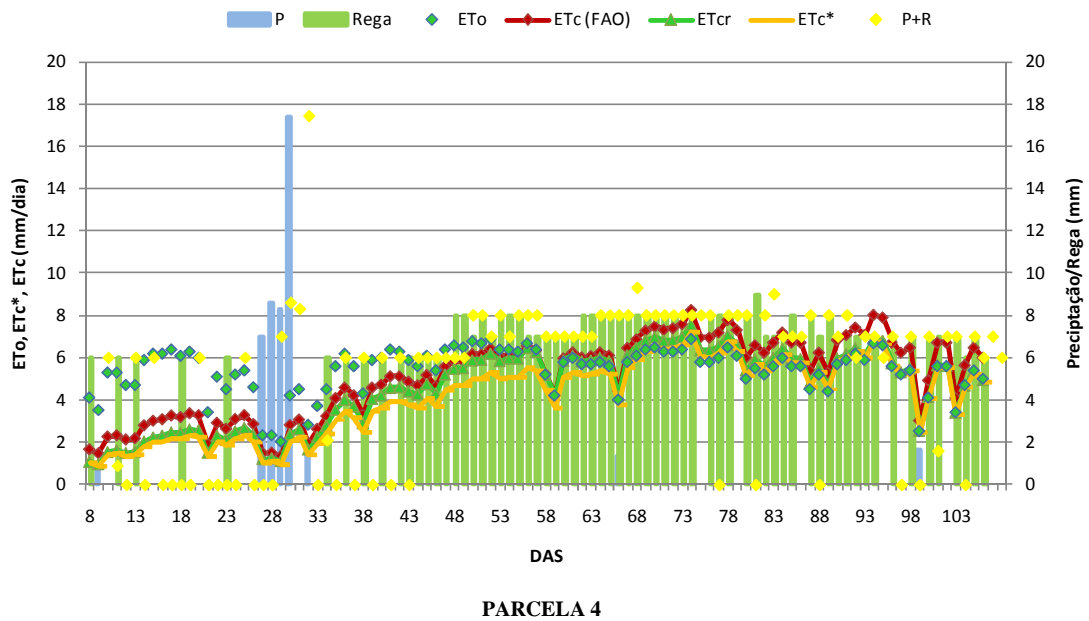


Figura 4.21: Evapotranspiração Cultural obtida mediante a aplicação dos 3 procedimentos utilizados – informação experimental (Kc real), FAO (Kc FAO) e Satélite (Kc*), evapotranspiração de referência (ETo), precipitação (P) e Rega (R), na parcela experimental 4

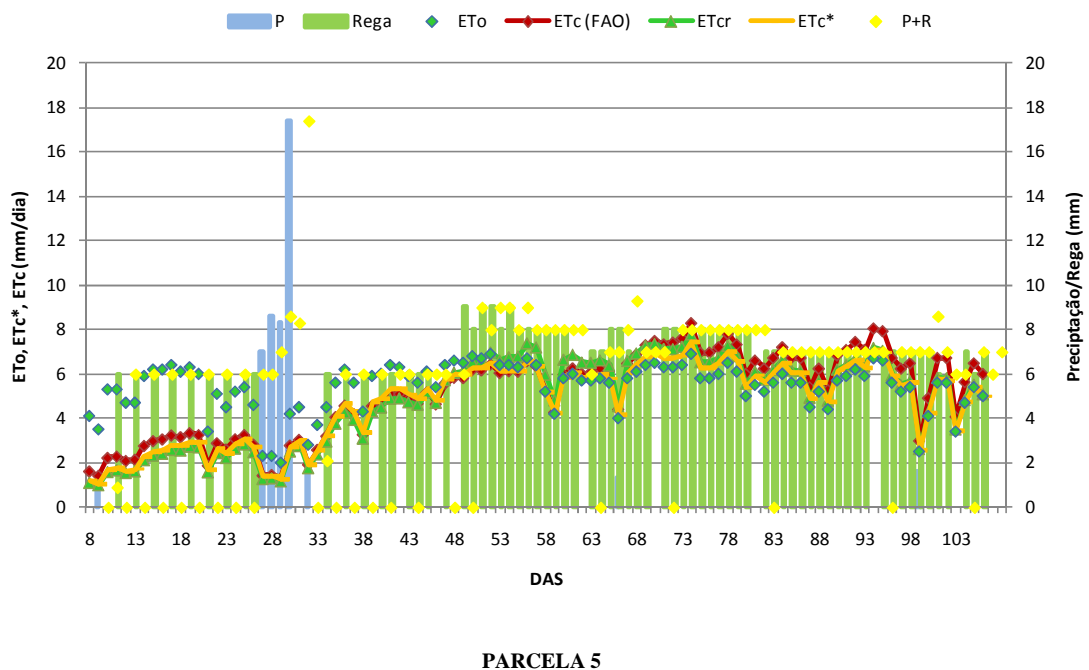
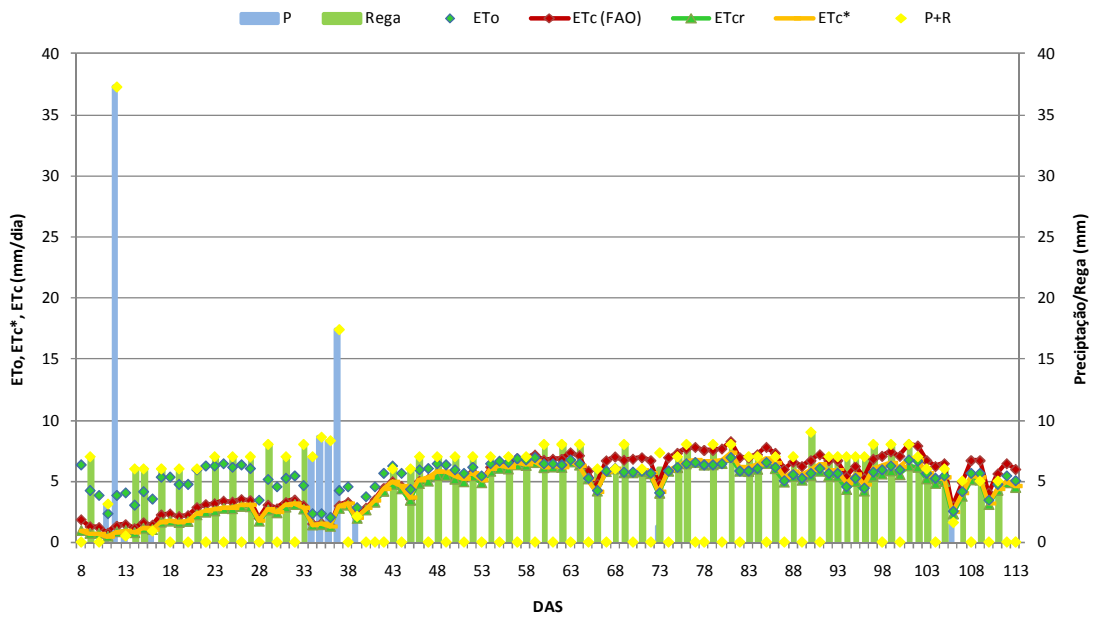
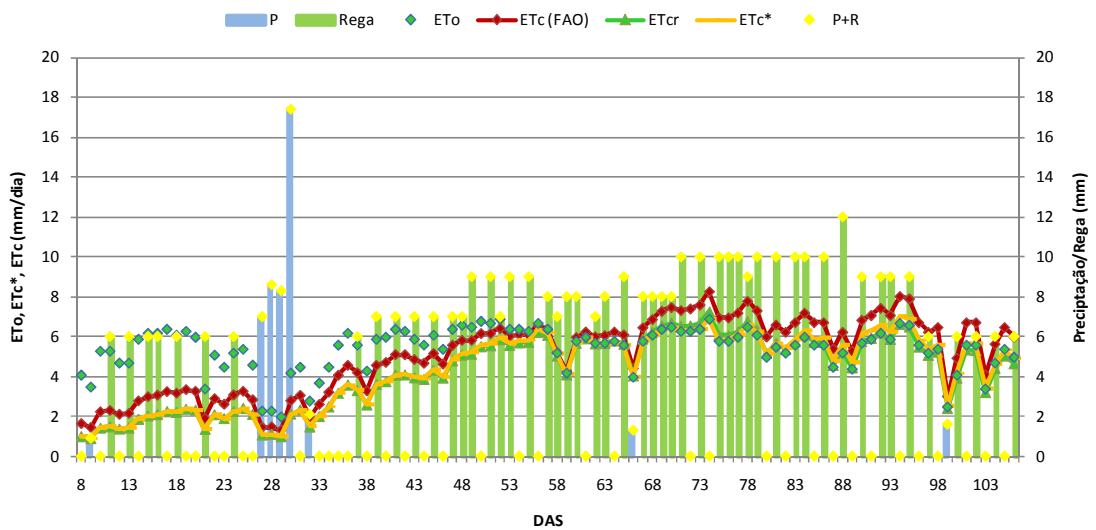


Figura 4.22: Evapotranspiração Cultural obtida mediante a aplicação dos 3 procedimentos utilizados – informação experimental (Kc real), FAO (Kc FAO) e Satélite (Kc*), evapotranspiração de referência (ETo), precipitação (P) e Rega (R), na parcela experimental 5



PARCELA 6

Figura 4.23: Evapotranspiração Cultural obtida mediante a aplicação dos 3 procedimentos utilizados – informação experimental (Kc real), FAO (Kc FAO) e Satélite (Kc*), evapotranspiração de referência (ETo), precipitação (P) e Rega (R), na parcela experimental 6



PARCELA 7

Figura 4.24: Evapotranspiração Cultural obtida mediante a aplicação dos 3 procedimentos utilizados – informação experimental (Kc real), FAO (Kc FAO) e Satélite (Kc*), evapotranspiração de referência (ETo), precipitação (P) e Rega (R), na parcela experimental 7

As taxas de evapotranspiração cultural, registadas nos gráficos das Figuras 4.18 a 4.24, foram obtidas mediante três procedimentos: a determinação da taxa de ET_c real (ET_{cr}) a partir dos valores de K_c encontrados mediante a aplicação do balanço hídrico e a monitorização dos teores de água no solo (ET_c), a taxa de ET_c espectral (ET_c^*) obtida a partir da informação de satélite e a taxa de ET_c obtida mediante informação da FAO.

A ET_{cr} (com base em informação experimental) e ET_c^* (com base na informação do índice de vegetação traduzido pelo satélite) representam o valor de ET do coberto no momento da observação e sob as condições reais de determinada parcela ou região. Os fatores determinantes na relação IV e K_c^* , integram fatores - tipo de coberto, solo, fatores climáticos sendo estes fatores característicos de uma determinada zona, reorientando desta forma as condições reais de determinada área regional.

As Tabelas 4.1 e 4.2 registam os valores da evapotranspiração cultural (ET_{cr} , ET_c^* e ET_c), precipitação, regas efetuadas e necessidades líquidas de rega (NLR_r , NLR^* e NLR) em três fases de desenvolvimento da cultura e início da fase de maturação (1, início desenvolvimento vegetativo; 2, desenvolvimento vegetativo rápido; 3, Floração e Formação Grão; 4, Início da Maturação (nesta só o início, porque os últimos registos de satélite disponíveis são de 1 de Setembro. Os valores apresentados correspondem aos cálculos efetuados com informação experimental, de satélite (ET_{cr} e NLR_r , ET_c^* e NLR^*) e com informação recomendada pela FAO (ET_c e NLR).

Tabela 4.1: Evapotranspiração Cultural (ETcr, ETC* e ETC), obtidas com base nos valores de Kcr (reais), Kc* (satélite) e Kcb (recomendados pela FAO), por unidade experimental

$$(ETc \text{ real} = ETo \cdot Kc_{\text{real}}; ETC \text{ Satélite } (ETC^*) = ETo \cdot Kc^*; ETC \text{ FAO} = ETo \cdot Kc)$$

EVAPOTRANSPIRAÇÃO CULTURAL (mm)							
Parcela	FASES	ETC real (mm)	ETC Satélite	ETC FAO	P (mm)	Rega (mm)	Água Aplicada (mm)
1	1	19	20	33	41	24	65
	2	158	163	195	3	118	121
	3	185	186	215	2	165	167
	4	18	19	22	0	5	5
TOTAL		380	388	464	46	312	358
2	1	22	21	32	16	48	64
	2	175	163	187	29	190	219
	3	184	180	216	2	170	172
	4	28	29	36	0	21	21
TOTAL		409	393	471	47	429	476
3	1	22	21	27	16	48	64
	2	215	195	198	29	190	219
	3	145	133	156	0	141	141
	4	30	29	36	0	32	32
TOTAL		412	378	417	45	411	456
4	1	31	27	41	1	3	4
	2	170	145	183	43	180	223
	3	198	188	219	1	214	215
	4	53	52	63	2	54	56
TOTAL		452	412	506	47	451	498
5	1	32	34	41	1	42	43
	2	187	184	183	43	179	222
	3	207	199	219	1	215	216
	4	55	54	63	2	67	69
TOTAL		481	471	506	47	503	550
6	1	24	25	34	42	44	86
	2	212	219	235	43	148	191
	3	136	145	165	1	109	110
	4	83	89	107	2	58	60
TOTAL		455	478	541	88	359	447
7	1	28	28	41	1	36	37
	2	158	159	183	43	143	186
	3	190	191	219	1	198	199
	4	50	53	63	2	30	32
TOTAL		426	431	506	47	407	454

Tabela 4.2: Necessidades Líquidas de Rega, obtidas com base nos valores de K_c (reais) – NLR1, K_c* (satélite) – NLR2 e K_cb – NLR3 (recomendados pela FAO), por unidade experimental.

$$NLR1=ETc \text{ real}-P; NLR2=ETc^*-P; NLR3=ETc \text{ (FAO)}-P_{\text{efectiva}}$$

NECESSIDADES LÍQUIDAS DE REGA (mm)				
Parcela	FASES	NLR 1 (mm)	NLR 2 (mm)	NLR 3 (mm)
1	1	-22	-21	-8
	2	155	160	192
	3	183	184	213
	4	18	19	22
TOTAL		334	342	418
2	1	6	5	16
	2	146	134	158
	3	182	178	214
	4	28	29	36
TOTAL		362	346	424
3	1	6	5	11
	2	186	166	169
	3	145	133	156
	4	30	29	36
TOTAL		367	333	372
4	1	30	26	40
	2	127	102	140
	3	197	187	218
	4	51	50	61
TOTAL		405	365	459
5	1	31	33	40
	2	144	141	140
	3	206	198	218
	4	53	52	61
TOTAL		434	424	459
6	1	-18	-17	-8
	2	169	176	192
	3	135	144	164
	4	81	87	105
TOTAL		367	390	453
7	1	27	27	40
	2	115	116	140
	3	189	190	218
	4	48	51	61
TOTAL		379	384	459

Os valores totais da evapotranspiração cultural calculada com base na informação disponibilizada pela FAO são superiores aos valores determinados por informação experimental (monitorização água no solo e balanço hídrico) e obtidos mediante informação fornecida pelo satélite (estimativa K_c a partir de valores de NDVI). Esta tendência aparece mais vincada nas fases de maiores necessidades hídricas (fases 2 e 3). As parcelas 3 e 5, foram onde se registou menores diferenças nos valores de ET_c obtidos com os três procedimentos utilizados. Este aspeto poderá estar relacionado com o facto de a cultura nestas duas parcelas apresentar um comportamento agronómico ligeiramente diferente das restantes: a fase de floração e formação do grão (maiores necessidades hídricas) foi antecipada. Nestas parcelas não se verificaram episódios de carência hídrica, nas fases de maiores necessidades hídricas.

Nas parcelas 1 e 6 verificaram-se episódios de carência hídrica nas fases 2 e 3 (fases de maiores necessidades hídricas) e de abundância hídrica na fase 1 do desenvolvimento (fase de menores hídricas). Na parcela 7 também se verificou algum déficit hídrico no início da fase de maturação, levando à senescência acelerada das folhas da cultura.

Da análise dos valores das necessidades líquidas de regas, registados na Tabela 4.2, facilmente se conclui o seguinte: a condução da rega e determinação das necessidades de rega, com base nos valores de Kc disponibilizados pela FAO na publicação (Allen et al., 1998), traduzem valores superiores de NLR, na ordem dos 20% face aos valores reais obtidos por informação experimental ou por satélite. A diferença justifica-se com o facto dos valores de Kc disponibilizados pela FAO serem valores padrão, para uso genérico, sob determinadas condições ambientais e agrónomicas, naturalmente diferentes das nossas condições experimentais do Perímetro de Rega do Divor.

No caso concreto da nossa experimentação, as maiores diferenças encontradas reportam às fases 2 e 3 de desenvolvimento da cultura. Este facto está relacionado com duas justificações: a duração destas fases nas parcelas experimentais terem sido menores (tal como se verifica na secção 4.1.3.1), comparativamente com as durações padrão publicadas pela FAO (Allen *et al.*, 1998); e os valores de Kc estimados a partir do satélite e monitorizados terem registado valores mais baixos, conforme registam os gráficos da Figura 4.18.

4.1.4 Balanço Hídrico do Solo, mediante informação de satélite e metodologia da FAO

No capítulo 2 deste trabalho – síntese bibliográfica – definiu-se a equação do balanço hídrico como a metodologia que permite estimar a disponibilidade de água no solo em cada instante, salientando a sua importância como metodologia de base à condução da água em regadio. Neste sentido, elaborou-se uma aplicação em folha de cálculo que nos permita operacionalizar os cálculos associados a esta metodologia para determinação das necessidades hídricas da cultura e o balanço de água no solo durante a campanha de rega, tendo por base informação traduzida pela FAO e fornecida pelo satélite. A aplicação desenvolvida seguiu os procedimentos descritos no Capítulo 3 deste trabalho.

Os resultados apresentados vão permitir fazer uma análise relativamente à aplicação da informação traduzida pelo satélite e fornecida pela FAO, na determinação das necessidades de água da cultura do milho no Perímetro de Rega do Divor, estabelecendo para esse fim uma análise com a informação experimental disponível – monitorização da água no solo, durante a campanha de rega, em sete parcelas experimentais.

Primeiro, fazemos uma abordagem a alguns parâmetros de base do balanço de água no solo, estimados a partir da informação traduzida pelo satélite, índices de vegetação NDVI e os valores de referência disponibilizados pela FAO: fração de cobertura do solo (f_c), coeficiente cultural basal (K_{cb}^* , K_{cb} FAO), coeficiente cultural espectral (K_c^*) real e potencial, evapotranspiração potencial (ET_c FAO) e evapotranspiração real espectral (ET_c^*).

A Figura 4.25 ilustra a fração de cobertura do solo, f_c , obtida mediante informação de satélite (NDVI) a partir da expressão matemática da Figura 4.12, e informação da FAO (valores de K_{cb} publicados pela FAO) e monitorização experimental, nas 7 unidades experimentais.

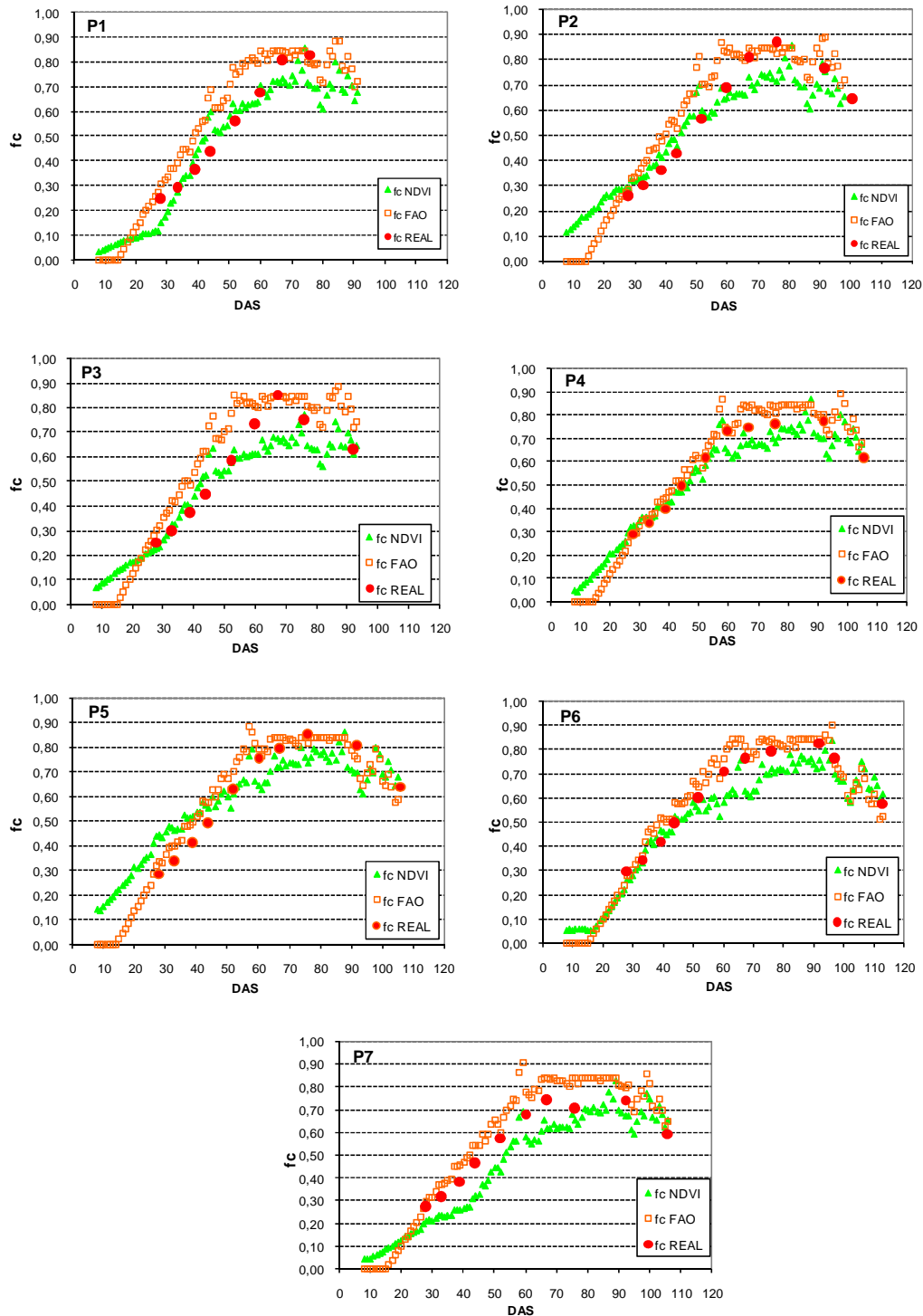


Figura 4.25: Fração de Cobertura do Solo (f_c) obtida a partir da informação de satélite, FAO e informação experimental

A Figura 4.26 ilustra as curvas de Kcb, das 7 unidades experimentais, Kcb NDVI (Kcb*), obtidas mediante informação de satélite, índice de vegetação NDVI e aplicação da expressão matemática obtida para a área geográfica do Divor, traduzida na Figura 4.14; e a curva de Kcb (FAO) traduzida pela informação disponível em Allen *et al* (1998) e ajustada às condições climáticas da região (conforme os procedimentos descritos no capítulo 3).

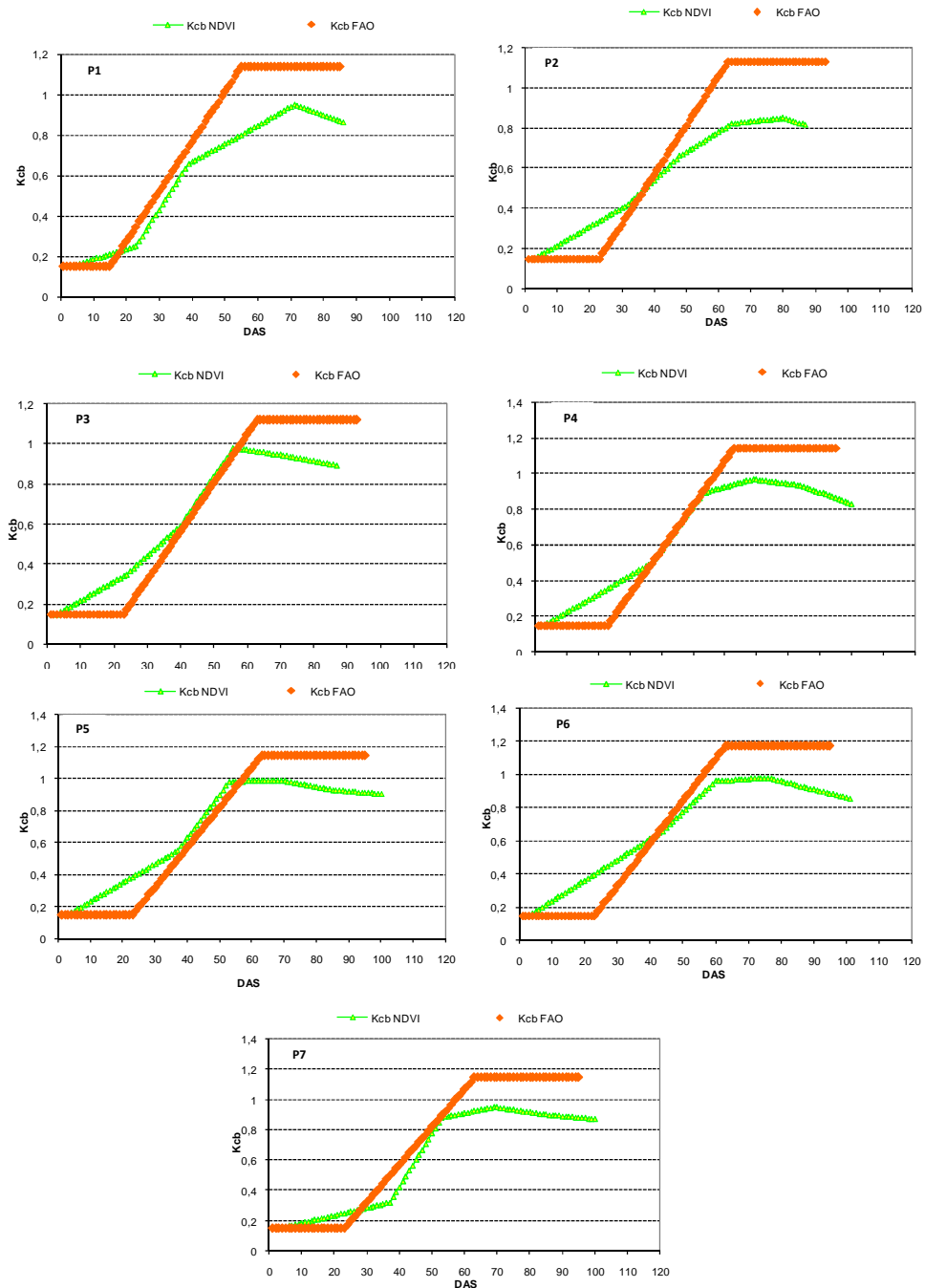


Figura 4.26: Curvas de Kcb* (Kcb NDVI) e Kcb (FAO), em todas as unidades experimentais

Como observaram vários autores (Bausch, 1995; Neale, 1989; Choudhury, 1994, González-Piqueras, 2006), os valores de K_{cb} traduzem de forma particular o comportamento da cultura, daí optar-se por representar este parâmetro, uma vez que o índice de vegetação, NDVI, também estará mais relacionado com a cultura e com a componente transpiração da taxa de evapotranspiração. Conforme já tínhamos tido oportunidade de verificar nas curvas de K_c representadas na Figura 4.18, as fases de desenvolvimento onde se verificam maiores desvios relativamente os valores traduzidos pela FAO, são a fase 1 (início do desenvolvimento) e a fase 3 (floração e formação do grão), fase de maiores necessidades hídricas. O comportamento das curvas de K_{cb} em cada unidade experimental vem confirmar as observações já efetuadas na Figura 4.17.

A Figura 4.27 ilustra as curvas de K_{cb}^* , K_c^* espectral e potencial (traduz as condições ótimas de desenvolvimento da cultura, sem stress hídrico) (obtidas mediante informação de satélite) nas 7 unidades experimentais.

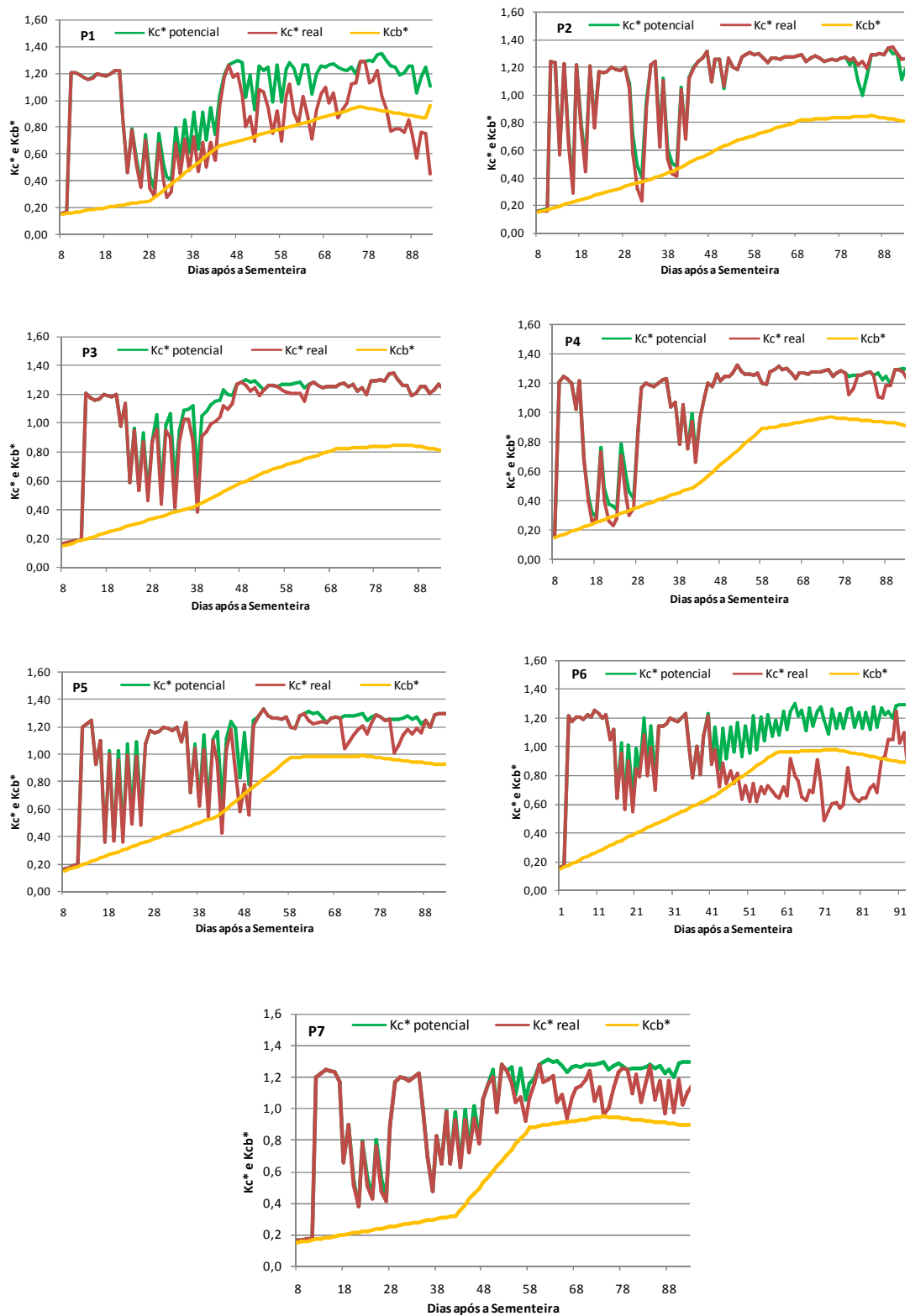


Figura 4.27: Curvas de Kcb^* , Kc^* real e Kc^* potencial em todas as unidades experimentais

As curvas de Kc^* real e Kc^* potencial apresentam oscilações acentuadas que traduzem o comportamento evaporativo das parcelas, associado à prática frequente de rega, com intervalos entre regas 2 a 3 dias no

máximo. No início do ciclo da cultura ocorrem grandes variações de K_c associadas às grandes perdas evaporativas, relacionadas com a baixa fração de cobertura do solo pela cultura.

As parcelas 1, 6 e 7 foram as que apresentaram maiores decréscimos dos valores de K_c^* reais face aos valores de K_c^* potencial (sem stress hídrico), associado ao défice hídrico verificado nestas parcelas nas fases de maiores necessidades hídricas, tal como se pode constatar nas Tabelas 4.1 e 4.2.

A Parcela 6 apresenta um grande decréscimo dos valores de K_c^* potencial face aos valores de K_c^* reais. Este facto estará associado aos problemas de infiltração verificados nesta parcela, os quais se traduziram num grande défice de água no solo, nas fases de desenvolvimento com maiores exigências hídricas.

A Figura 4.28 traduz a taxa de evapotranspiração obtida mediante informação da FAO e a taxa de evapotranspiração real obtida pela informação de satélite (índice de vegetação, NDVI).

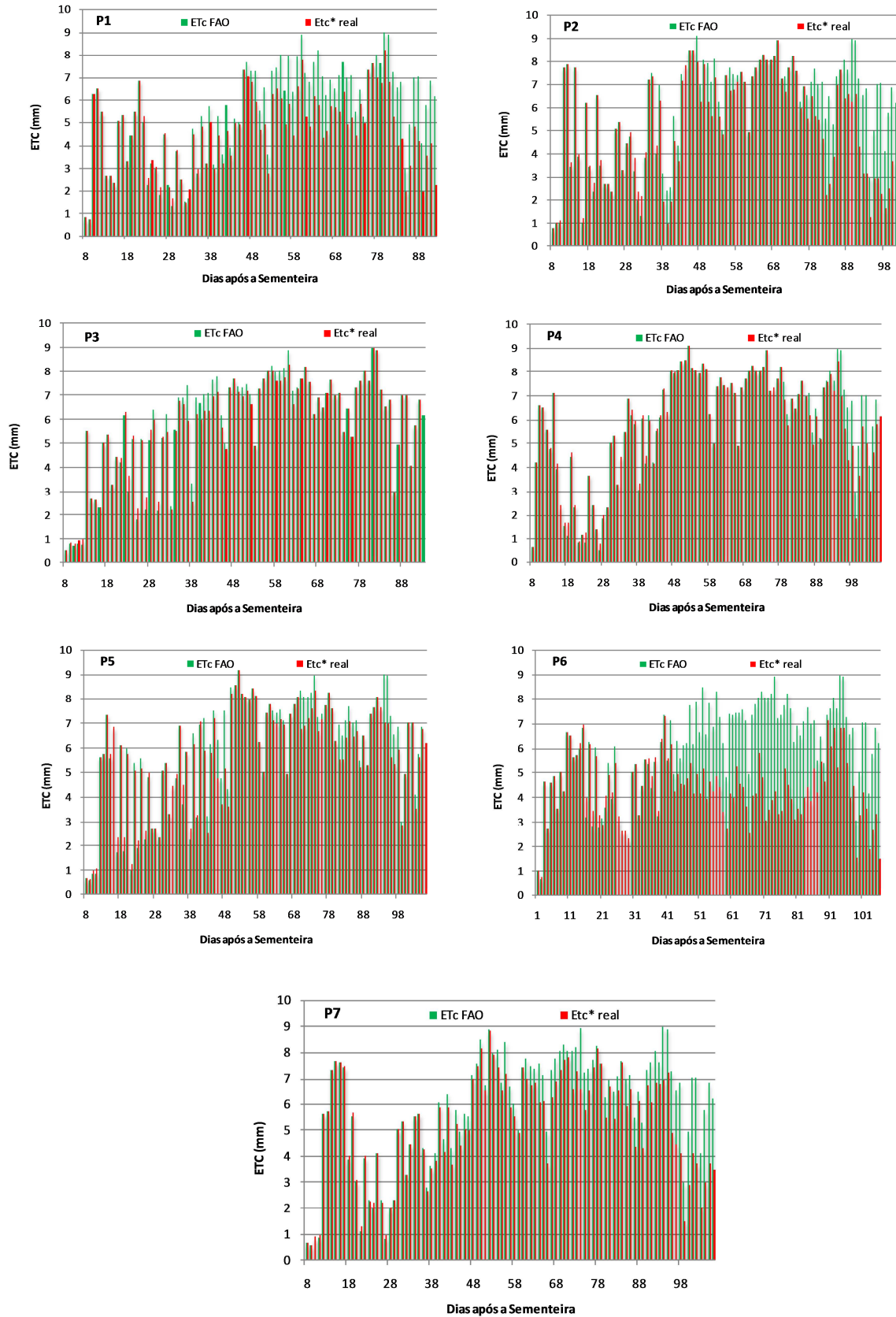


Figura 4.28: Evapotranspiração Cultural, ETc (FAO) e obtida por informação de satélite (ETc*real) em todas as unidades experimentais

A Figura 4.29 ilustra os valores dos teores de água no solo obtidos a partir do balanço hídrico do solo mediante informação de base descrita FAO e traduzida pela informação de satélite, em todas as unidades experimentais. Também estão representados os valores da água no solo obtidos por monitorização direta, com sonda TDR, permitindo assim avaliar a fiabilidade da informação obtida pelos procedimentos utilizados.

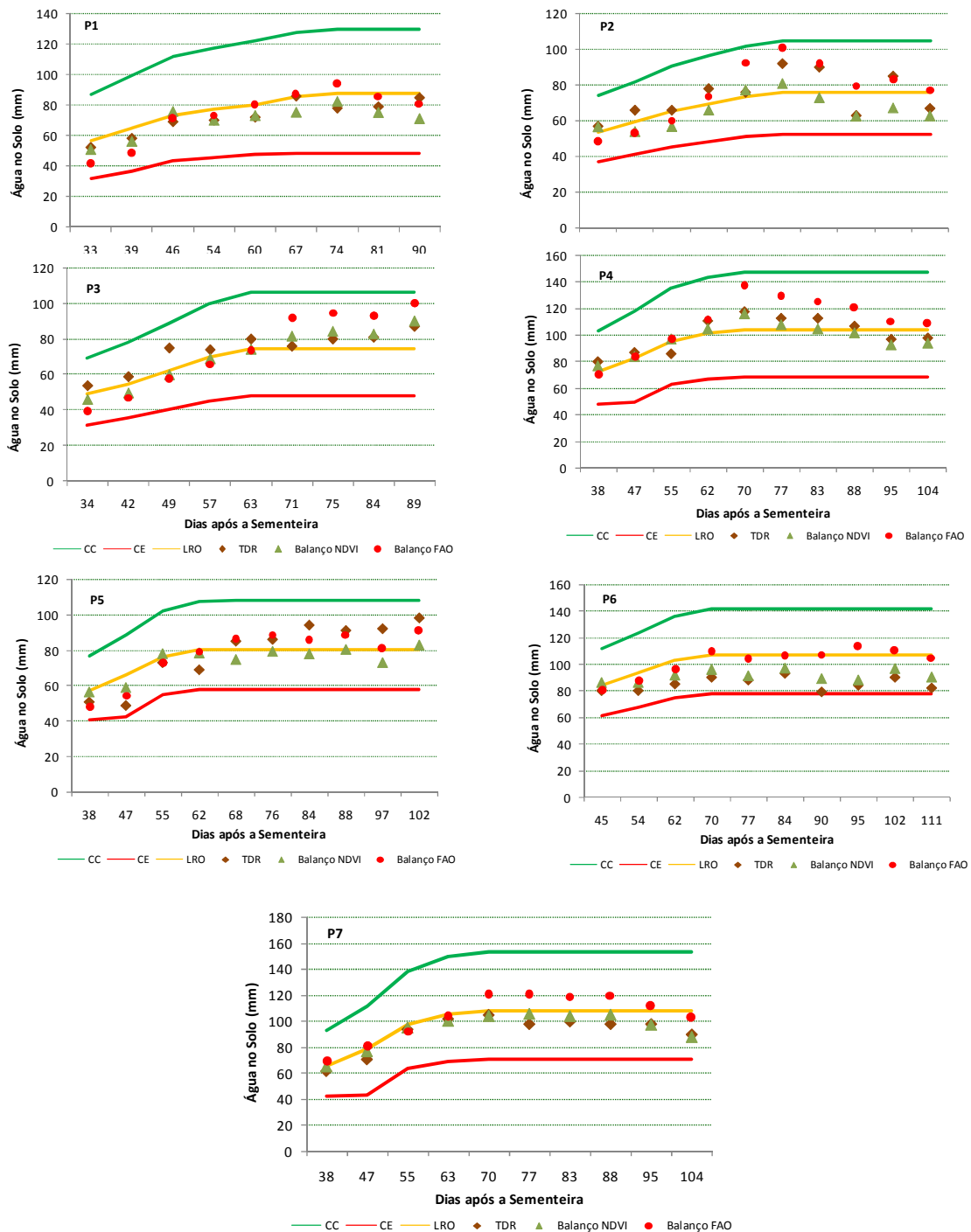


Figura 4.29: Balanço de Água no Solo (mm) obtido mediante informação de satélite e informação da FAO e monitorização direta no solo (sonda TDR), nas 7 unidades experimentais

Analisando os resultados apresentados na Figuras 4.29 é possível retirar as seguintes ilações:

Os resultados apresentados, relativamente ao cálculo dos coeficientes culturais (K_{cb}) mediante informação de satélite, com base nos índices de vegetação NDVI, traduzem bem o desenvolvimento da cultura em cada unidade experimental, sendo de notar uma elevada proximidade nos valores monitorizados nas parcelas experimentais.

As variações observadas na reserva de água no solo em todas as parcelas de rega traduzem bem as oscilações introduzidas pela entrada de água no perfil útil do solo (rega ou precipitação). No entanto, são de referir algumas divergências introduzidas pela uniformidade e eficiência de rega, ocasionadas por problemas de infiltração e eventuais perdas por escoamentos superficiais, principalmente no que corresponde à disponibilidade de água no perfil útil do solo, durante a campanha de rega, apresentando valores por vezes inferiores ao limite inferior de gestão da água de rega (limite do rendimento ótimo).

Os resultados apresentados comprovam a importância da utilização de tecnologia de deteção remota na gestão da água de rega à escala regional, na medida em que fornece informação com elevada representação espacial, relativamente á caracterização da superfície terrestre, neste caso concreto o desenvolvimento da cultura, podendo assim fornecer informação preciosa quanto à determinação das necessidades efetivas de rega.

A informação obtida no presente estudo comprova mais uma vez os resultados obtidos em outros trabalhos já desenvolvidos e publicados por outros autores: Reginato *et al.* (1985), Neale *et al.* (1989, 1996, 2003, 2005), Jackson *et al.* (1980) Heilman *et al.* (1982), Bausch and Neale (1987), Michael and Bastiaanssen (2000), Jachum *et al.* (2002); Anderson, MC, *et al.* (2004), Hunsaker *et al.* (2005), Calera *et al.* (2005), Zang and Wegehenkel (2006), González-Dugo e Mateos (2008), Gonzalez-Dugo *et al.* (2009), Droogers, *et al.* (2010), Allen, *et al.* (2011), no que diz respeito à determinação dos coeficientes culturais mediante a utilização de índices de vegetação derivados a partir de valores de refletância da superfície cultural, obtidos a partir das imagens multiespectrais de alta resolução.

As expressões analíticas obtidas na determinação dos parâmetros biofísicos – fração de cobertura do solo, coeficiente cultural basal (K_{cb}) e coeficiente cultural (K_c), traduzem bem o desenvolvimento da cultura do milho para o Perímetro de Rega do Divor, sendo este facto confirmado pela elevada correlação que se obteve entre a reserva de água no solo simulada pela informação de satélite e os valores monitorizados pela sonda TDR.

Relativamente à representação espacial e temporal destas técnicas de deteção remota, há que referir o seguinte: a utilização de imagens de mais de um satélite poderá ser uma possibilidade para aumentar a representação temporal, na medida em que em regadio o intervalo entre observações deverá ser no máximo 8 dias, e a maioria dos satélites tem um ciclo de passagem de no mínimo 16 dias. Relativamente à resolução espacial, há que ter em conta a utilização de imagens de satélites com alta resolução. A integração de plataformas aerotransportadas para a recolha de informação remota sobre a superfície terrestre poderá ser uma mais-valia na gestão de grandes áreas regadas, introduzindo uma maior resolução espacial e maior flexibilidade na programação das missões, contornando assim as limitações impostas à

metodologia de satélite por condições atmosféricas desfavoráveis à aquisição da informação sobre a superfície terrestre.

Outra questão que é preciso ter presente com a utilização das metodologias de satélite na gestão da água em regadio é o tempo necessário entre a aquisição da informação e a chegada da informação útil ao utilizador final – o regante, o qual deverá ser o menor possível. Neste sentido, os procedimentos metodológicos deverão estar bem definidos, validados e automatizados, devendo chegar ao agricultor no menor espaço de tempo e com a maior fiabilidade possível. Este aspeto já foi abordado por dois projetos de investigação europeus DEMETER e PLEIADES, com os quais se delinearam estratégias e procedimentos neste sentido.

A Figura 4.30 ilustra a expressão que relaciona os valores da água no solo obtidos a partir da informação de satélite e os valores obtidos por monitorização direta no solo. Os valores apresentados traduzem a média de todos os pontos de controlo das 7 unidades experimentais.

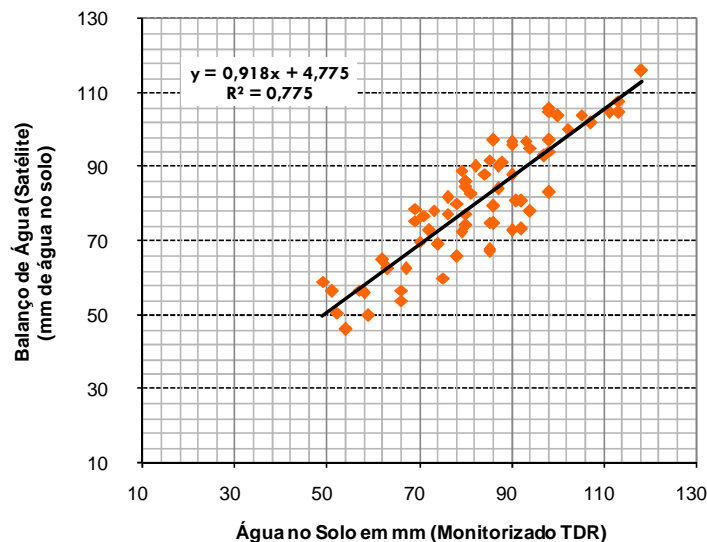


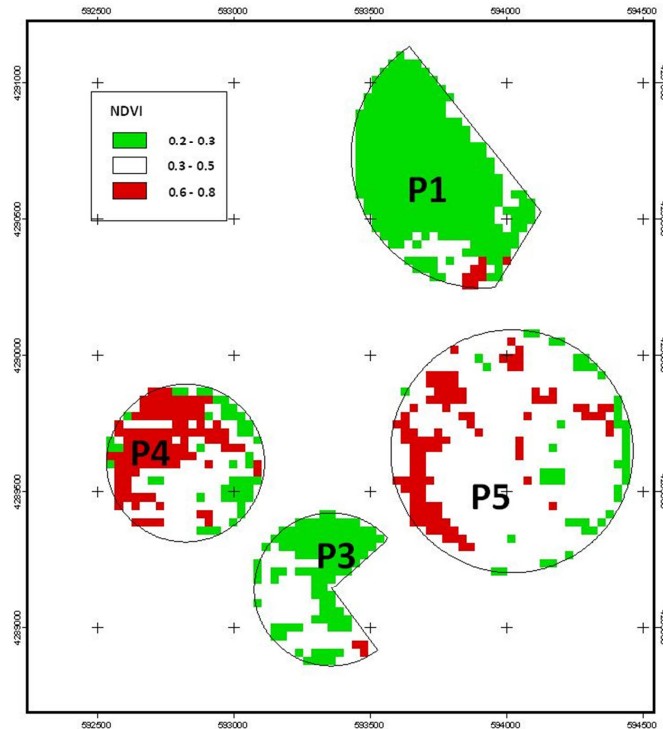
Figura 4.30: Correlação entre os valores de água no solo obtidos com o balanço hídrico mediante informação de satélite e a monitorização direta da água no perfil do solo (sonda TDR), nas 7 unidades experimentais

A informação traduzida na Figura 4.30 ilustra um elevado coeficiente de determinação 77%, entre os valores de água no solo estimados a partir da informação de satélite e a monitorização direta no solo. No entanto, parece-nos possível este valor estar subestimado, pois existem dois fatores que poderão estar associados a este facto: o primeiro, relacionado com a diferente resolução espacial das fontes de informação (a monitorização direta, reporta um controlo pontual da água no solo, enquanto o satélite reporta a sua informação a uma resolução espacial de 30 m), o segundo relacionado com os problemas de infiltração e a existência de perdas de água por escoamento superficial que não foram contabilizadas aquando da monitorização das dotações de rega (introduzidas na equação do balanço hídrico do solo).

4.2 Distribuição espacial da Informação obtida com a Imagem de Satélite

4.2.1 Índice de Vegetação, NDVI

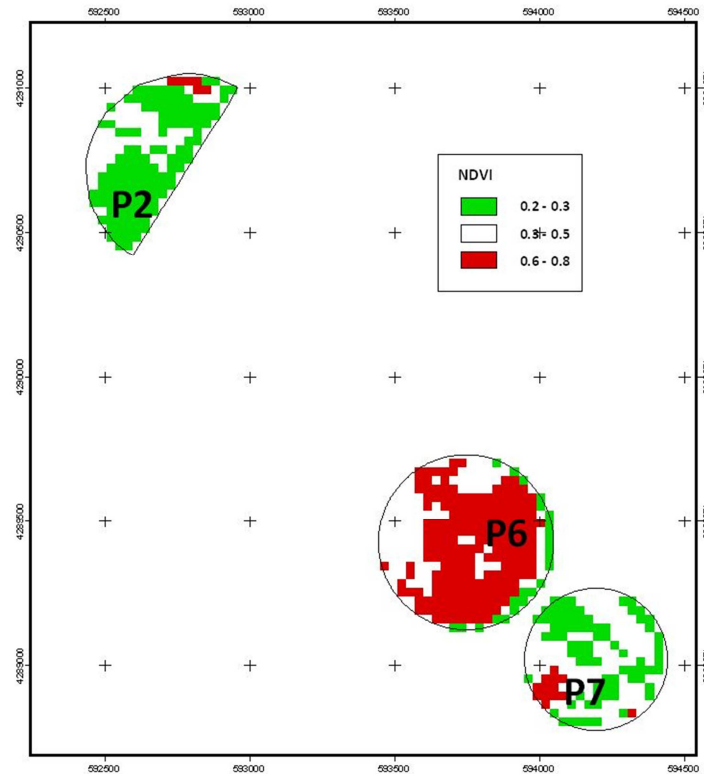
As Figuras 4.31 e 4.32 representam a distribuição espacial do índice de vegetação (NDVI), durante a fase de desenvolvimento vegetativo rápido, em todas as parcelas experimentais.



P1: NDVI máx: 0.67; NDVI min: 0.16; NDVI med: 0.39; σ 0.14 e σ^2 0.02
P3: NDVI máx: 0.56; NDVI min: 0.17; NDVI med: 0.34; σ 0.10 e σ^2 0.01
P4: NDVI máx: 0.71; NDVI min: 0.20; NDVI med: 0.48; σ 0.14 e σ^2 0.02
P5: NDVI máx: 0.73; NDVI min: 0.23; NDVI med: 0.49; σ 0.15 e σ^2 0.02

Figura 4.31: Distribuição espacial do índice de vegetação (NDVI) nas parcelas experimentais 1, 3, 4 e 5, durante a fase de desenvolvimento vegetativo (29 de Junho)

As parcelas 1 e 3 apresentam valores médios de NDVI ligeiramente mais baixos, pois em 29 de Junho a fase de desenvolvimento vegetativo nestas duas parcelas estava apenas no início. As parcelas 4 e 5 apresentam uma heterogeneidade mais elevada no desenvolvimento da cultura traduzida por um valor de variância mais elevado nos valores de NDVI.

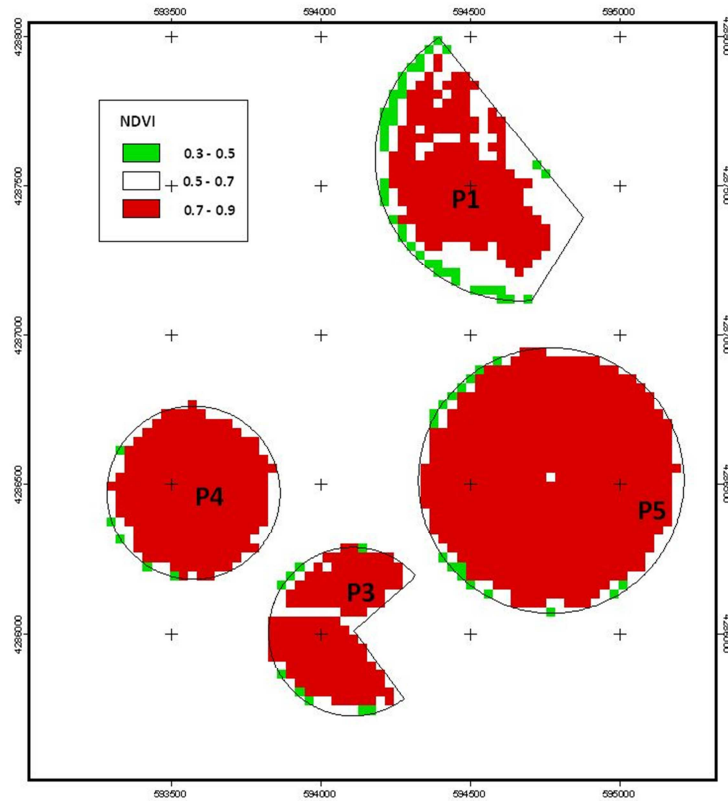


P2: NDVI máx:0.81; NDVI min: 0.25; NDVI med: 0,45; σ 0.14 e σ^2 0.02
P6: NDVI máx:0.82; NDVI min: 0.19; NDVI med: 0,59; σ 0.17 e σ^2 0.03
P7: NDVI máx:0.63; NDVI min: 0.29; NDVI med: 0,46; σ 0.10 e σ^2 0.01

Figura 4.32: Distribuição espacial do índice de vegetação (NDVI) nas parcelas experimentais 2, 6 e 7, durante a fase de desenvolvimento vegetativo (29 de Junho)

A distribuição espacial dos valores de NDVI das parcelas experimentais traduz bem o desenvolvimento da cultura – Parcelas 1 e 3, no início da fase de desenvolvimento vegetativo – NDVI médio de 0.39 e 0.34, respetivamente; as Parcelas 2, 4, 5 e 7, em pleno desenvolvimento vegetativo – NDVI médio de 0.45, 0.48, 0.49 e 0.46, respetivamente; a Parcela 6, no final do desenvolvimento vegetativo – NDVI médio de 0.59.

As Figuras 4.33 e 4.34 representam a distribuição espacial do índice de vegetação (NDVI), durante a fase de floração e formação do grão, na parcela 1 e 7 (inicial), nas parcelas 3, 4, 5 e 6 (plena floração).



P1: NDVI máx:0.85; NDVI min: 0.26; NDVI med: 0.58; σ 0.17 e σ^2 0.03
P3: NDVI máx:0.85; NDVI min: 0.26; NDVI med: 0.66; σ 0.15 e σ^2 0.02
P4: NDVI máx:0.84; NDVI min: 0.36; NDVI med: 0.67; σ 0.14 e σ^2 0.02
P5: NDVI máx:0.85; NDVI min: 0.32; NDVI med: 0.63; σ 0.15 e σ^2 0.02

Figura 4.33: Distribuição espacial do índice de vegetação (NDVI) nas parcelas experimentais 1, 3, 4 e 5, durante a fase de floração e formação do grão (31 de Julho)

A distribuição espacial dos valores de NDVI das parcelas experimentais traduz bem o estado de desenvolvimento da cultura – Parcela 1, no início da floração, e restantes parcelas em plena floração. A parcela que apresenta maior heterogeneidade no seu desenvolvimento é a parcela 1, onde a variância dos valores de NDVI apresenta um valor superior. Este facto estará naturalmente relacionado com a prática da rega nesta unidade experimental, tendo-se praticado um regime de regas deficitárias, face às necessidades da cultura. Também nesta parcela é de referir a existência de problemas de germinação e de infiltração, o que naturalmente ocasionou alguma heterogeneidade no desenvolvimento da cultura, traduzida pelos valores de NDVI.

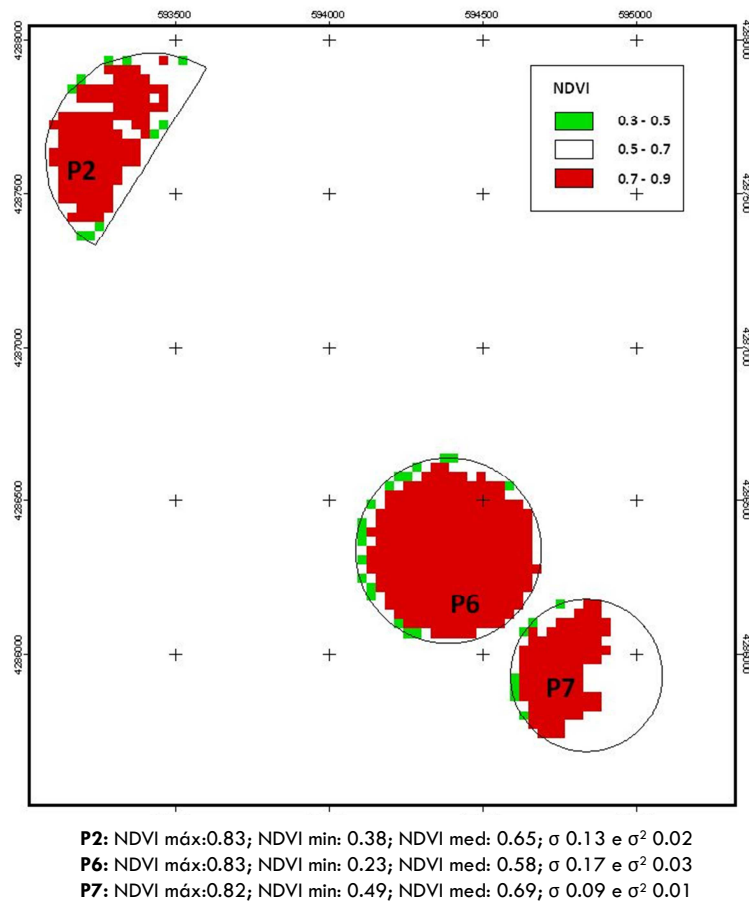
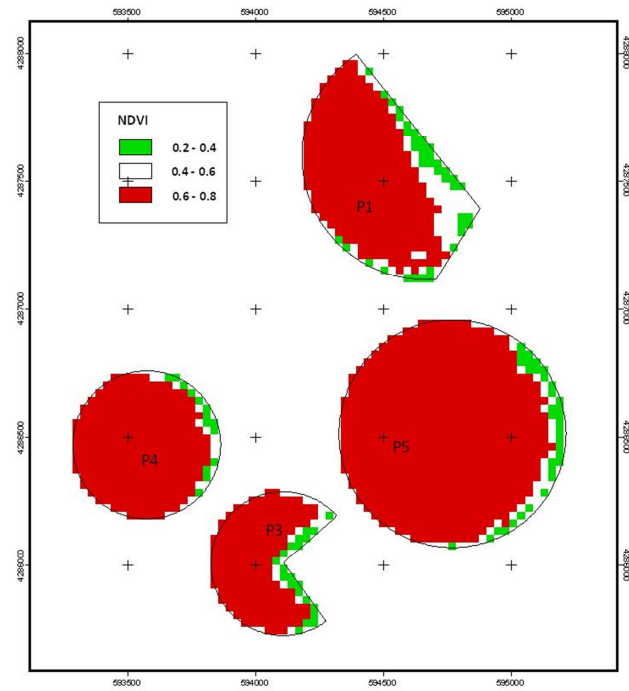


Figura 4.34: Distribuição espacial do índice de vegetação (NDVI) nas parcelas experimentais 2, 6 e 7, durante a fase de floração e formação do grão (31 de Julho)

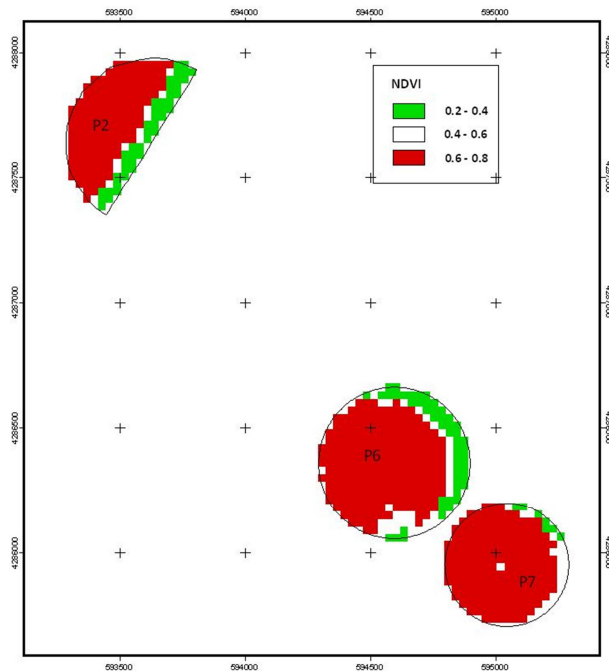
A parcela 7 apresenta duas zonas distintas dos valores de NDVI. Este facto esteve associado à prática cultural – sementeira direta - nesta parcela, tendo ocasionado problemas de germinação, devido à existência de muito resíduos na superfície do solo, do ano anterior; e também a emergência de uma elevada quantidade de infestantes nesta parcela. A parcela 6, apresenta também alguma heterogeneidade na distribuição espacial dos valores de NDVI, facto associado aos problemas de infiltração ocorridos nesta parcela, traduzidos num desenvolvimento irregular da cultura.

As Figuras 4.35 e 4.36 representam a distribuição espacial do índice de vegetação (NDVI), durante o início da fase de maturação, nas parcelas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 (inicial) e na parcela 6 em plena maturação.



P1: NDVI máx:0.83; NDVI min: 0.29; NDVI med: 0.58; σ 0.16 e σ^2 0.02
P3: NDVI máx:0.81; NDVI min: 0.25; NDVI med: 0.54; σ 0.18 e σ^2 0.03
P4: NDVI máx:0.79; NDVI min: 0.24; NDVI med: 0.54; σ 0.18 e σ^2 0.03
P5: NDVI máx:0.81; NDVI min: 0.21; NDVI med: 0.51; σ 0.19 e σ^2 0.04

Figura 4.35: Distribuição espacial do índice de vegetação (NDVI) nas parcelas experimentais 1, 3, 4 e 5, durante o início da fase de maturação (1 de Setembro)



P2: NDVI máx:0.80; NDVI min: 0.20; NDVI med: 0.50; σ 0.16 e σ^2 0.04
P6: NDVI máx:0.79; NDVI min: 0.19; NDVI med: 0.50; σ 0.18 e σ^2 0.03
P7: NDVI máx:0.79; NDVI min: 0.27; NDVI med: 0.59; σ 0.14 e σ^2 0.02

Figura 4.36: Distribuição espacial do índice de vegetação (NDVI) nas parcelas experimentais 2, 6 e 7, durante o início da fase de maturação (1 de Setembro)

A distribuição espacial dos valores de NDVI na fase de maturação da cultura vem ao encontro da informação já disponibilizada nas fases de desenvolvimento vegetativo rápido e na fase de floração e formação do grão e traduz bem o desenvolvimento da cultura em todas as parcelas experimentais, salientando alguns aspetos como: problemas de infiltração, défice de água no solo em algumas zonas, etc.

4.2.2 Correlação Distribuição espacial de parâmetros agronómicos (fração cobertura do solo (f_c) e fração da radiação fotossintética activa absorvida (f_{APAR})) e informação experimental – Água no Solo e Produção Total da Cultura:

Os parâmetros agronómicos estão relacionados entre si, traduzindo de forma geral o crescimento e desenvolvimento da cultura. Neste ponto apresenta-se a distribuição espacial do de dois parâmetros agronómicos, estimados a partir da informação de satélite – fração de cobertura do solo pela cultura (f_c) e a fração da radiação fotossintética activa absorvida (f_{APAR}), em apenas duas unidades experimentais – Parcela 1 e 6 – uma vez que foi nestas parcelas que se monitorizou a produção total da cultura, tal como descreve o capítulo 3 dos procedimentos e metodologias.

Com a representação espacial dos parâmetros agronómicos estimados (f_c e f_{APAR}) pretende-se avaliar o desenvolvimento da cultura dentro da parcela, identificar zonas com possíveis problemas de encharcamento, défice hídrico, pragas e doenças, etc.

Pretende-se com esta representação analisar se existe alguma correspondência entre os parâmetros estimados a partir do satélite e os valores da produção de matéria verde monitorizados por amostragem e posterior interpretação em SIG.

A Figura 4.37 representa a distribuição espacial da fração cobertura do solo pela cultura, na parcela experimental 6, nas 3 fases principais do desenvolvimento da cultura.

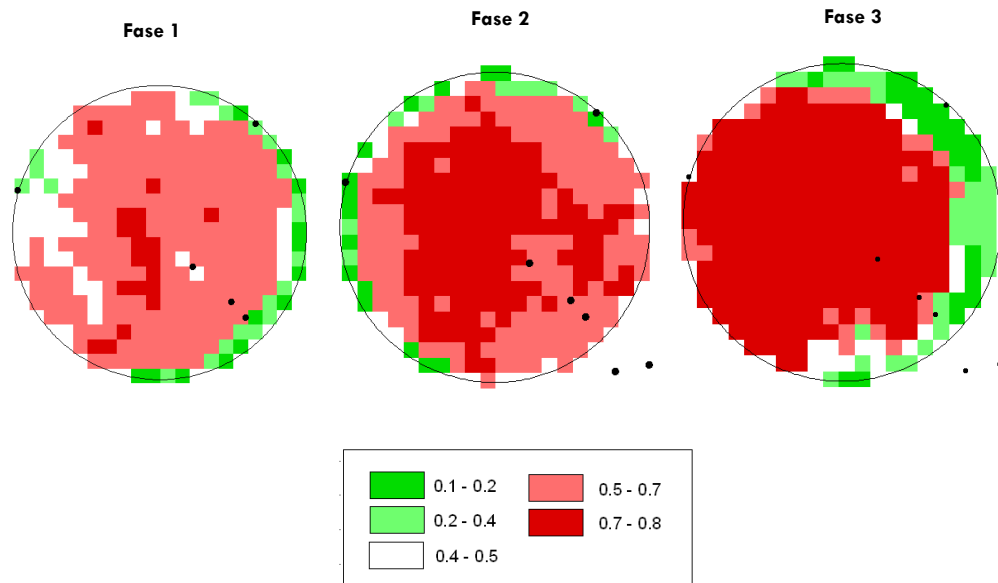


Figura 4.37: Distribuição espacial da fração de cobertura do solo (f_c), na parcela experimental 6, durante as fases de desenvolvimento – 1. Desenvolvimento vegetativo (29 de Junho), 2. Floração e Formação do Grão (31 de Julho), 3. Maturação (1 de Setembro).

Os valores médios de f_c na parcela experimental 6 são, em três estádios de desenvolvimento da cultura do milho: fase 1- 0.51, fase 2 – 0.52 e Fase 3 – 0.43.

É de notar um decréscimo rápido da fração de cobertura do solo (na fase de maturação), associado à senescência acelerada das folhas, induzido pelo défice hídrico ocorrido na parcela nas fases de maiores necessidades hídricas (fases 2 e 3), e também pelos problemas de infiltração verificados na parte norte da parcela.

A Figura 4.38, ilustra a representação espacial da fração da radiação fotossintética activa absorvida (f_{APAR}), na parcela experimental 6.

Este cociente, f_{APAR} , representa a radiação absorvida pelo coberto vegetal, APAR e a radiação incidente, PAR_i (Asrar *et.al.*, 1989). Este parâmetro está relacionado diretamente com o crescimento e desenvolvimento das plantas, pois indica a energia absorvida necessária para realizar o processo fotossintético (Gardner *et al.*, 1990).

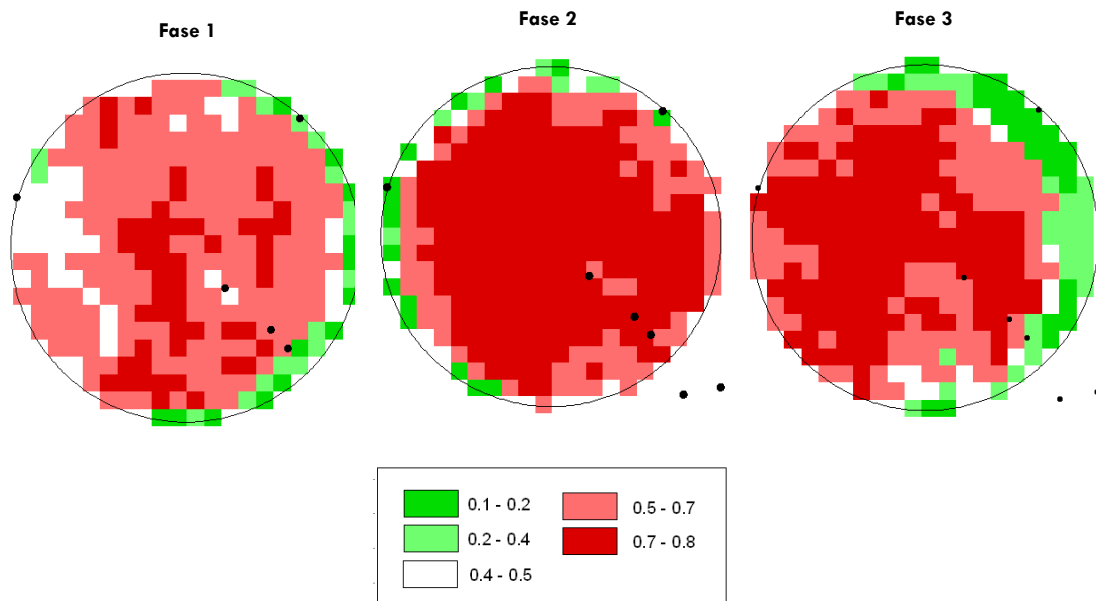


Figura 4.38: Distribuição espacial da fração da radiação fotossintética activa absorvida (f_{APAR}), na parcela experimental 6, nas fases de desenvolvimento – 1. Desenvolvimento vegetativo (29 de Junho), 2. Floração e Formação do Grão (31 de Julho), 3. Maturação (1 de Setembro).

Os valores médios da distribuição espacial da fração da radiação fotossintética activa absorvida pela cultura, nas 3 fases de desenvolvimento da cultura, em 3 datas de observação foram 0.53, 0.54 e 0.45, respetivamente. É de notar valores mais baixos de f_{APAR} , na periferia da parcela, associado aos problemas de infiltração verificados, os quais provocaram grandes perdas por escoamento superficial na periferia da parcela.

A Figura 4.39 ilustra a representação espacial dos valores de f_{APAR} acumulados em 5 datas de observação: 29 de Junho, 15 de Julho, 31 de Julho, 16 de Agosto e 1 de Setembro.

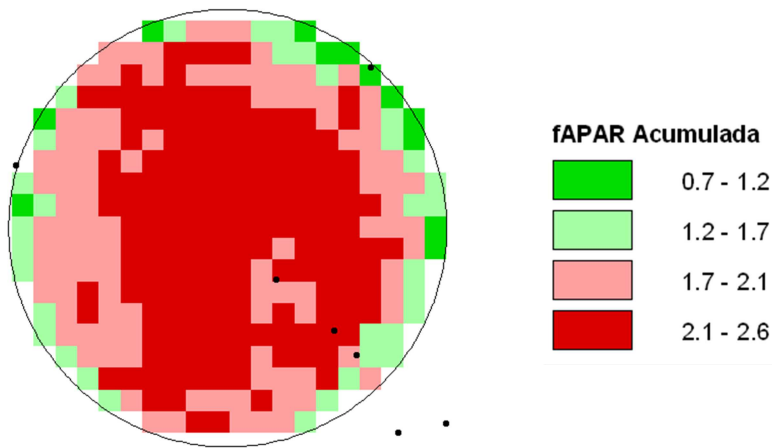


Figura 4.39: Distribuição espacial da fração da radiação fotossintética activa absorvida (f_{APAR}) acumulada – obtida e 5 datas de observação: 29 de Junho, 15 de Julho, 31 de Julho, 16 de Agosto e 1 de Setembro.

A representação espacial acumulada dos valores de f_{APAR} observados em 5 datas distintas, traduzem de uma forma indireta a capacidade que a cultura terá para produzir maior ou menor quantidade de matéria verde – produção total da cultura – consoante os valores de f_{APAR} verificados sejam maiores ou menores. Esta informação será relacionada com a informação obtida com a monitorização da produção da cultura, tal como ilustra a Figura 4.40.

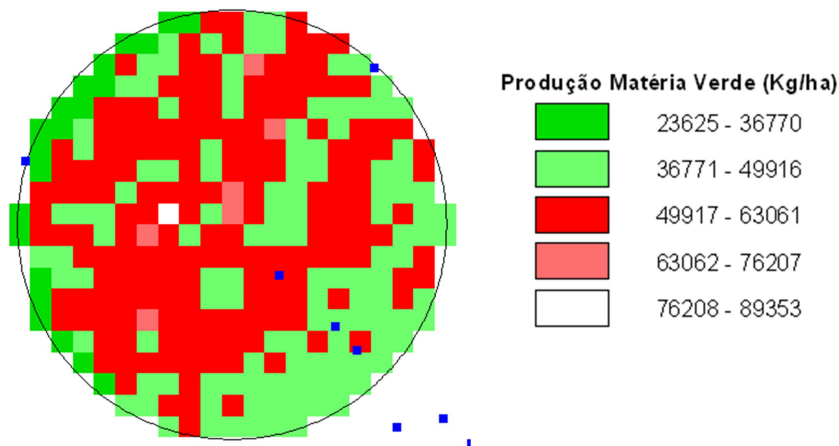


Figura 4.40: Distribuição espacial da Produção total da Cultura, na parcela experimental 6

Com uma produção média de 51 607 Kg/ha, a parcela 6 apresenta alguma heterogeneidade nos valores da produção de matéria verde monitorizados. Verifica-se que existe alguma correspondência na distribuição espacial dos maiores valores de f_{APAR} e os locais com maior produção de matéria verde. No entanto, é importante salientar que as amostras da produção da cultura correspondem a uma área aproximada de 1 ha, e a dimensão do pixel da imagem de satélite que traduz os valores de f_{APAR} é 30 m, logo existiu

alguma agregação na informação representada, o que levou de certa forma a maiores divergências na informação.

A informação espacialmente distribuída disponibilizada pelo satélite – parâmetros agronômicos – e a produção total obtida por amostragem, permitem avaliar o comportamento da cultura em determinada área geográfica, permitindo identificar possíveis variações espaciais, associadas a causas como: encharcamento, déficit hídrico, infestantes, doenças ou pragas, etc.

A Figura 4.41 representa a distribuição espacial da fração cobertura do solo pela cultura, na parcela experimental 1, nas 3 fases principais do desenvolvimento da cultura.

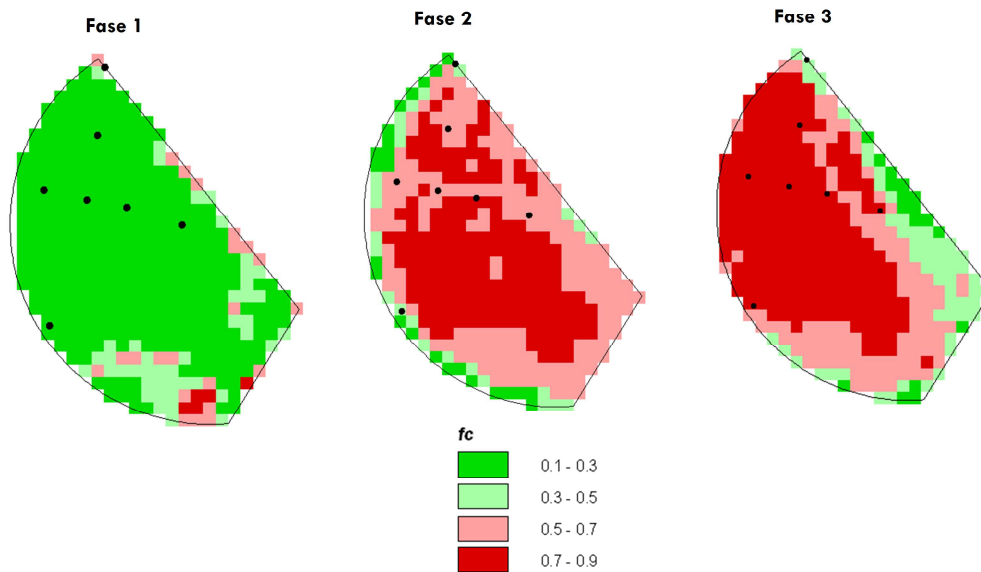


Figura 4.41: Distribuição espacial da fração de cobertura do solo (f_c), na parcela experimental 1, durante as fases de desenvolvimento – 1. Desenvolvimento vegetativo (29 de Junho), 2. Floração e Formação do Grão (31 de Julho), 3. Início da Maturação (1 de Setembro).

Os valores médios de f_c na parcela experimental 1 são, em três estádios de desenvolvimento da cultura do milho: fase 1- 0.30, fase 2 – 0.53 e Fase 3 – 0.53.

É de notar alguma heterogeneidade no desenvolvimento da cultura, induzido pelo déficit hídrico ocorrido na parcela nas fases de maiores necessidades hídricas (fase 2 e 3), e também pelos problemas de infiltração e uniformidade de distribuição verificados.

A Figura 4.42, ilustra a representação espacial da fração da radiação fotossintética activa absorvida (f_{APAR}), na parcela experimental 1

.

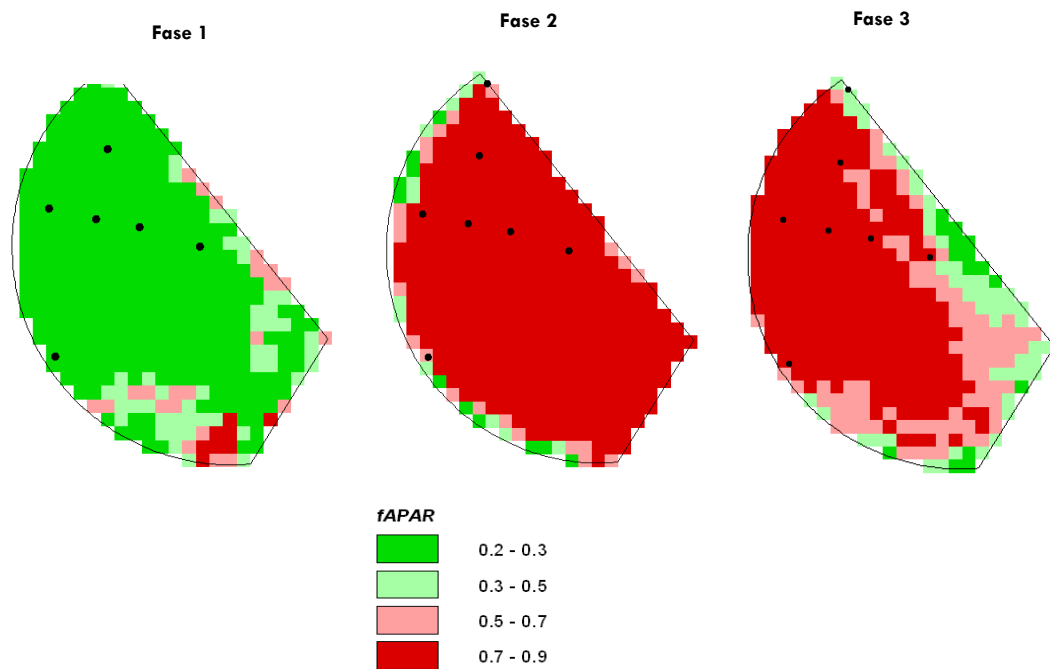


Figura 4.42: Distribuição espacial da fração da radiação fotossintética activa absorvida (f_{APAR}), na parcela experimental 1, nas fases de desenvolvimento – 1. Desenvolvimento vegetativo (29 de Junho), 2. Floração e Formação do Grão (31 de Julho), 3. Início da Maturação (1 de Setembro).

Os valores médios da distribuição espacial da fração da radiação fotossintética activa absorvida pela cultura, nas 3 fases de desenvolvimento da cultura, em 3 datas de observação foram 0.31, 0.55 e 0.55, respetivamente.

A Figura 4.43 ilustra a representação espacial dos valores de fAPAR acumulados em 5 datas de observação: 29 de Junho, 15 de Julho, 31 de Julho, 16 de Agosto e 1 de Setembro.

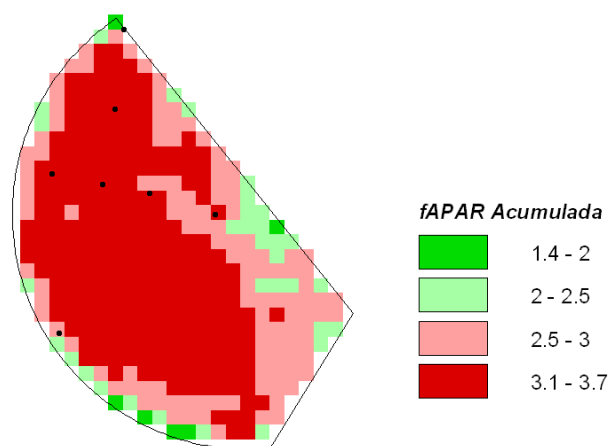


Figura 4.43: Distribuição espacial da fração da radiação fotossintética activa absorvida (f_{APAR}) acumulada – obtida em 5 datas de observação: 29 de Junho, 15 de Julho, 31 de Julho, 16 de Agosto e 1 de Setembro.

A representação espacial acumulada dos valores de f_{APAR} observados em 5 datas distintas, traduz de uma forma indireta a produtividade da cultura. Esta informação é relacionada com a informação obtida com a monitorização da produção da cultura, tal como ilustra a Figura 4.44.

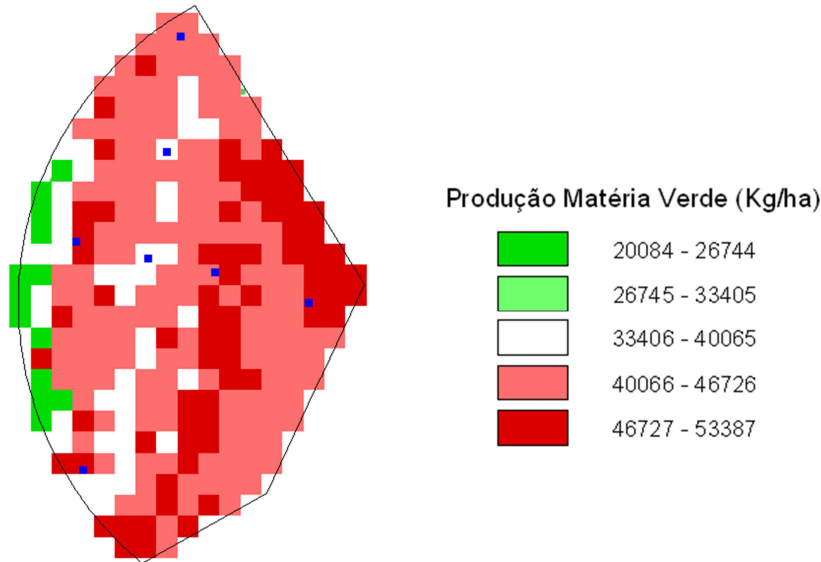


Figura 4.44: Distribuição espacial da Produção total da Cultura, na parcela experimental 1

Com uma produção média de 43 302 Kg/ha, verifica-se alguma heterogeneidade nos valores da produtividade da cultura. Este facto estará relacionado com vários aspetos: problemas na germinação devido à sua sementeira tardia (1 de Junho), problemas de infiltração, grandes perdas por escorrimento superficial e dotações de rega reduzidas, face às necessidades de rega da cultura, nas fases de maiores necessidades hídricas (fase 2 e 3). Tal como na Parcela 6, as amostras da produção da cultura correspondem a uma área aproximada de 1 ha, e a dimensão do pixel da imagem de satélite que traduz os valores de f_{APAR} é 30 m, logo existiu alguma agregação na informação representada, o que levou de certa forma a maiores divergências na informação.

A Figura 4.45 ilustra a correlação entre o valor médio da água disponível no solo (monitorizados com a sonda TDR) e os valores de NDVI (obtidos a partir da informação obtida com as imagens de 29 de Junho, 15 de Julho, 31 de Julho, 16 de Agosto e 1 de Setembro), nas parcelas 1 e 6.

Os valores apresentados reportam aos locais de amostragem sinalizados nas imagens anteriores.

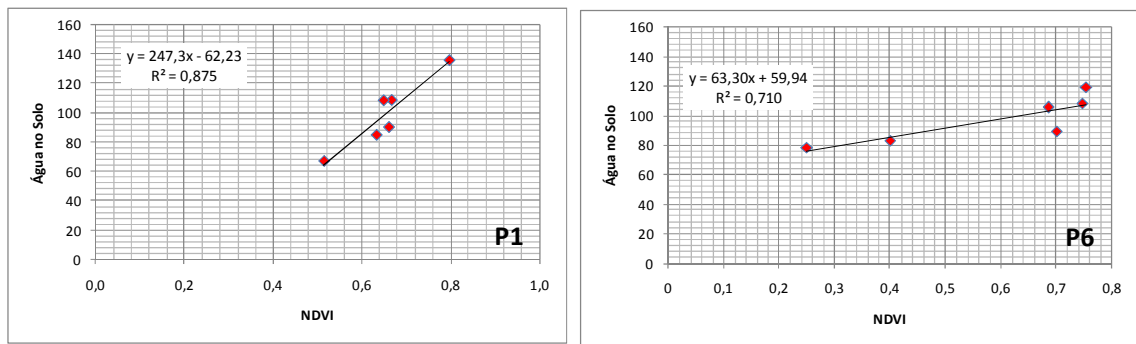


Figura 4.45: Correlação entre os valores médios de água no solo, monitorizada com recurso à sonda TDR e os valores de NDVI estimados a partir das imagens de satélite, nas parcelas 1 e 6.

Verifica-se uma correlação elevada em ambas as parcelas, 87% e 71%. Estes valores apresentados mostram bem a forte relação que existe entre o desenvolvimento da cultura (indiretamente traduzido pelos valores de NDVI) e a disponibilidade de água no solo.

4.2.3 Distribuição Espacial das Necessidades Hídricas da Cultura: Evapotranspiração Cultural

Nesta secção pretende-se avaliar a heterogeneidade de valores de ET_c^* , dentro de cada parcela experimental, de forma a avaliar o desenvolvimento da cultura dentro da parcela, identificando ou não a existência de zonas com problemas associados ao seu desenvolvimento: défice hídrico, encharcamento, praga, doenças, infestantes, etc.

As Figuras 4.46 a 4.48, ilustram a distribuição espacial da ET_c^* , em quatro unidades experimentais (P1, P3, P4 e P5), correspondente a momentos de observação, três fases de desenvolvimento da cultura (desenvolvimento vegetativo, floração e início da maturação, 29 Junho, 31 de Julho e 1 de Setembro, respetivamente).

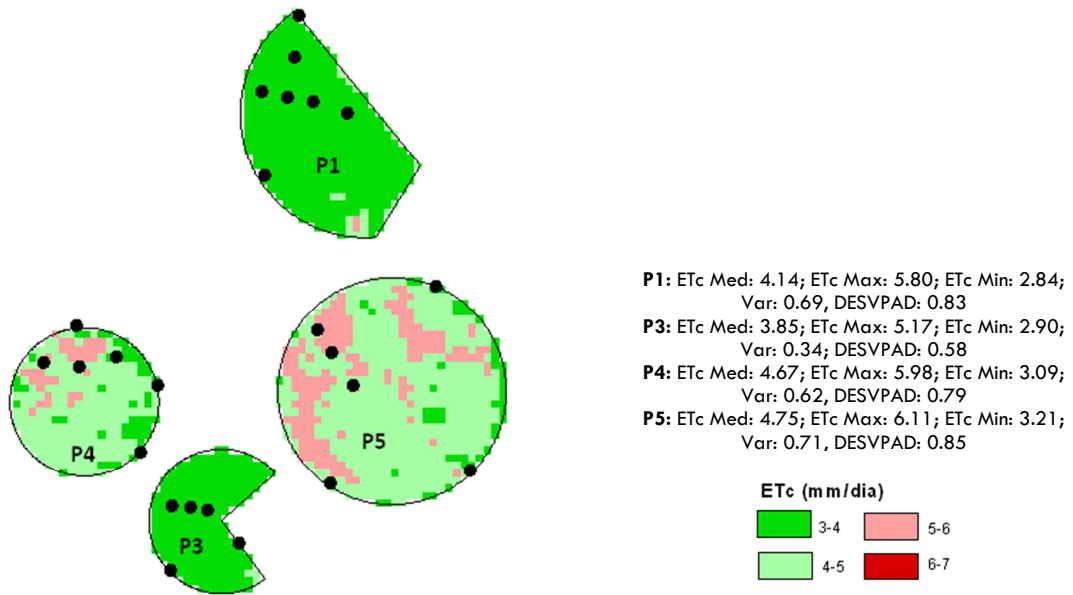


Figura 4.46: Distribuição espacial da Evapotranspiração Cultural (ETc^*) nas parcelas experimentais 1, 3, 4 e 5, durante a fase de desenvolvimento vegetativo (29 de Junho)

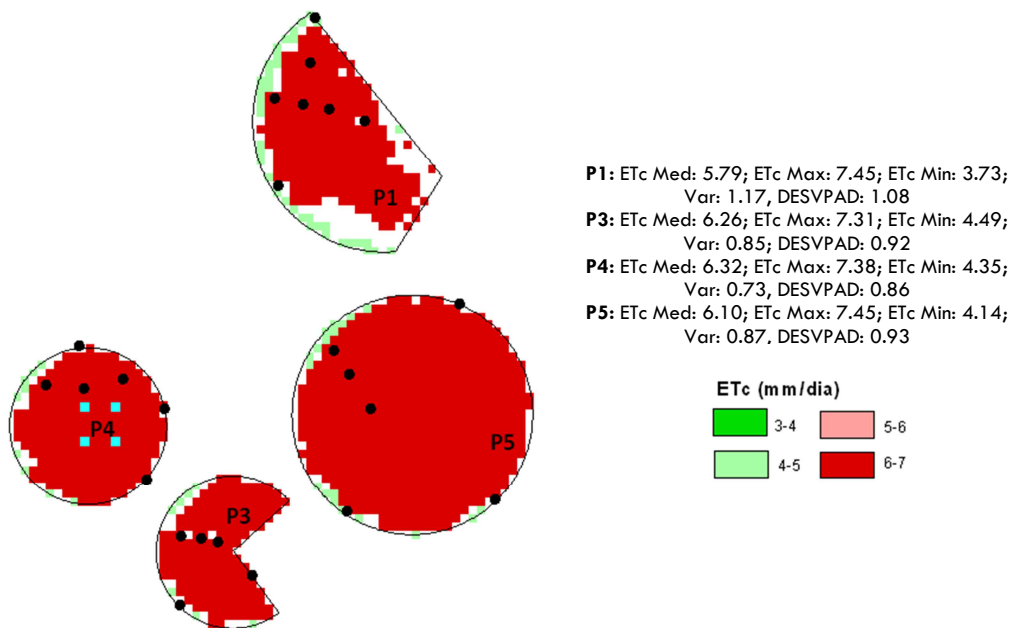


Figura 4.47: Distribuição espacial da Evapotranspiração Cultural (ETc^*) nas parcelas experimentais 1, 3, 4 e 5, durante a fase de floração e formação de grão (31 de Julho)

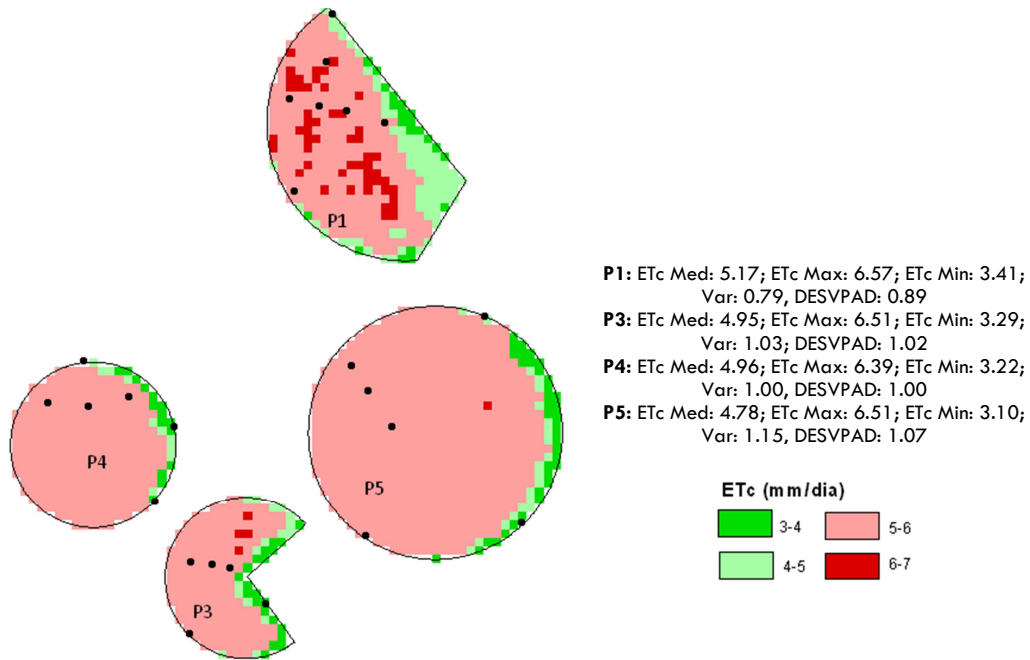


Figura 4.48: Distribuição espacial da Evapotranspiração Cultural (ETc^*) nas parcelas experimentais 1, 3, 4 e 5, no início Fase Maturação (1 de Setembro)

As Figuras 4.49 a 4.51, ilustram a distribuição espacial da ETc^* , em três unidades experimentais (P2, P6 e P7), correspondente momentos de observação, três fases de desenvolvimento da cultura (desenvolvimento vegetativo, floração e início da maturação, 29 Junho, 31 de Julho e 1 de Setembro, respetivamente).

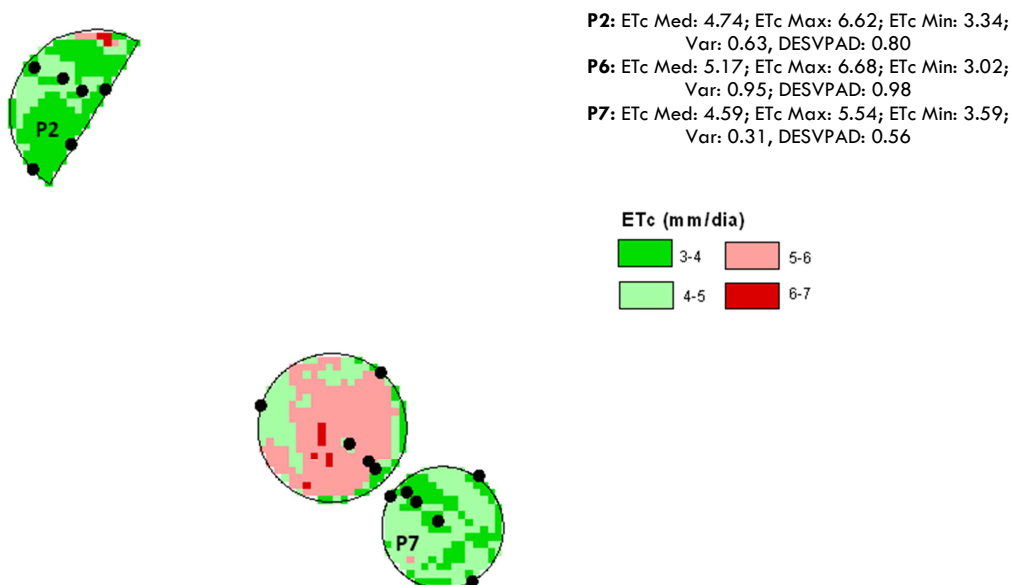


Figura 4.49: Distribuição espacial da Evapotranspiração Cultural (ETc^*) nas parcelas experimentais 2,6 e 7, durante a fase de desenvolvimento vegetativo (29 de Junho)

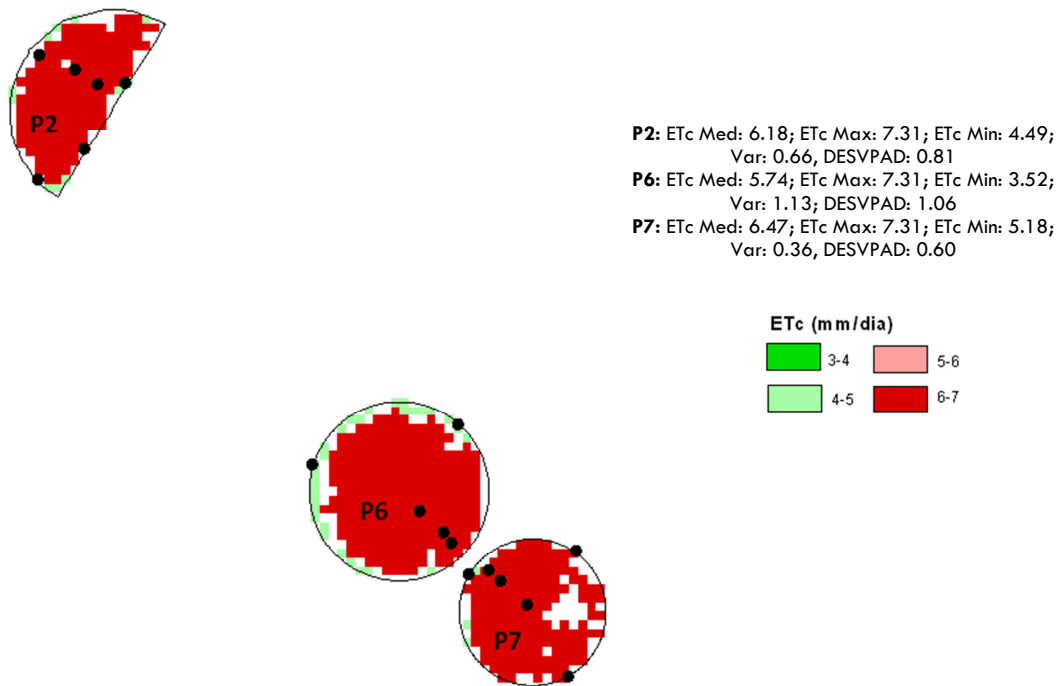


Figura 4.50: Distribuição espacial da Evapotranspiração Cultural (ETc^*) nas parcelas experimentais 2,6 e 7, durante a fase de Floração e Formação Grão (31 de Julho)

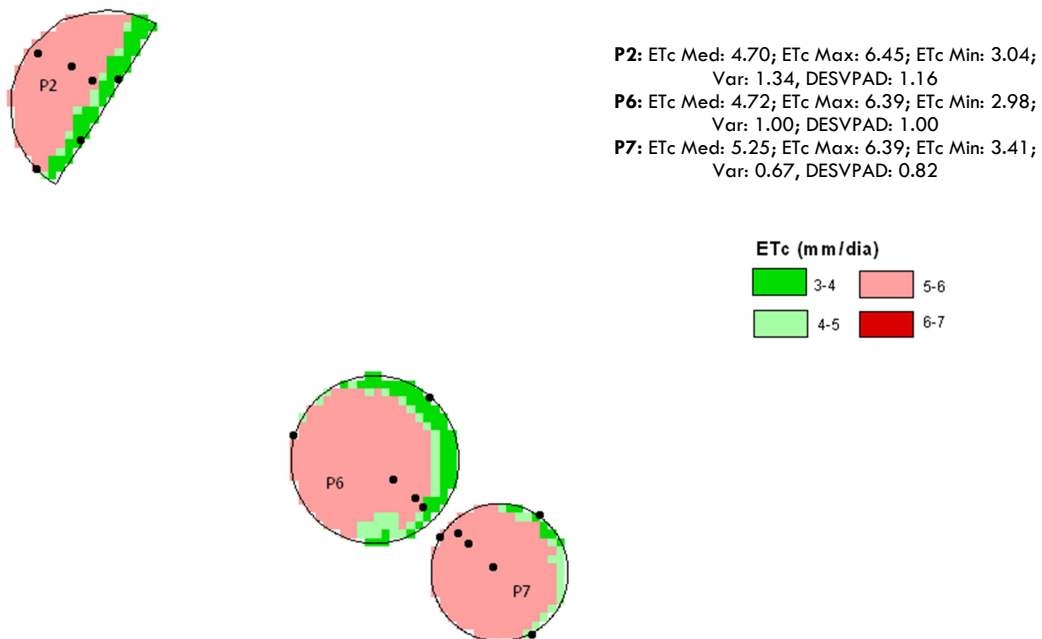


Figura 4.51: Distribuição espacial da Evapotranspiração Cultural (ETc^*) nas parcelas experimentais 2,6 e 7, no início Fase de Maturação (1 de Setembro)

A Figura 4.52 apresenta a distribuição espacial dos valores de ETc acumulados calculados com base na informação de satélite, Kc^* (coeficiente cultural espectral obtidos a partir dos valores de NDVI), em todas

as parcelas experimentais. Os valores apresentados foram obtidos com a informação disponibilizada pelas imagens de satélite Landsat 5, em 5 datas de observação: 29 de Junho, 15 de Julho, 31 de Julho, 16 de Agosto e 1 de Setembro.

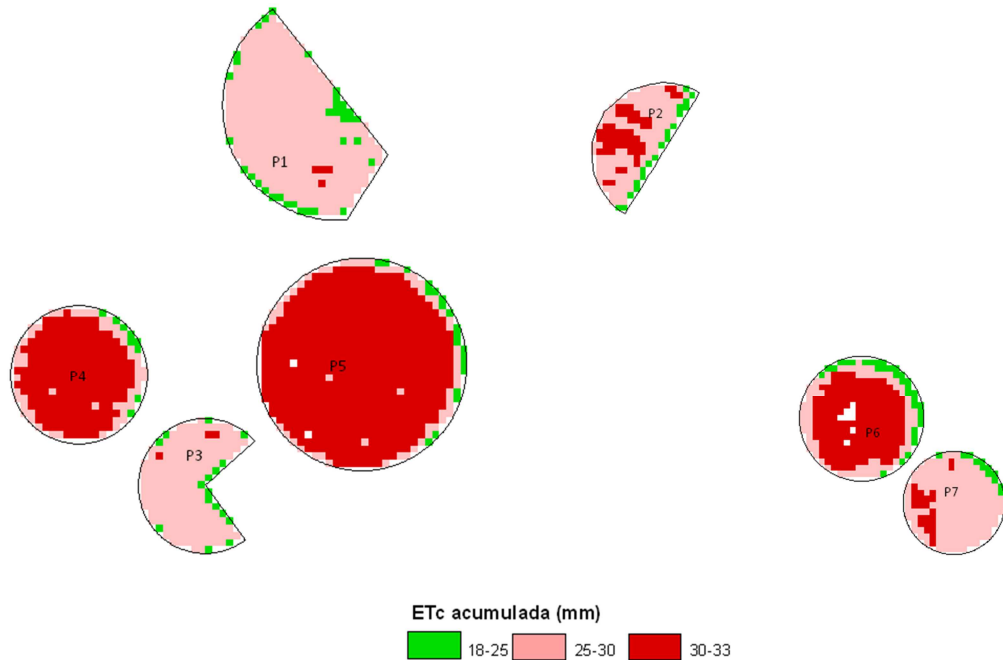


Figura 4.52: Distribuição espacial da Evapotranspiração Cultural acumulada (ETc^*) em todas as parcelas experimentais, em 5 datas de observação, mediante informação de satélite em 5 datas de observação (29 de Junho, 15 de Julho, 31 de Julho, 16 de Agosto e 1 de Setembro).

Os resultados apresentados ilustram bem as potencialidades que a metodologia de satélite poderá introduzir num sistema de gestão da rega à escala regional. Possibilitam a representação espacial de parâmetros agrónomicos e necessidades hídricas das culturas, permitindo desta forma avaliar o seu desenvolvimento e identificar possíveis problemas associados ao seu desenvolvimento: défice hídrico, encharcamento, pragas e doenças, problemas de germinação, problemas relacionados com o funcionamento do equipamento de rega, identificação de manchas de solo com capacidade de retenção diferente, etc.

Relativamente ao cálculo dos coeficientes culturais mediante a utilização dos procedimentos metodológicos cuja base é a determinação dos índices de vegetação (neste caso concreto os valores de NDVI) a partir das imagens de satélite, é de notar uma descrição com elevada representação espacial que se traduzirá num cálculo mais realista da taxa de evapotranspiração da cultura. A distribuição espacial das necessidades hídricas das culturas é sem dúvida uma potencialidade muito importante na identificação de problemas de uniformidade, que condicionam o pleno desenvolvimento da cultura, implicando práticas de rega de baixa eficiência.

As curvas de desenvolvimento da cultura características, nos parâmetros agronômicos representados – fração de cobertura e coeficientes culturais – comprova-se a elevada capacidade que o índice de vegetação NDVI tem para traduzir o desenvolvimento do índice de área foliar da cultura e também a senescência foliar (González-Dugo e Mateos, 2008).

É de considerar que no início da campanha de rega e início do desenvolvimento da cultura a informação de satélite foi deficiente, tendo-se verificado episódios de nebulosidade aquando da passagem do satélite, tendo-se traduzido em imagens sem utilidade. É de considerar a integração da análise de imagens de outro satélite, obtidas em plenas condições de visibilidade.

4.3 Procedimentos e Metodologias de Gestão para a estimativa do Índice de Stress (oportunidade de Rega)

Os resultados apresentados neste ponto reportam à informação obtida com a utilização remota de sensores, em plataforma não tripulada. O objetivo geral desta componente, é avaliar o potencial desta tecnologia para a utilização em gestão de grandes áreas de regadio, procurando ultrapassar algumas limitações apontadas à utilização da tecnologia de satélite – fraca resolução espacial e temporal, elevada dependência de condições atmosféricas favoráveis (implicando muitas vezes períodos longos sem informação), custo elevado das imagens.

Os dados apresentados reportam apenas à informação na banda do infravermelho térmico, pois não nos foi possível recolher informação multiespectral. Com a informação disponível pretende-se avaliar a operacionalidade da tecnologia, no que diz respeito à sua utilização na gestão da água de rega em regadio – na definição da oportunidade de rega, mediante estimativa dos índices de stress hídrico.

O sistema remoto de elevada resolução, utilizando plataforma aérea não tripulada, pode vir a ser a metodologia de suporte à definição dos procedimentos de gestão da água a utilizar à escala regional.

4.3.2 Imagem Térmica de Elevada Resolução obtida por Plataforma aérea não tripulada

A Figura 4.53 ilustra a imagem térmica de elevada resolução (40 cm, resolução espacial), obtida com a câmara térmica de alta resolução instalada na plataforma aérea não tripulada (UAV). A imagem apresentada foi recolhida na missão realizada no dia 21 de Setembro de 2010, no Perímetro de rega do Divor, em quatro unidades experimentais (P1,P3, P4 e P5), uma área de 179 ha.

As condições atmosféricas durante a realização do voo foram as seguintes: pressão atmosférica (98 kPa), velocidade do vento (1-2 m/s), humidade relativa (54%) e temperatura do ar (23°C).

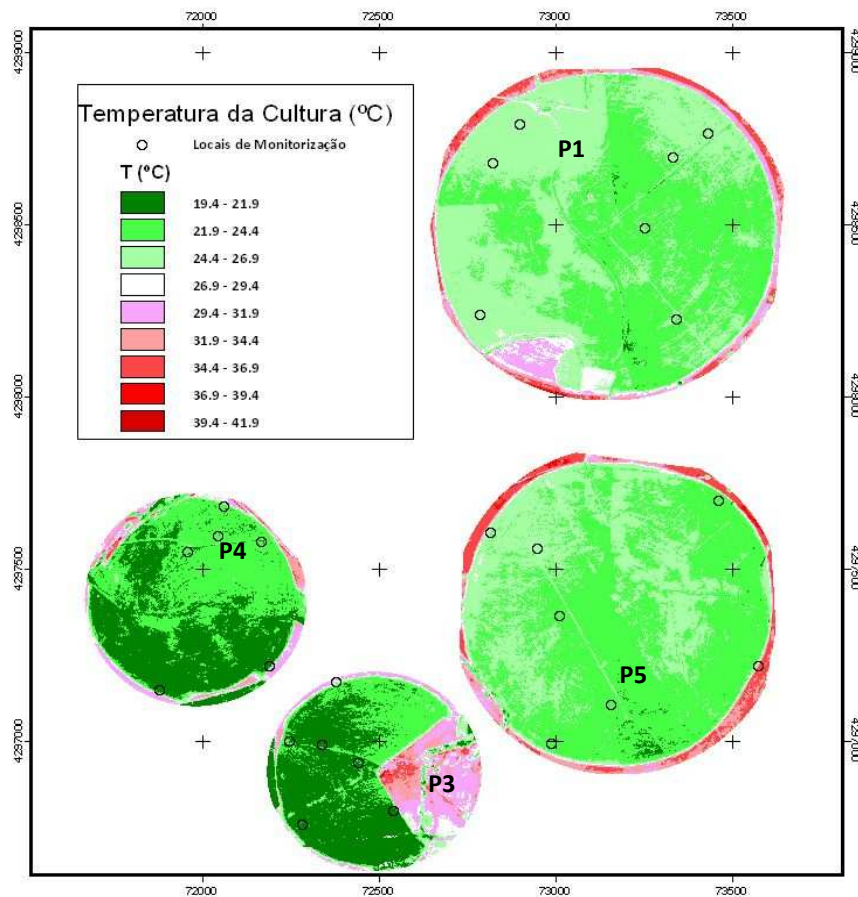


Figura 4.53: Imagem térmica de elevada resolução obtida com a plataforma aérea não tripulada, durante a campanha de 2010, no Perímetro de Rega do Divor

Nas parcelas experimentais 3 e 4, a cultura (milho) apresenta uma temperatura da superfície cultural (19.5-21.0°C) inferior à temperatura do ar (23°C), mas superior à temperatura do coberto nas parcelas 1 e 5. Em cada uma das parcelas, como as imagens documentam, é bem patente a coroa de temperaturas altas (30-40°C), correspondendo à rega deficitária da periferia do Pivot, proporcionada pelo lança suspenso, muito frequente neste tipo de sistemas de rega.

As parcelas apresentam alguma heterogeneidade nos valores da temperatura de superfície cultural, esta variação da temperatura dentro da parcela está associada à variação da disponibilidade de água no solo (carência/encharcamento).

4.3.2.1 Diferencial Térmico ($T_c - T_a$) e Disponibilidade de Água no Solo

A Figura 4.54 ilustra o diferencial térmico ($T_c - T_a$), em °C, nas quatro unidades experimentais.

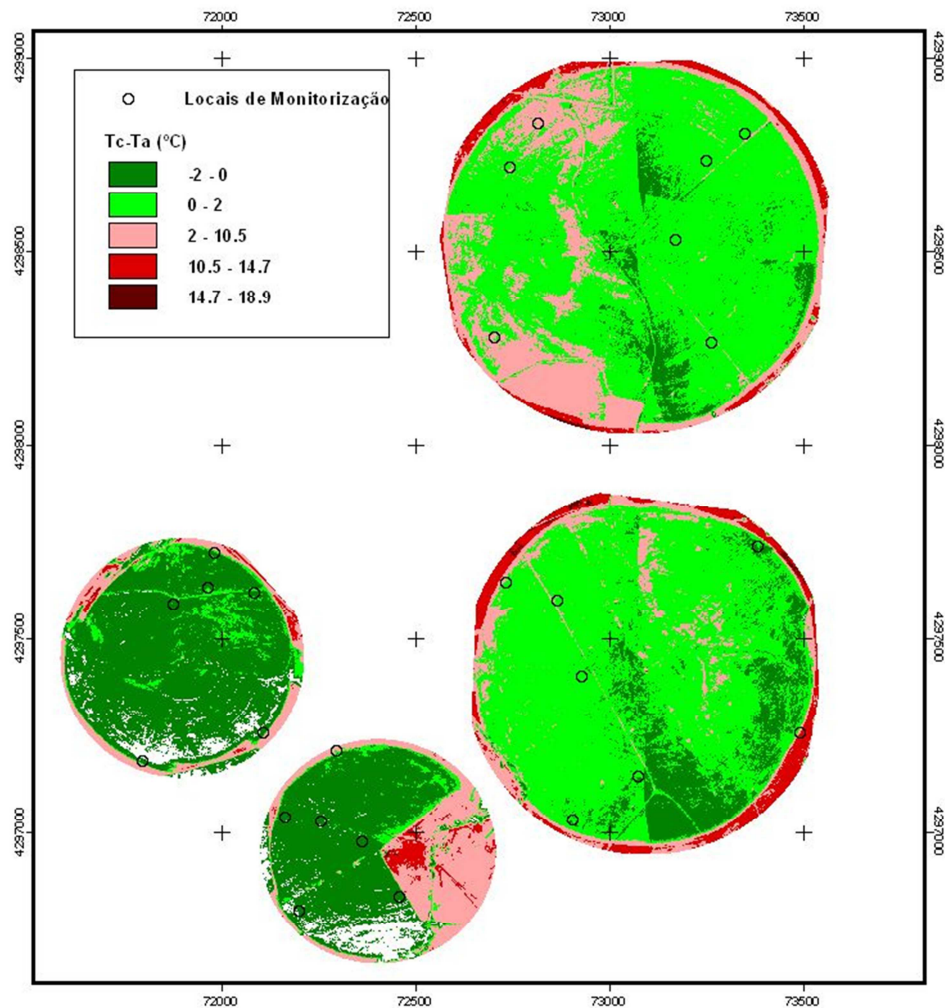


Figura 4.54: Diferencial térmico (T_c-T_a), em $^{\circ}\text{C}$, obtido com a plataforma aérea não tripulada, durante a campanha de 2010, no Perímetro de Rega do Divor

A representação espacial do diferencial térmico (T_c-T_a), em $^{\circ}\text{C}$, mostra o seguinte: a cultura nas parcelas 3 e 4 apresenta temperaturas do coberto inferiores à temperatura do ar, indicativo da existência de conforto hídrico. Apenas zonas pontuais apresentam valores de temperatura (T_c) mais elevados, associados a zonas de encharcamento (traduzindo problemas de asfixia radical), à exceção da área ocupada pelo lanço suspenso da rampa rotativa, onde os valores mais altos da temperatura do coberto estão associados à pequena disponibilidade de água no solo aí existente.

Nas parcelas 1 e 5, os valores da temperatura do coberto são, na maior parte da área, superiores à temperatura do ar, apresentando um diferencial térmico superior a zero, indicativo da existência de stress.

A Figura 4.55, representa a correlação encontrada entre a disponibilidade de água no solo, monitorizada com as amostras gravimétricas e o diferencial térmico (T_c-T_a) obtido com a imagem térmica de elevada resolução.

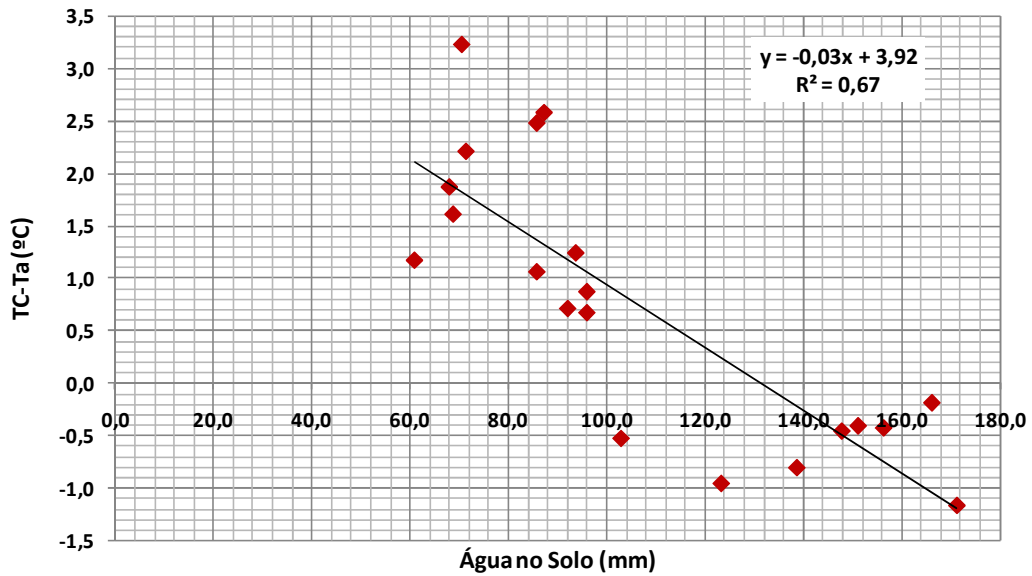


Figura 4.55: Correlação Linear entre o diferencial térmico (T_c-T_a), em °C e a disponibilidade de água no solo (mm)

Com a correlação linear encontrada para o diferencial (T_c-T_a) e disponibilidade de água no perfil do solo (até 60 cm de profundidade), é possível retirar as seguintes ilações: para valores de água no solo acima dos 100 mm de água a cultura apresenta valores de temperatura inferiores à temperatura do ar, indicativo da não existência de stress hídrico; para valores de disponibilidade de água no solo inferiores a 100 mm de água no perfil do solo, o diferencial térmico assume valores positivos, indicativo de stress hídrico, com valores da temperatura do coberto superiores à temperatura do ar.

Na Tabela 4.3 apresentam-se os valores médios (pontos monitorizados) por unidade experimental, para a disponibilidade de água no perfil do solo, temperatura do coberto vegetal e diferencial térmico (T_c-T_a).

Tabela 4.3: Disponibilidade de água no solo, T_c , T_c-T_a , capacidade de campo (C_c) e coeficiente de emurchecimento (C_e)

Parcela	Água no Solo (mm)	T_c (°C)	T_c-T_a (°C)	C_c e C_e (mm)
1	70	24.74	1.74	162/60
3	120	22.37	-0.63	126/57
4	151	22.59	-0.41	180/84
5	85	24.06	1.06	129/69

Os valores apresentados mostram que de uma forma geral a tecnologia utilizada identifica com facilidade a existência de stress hídrico na cultura. No entanto, apresenta fraca sensibilidade na avaliação de situações em conforto hídrico pleno a moderado, tal como podemos observar na Figura 4.56, onde estão correlacionados valores de água no solo em pleno conforto hídrico e diferenciais térmicos ($T_c - T_a$) verificados.

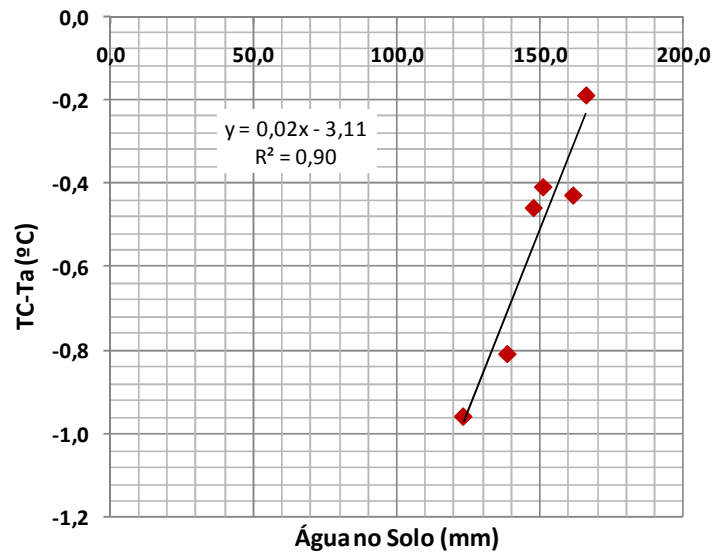


Figura 4.56: Correlação Linear entre valores de plena disponibilidade hídrica e o diferencial térmico ($T_c - T_a$), em °C

Com o ensaio experimental realizado, apenas foi possível usar a câmara térmica, devido à existência de um problema técnico na câmara multiespectral de elevada resolução. No entanto, num futuro próximo deve testar-se a tecnologia equipada com as duas câmaras, uma vez que a informação multiespectral de elevada resolução tem vindo a revelar-se muito importante no cálculo das necessidades hídricas das culturas, utilizando a metodologia dos índices de vegetação (NDVI) para o cálculo dos coeficientes culturais espectrais (K_{cb}^* e K_c^*).

Talvez seja importante em ensaios futuros estudar os seguintes aspetos: realizar novas missões em diferentes estádios de desenvolvimento e com diferentes condições ambientais, para assim poder avaliar a sensibilidade da metodologia utilizada; experimentar a tecnologia em outra oportunidade de leitura, junto às 14 horas (altura em que os estomas da cultura estarão fechados e a temperatura do coberto será maior, traduzindo desta forma, com maior precisão, a existência ou não de stress).

4.3.2.2 Cálculo do Índice de Stress Hídrico (CWSI) para a Cultura do Milho, no Perímetro de Rega do Divor, a partir das imagens térmicas obtidas com a plataforma aérea não tripulada

A Figura 4.57 ilustra a distribuição espacial dos valores do CWSI nas quatro parcelas monitorizadas com a plataforma aérea não tripulada. Os valores apresentados resultaram da aplicação da metodologia de Idso *et al.* (1981), tendo por base o limite inferior e superior de stress definidos por Toureiro *et al.* (2008), obtidos para a cultura do milho no Perímetro de Rega do Divor, mediante utilização de plataforma remota com viatura TT.

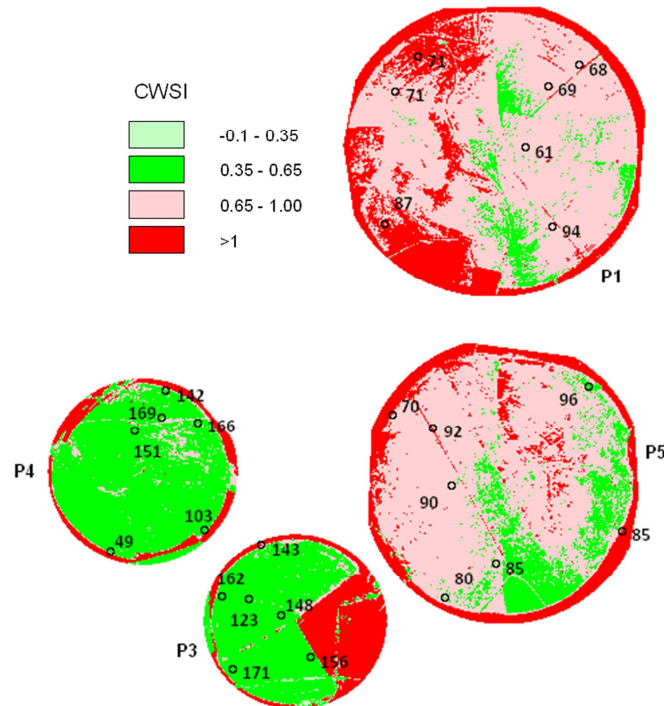


Figura 4.57: Distribuição Espacial CWSI em 4 unidades experimentais (P1, P3, P4 e P5) do Perímetro do Divor

Os valores de CWSI apresentados justificaram a informação já apresentada, relativa ao diferencial térmico, as Parcelas 3 e 4 apresentam valores de CWSI mais baixos e teores de água disponível mais elevados, as Parcelas 1 e 5 apresentam valores mais elevados de CWSI e teores de água mais baixos, também nestas duas parcelas a heterogeneidade dos valores apresentados é bastante mais elevada. Na parcela 1 permanecem os problemas de infiltração, resultando em zonas com elevado défice de água disponível e outras em que verificamos algum encharcamento (associado às grandes perdas por escoamento superficial), nestas zonas os valores de CWSI são bastante elevados.

O valor de *CWSI de referência* referido em bibliografia para a cultura do milho, a partir do qual existe stress que afeta diretamente a produção da cultura é de 0,35, (Yazar, *et.al.* 1999). No caso de estudo apresentado, parece que este limite será superior, podendo chegar a 0,65. No entanto, é de assegurar o

início da rega antes que este limite seja atingido, para garantir o pleno desenvolvimento da cultura, sem que ocorram quebras de produção.

A Figura 4.58 apresenta a correlação entre os valores do índice de stress (CWSI) e os valores da água disponível nos pontos monitorizados. As parcelas 3 e 4 e as parcelas 1 e 5 apresentam características pedológicas semelhantes, no que diz respeito às curvas características de água no solo. Por esta razão, opta-se por correlacionar a informação separadamente: Gráfico 1 – Parcelas 3 e 4 e Gráfico 2 – Parcelas 1 e 5.

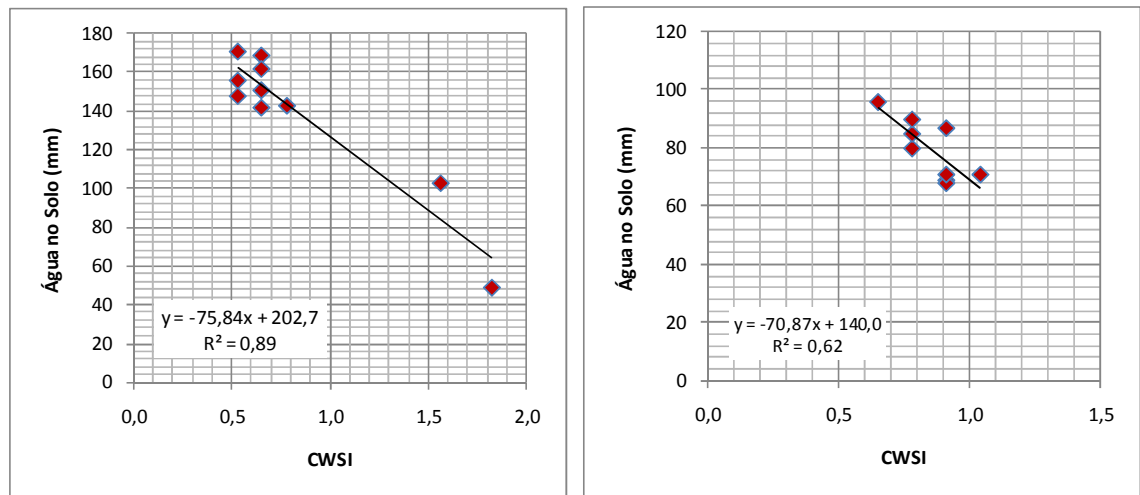


Figura 4.58: Correlação entre os valores de CWSI e água no solo (monitorização por amostragem)

Os valores apresentados na Figura 4.58 representam a correlação encontrada entre os valores de CWSI e os teores de água no solo, para as Parcelas 3 e 4 com um coeficiente de determinação de 89% e para as Parcelas 1 e 5, um valor bastante mais baixo, 62%.

Os resultados apresentados no ponto 4.3.2.2, ilustram bem a importância que a termometria de infravermelhos pode ter na determinação do índice de stress nas culturas, definindo deste modo a oportunidade de rega, assegurando desta forma o apoio à condução da rega numa determinada área regional.

Será necessário realizar algum trabalho experimental que permita estimar com maior rigor os limites inferior e superior para o cálculo de CWSI, utilizando a informação fornecida pela plataforma aérea não tripulada, e verificar o valor limite para o CWSI, a partir do qual será necessário despoletar a rega, sem que ocorram quebras de produção. Neste sentido, será necessário suportar a decisão do momento a partir do qual será necessário regar – oportunidade de rega – mediante a informação traduzida pelo valor de CWSI, analisando a disponibilidade de água do solo em cada momento e os correspondentes valores de CWSI, com base nas curvas características de água no perfil do solo, de forma a definir qual o valor de CWSI indicativo de rega.

A utilização da tecnologia aérea não tripulada (UAV), equipada com a câmara térmica associada com uma câmara multiespectral de elevada resolução, será uma metodologia com um grande potencial para a determinação das necessidades de água das culturas e identificação de stress hídrico, em áreas de regadio de média a grande dimensão, para a gestão da água de rega. As grandes vantagens associadas a esta tecnologia são: elevada representação espacial da informação obtida (resolução de 40 cm), rapidez na recolha da informação (no ensaio realizado, foram consumidos 30 min para fazer o levantamento de 179 ha), possibilidade de programação das missões de forma a minimizar os efeitos provocados pelas condições atmosféricas desfavoráveis (nebulosidade), fácil operacionalidade da tecnologia.

4.4 Procedimentos e metodologias para a gestão integrada da água de rega na área regional do Divor

Os resultados obtidos com o presente trabalho de doutoramento são a base para a definição de um conjunto de procedimentos e metodologias para a gestão da água de rega no Perímetro de Rega do Divor, com aplicação à cultura do milho. Pretende-se que os procedimentos definidos sejam generalizáveis, tanto quanto possível, a outros regadios com características mediterrâneas.

Agrupa-se a informação obtida em duas componentes distintas: a primeira agrega os procedimentos relacionados com a metodologia de satélite (Landsat 5), na tradução do desenvolvimento da cultura (parâmetros agrónomicos) e na estimativa das necessidades de rega; e a segunda reporta os procedimentos relacionados com a utilização remota de sensores em plataforma aérea não tripulada, avaliação da operacionalidade desta tecnologia e a sua utilização à escala regional, como alternativa e complementar ao satélite, ultrapassando desta forma algumas limitações impostas pelo satélite, relativas à resolução espacial e temporal e custos de informação.

A informação obtida pela plataforma aérea não tripulada reporta apenas à recolha de imagens com elevada representação espacial, na banda do infravermelho térmico, permitindo apenas avaliar a estimativa do índice de stress hídrico e definição da oportunidade de rega, a partir desta informação. A informação multiespectral não foi possível avaliar devido a uma avaria na câmara multiespectral, no entanto será de considerar a sua utilização futura, como base de informação à definição dos parâmetros agrónomicos, coeficientes culturais, necessidades hídricas, seguindo para esse fim as expressões analíticas obtidas com base na informação de satélite.

4.4.1 Procedimentos e metodologias para uma Gestão integrada da Água de Rega com suporte em técnicas de deteção remota (satélite e plataforma aérea não tripulada)

Nesta secção são estruturados os resultados obtidos com o presente trabalho, de forma a constituírem uma base para a definição dos procedimentos e metodologias de gestão da água de rega à escala regional do

Divor, mediante a utilização de tecnologias de detecção remota (com base na informação de satélite e/ou utilização remota de sensores em plataformas não tripuladas).

4.4.1.1 Definição da Área efetivamente regada

A informação disponibilizada pelo cálculo de NDVI, a partir da imagem de satélite (imagens de satélite) associadas aos sistemas de informação geográfica (SIG) permitem conhecer com rigor a área efetivamente regada à escala regional, ao mesmo tempo que nos permite identificar quais as culturas regadas em cada parcela. Estas informações obtêm-se a partir de um mapa de uso do solo, mediante análise multitemporal de NDVI.

A Figura 4.59, ilustra o diagrama com os procedimentos necessários à definição do mapa de uso do solo a partir da informação multiespectral de alta/elevada resolução (satélite ou utilização remota de sensores).

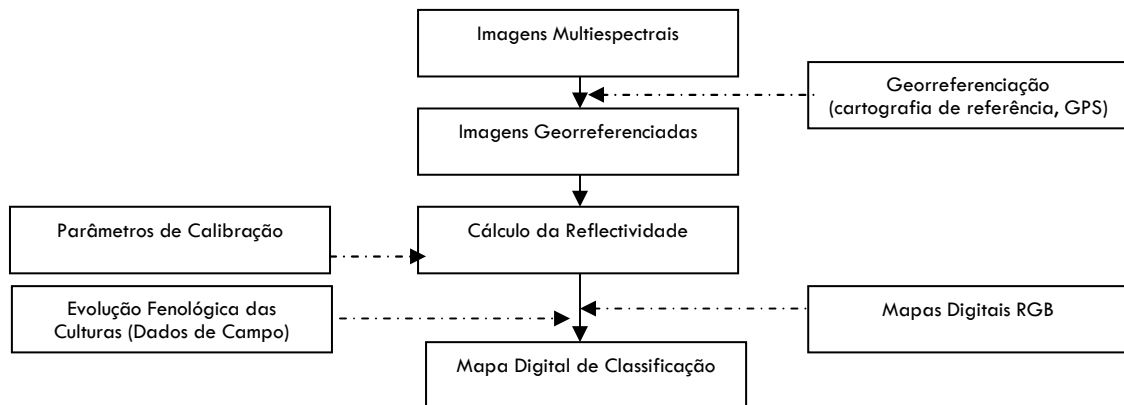


Figura 4.59: Diagrama com os procedimentos de base para a definição do mapa de uso do solo (classificação)

4.4.1.2 Definição dos parâmetros que caracterizam hidrogeologicamente a área regional de regadio

O conhecimento das características hidrogeológicas de qualquer parcela de regadio considera-se informação de base fundamental à prática de uma gestão eficiente da água.

A Figura 4.60, ilustra o diagrama com os procedimentos a utilizar e adotar para qualquer área de regadio.

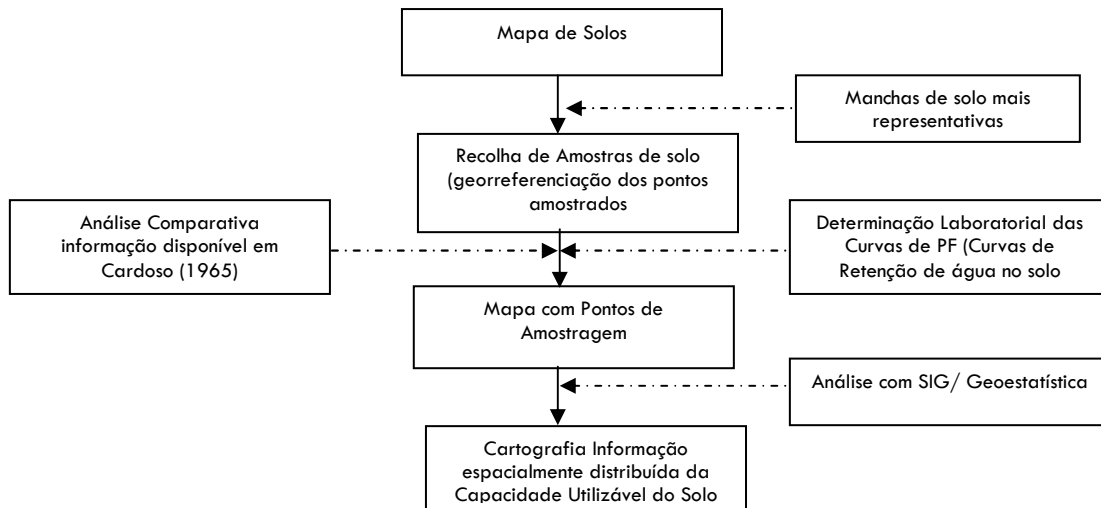


Figura 4.60: Diagrama com os procedimentos de base para caracterização hidropedológica de uma área regional regadio (base experimental do Divor)

Relativamente ao Perímetro de Rega do Divor, constituiu-se com o presente trabalho uma base de dados de solos desta área regional, que nos permite conhecer com rigor das curvas de retenção de água no solo.

O Capítulo 3 apresenta a caracterização da área de estudo (Perímetro do Divor), sendo a base para a integração num esquema de gestão da água de rega, permitindo conhecer com rigor a capacidade de armazenamento de qualquer parcela de rega, será possível definir qual a quantidade de água efetivamente necessária ao pleno desenvolvimento das culturas (dotações de rega) e o momento a partir do qual será necessário aplicar água à cultura, definição da oportunidade de rega.

4.4.1.3 Definição dos parâmetros que caracterizam o desenvolvimento da cultura do milho, na área regional do Divor, mediante imagens multiespectrais de alta/elevada resolução

A informação obtida na secção 4.1.3 traduz os dados que apoiaram a definição das relações matemáticas que nos permitirão estimar os parâmetros agronómicos a partir dos valores de NDVI traduzidos pela imagem de satélite.

A Tabela 4.4 traduz essas relações que serão a base para apoiar a gestão da água de rega na cultura do milho para a área regional do Divor.

Tabela 4.4: Expressões matemáticas que relacionam f_c e LAI com valores de NDVI, para a cultura do milho, na área regional do Divor

Parâmetro da Cultura	Expressão Matemática	R ²
Fração de Cobertura do Solo pela Cultura (f_c)	$f_c=0,136 e^{2.123(NDVI)}$	0.89
Índice de Área Foliar (LAI)	$LAI=0,268 e^{3.439(NDVI)}$	0.87

A informação disponibilizada pela imagem de satélite permite-nos conhecer com elevada representação espacial o desenvolvimento da cultura, identificando o estágio do seu desenvolvimento em cada instante, assegurando desta forma a estimativa rigorosa das necessidades de hídricas das culturas e ao mesmo tempo permite-nos identificar possíveis problemas associados ao desenvolvimento da cultura (pragas, doenças, encharcamento, etc.).

A Tabela 4.5 apresenta as expressões matemáticas que relacionam LAI com f_c , e f_{APAR} com NDVI, estas expressões foram obtidas por González *et al* (2006), mas validadas para as condições do Perímetro do Divor.

Tabela 4.5: Expressões analíticas desenvolvidas por outros autores e validadas para a área regional do Divor, que relacionam LAI e f_c , f_{APAR} e NDVI

Parâmetro da Cultura	Expressão Matemática
Fração Cobertura do Solo (f_c)	$f_c=0,142 (LAI)+0.153$
Fração da Radiação Fotossintética ativa absorvida (f_{APAR})	$f_{APAR}=1,25 (NDVI-0.14)$

A Tabela 4.6 apresenta as expressões encontradas para a estimativa do valor de K_c e K_{cb} a partir da informação de satélite (NDVI).

Tabela 4.6: Expressões matemáticas que relacionam K_c^* e K_{cb}^* com valores de NDVI, para a cultura do milho, na área regional do Divor

Parâmetro da Cultura	Expressão Matemática	R ²
Coefficiente Cultural (K_c^*)	$K_c^*=0.918 (NDVI)+0.303$	0.82
Coefficiente Cultura Basal (K_{cb}^*)	$K_{cb}^*=1.345 (NDVI)-0.163$	0.86

A determinação rigorosa dos valores de K_c e K_{cb} será uma mais-valia para a estimativa das necessidades reais de rega a uma escala regional, permitindo desta forma apoiar um esquema de gestão da rega cuja economia da água será o lema chave para o sucesso da agricultura de regadio.

As expressões apresentadas nas Tabelas 4.4 a 4.6, foram obtidas e validadas com base na informação experimental e de satélite, no entanto, poderemos fazer uso desta informação em imagens multiespectrais de elevada resolução, com origem nas tecnologias de deteção remota a partir da plataforma aérea não tripulada.

A Figura 4.61, ilustra os procedimentos gerais adotar em qualquer área regional, para a estimativa espacialmente distribuída das necessidades hídricas das culturas (ET_c^*), mediante informação multiespectral, com alta/elevada representação espacial e temporal.

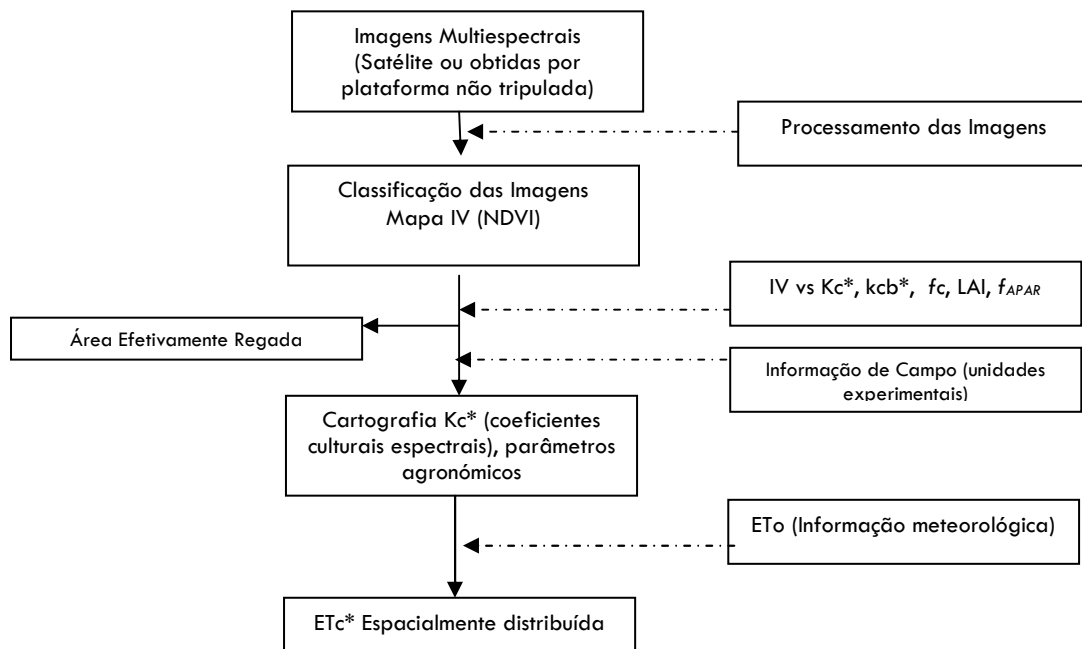


Figura 4.61: Diagrama com os procedimentos de base para estimar os parâmetros agronómicos, e necessidades hídricas das culturas, a uma escala regional

4.4.2 Procedimentos e metodologias de gestão para a estimativa do Índice de Stress (CWSI) – oportunidade de rega, na cultura do milho, para a área regional do Divor

A informação disponibilizada neste ponto reporta aos resultados apresentados na secção 4.3 deste trabalho, cuja metodologia de base foi a utilização remota de sensores de infravermelhos com plataforma aérea não tripulada.

A Tabela 4.7, regista os limites inferior e superior para estimativa do índice de stress CWSI, mediante a metodologia descrita por Idso *et al.* (1981). Os limites apresentados foram obtidos por Toureiro *et al.* (2008) para a cultura do milho no Perímetro de Rega do Divor, e experimentados no presente trabalho.

Tabela 4.7: Limite inferior e superior para estimativa do índice de stress CWSI (Toureiro *et al.*, 2008)

Limite Inferior	$(T_c - T_a)_{Min} = -1.85(DPV) - 2.55$
Limite Superior	$(T_c - T_a)_{Max} = 2.51$

DVP: Défice Pressão de Vapor (KPa); T_a : Temperatura do Ar (°C); T_c – Temperatura do Coberto (°C)

Estes limites serão a base para o cálculo dos valores de CWSI, a partir de imagens térmicas de elevada resolução.

A utilização remota de sensores em plataforma aérea não tripulada permitiu recolher informação com elevada representação espacial, traduzindo com rigor o estado hídrico de 4 parcelas experimentais do Perímetro do Divor. Com esta informação foi possível concluir que este tipo de plataformas poderá ser uma mais-valia, para a utilização na gestão de grandes áreas de regadio, pois permitem ir ao encontro da resolução das seguintes limitações associadas à tecnologia de satélite: reduzida resolução espacial e temporal (ciclos de passagem do satélite muitas vezes são condicionados com as condições instáveis da atmosfera, presença de nuvens), no que respeita à recolha de informação na banda do infravermelho térmico a maioria dos satélites não permite a recolha desta informação espectral e os que a disponibilizam, reproduzem informação com uma resolução baixa (90 a 120 m, p.e.), relativamente aos custos da informação, ainda são considerados muito elevados.

Com a estimativa dos valores de CWSI, foi possível concluir que o limite de referência de CWSI a partir do qual a cultura sofre quebras de produção é 0.65, superior aos valores encontrados em bibliografia 0.35. Sendo de referir a necessidade que existe em aferir melhor qual o limite de referência para diferentes condições de disponibilidade de água, que nos permita definir o valor de referência de CWSI a partir do qual será necessário regar – Oportunidade de Rega.

5**CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS**

O Capítulo 5 – Conclusões e Perspetivas Futuras faz referência de uma forma resumida ao contributo que o presente trabalho de doutoramento dá para o desenvolvimento e validação de procedimentos e metodologias para uma gestão integrada da água em grandes áreas de regadio, mediante modelação com técnicas de teledeteção. Neste caso concreto, a área experimental onde se desenvolveu o trabalho foi o Perímetro de Rega do Divor e a cultura objeto de estudo foi o Milho. No entanto, os procedimentos e metodologias desenvolvidos e validados com o presente trabalho serão aplicáveis a outras áreas de regadio, mediante os ajustamentos necessários.

O trabalho desenvolvido baseou-se na interpretação e análise da informação fornecida por duas tecnologias de deteção remota – a imagem de satélite (imagens Landsat 5) e a utilização remota de sensores, em plataforma aérea não tripulada – cujo objetivo principal foi a definição de metodologias e procedimentos necessários à estimativa de parâmetros biofísicos e agronómicos que traduzam o desenvolvimento da cultura do milho, e nos permitam determinar em tempo real as necessidades hídricas das culturas e índice de stress hídrico, a uma escala regional.

A metodologia “Kc.ETo” permite estimar de forma expedita a evapotranspiração cultural, sendo a mais utilizada, do ponto de vista operativo, na determinação das necessidades hídricas das culturas (Allen *et al*, 1998). Os resultados obtidos com esta metodologia e os determinados com modelos mais sofisticados, baseados no balanço de energia da superfície, apresentam valores similares.

O recurso às técnicas de deteção remota para estimar os valores reais de “Kc” a partir dos índices de vegetação (IV), determinados com base em imagens multiespectrais de alta/elevada resolução, permite determinar em tempo real as necessidades hídricas das culturas com uma elevada representação espacial. É neste sentido que os resultados obtidos com presente trabalho de doutoramento pretendem dar o seu contributo – analisando e desenvolvendo procedimentos de cálculo que permitam estimar os valores reais dos coeficientes culturais, traduzidos em valores reais de evapotranspiração e consequentemente

necessidades efetivas de rega, a uma escala regional, neste caso concreto para o Perímetro de Rega do Divor.

Foram determinadas e validadas expressões analíticas que relacionam o índice de vegetação (NDVI) com seguintes parâmetros biofísicos da cultura do Milho – fração de cobertura do solo (f_c), índice de área foliar (IAF), f_{APAR} , coeficiente cultural basal (K_{cb}) e coeficiente cultural (K_c). As expressões obtidas e propostas para a área regional do Divor, permitirão ultrapassar as divergências (tal como foi verificado no capítulo 4) encontradas com a utilização dos modelos propostos por vários autores, relacionadas com o tipo de cultura e as condições ambientais de determinada área.

A Tabela 5.1, regista as expressões obtidas.

Tabela 5.1: Expressões analíticas para cálculo de indicadores biofísicos a partir de informação de deteção remota, para a área regional do Divor e Cultura do Milho

Parâmetro	Expressão Matemática	R ²
Fração de Cobertura do Solo pela Cultura (f_c)	$f_c=0,136 e^{2.123(NDVI)}$	0.89
Índice de Área Foliar (LAI)	$LAI=0,268 e^{3.439(NDVI)}$	0.87
Fração Cobertura do Solo (f_c)	$f_c=0,142 (LAI)+0.153$	0.92
Fração da Radiação Fotossintética ativa absorvida (f_{APAR})	$f_{APAR}=1,25 (NDVI-0.14)$	0,90
Coeficiente Cultural (K_c^*)	$K_c^*=0,918 (NDVI)+0,303$	0.82
Coeficiente Cultura Basal (K_{cb}^*)	$K_{cb}^*=1,345 (NDVI)-0,163$	0.86

Da análise efetuada aos índices de vegetação registados nas unidades experimentais do Perímetro do Divor, durante o ciclo cultural, retira-se a seguinte ilação: os IV são capazes de distinguir as curvas de evolução do desenvolvimento da cultura do milho, distinguindo as principais fases de desenvolvimento da cultura, traduzem o ritmo de crescimento da cultura e a sua produtividade (tal como observaram vários autores).

No caso concreto da experimentação utilizada no presente trabalho, a duração das fases de desenvolvimento da cultura do milho, traduzidas a partir do satélite e registadas por observação direta, apresentaram valores similares, e inferiores aos padronizados pela FAO (Allen *et al*, 1998). Neste caso, a estimativa real da duração das fases de desenvolvimento da cultura traduzir-se-á em menores valores de necessidades hídricas das culturas, e consequentemente em maior economia de água de rega.

Os parâmetros agronómicos estimados com base na informação de satélite, índice de vegetação (NDVI), registaram valores similares aos monitorizados diretamente nas parcelas experimentais do Perímetro do Divor. Assim, será de considerar a aplicação das expressões analíticas determinadas, num esquema de

gestão e acompanhamento da rega na área regional do Divor, utilizando para esse fim imagens multiespectrais com uma elevada representação espacial e temporal.

Relativamente, aos valores de Kc^* e Kcb^* , estimados a partir do satélite e utilizados na determinação da taxa de evapotranspiração cultural em tempo real, obtiveram-se valores similares aos monitorizados mediante informação experimental – balanço hídrico e monitorização da água no perfil do solo. Já os valores de ET_c , calculados com base na informação disponibilizada pela FAO, registaram necessidades globais de rega superiores às determinadas com base na informação de satélite e experimental. Esta sobrestimação estará relacionada com duas questões: a duração das fases de desenvolvimento da cultura (com menor duração) e os valores reais de Kc (mais baixos). Confirmou-se uma elevada correlação entre a reserva de água no solo simulada pela informação de satélite e os valores monitorizados pela sonda TDR. Logo será de considerar a integração da tecnologia de satélite num esquema geral de gestão da água de rega, a uma escala regional.

A relação Kc^* com IV mostra uma dispersão maior, especialmente na fase de desenvolvimento inicial, quando a fração de cobertura do solo pela cultura é muito baixa, em que os valores do IV incorporam também a fração do solo nu.

A relação entre NDVI e Kcb^* traduz a relação entre os índices de vegetação e os indicadores biofísicos da cultura e a evapotranspiração. Os valores de f_{APAR} relacionam-se com os valores da produção de matéria verde e a evapotranspiração acumulada, coincidindo com a capacidade de absorção da radiação.

Relativamente à representação espacial e temporal desta técnica de deteção remota, há que referir o seguinte: será necessário utilizar imagens de mais de um tipo de satélite de forma a aumentar a representação temporal, na medida em que em regadio o intervalo entre observações deverá ser no máximo 8 dias, e a maioria dos satélites tem um ciclo de passagem de no mínimo 16 dias. Relativamente à resolução espacial, há que procurar a utilização de imagens de satélites com alta/elevada resolução. Estas são, ainda, restrições ao uso da informação de satélite na gestão da rega.

Outra questão que é preciso ter presente quando se utilizam as metodologias de satélite na gestão da água em regadio é o tempo necessário entre a aquisição da informação e a chegada da informação útil ao utilizador final – o regante – tempo que deverá ser o menor possível. Neste sentido os procedimentos metodológicos deverão estar bem definidos, validados e automatizados, devendo chegar ao agricultor no menor intervalo de tempo e com a maior fiabilidade possível. O custo que esta tecnologia ainda possui torna muitas vezes a sua aplicação impossível de se concretizar.

O presente trabalho procurou dar resposta a estas limitações impostas pela utilização do satélite, quando integrou na sua experimentação a utilização remota de sensores, com plataforma aérea não tripulada. A sua utilização permitirá recolher informação remota sobre a superfície terrestre, constituindo uma mais-valia na gestão de grandes áreas regadas, introduzindo uma maior resolução espacial e maior flexibilidade na programação das medições, contornando assim as limitações impostas à metodologia de satélite por condições atmosféricas desfavoráveis à aquisição da informação sobre a superfície terrestre.

A utilização da tecnologia da plataforma aérea não tripulada (UAV) equipada com a câmara térmica associada com uma câmara multiespectral de elevada resolução, é uma metodologia com grande potencial para a determinação das necessidades de água das culturas e identificação de stress hídrico, em áreas de regadio de média a grande dimensão, para a gestão da água de rega. As grandes vantagens associadas a esta tecnologia são: elevada representação espacial da informação obtida (resolução de 40 cm), rapidez e disponibilidade na recolha da informação (no ensaio realizado, foram consumidos 30 min, para fazer o levantamento de 179 ha), possibilidade de programação das missões de forma a minimizar os efeitos provocados pelas condições atmosféricas desfavoráveis (nebulosidade), fácil operacionalidade da tecnologia.

O Índice de Stress Hídrico (*Crop Water Stress Index, CWSI*), obtido mediante a utilização da temperatura da superfície cultural, monitorizada com a plataforma não tripulada, parece traduzir com fiabilidade a disponibilidade de água no solo e consequentemente o estado hídrico da cultura, podendo definir desta forma a oportunidade de rega.

A determinação do valor CWSI carece ainda de algum trabalho experimental que permita estimar com maior rigor os limites inferior e superior para o cálculo de CWSI, utilizando a informação fornecida pela plataforma aérea não tripulada, e verificar o valor limite para o CWSI, a partir do qual será necessário despoletar a rega, sem que ocorram quebras de produção. Neste sentido, será necessário suportar a decisão do momento a partir do qual será necessário regar – oportunidade de rega – mediante a informação traduzida pelo valor de CWSI, analisando a disponibilidade de água do solo em cada momento e os correspondentes valores de CWSI, com base nas curvas características de água no perfil do solo, de forma a definir qual o valor de CWSI indicativo de rega.

De futuro, será de considerar a realização de mais missões, que permitam recolher informação multiespectral, de forma a validar a informação obtida com o satélite (Quadro 5.1).

A utilização remota de sensores utilizando plataformas aéreas não tripuladas permite disponibilizar informação compatível com as aplicações agrícolas, com elevada resolução espacial, espectral e temporal. Encontra-se em bibliografia muitos trabalhos com resultados da sua aplicação na monitorização agrícola, estimativa de stress hídrico, níveis de clorofila, produção das culturas, índice de área foliar, índices de vegetação (Herwitz, *et al.*, 2002; Herwitz, *et al.*, 2004; Johnson, *et al.*, 2003; Everaerts, 2005; Sugiura, *et al.*, 2005; Lamberts, *et al.*, 2007; Berni, *et al.*, 2009a; Berni, *et al.*, 2009b).

O principal problema associado à utilização destas plataformas é a caracterização geométrica e espectral que o tipo de micro sensores requer, exigindo o conhecimento de grandezas físicas associadas à superfície terrestre (refletância, temperatura da superfície, etc.).

Relativamente à utilização de sensores em plataformas aéreas tripuladas, apontam-se as seguintes limitações: elevados custos operacionais, associados ao processamento da informação e a falta de empresas prestadoras de serviços nesta área implica um custo efetivo deste tipo de produtos muito elevado, o que limita a sua utilização pelos agricultores e técnicos, sendo utilizados na sua maioria para fins de investigação.

Os resultados apresentados comprovam a importância da utilização de tecnologia de detecção remota na gestão da água de rega à escala regional, na medida em que esta tecnologia fornece informação com elevada representação espacial e suficiente precisão e fiabilidade. Mais concretamente, esta tecnologia permite acompanhar o desenvolvimento da cultura, fornecendo informação preciosa para a determinação das necessidades efetivas de rega.

A informação obtida no presente estudo comprova mais uma vez os resultados obtidos em outros trabalhos já desenvolvidos e publicada por outros autores - Reginato *et al.* (1985), Neale *et al.* (1989, 1996, 2003, 2005), Jackson *et al.* (1980) Heilman *et al.* (1982), Bausch and Neale (1987), Michael and Bastiaanssen (2000), Jachum *et al.* (2002); Anderson, MC, *et al.* (2004), Hunsaker *et al.* (2005), Calera *et al.* (2005), Zang and Wegehenkel (2006), González-Dugo e Mateos (2008) no que diz respeito à determinação dos coeficientes culturais mediante a utilização de índices de vegetação derivados de valores de refletância da superfície cultural, obtidos a partir das imagens multiespectrais de alta/elevada resolução.

Conclui-se o seguinte:

- A informação de base obtida no presente trabalho de doutoramento permitirá determinar com elevada representação espacial os coeficientes culturais da cultura, como os quais será possível estimar com rigor as necessidades efetivas de rega – dotações de rega – em cada instante do ciclo cultural, para a área regional do Divor e cultura do Milho. Será também possível avaliar o desenvolvimento da cultura em cada instante mediante informação traduzida pela determinação dos parâmetros biofísicos, f_c , LAI, f_{APAR} .
- A utilização remota de sensores aerotransportados em plataforma aérea não tripulada, permite obter informação com elevada representação espacial e temporal, muito útil para apoiar um esquema de gestão da rega à escala regional, permitindo assim ultrapassar algumas limitações associadas à utilização da tecnologia de satélite.
- A monitorização da temperatura de infravermelhos da cultura, com uma elevada representação espacial e temporal, permitirá traduzir o estado hídrico da cultura, traduzido pelo índice CWSI. Este indicador parece correlacionar-se bem com a disponibilidade de água no solo, permitindo assim determinar a oportunidade de rega em cada instante. No entanto, desta vertente carece ainda de alguma experimentação, que nos permita definir com maior rigor o valor de referência do CWSI a partir do qual será necessário regar.

PERSPETIVAS FUTURAS

Relativamente às perspetivas futuras quanto à existência de informação de satélite de alta/elevada resolução que permita um esquema de gestão da água de grandes áreas de regadio com suporte em técnicas de detecção remota, pode adiantar-se o seguinte:

- A NASA está a testar cinco novos satélites, designados *satélites Sentinel: Sentinel-1 a 5*. O *Sentinel-1*, missão em GMES, lançado em 2011, está em fase de teste. O *Sentinel-2*, multiespectral de alta-resolução, parece oferecer oportunidade ao estudo de variáveis ambientais, por exemplo, imagens de vegetação, terra e água, vias fluviais interiores e áreas litorais, podendo também fornecer informação para serviços de emergência, com lançamento previsto para o final de 2012. O *Sentinel-3* permitirá determinar parâmetros topográficos, temperatura da superfície da terra, etc, com lançamento previsto para 2013. O *Sentinel-4* é um Meteosat de 3ª Geração (MTG) satélite em órbita geoestacionária, que será lançado em 2017, será útil para estudos atmosféricos. O *Sentinel-5* é uma astronave que será lançada em 2019 e será utilizado para fins de monitorização atmosférica.

O satélite Sentinel-2 disponibilizará informação com aquisições globais sistemáticas de imagens multiespectrais de alta resolução, com uma elevada frequência temporal, ideal para a monitorização do desenvolvimento das culturas em agricultura de regadio. Cada imagem Sentinel-2 cobrirá 290 km², com 13 bandas espectrais que englobam o visível e infravermelho próximo, tendo as seguintes resoluções espaciais: 4 bandas com 10 m, 6 bandas com 20 m e 3 bandas com 60 m. Quanto ao ciclo de passagem, haverá dados disponíveis a cada 5 dias, ideal para obter dados em boas condições atmosféricas (sem nebulosidade).

Outra oportunidade importante é o novo satélite *Landsat 5 TM scheduler* libertado no dia 6 de Maio de 2010. Este sistema tem o objetivo de prolongar a missão do Landsat 5 existente.

Os satélites *Landsat Data Continuity Mission* (LDCM) são a próxima geração de satélites Landsat e é esperado que sejam lançados em 2012. Esta missão assegurará a aquisição continuada e disponibilidade de imagens Landsat.

- Sistema DEIMOS é um projeto de colaboração entre uma companhia aeroespacial espanhola *DEIMOS Space* e o Laboratório de Detecção Remota da *Universidade de Valladolid* (LATUV). A meta da companhia é o projeto de implementação, operação, e exploração comercial de um sistema de Observação de Terra completa, operando a partir de Valladolid (Espanha).

O sistema está baseado em um satélite multiespectral com uma resolução espacial de 22 m e uma quadrícula de mais de 600 km². O satélite regista imagens da superfície terrestre para uma estação localizada no Parque Tecnológico de Boecillo (Valladolid, Espanha), permite uma cobertura de Espanha e Portugal todas as semanas, e uma cobertura da Europa em cada 10 dias. As regiões de interesse especial para o sistema novo são: Espanha, e especialmente a região de Castilha e Léon onde o sistema fica situado, Portugal onde a companhia DEIMOS Engenharia comercializará o sistema, e o resto da Europa onde DEIMOS Imaging contribuirá para o desenvolvimento do GMES (Global Monitoring Environment and Safety), um programa comum da ESA e da União Europeia.

Deimos-1 é o primeiro satélite, já operacional em órbita, com as seguintes características: 6 bandas, infravermelho e infravermelho próximo, vermelho, verde, equivalente ao satélite Landsat, resolução espacial de 20 m, dimensão 600 Km², alta frequência temporal (semanal, na Península Ibérica e bi-semanal em toda a Europa).

DEIMOS Imaging tem capacidade de integrar no desenvolvimento de produtos e serviços em vários sectores de atividade em agricultura: gestão da água em regadio, planeamento e gestão de recursos hídricos, monitorização da extração de águas subterrâneas, monitorização e avaliação da seca, avaliação de estragos provocados por fenómenos naturais, avaliação de produtividades.

A procura de meios menos caros e mais eficientes para observar a terra motivou o desenvolvimento de satélites em deteção remota. Os custos altos desta tecnologia levaram países em desenvolvimento a tornar-se dependentes de imagens provenientes de equipamentos de outras origens:

- O CBERS é um Programa para o desenvolvimento de dois satélites com potencialidades para estudos na agricultura e ambiente (específico para catividades científicas). CBERS-1 e 2 são idênticos na estrutura técnica. Em 2002, um acordo foi assinado para a continuidade de programa de CBERS, com a construção de dois satélites novos - CBERS-3 e 4. Porém, considerando que o lançamento de CBERS-3 só foi possível em 2009 e que o fim de vida útil de CBERS-2 aconteceu antes de 2009 - o Brasil e a China decidiram em 2004 construir CBERS-2B, lançado em 2007.

Os satélites CBERS trouxeram para o Brasil avanços científicos significativos, as suas imagens são usadas em áreas importantes, como desflorestação e controle do fogo na Região amazónica, monitorização do recurso água, crescimento urbano, ocupação de terra e várias outras aplicações.

Muito embora o futuro prometa uma maior disponibilidade de informação multiespectral a partir da tecnologia de satélite, perspectiva-se que a utilização remota de sensores em plataformas não tripuladas venha a impulsionar a sua utilização na gestão de grandes áreas de regadio, como tecnologia com elevada operacionalidade e fiável na recolha de informação com elevada representação espacial e temporal, útil à determinação das necessidades efetivas de rega e à estimativa de indicadores de stress.

Importa referir o seguinte, muito embora o presente trabalho de doutoramento tenha produzido avanço no conhecimento da aplicação de tecnologia de teledeteção à gestão de grandes áreas regas, será de considerar a continuidade desta linha de investigação, nos seguintes aspetos:

- Será necessário estabelecer novas relações parâmetros biofísicos, K_{cb}^* , K_c^* e IV para diferentes culturas, solos e regiões, de forma a validar informação necessária para aplicação em diferentes áreas regionais.
- Analisar a aplicação de outros índices de vegetação, na determinação de parâmetros biofísicos e estimativa dos valores da evapotranspiração e necessidades de rega.
- Análise comparativa com outras metodologias determinísticas da evapotranspiração: balanço energético da superfície terrestre vs K_c^* -IV.

- Realizar mais missões experimentais com a utilização remota de sensores em plataforma aérea não tripulada, com o objetivo de recolher imagens multiespectrais e térmicas com elevada representação espacial e temporal, para análise comparativa com informação produzida pela tecnologia de satélite.
- A determinação do valor CWSI, carece ainda de algum trabalho experimental que suporte a decisão do momento a partir do qual será necessário regar – oportunidade de rega – mediante a informação traduzida pelo valor de CWSI, analisando a disponibilidade de água do solo em cada momento e os correspondentes valores de CWSI, com base nas curvas características de água no perfil do solo, de forma a definir qual o valor de CWSI indicativo de rega.
- Operacionalizar e sistematizar os procedimentos associados à utilização da informação produzida pelas técnicas de deteção remota, para integração num esquema global de gestão da água de rega à escala regional, alimentando um sistema de avisos de rega aos agricultores, e se possível generalizar a sua aplicação a outras áreas de regadio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, M. C., KUSTAS, W. P., AND NORMAN, J. M. (2007). Upscaling flux observations from local to continental scales using thermal remote sensing, *Agron. J.*, 99, 240–254.
- ALEXANDRIDIS T, ASI S, ALI S. (1999). Water performance indicators using satellite imagery for the Fordwah Eastern Sadiqia (South) irrigation and drainage Project; Report no. R-87, International Water Management Institute, Lahore, Pakistan: 16 pp.
- 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. Roma
- ALLEN R.G. (2000). Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology*, 229:27-41.
- ALLEN, R.G., BASTIAANSEN, W., WRIGHT, J.L., MORSE, A., TASUMI, M. & TREZZA, R. (2002). Evapotranspiration from satellite images for water management and hydrologic balances. Proceedings of the 2002 ICID Conference, Montreal, Canada, July, 2002. CD-ROM.
- ALLEN, R.G., TASUMI, M., MORSE, A., TREZZA, R. (2005). A Landsat based energy balance and evapotranspiration model in western US water rights regulation and planning. *Irrig. Drain. Syst.* 19, 251–268.
- ALLEN, R. G., M. TASUMI, AND R. TREZZA. (2007a). Satellite based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC): Model. *ASCE J. Irrig. Drain. Eng.* 133(4): 380] 394.
- ALLEN, R. G., M. TASUMI, AND R. TREZZA. (2007b). Satellite based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC): Applications. *ASCE J. Irrig. Drain. Eng.* 133(4): 395-406.
- ALLEN,R.G., PEREIRA, L.S., HOWELL, T.A., JENSEN M. E. (2011). Evapotranspiration information reporting:I Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management* 98. pp 899-920.
- ALLEN,R.G., PEREIRA, L.S., HOWELL, T.A., JENSEN M. E. (2011). Evapotranspiration information reporting: II Recommended Documentation. *Agricultural Water Management* 98. pp 921-929.
- ALVES I, FONTES JC, PEREIRA LS (2000). Evapotranspiration estimation form infrared surface temperature. I: Performance of the flux equation. *Trans ASAE* 43(3):591-598.

- AQUACROP (2009). The FAO crop model to simulate yield response to water. Developed by Dirk RAES, Pasquale STEDUTO, Theodore C. HSIAO, and Elias FERERES.
- ARMAMI, E., ZAIRI, A., PEREIRA, L.S., MACHADO, T., SLATNI, A., RODRIGUES, P.N. (2001). *Deficit irrigation of cereals and horticultural crops. 2. Economic analysis. Agricultural Engineering International* (www.agen.tamu.edu/cigr) Vol. III, Manuscript LW 00 007b.
- ASRAR G., FUCHS M., KANEMASU E.T., HATFIELD J.L. (1984). Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat, *Agronomy Journal*, 76:300-306.
- ASRAR, G. (1989). *Theory and applications of optical remote sensing*. New York, John Wiley & Sons.
- BABALOLA, O. (1978). Spatial variability of soil water properties in tropical soils of Nigeria. *Soil Sci.*, Baltimore, V.126, n. 5, p269-279.
- BARET F., GUYOT G., MAJOR D.J. (1989). TSAVI: a vegetation index which minimises soil brightness effects on LAI and APAR estimation. Proceedings of 12th Canadian symposium on remote sensing. Canada. Vol3 0 1355-1358.
- BARNES, E.M., K.A. SUDDUTH, J.W. HUMMEL, S.M. LESCH AND D.L. CORWIN *ET AL.*, 2003. Remote and ground-Based sensor techniques to map soil properties. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 69: 619-630.
- BASTIAANSEN, W.G.M. 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. Ph.D. dissertation, CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, the Netherlands. 273 pp.
- BASTIAANSEN W.G.M, WAL T, VISSER TNM.(1996). Diagnosis of regional evaporation by remote sensing to support irrigation performance assessment, *Irrigation and Drainage Systems*; 10: 1–23.
- BASTIAANSEN, W. G. M., MENENTI, M., FEDDES, R. A., & HOLTSLAG, A. A. M. (1998a). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212–213, 198-212.
- BASTIAANSEN, W. G. M., PELGRUM, H., WANG, J., MA, Y., MORENO, J. F., & ROERINK, G. J. (1998b). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 2: Validation. *Journal of Hydrology*, 212–213, 213-229.
- BASTIAANSEN W.G.M., BOS MG. (1999). Irrigation performance indicators based on remotely sensed data: a review of literature; *Irrigation and Drainage Systems*. 13:291-311
- BASTIAANSEN W.G.M., VAN DAM JC, DROOGERS P. IN: DAM, VAN DAM JC, MALIK, R.S. (Eds) (2003). Water productivity of irrigated Crops in Sirsa District, India. *Integration of Remote Sensing, Crop and Soil Models and Geographical Information Systems*; pp.11-20.

- BASTIAANSEN, W.G.M., NOORDMAN, E.J.M., PELGRUM, H., DAVIDS, G. & ALLEN, R.G. (2005). SEBAL for spatially distributed ET under actual management and growing conditions, *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131(1): 85–93.
- BAUSCH W.C. e NEALE C.U. (1987). Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Transactions American Soc. Agric. Engin.*, 30(3):703-709.
- BAUSCH W.C. (1993). Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of Environment*, 46:213-222.
- BAUSCH WC (1995). Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agricultural Water Management*; 27(1): 5 5-68.
- BAUSCH, W.C., H.R. DUKE, AND C.J. IREMONGER (1996). Assessment of plant nitrogen in irrigated corn. pp. 23–32. In: P.C. Robert, R.H. Rust and W.E. Larson (eds.), *Precision Agriculture, Proceedings of the 3rd International Conference*. American Society of Agronomy/Crop Science Society of America/ Soil Science Society of America, Madison, WI.
- BELMANS, C., WESSELING e R. A. FEDDES (1983). Simulation of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *J. of Hydrol.*, 63 : 271-286.
- BERNI J.A.J, ZARCO-TEJADA P.J., SEPULCRE-CANTÓ G., FERERES E., VILLALOBOS F. (2009a). Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment*. 113, 2380-2388.
- BERNI J., ZARCO-TEJADA P., SUAREZ L., FEREREZ E. (2009b). Thermal and narrow-band multispectral remote sensing for vegetation monitoring from na unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.*, 47, 722-738.
- BIRTH, G.S., MCVEY, G.R., (1968). Measuring the colour of growing turf with a reflectance spectrophotometer. *Agronomy Journal* 60, 640–643.
- BLACKBURN GA. (1998) Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. *International Journal of Remote Sensing*;19:657-675.
- BOUGUET, J. (2001) Camera calibration toolbox for matlab. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/ (accessed 15 Apr. 2009).
- BROWN, K. W., AND N. J. ROSENBERG. (1973). A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beetfield. *Agron. J.* 65: 341-347.
- BREST, C. L., & GOWARD, S. (1987). Deriving surface albedo measurements from narrowband satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 8, 351± 367.
- BRUTSAERT, W. (1975). On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. *Water Resources Research*, Washington, v. 11, n. 5, p. 742-744.

- BURGESS, T.M., WEBSTER, R. (1980). *Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The Semivariogram and punctual kriging*. J. Soil Sci., Oxford, v. 31, p.315-331.
- BURROUGH PA, MCDONNELL RA. (1998). Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press.
- BURROUGH PA, MCDONNELL RA. (1998). Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press.
- BUSCHMANN, C. AND E. NAGEL. 1993. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. Int. J. Remote Sens. 14:711-722.
- CALERA A., JOCHUM A., CUESTA GARCIA A., MONTORO RODRIGUEZ A., LOPEZ FUSTER P., (2005). Irrigation management from space: Towards user-friendly products, Irrigation and Drainage Systems, 19: 337-353.
- CAMPOS, I., NEALE, C.M.U., CALERA, A., BALBONTÍN, C.(2010). Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis Vinifera* L.). Agricultural Water Management 98. pp 45-54.
- CARDOSO, J. CARVALHO; BESSA, M. TEIXEIRA E MARADO, M. BRANCO (1973). Carta dos Solos de Portugal, Memória Descritiva, Agronomia Lusitania.
- CARLSON TN, CAPEHART WJ, GILLIES RR.(1995). A new look at the simplified method for remote sensing of daily evapotranspiration. Remote Sensing of Environment; 54, 161±167.
- CARTER, G.A. (1994), Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress, *Int. J. Remote Sens.* 15:697-703.
- CAVERO, J., FARRE, I., DEBAEKE, P., FACI, J. PLAYAN, E. .(2000). Simulation of maize yield under water stress with EPICphase and CROPWAT in a semiarid climate. Agron. J. 92, 679-690.
- CHAVEZ J. L., GOWDA P.H., EVETT S. R., COLAIZZI P. D., HOWELL T. A., MAREK T. (2007). An application of METRIC for ET mapping in the Texas high plains. Trans ASABE.
- CHALMERS, D. J. (1990). *Control del crecimiento de la planta por la regulación de los déficits de agua y la limitación de la zona de humectación*. Frut 5:369-375.
- CHANDER, G. e MARKHAM, B. (2003). *Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures, and post-calibration dynamic ranges*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41:2674-2677.
- CHANDER, G., MARKHAM, B. e BARSÍ, J. (2007). *Revised Landsat-5 TM Thematic Mapper Radiometric Calibration*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 4(3): 490-494.
- CHANDER, G., MARKHAM, B. e L. H. (2009). *Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors*. Remote Sensing of Environment, 113: 893-903.

- CHANZY, A., SCHUMAGGE, T.J., CALVET, J.C., KERR, Y., VAN OEVELEN, P. GROSJEAN, O AND WANG, J.R. (1997). Airborne microwave radiometry on a semi-arid area during HAPEX-Sahel. *Journal Hydrol.*This Issue.
- CHARTZOULAKIS, K., PSARRAS, G. 2005. Global change effects on crop photosynthesis and production in Mediterranean: the case of Crete, Greece. *Agric. Ecosyst. Environ.* 106, 147-157.
- CHAVEZ JL, NEALE CMU (2007) Daily evapotranspiration estimates from airborne remote sensing and ground data inputs. [Irrigation Science](#). November 2008, Volume 27, [Issue 1](#), pp 67-81.
- CHÁVEZ JL, NEALE CMU, HIPPS LE, PRUEGER JH, KUSTAS WP (2005). Comparing aircraft-based remotely sensed energy balance fluxes with eddy covariance tower data using heat flux source area functions. *J. Hydrometeorology* AMS 6(6):923-940.
- CHENG, Y.B., ZARCO-TEJADA P.J., RIANO D., RUEDA C.A. AND USTIN S.L. (2006). Canopy water content estimates with AVIRIS imagery and MODIS reflectance products. In *Proc. SPIE – Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability III* 2006, vol. 6298, pp. 629-809.
- CHOUDHURY B. J., AHMED N.U., IDSO S. B., REGINATO, R.J., DAUGHTRY C.S. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*, 50:1-17.
- CHOUDHURY BJ, AHMED NU, IDSO SB, REGINATO RJ, DAUGHTRY CST.(1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*; v.50, p.1-17.
- COLAIZZI PD, SCHNEIDER AD, EVETT SR, HOWELL TA. (2004). Comparison of SDI, LEPA, and spray irrigation performance for grain sorghum. *Transactions of ASAE* 47(5): 1477–1492.
- COLAIZZI PD, EVETT SR, HOWELL TA. (2006). Near-surface soil water and temperature for SDI, LEPA, and spray irrigation. CD-ROM. Irrigation Association 27th Annual International Irrigation Show, San Antonio, TX, 5–7 November.
- COLIN, J., MENENTI, M., RUBIO, E., AND JOCHUM, A. (2006). A Multi-Scales Surface Energy Balance System for operational actual surface evapotranspiration, *AIP Conf. Proc.*, 852, 178–184.
- CRAGO, R., M. FRIEDL, W. KUSTAS, AND Y. WANG. (2004). Investigation of aerodynamic and radiometric land surface temperatures. *NASA Sci. Tech. Aerospace Reports (STAR)* 42(1).
- CROPWAT (2008). Design and management of irrigation schemes. FAO. Rome.
- CUESTA A. MONTORO A., JOCHUM A.M., LÓPEZ P. CALERA A. (2005). Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. *ITEA* 101, PP 91-100.
- D'URSO, G.; SANTINI, A. (1996). A remote sensing and modeling integrated approach for the management of irrigation distribution system. In: CAMP, C.R.; SADLER, E.J.; YODER, R.E. (Eds.). *Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*. St. Joseph: ASAE, p. 435-441.

- D'URSO, G. 2001. Simulation and management of on-demand irrigation systems: A combined agrohydrological and remote sensing approach, *Ph.D. Wageningen, The Netherlands.dissertation*, Wageningen University.
- D'URSO, G.; CALERA BELMONTE, A. (2006). Operative approaches to determine crop water requirements from earth observation data: methodologies and applications. In *Earth Observation for Vegetation Monitoring and Water Management*; D'Urso, G., Jochum, M.A.O., Moreno, J., Eds.; American Institute of Physics: Melville, NY, USA, pp. 14-25.
- D'URSO, G, RICHTER, K., CALERA, A., OSANN, M.A., ESCADAFAL, R., GARATUZA-PAZAN, J., HANICH, L., PERDIGÃO, A., TAPIA, J.B., VUOLO, F. (2010). Earth Observation products for operational irrigation management in the contexto of the PLEIADeS project. *Agricultural Water Management* 98. pp 271-282.
- DAVIS, B. (1987). *Uses and Abuses of Cross-Validation in Geostatistics*. 1997, *Mathematical Geology*, vol. 19, nº 3, pp 249-258.
- DECROIX M. & PUECH J. (1985). Le pilotage de l'irrigation à la parcelle. In: *Les Besoins en Eau des Cultures*. pp 693–742. Conférence Internationale Paris, 11–14, Sept. 1984. INRA-Press, Paris.
- DEERING, D.W. (1978). Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors. Ph.D. Diss. Texas A&M Univ., College Station, 338p.
- DETAR WR, PENNER JV, FUNK HA. (2006). Airborne remote sensing to detect plant water stress in full canopy cotton. *Trans. ASAE*; 49:655–665.
- DUCHEMIN, B.; HADRIA, R.; ER-RAKI, S.; BOULET, G.; MAISONGRANDE, P.; CHEHBOUNI, A.; ESCADAFAL, R.; EZZAHAR, J.; HOEDJES, J. C. B.; KHARROU, M. H.; KHABBA, S.; MOUGENOT, B.; OLIOSO, A.; RODRIGUEZ, J. –C.; SIMONNEAUX, V. (2006). Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 79, p. 1-27.
- DOBROWSKI SZ, PUSHNIK JV, ZARCO-TEJADA PJ, USTIN SL. (2005). Simple reflectance indices track heat and water stress induced changes in steady state chlorophyll fluorescence at the canopy scale. *Remote Sensing of Environment*; 97: 403-414.
- DOBROWSKY S.Z., PUSHNIK J.C., ZARCO-TEJADA P.J., USTIN S.L. (2005). Simple reflectance indices track heat and water stress-induced changes in steady-state chlorophyll fluorescence at the canopy scale. *Remote Sensing of Environment*. 97. 403-414.
- DOORENBOS E PRUITT (1977). Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 24. FAO. Roma.
- DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. (1979). Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper* nº.33. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

- DORAISWANY, P.C. SMOULIN, P.C., COOK, P.W. STRERN A. (2003). Crop yield assessment from remote sensing 69 (6):665-674.
- DGADR (2003). Estudo de Caracterização dos Solos e esboço de aptidão das terras para o regadio à Escala 1:25 000 na área a beneficiar com o empreendimento de fins múltiplos de Alqueva. DSRNAH – DS Lisboa.
- DUCHEMIN, B., HADRIA R., ERRAKI S., BOULET G., MAISONGRANDE P., CHEHBOUNI A., ESCADAFAL R. EZZAHAR J., HOEDJES J.C.B., KHARROU M.H., KHABBA S., MOUGENOT B., OLIOSO A., RODRIGUEZ J.C., SIMMONEAUX V. (2006). Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, 79:1-27.
- DUDLEY, N.J., HOWELL, D.T., MUSGRAVE, W.J.(1971). Optimal intraseasonal irrigation water allocation. *Water Resour. Res.* 7 (5): 1051-1063.
- D'URSO G, MENENTI M, SANTINI A (1996). Remote sensing and simulation modelling for on-demand irrigation systems management. In: M. Smith, L.S. Pereira, J. Berengena, B. Itier, J. Goussard, R. Ragab, L. Tollefson & P. van Hofwegen (eds.), *Irrigation scheduling: from theory to practice*. Rome, ICID / FAO. Water Rep. 8, pp. 305-312
- ER-RAKI S., CHEHBOUNI A., GUEMOURIA N., DUCHEMIN B., EZZAHAR J., HADRIA R. (2007). Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region *Agric. Water Manage.*, 87, pp. 41–54.
- ERDEM, T.; ERDEM, Y.; ORTA, H. & OKURSOY, H. (2006). Water-yield relationships of potato under different irrigation methods and regimens. *Sci. Agric.*, 63:226-231.
- EHRLER, WL., IDSO, S.B., JACKSON, R.D., REGINATO, R.J. (1978). Diurnal Changes in plant water potential and canopy temperature of wheat as a affected by drought. *Agronomy Journal*, 70:999-1004.
- ENGLISH, M., RAJA, S.N. (1996). Perspectives on deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 32: 1-14.
- ENGLISH, M.J. (1990). Deficit irrigation. I: Analytical framework. *J. Am. Soc. Civil Eng.* 116 (IR3): 399-412.
- ENGMAN E.T. (1995). Recent advances in remote sensing in hydrology. *Reviews on Geophysis*, 33: Supplement. URL: www.agu.org/revgeophys/engman00/engman00.html.
- ENGMAN ET, CHAUHAN N. (1995). Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing, *Rem. Sens. of Env.*; 51: 189–198.
- EVERAERTS, J. (2005). PEGASUS – Bridging the gap between airborne and spaceborne remote sensing, in *Strategies for European Remote Sensing*, M. Oluic, Ed. Netherlands: Millpress Science Publishers. Pp. 395-401.

- FABEIRO CORTÉS, C., MARTÍN DE SANTA OLALLA, F. E LÓPEZ URREA, R. (2003a). Production of garlic (*Allium sativum* L.) under controlled deficit irrigation in a semi-arid climate. *Agricultural Water Management*, 59: 155-167.
- FABEIRO, C., MARTÍN DE SANTA OLALLA, F., LÓPEZ, R. E DOMÍNGUEZ, A. (2003b). Production and quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) cultivated under controlled deficit irrigation conditions in a semi-arid climate. *Agricultural Water Management*, 62:215-227.
- FABEIRO, C., MARTÍN DE SANTA OLALLA, F.J. E DE JUAN, J. A. (2001). Yield and size of deficit irrigated potatoes. *Agricultural Water Management*, 48: 225-266.
- FABEIRO, C., MARTÍN DE SANTA OLALLA, F.J. E DE JUAN, J. A. (2002). Production of muskmelon (*Cucumis leo* L.) under controlled deficit irrigation in a Semi-arid climate. *Agricultural Water Management*, 54: 93-105.
- FAO (1994). The state of food and agriculture. FAO Agriculture Series. Rome.
- FAO (1995). Environmental impact assessment of irrigation and drainage projects. FAO Agriculture Series. Rome.
- FAO (2002). Deficit irrigation practice. Water reports nº. 22, Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome, 100 pp.
- FAO (2003). The State of Food, Insecurity in the world. Monitoring progress toward the world food Summit and millennium development goals. Rome. 40 pp.
- FAO (2009). The State of Food, Insecurity in the world. Monitoring progress toward the world food Summit and millennium development goals. Rome. 161 pp.
- FARRÉ, I., FACI, J.M. (2006). Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. *Agricultural water management*. 83, 135-143.
- FEIO, M. (1991). Clima e agricultura. Exigências climáticas das principais culturas e potencialidades agrícolas do nosso clima. Lisboa, Ministério da Agricultura, Pescas e Alimentação, Direcção-Geral de Planeamento e Agricultura, 266 p.
- FERERES, E. (1983). Short and long-term effects os irrigation on the fertility and productivity of soils. Proc. 17 th Coll. Int. Potash Institute. Bern 283-304.
- FERERES, E., C. GIMENEZ E J.M. FERNANDEZ (1986). Genetic variability in sunflower cultivars under drought. I yield relationships. *Aust. J. Agric. Res.*, 37:573 – 582.
- FERREIRA, M.I. (1996). Evapotranspiração e stress hídrico em cobertos arbóreo-arbustivos numa perspectiva de gestão da água em região mediterrânica. *Annal. Inst. Sup. Agron.* 45: 343-385.

- FONTES, J. C. (1992). Temperatura do Coberto Vegetal como Indicador do Estado Hídrico das Plantas. Trabalho de Síntese para as Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores.
- FRENCH, R.J., SCHULTZ, J.E. (1984). Water use efficiency in wheat in a Mediterranean type environment: II. Some limitation to efficiency. *Aust. J. Agric. Res.* 35, 765-775.
- GAMON J.A., PEÑUELAS J., FIELD C.B. (1992). A narrow-wave band spectral index that track diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment.* 41, 35-44.
- GAMON JA, PENUELAS J, FERNANDEZ JM. (1992). A narrow wave band spectral index that track diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of the Environment;* 41, 35-44.
- GARDNER BR, BLAD BL, WATTS DG. (1981). Plant and air temperatures in differentially irrigated corn. *Agr. Meteorology* 1981; 25:207-217
- GILBERT, M.A., GANDIA, S., MELIA, J., (1996). Analyses of spectralbiophysical relationships for a corn canopy. *Remote Sensing of Environment* 55 (1), 11–20.
- GIRONA J. (1992). Estrategias de riego deficitario en el cultivo del almendro. *Fruticultura Profesional* 47:38-45.
- GIRONA, J. (1989). Physiological, growth and production responses of late maturing peach (*Prunus persica* L. Batsch) to controlled deficit irrigation. MS Thesis. Univ. California, Davis, 116 p.
- GIRONA, J., RUIZ-SÁNCHEZ, M. C., GOLDHAMER, D., JOHNSON, S. Y DEJONG, T. (1990). Late maturing peach response to controlled deficit irrigation: seasonal and diurnal patterns of fruit growth, plant and soil water status, CO₂ uptake and yield 2 years results. XXIII International Horticultural Congress. Firenze (Italy) 1:284.
- GITELSON, A.A., VIÑA A., ARKEBAUER T. J., RUNDQUIST, D. C. KEYDAN, G. P., LEAVITT, B. (2003). Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophys Res Lett*, 30 (5) (2003), p. 1248
- GITELSON, ANATOLY A. (2005), Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops, *Geophys Res Lett*, 32, L08403.
- GITELSON, ANATOLY A., ANDRÉS VIÑA, SHASHI B. VERMA, DONALD C. RUNDQUIST, TIMOTHY J. ARKEBAUER, GALINA KEYDAN, BRYAN LEAVITT, VERONICA CIGANDA, GEORGE G. BURBA, AND ANDREW E. SUYKER (2006). Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: Implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity, *J Geophys Res*, 111, D08S11.
- GOLDHAMER, D.A. Y E SHACKEL, K. (1989). Irrigation cutoff and drought irrigation strategy effects on almond. 17th Annual Almond Research Conference. Modesto. California.

- GONTIA, N.K. AND K.N. TIWARI. 2008. Development of crop water stress index of wheat crop for scheduling irrigation using infrared thermometry. *Agric. Water Manage.*, 95 (10): 1144–1152.
- GONÇALVES, J.M. (1997). *Sistema de Apoio à Decisão para o Projecto em Rega de Gravidade. Aplicação da Análise Multicritério ao Baixo Mondego*. Dissertação apresentada no Instituto Superior de Agronomia para efeito de prestação de provas de doutoramento. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa.
- GÓMEZ, M., SOBRINO, J. A., OLIOSO, A., & JACOB, F. (2005). Retrieval of evapotranspiration over the Alpillis/ReSeDA experimental site using airborne POLDER sensor and Thermal Camera. *Remote Sensing of Environment*, 96(3–4), 399–408.
- GONZÁLEZ, R., NÚÑEZ, L.C., MARTÍN, P., BERJÓN, A., ZARCO-TEJADA, P.J. (2005). **Estimación de la absorbancia de radiación par en hojas de vid a partir de su contenido en clorofila**. V Congreso Ibérico de Ciencias Hortícolas, Actas Portuguesas de Horticultura, Vol. 2, Asociación Portuguesa de CC. Hortícolas (Ed.), Lisboa, ISBN: 972-95881-9-8, PP. 384-389, Oporto (Portugal), 22-27/05/2005.
- GONZÁLEZ-DUGO, M. P., M. S. MORAN, L. MATEOS, AND R. BRYANT (2006), Canopy temperature variability as an indicator of crop water stress severity, *Irrig Sci*, 24(4), 233
- GONZÁLEZ-DUGO, M. P. AND MATEOS, L. (2008). Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigated cotton and sugarbeet crops, *Agr. Water Manage.*, 95, 48–58.
- GONZALEZ-DUGO, M.P, NEALE, C.M.U., MATEOS, L., KUSTAS, W.P., PRUEGER, J.H., ANDERSON, M.C., LI, F. (2009). A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. *Agricultural Water Management* 149. pp 1843-1853.
- GONZALEZ-PIQUERAS, J., CALERA BELMONTE A., GILABERT, M. A., CUESTA GARCÍA, A., AND DE LA CRUZ TERCERO, F. (2003) In: Estimation of crop coefficient by means of optimized vegetation indices for corn. Proceedings of the SPIE Congress, Barcelona, 8–11 September, p. 12, 2003.
- GONZÁLEZ-PIQUERAS J. (2006). Evapotranspiration de la Cubierta Vegetal mediante la Determinación del Coeficiente de Cultivo por Teledetección. Extensión a Escala Regional: Acuífero 08.29 Mancha Oriental. Tesis Doctoral presentada na Universitat de Valencia.
- GUANTER L., ESTELLÉS, V. E MORENO, J. (2007). *Spectral Calibration and Atmospheric Correction of ultra-fine spectral and spatial resolution remote sensing data*. Application to CASI-1500 data. *Remote Sensing of Environment* 109(1):54-65.
- GULATI, H.S., MURTY, V.V.N. (1979). A model for optimum allocation of canal water based on crop production functions. *Agric. Water Manage.*, 2: 79-91.
- HAMLETT, J. M. ET AL (1986). *Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analyses*. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v. 50 p. 868-875.

- HARGREAVES, G.H. Y SAMANI, Z.A. (1984). Economic considerations of deficit irrigation. *J.Irrigation and Drainage Eng.* 110:343-358.
- HARIKISHAN J, NEALE CMU, WRIGHT JL (2006). Development and validation of canopy reflectance based crop coefficient for potato. *Agric Water Manage.* 2007 vol. 88, issue 1-3, pages 235-246.
- HATFIELD. J.L. (1983). Evapotranspiration obtained from remote sensing. *Adv. Irrigation*, 2 (1983), pp. 396-416
- HATFIELD, J.L., J.H. PRUEGER AND W.P. KUSTAS. (2004). Remote sensing of dryland crops. p. 531-568. *In* S.L. Ustin (ed.) *Remote sensing for natural resource management and environmental monitoring: Manual of remote sensing*. 3rd ed. John Wiley, Hoboken, NJ.
- HATFIELD JL, BOOTE KJ, KIMBALL BA, WOLFE DW, ORT DR, IZAURRALDE CR, THOMSON AM, MORGAN JA, POLLEY HW, FAY PA, ET AL.(2008) Agriculture. *In* The Effects of Climate Change on Agriculture, Land Resources, Water Resources, and Biodiversity. U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Washington, DC, pp 21-74.
- HEILMAN, J. L., E. T. KANEMASU, N. J. ROSENBERG, AND B. L. BLAD. (1976). Thermal scanner measurements of canopy temperatures to estimate evapotranspiration. *Remote Sensing Environ.* 5:137-145.
- HEILMAN, J. L., HEILMAN W.E. AND MOORE D.G. (1981). Remote sensing of canopy temperature at incomplete cover. *Agron. J.* 73, pp. 403-406.
- HEILMAN JL, HEILMAN WE, MOORE DG. (1982). Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agronomy Journal*; 74:967-971.
- HERWITZ, S.R., L.F. JOHNSON, R.G. HIGGINS, J.G. LEUNG AND S.E. DUNAGAN, (2002). Precision agriculture as a commercial application for solar-powered unmanned aerial vehicles. AIAA 2002-3404, Portsmouth, VA.
- HERWITZ, S.R., L.F. JOHNSON, S.E. DUNAGAN, R.G. HIGGINS, D.V. SULLIVAN, J. ZHENG, B.M. LOBITZ, J.G. LEUNG, B.A. GALLMEYER, M. AOYAGI, R.E. SLYE, AND J.A. BRASS (2004). Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support, *Comp. Elec. Agric.*, 44:49-61.
- HILLEL, D. (1980). *Fundamentals of soil physics*. New York, Academic Press. 413p.
- HOOGENBOOM, G. (2000). Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications, *Agric. Forest Meteorol.* 103, 137-157.
- HOWELL, T.A. (2001). Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agron. J.* 93, 281-289.~

- HOWELL, T.A., HILER, E.A., REDELL, D.L. (1975). Optimization of water use efficiency under high frequency irrigation – II. System simulation and dynamic programming. *Trans. ASAE*, 18 (5): 879-887.
- HSIAO, T.C. (1990). Measurements of plant water status. In: STEWART, B.A.; NIELSEN, D.R. (Eds.). *Irrigation of agricultural crops*. New York : American Society of Agronomy, ch.9, p.244-280.
- <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.
- http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropraw.html
- HUETE AR. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVE). *Remote Sensing of Environment* ; 25:295-309.
- HUNT, E.R., JR., C.S.T. DAUGHTRY, C.L WALTHALL, J.E. MCMURTREY III, AND W.P. DULANEY (2003). Agricultural remote sensing using radio-controlled model aircraft, In: T. VanToai, D. Major, M. McDonald, J. Schepers, and L. Tarpley (eds) *Digital Imaging and Spectral Techniques: Applications to Precision Agriculture and Crop Physiology*, ASA Special Publication 66, ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, pp. 191-199.
- HUNSAKER, D. J.; PRINTER JR., P. J.; BARNES, E. M.; KIMBALL, B. A. (2003). Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. *Irrigation Science*, New York, v. 22, p. 95-104.
- HUNSAKER, D. J., PINTER JR., P. J., BARNES, E.M., KIMBALL, B. A (2003). Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. *Irrig. Sci.*, 22 (2003), pp. 95–104
- HUNSAKER, D.J., E.M. BARNES, T.R. CLARKE, G.J. FITZGERALD, AND P.J. PINTER, 2005. Cotton irrigation scheduling using remotely sensed and FAO-56 basal crop coefficients. *Trans. ASAE*. 48:1395-1407.
- IDSO S. B. AND BAKER D. G. (1967). Relative importance of reradiation, convection and transpiration in heat transfer from plants. *Plant Physiol.* 42, pp.631-640.
- IDSO S.B., SCHMUGGE T.J., JACKSON R.D., REGINATO R.J. (1975). The utility of surface temperature measurements for remote sensing of soil water studies. *Journal of Geophysical Research*, 80 (21): 3044-3049.
- IDSO SB, JACKSON RW, REGINATO RJ,(1977). Remote sensing of crop yields. *Science*; 196:19-25
- IDSO SB, JACKSON RD, PINTER JR.PJ, REGINATO RJ, HATELD JL. (1981). Normalizing the stress degree-day for environmental variability. *Agric. Meteorol.*; 24, 45±55.
- IDSO SB, JACKSON RD, PINTER JR.PJ, REGINATO RJ, HATELD JL. (1981). Normalizing the stress degree-day for environmental variability. *Agric. Meteorol.*; 24, 45±55.
- IDSO, S.B. (1982). Non water stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agric. Meteorol.* 27: 59-70.

- IGBADUN, H. E., MAHOO, H. F., TARIMO, A., SALIM, B.A. (2006). Crop water productivity of na irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha River Basin, Tanzania. *Agricultural Water Management*. 85, 141-150.
- IGBADUN, H.E., SALIM, B.A., TARIMO, A.K., MAHOO, H.F.(2008). Effects of deficit irrigation scheduling on yields and soil water balance of irrigated maize. *Irrig. Sci.* 27: 11-13.
- INAG (2001). Programa Nacional para o uso eficiente da Água: *Versão preliminar*, Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, Instituto da Água.
- IRMAK, S., D.Z. HAMMAN, AND R. BASTUG. (2000). Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agron. J.* 92:1221–1227.
- JOCHUM, A. M., A. CALERA Y A. CUESTA. (2002). Tecnologías de observation de la tierra en los servicios de asesoramiento de riegos. III Congreso sobre Gestión y Planificación del Agua, Sevilla, pp. 1-10.
- JACKSON R.D., REGINATO R.J., IDSO S.B. (1977). Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Researche*, 13:651-656.
- JACKSON ET AL., 1980 R.D. JACKSON, S.B. IDSO, R.J. REGINATO, P.J. PINTER JR. (1980). Remotely sensed crop temperatures and reflectances as inputs to irrigation scheduling. *Irrigation and Drainage Special Conference Proceedings*, ASCE, Boise, N. Y., USA (1980), pp. 390–397.
- JACKSON, R. D. (1981) Canopy temperature and crop water stress. In: *Advances in Irrigation* ed. D. Hillel, Vol 1, 43-85. Academic Press, New York, USA.
- JACKSON RD, IDSO SB, REGINATO RJ, PINTER JR. PJ. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.*; 17, 1133±1138.
- JACKSON RD, IDSO SB, REGINATO RJ, PINTER PJ. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator, *Water Resources Research*; 17: 1133–1138.
- JACKSON, RAY D. (1982), Soil Moisture Inferences from Thermal-Infrared Measurements of Vegetation Temperatures, *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, *ge-20*(3), 282.
- JACKSON, R. D., HATFIELD, J. L., REGINATO, R. J., IDSO, S. B. & PINTER, JR., P. J. (1983) Estimates of daily evapotranspiration from one time of day measurements. *Agr. Water Mgmt.* 7, 351-362.
- JACKSON, R. D., MORAN, M. S. GAY, L. W. & RAYMOND, L. H. (1987) Evaluating evaporation from field crops using airborne radiometry and ground-based meteorological data. *Irrig. Sci.* 8, 81-90.
- JACKSON, R. D., and C. E. EZRA (1985), Spectral response of cotton to suddenly induced water stress, *INT J REMOT*, 6(1), 177
- JACKSON, T.J., D.M. LEVINE, A.Y. HSU, A. OLDAK, P.J. STARKS, C.T. SWIFT, J. ISHAM AND M. HAKAN. (1999). Soil moisture mapping at regional scales using microwave radiometry: The southern Great Plains hydrology experiment. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 37:2136–2151.

- JACKSON, T.J., D. CHEN, M. COSH, F. LI, M. ANDERSON, C. WALTHALL, P. DORAISWAMY AND E.R. HUNT. (2004). Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sens. Environ.* 92:475–482.
- JACQUEMOUD, S., USTIN, S.L., VERDEBOUT, J., SCHMUCK, G., ANDREOLI, G. and HOSGOOD, B., (1996). Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. *Remote Sensing of Environment*, **56**, pp. 194–202.
- JACQUEMOUD S., BACOUR C. POILVÉ H., FRANGI J.P. (2000). Comparison of four radioactive transfer models to simulate plant canopies reflectance: direct and inverse mode. *Remote Sensing Environment*, 74(3): 471-481.
- JACUCCI G., KABAT P., PEREIRA L.S., VERRIER P., STEDUTO P., UHRIK C, BERTANZAN G., HUYGEN J., VAN DEN BROCK B., TEIXEIRA J. L., FERNANDO R., GIANNERINI G., CARBONI F., TODOROVIC M., TOLLER G., TZIALLAS G., FRAGAKI E., VERA-MUNOZ J., CARREIRA D., YOUCHEV P., CALZA D., VALLE E., DOUROUKIS M. 1994. The HYDRA project: a decision support for irrigation water management. Proceed. Intern. Conference on Land and Water Resources in the Mediterranean region CIHEAM – IAM- B VOL VI:1-19.
- JAMA, A.O., OTTMAN, M.J. (1993). Timing of the first irrigation in corn and water stress conditioning. *Agron. J.* 85, 1159-1164.
- JAYANTHI H, NEALE CMU, WRIGHT JL., (2007). Development and validation of canopy reflectancebased crop coefficient for potato. *Agric. Water Manag.* 88(1–3):235–246.
- JOHNSON, D.E., M. VULFSON, M. LOUHAICHI, AND N.R. HARRIS, (2003). *VegMeasure Version 1.6 User's Manual*, Dept. of Range. Res., Oregon State Univ., Corvallis, OR.
- JORDAN, C. F. (1969). Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50:663-666.
- KADIGI, R.M.J., KASHAIGILI, J.J., MDOE, N.S. (2004). The economic of irrigated paddy in Usangu Basin in Tanzania: water utilization, productivity, income and livelihood implications. *Pys. Chem. Earth* 29, 1091-1100.
- KANEMASU, E. T., STONE, L. R., AND POWERS, W. L. (1976). Evapotranspiration model tested for soybean and sorghum. *Agron. J.*, 68, 569– 572.
- KIMES DS, SMITH JA, RANSON KJ (1980) Vegetation reflectance measurements as a function of solar zenith angle. *Photogrammetric Eng Remote Sensing* 46:1563–1573.
- KIMES DS (1983) Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies. *Appl Opt* 22(9):1364–1372

- KIMES D.S., KNYAZIKHIN Y., PRIVETTE J.L., ABUELGASIM A.A., GAO F. (2000). Inversion methods for physically-based models. *Remote Sensing Reviews*. 18:381-439.
- KITE B.W., DROOGERS P. (2000). Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data: a case study from Western Turkey. *Journal of Hydrology*, 209:3-18.
- KUMAR, R., KHEPAR, S.D. (1980). Decision models for optimal cropping patterns in irrigation based on crop water production functions. *Agric. Water Manage.*, 3: 77-82.
- KUSTAS AND NORMAN, 1996, W.P. KUSTAS, J.M. NORMAN. (1996). Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques*, 41 , pp. 495–516
- KUSTAS, W. P., AND NORMAN, J. M. (1999). “Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover.” *Agric. For. Meteorol.* 94, 13-29.
- KUSTAS, W.P., A.N. FRENCH, J.L. HATFIELD, T.J. JACKSON, M.S. MORAN, A. RANGO, J.C. RITCHIE AND T.J. SCHMUGGE. (2003). Remote sensing research in hydrometeorology. *Photogram. Eng. Remote Sens.* 69:631–646.
- KUSTAS WP, LI F, JACKSON TJ, PRUEGER JH, MACPHERSON JI, WOLDE M (2004). Effects of remote sensing pixel resolution on modelled energy flux variability of croplands in Iowa. *Remote Sensing Environ* 92:535-547.
- KUSTAS, W.P., ANDERSON, M.C., NORMAN, J.M., LI, F. (2007). Utility of radiometric–aerodynamic temperature relations for heat flux estimation. *Boundary-Layer Meteorol.* 122, 167–187.
- LAMBETS K., EISENBEISS H., SAUERBIER M., KUPFERSCHMIDT D, GAISECKER T., SOTOODEH S. AND HANUSCH T. (2007). Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modeling of the late intermediate period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru. *J. Archaeol. Sci.*, vol. 34, n° 10, pp 1702-1712.
- Lei da Água – Lei nº. 58/2005 de 29-12-2005.
- LIMING WANG, GUO YU QIU, XIYING ZHANG, SUYING CHEN. (2005). Application of a new method to evaluate crop water stress index. *Irrigation Science* 24: 49-54.
- LIU, Y., LI, Y.N., PEREIRA, L.S., FERNANDO, R.M., TEIXEIRA, J.L. (2000). Irrigation management strategies for water saving in North China Plain. In: Proceedings of the XIV Memorial CIGR World Congress. Paper R 1105, Tsukuba, Japan, November/December 2000, CIGR.
- LOHEIDE II, S. P. AND S.M. GORELICK. (2005). A High-Resolution Evapotranspiration Mapping Algorithm (ETMA) with Hydroecological Applications at Riparian Restoration Sites, Remote Sensing of Environment.

- LÓPEZ URREA, R., LÓPEZ CÓRCOLES, H., LÓPEZ FUSTER, P. FABEIRO CORTÉS, C. MARTÍN DE SANTA OLALLA, F. J. E MARTÍNEZ CABAÑERO, M. (2002). Anuario Técnico del ITAP 2001. Ensayos de Riego Deficitario Controlado. Albacete, pp. 43-73.
- LÓPEZ URREA, R., LÓPEZ CÓRCOLES, H., LÓPEZ FUSTER, P. MONTOSO, A., MARTÍN DE SANTA OLALLA, F. J. E CALERO, J.A. (2003). Anuario Técnico del ITAP 2002. Ensayos dosis de agua y medidas disimétricas. Albacete, pp. 149-184.
- MAKIN, I.W. (1986). Applications of remotely sensed multispectral data in monitoring saline soils, Technical Note 19, Hydraulic Research, Wallingford/Irrigation and Power Research Institute, Amritsar, India.
- MARTÍN DE SANTA OLALLA, F., DOMÍNGUEZ-PADILLA, A. E LÓPEZ URREA, R. (2004). Production and Quality of the Onion Crop (*Allium cepa* L.) cultivated Under Controlled Deficit Irrigation Conditions in a Semi-Arid Climate. Agriculture water Management (in Press).
- MARTÍN DE SANTA OLALLA, M., FUSTER, P. L., BELMONTE, C. (2005). Agua y Agronomía. Universidade Castilla-La Mancha. Ediciones Mundi-Prensa.
- MARTÍN DE SANTA OLALLA, M., FUSTER, P. L., BELMONTE, C. (2005). Agua y Agronomía. Universidade Castilla-La Mancha. Ediciones Mundi-Prensa.
- MARTIN, D., VAN BROCKLIN, J., WILMES, G. (1989). Operating rules for deficit irrigation management. Trans. ASAE, 32(4): 1207-1215.
- MARTÍNEZ N. J.(2010). Evaluación del Impacto de la Sequía sobre la vegetación natural mediante teledetección en el SE español. Trabajo Final de Carrera en Ciencias Ambientales. Universidad Politecnica de Valencia. Escuela Politecnica Superior de Gandia.
- MENENTI M, VISSER TNM, MORABITO JÁ, DROVANDI A (1989). Appraisal of irrigation performance with satellite data and georeferenced information, in Rydzewski, J.R. and Ward, C.F. (eds.) Irrigation, Theory and Practice, Proc. of the Int. Conf., Institute of Irrigation Studies, Southampton, 12–15 September 1989: 785–801. Pentech Press, London.
- MENENTI M. (1990). Remote Sensing in evaluation and management of irrigation. Instituto Nacional de Ciencia y Tecnicas Hidricas (INCYTH), Mendonza, Argentina: 337 pp.
- MENENTI, M., AND B. J. CHOUDHURY. (1993). Parameterization of land surface evapotranspiration using a location dependent potential evapotranspiration and surface temperature range. In Proc. Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales, 561-568. Bolle et al., eds. IAHS Publication 212. International Association of Hydrological Sciences.
- MENENTI, M., 2000. Evaporation. In: Schultz GA, Engman ET (eds.). Remote sensing in hydrology and water management. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, p 157-188.

- MENENTI, M., L. JIA, AND Z. SU. (2003). On SEBI-SEBS validation in France, Italy, Spain, USA, and China. In Proc. Workshop on Use of Remote Sensing of Crop Evapotranspiration for Large Regions. R. G. Allen and W. Bastiaanssen, co-chairs. International Commission on Irrigation and Drainage
- MITCHELL, D. Y CHALMERS, D. J. (1982). The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 107:853-856.
- MITCHELL, P. D., CHALMERS, D.J., Y BURGE, G. (1986). The use of initial withholding of irrigation and tree spacing to enhance the effect of regulated deficit irrigation on pear trees. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 111:858-861.
- MITCHELL, P. D., JERIE, P.H. Y CHALMERS, D.J. (1984). Effects of regulated water deficits on pear tree growth, flowering, fruit growth and yield. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 109:1604-606.
- MITCHELL, P. D., VAN DEN ENDE, B.; JERIE, P.H. Y CHALMERS, D.J. (1989). Responses of "Barlett" pear to withholding irrigation, regulated deficit irrigation and tree spacing. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114:15-19.
- MICHAEL, M. G.; BASTIAANSEN, W. G. M.A. (2000). A new simple method to determine crop coefficients for water allocation planning from satellites: Results from Kenya. *Irrigation and Drainage Systems*, 14(3):237-256.
- MOLDEN, D., SAKTHIVADIVEL, R., PERRY, C.J., DE FRAITURE, C., KLOEZEN, W.H. (1998). Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems. Research Report 20. International Water Management Institute, Colombo Sri Lanka.
- MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. (1990). Principles of environmental physics. 2.ed. London: Edward Arnold, 291p.
- MORAN, M. S., PINTER, P. J., JR., CLOTHIER, B. E., AND ALLEN, S. G. (1989). Effect of water stress on the canopy architecture and spectral indices of irrigated alfalfa, *Remote Sens. Environ.* 29:251-261.
- MORAN M.S., CLARKE, T.R., INOUE, Y. & VIDAL, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index, *Rem. Sens. of Env.*; 49(2): 246-263.
- MORAN MS. (1994). Irrigation management in Arizona using satellites and airplanes. *Irrig. Science* 1994; 15: 35-44.
- MORAN MS, VIDAL A, TROUFLEAU D., QI J, CLARKE TR, PINTER PJ Jr., MITCHELL TA, INOUE Y, NEALE CMU (1997). Combining multifrequency microwave and optical data for crop management. *Remote Sensing Environ* 61:96-109.
- MORAN M.S. BRYANT R.B., CLARKE T.R., QI J. (2001). Development and calibration of reference reflectance tarps for use with airborne cameras. *Photog Eng. Remote Sens* 67: 273-286.

- MORAN, MS, FITZGERALD, SG. RANG A., WALTHALL, C., BARNES, E., BAUSCH W., CLARKE, T., DAUGHTRY, C., EVERITT, J., HALFIELD, K., HAUSTAD, JACKSON, T., RITCHEN, N., KUSTAS W., MCGUIRE, M., PINTER, P., SUDDUTH K., SCHEPERS J., SCHMUGGE T., PSTARKS ANDA UPCHURCH D. (2003). Sensor development and radiometric correction for agricultural applications. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 69 (6):705-718.
- NEALE C.M. BAUSCH W.C., HEERMAN D.F. (1989). Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Transactions of the ASAE*, 32(6): 1891-1899.
- NEALE CM U., W. C. BAUSCH, AND D. F. HEEREMANN. (1989). Development of reflectancebased crop coefficients for corn. *Transactions of the ASAE*; 32(6): 1891-1899.
- NEALE CMU, AHMED RH, MS MORAN MS, PINTER PJ, QI J, CLARKE TR.(1996). Estimating seasonal cotton evapotranspiration using canopy reflectance. In *Evapotranspiration and irrigation scheduling: Proceedings of the International Conference, November 3 to 6, San Antonio, Texas, USA*, ed. C. R. Camp, E. J. Sadler, and R. E. Yoder, 173-181. St. Joseph, Michigan, USA: American Society of Agricultural Engineers.
- NEALE CMU, JAYANTHI H, WRIGHT JL (2003) Crop and irrigation water management using high resolution airborne remote sensing. In: *Proceedings of 54th IEC meeting of the international commission on irrigation and drainage (ICID) workshop remote sensing of ET for large regions, 17 Sept (2003) Montpellier, France. CD-ROM. New Delhi, India*
- NEALE, C., JAYANTHI, H., WRIGHT, J. (2005) Irrigation water management using high resolution airborne remote sensing, *Irrigation and Drainage Systems*, Vol. 19, No. 3-4, pp. 321-336.
- NEOSMITH, D.S., RITCHIE, J.T. (1992). Short and long-term responses of corn to a pre-anthesis soil water deficit. *Agron. J.* 84, 107-113.
- NORMAN, J. M., KUSTAS W. P., AND HUMES, K. S. (1995). A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperature, *Agr. For. Meteorol.*, 77, 263–293.
- NORMAN, J. M., KUSTAS, W. P., PRUEGER, J. H., AND DIAK, G. R. (2000). Surface flux estimation using radiometric temperature: a dual temperature difference method to minimize measurement error, *Water Resour. Res.*, 36, 2263–2274.
- NORMAN, J. M., ANDERSON, M. C., KUSTAS, W. P., FRENCH, A. N., MECIKALSKI, J. R., TORN, R. D., DIAK, G. R., SCHMUGGE, T. J., AND TANNER, B. C. W. (2003). Remote sensing of surface energy fluxes at 101-m pixel resolutions, *Water Resour. Res.*, 39(8), 1221, doi:10.1029/2002WR001775, 2003.
- OLIOSO A., INOUE Y., ORTEGA-FARIAS S., DEMARTY J., WIGNERON J.P., BRAUD I., JACOB F., LECHARPENTIER P., OTTLE C., CALVET J.C., BRISSON N. (2003). Assimilation of remote sensing data into crop simulation models and SVAT models. In *ICID (ed.)*, 54th IEC Meeting of the

International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) – International Workshop on Use of Remote Sensing of Crop Evapotranspiration for Large Regions, ICID, International Commission on Irrigation and Drainage. Montpellier. France. P. 15.

OLIVEIRA I. (1993). Técnicas de Regadio. Instituto de Estruturas Agrárias e Desenvolvimento Rural, Lisboa.

OSBORNE, S.L., J.S. SCHEPERS AND M.R. SCHLEMMER. (2004). Detecting nitrogen and phosphorus stress in corn using multi-spectral imagery. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 35:505–516

OTEGUI, M.E., ANDRADE, F.H., SUERO, E.E. (1995). Growth, water use and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Res* 40: 87-94.

OWEIS, T.(1997). Supplemental Irrigation: a highly efficient water- use practice. ICARDA, Aleppo, Syria, 16 pp.

PANDEY, R.K., MARANVILLE, J. W., ADMOU, A. (2000a). Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment. I. Grain yield and yield components. *Agric. Water Management.* 46, 1-13.

PANDEY, R.K., MARANVILLE, J. W., CHETIMA, M. M. (2000b). Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment. II. Shoot growth. *Agric. Water Management.* 46, 15-27.

PAYERO, J.O., MELVIN, S.R., IRMAK, S., TARKALSON, D. (2006). Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. *Agricultural Water Management.* 84, 101-112.

PÉREZ-PRIEGO O., ZARCO-TEJADA P.J., SEPULCRE-CANTÓ G., MILLER J.R., FERERES E. (2005) Detection of water stress in orchard trees with a high-resolution spectrometer through chlorophyll fluorescence *in-filling* of the O₂-A band. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43, pp. 2860–2869.

PEREIRA LS, (1994). Evapotranspiration, crop water requirements and irrigation scheduling (invited lecture). In: A Hamdy (Ed.) *Farm Water Management Techniques*, (Advanced Short Course, IAV Hassan II, Rabat), IAM, Bari: 1-18.

PEREIRA, L. S. (2004). Necessidades de Água e Métodos de Rega. *Publicações Europa-América*, Coleção EuroAgro, nº 60.

PEREIRA, L.S., CORDERY, I., IACOVIDES, I. (2002). Coping with water scarcity. IHP-VI - Technical Documents in Hydrology nº. 58. International Hydrological Programme. UNESCO. Paris. 269 pp.

PÉREZ-PRIEGO O, ZARCO-TEJEDA PJ, SEPULCRE-CANTÓ G, MILLER JR, FERERES E (2005). Detection of water stress in orchard trees with a high resolution spectrometer through chlorophyll fluorescence in filling of the O₂-A band. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*; 43,2860-2869.

- PÉREZ-PRIEGO O., ZARCO-TEJADA P.J., SEPULCRE-CANTÓ G., MILLER J.R., FERERES E. (2005). Detection of water stress in orchard trees with a high resolution spectrometer through chlorophyll fluorescence in filling of the O₂-A band. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43, 2860-2869.
- PHENE, C.J. ITIER, B. and REGINATO, R.J. (1990). Sensing Irrigation need. In Proc. Erd National Irrigation Symposium. ASAE Publication. 0-90 pp 429-443.
- PINTER, P. J., K. E. FRY, G. GUINN, AND J. R. MAUNEY. (1983). Infrared thermometry: A remote sensing technique for predicting yield in water stressed cotton. *Agric. Water Mgmt.* 6(4): 385-395.
- PINTER P.J. JR. (1993). Solar angle independence in the relationship between absorbed PAR and remotely sensed data for alfalfa. *Remote Sens. Environ.* 46: 19-25.
- PINTER, P.J., J.L. HATFIELD, J.S. SCHEPERS, E.M. BARNES, M.S. MORAN, C.S. DAUGHTRY AND D.R. UPCHURCH. (2003). Remote sensing for crop management. *Photogram. Eng. Remote Sens.* 69:647-664.
- PROJETO POCTI 34149/AGR/2000 (1999). “*Conservação do Solo e da Água em Condições Particularmente Difíceis dos Regadios Mediterrâneos*”. Anexo Técnico da Candidatura ao Projecto de Investigação. Departamento de Engenharia Rural. Universidade de Évora. Évora.
- RAFN E. CONTOR B., AMES D. (2008). Evaluation of a method estimating irrigated crop-evapotranspiration coefficients from remotely sensed data in Idaho. *Journal of irrigation and Drainage Engineering – ASCE* 134, pp 722-729.
- REGINATO, R. J., JACKSON, R. D., AND PINTER, P. J., JR. (1985). Evapotranspiration calculated from remote multispectral and ground station meteorological data, *Remote Sens. Environ.* 18:75-89.
- RIANO D., VAUGHAN P., CHUVIECO E, ZARCO-TEJADA P. AND USTIN S.L. (2005). Estimation of fuel moisture content by inversion of radiative transfer models to simulate equivalent water thickness and dry matter content: analysis at leaf and canopy level. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.43, n° 4, pp 821-826.
- RICHARDSON, A.J, WIEGAND C. L. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetrico.* 43:1541-1552.
- RITCHIE, S. W., HANWAY, J.J., BENSON, G. O. (1992). How a corn plant develops. Special Report N° 48. Iowa State University, p. 21.
- RITCHIE, J.; ZIMBA, P. & EVERITT, J. (2003). Remote sensing techniques to assess water quality. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 69, No. 6, 695-704.
- ROBERTS D.A., GREEN R.O. AND ADAMS J.B. (1997). Temporal and spatial patterns in vegetation and atmospheric properties from AVIRIS. *Remote Sens. Environ.*, vol. 62, n° 3, pp 223-240.
- ROERINK GJ, BASTIAANSEN WGM, CHAMBOULEYRON J, MENENTI M. (1997). Relating crop water consumption to irrigation water supply by remote sensing, *Water Resources Management*; 11(6): 445-465.

- ROERINK, G. J., SU, Z., & MENENTI, M. (2000). S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth. Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(2), 147-157.
- RONDEAUX G., STEVEN M., AND BARET F. (1996). Optimisation of the soil adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, vol.55 p 95-107.
- ROSS MA, TARA PD, BURDGE J. (1993). New Directions in Integrated Hydrologic Modeling with GIS, American Water Resources Association. National Conference on Hydraulic Engineering, "Exemplary Systems for GIS Applications in Surface Water Hydrology", San Francisco, California, July 25-30.
- ROSS MA, TARA PD, BURDGE J.(1993). New Directions in Integrated Hydrologic Modeling with GIS, American Water Resources Association, National Conference on Hydraulic Engineering, "Exemplary Systems for GIS Applications in Surface Water Hydrology", San Francisco, California, July 25-30, 2003.
- ROUSE JR. JW, HASS RH, SCHELL JA, DEERING DW. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3., Washington, 1973. Proceedings. Washington: NASA, v.1, p. 309-317.
- RUBIO E., COLIN J., D'URSO G., TREZZA R., ALLEN R., CALERA A., GONZALEZ J., JOCHUM A., MENENTI M., TASUMI M., KELLY C., VUOLO F. (2006). Golden day comparison of methods to retrieve ET (KC-NDVI, Kc-analytical, MSSEBS, METRIC), Earth Observation for Vegetation Monitoring and Water Management. AIP, Naples (Italy), pp. 193-200.
- SAKTHIVADIVEL, R., DE FRAITURE, C., MOLDEN, D., PERRY, C., KLOEZEN, W. (1999). Indicators of land and water productivity in irrigated agriculture. *Int. J. Water Res. Dev.* 15 (1/2), 161-179.
- SANTINI, A. 1992. Modelling water dynamics in the soil-plant-atmosphere system for irrigation problems. *Excerpta* no. 6. 1991/92.
- SARWAR, A., BASTIAANSEN, W.G.M. (2001). Long-term effects of irrigation water conservation on crop production and environment in semi-arid areas. *J. Irrig. Drain. Eng.* 127(6): 331-338.
- SELLERS, P. J., RANDALL, D. A., BETTS, A. K., HALL, F. G., BERRY, J. A., COLLATZ, G. J., DENNING, A. S., MOONEY, H. A., NOBRE, C. A., SATO, N., FIELD, C. B., & HENDERSON-SELLERS, A. (1997). Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, 275, 502– 509.
- SEMENOV, M.A., JAMIESON, P.D. (2001). Using weather generators in crop modelling. In: Sivakumar, M.V.K. (Ed.), *Climate Prediction and Agriculture*, Proceeding of the START/WNO International Workshop, Geneva, Switzerland, September 27-29, 1999. International START Secretariat, Washington, DC, USA, pp. 119-142.

- SEPULCRE-CANTÓ G., ZARCO-TEJADA P. J., SOBRINO A., JIMÉNEZ-MUNOZ J.C. AND VILLALOBOS F.J. Spatial variability of crop water stress in na olive grove with high-spatial thermal remote sensing imagery. In Proc. Precision Agric., pp. 267-272.
- SERRALHEIRO, R.P. (1997). *Perspectiva da Agricultura de Regadio em Portugal*. Publicações da Universidade de Évora, Ciências Agrárias, pp 28-29.
- SERRALHEIRO R. P. (1999). Anexo Técnico da Candidatura ao Projeto de Investigação PROJETO POCTI 34149/AGR/2000 (1999). “*Conservação do Solo e da Água em Condições Particularmente Difíceis dos Regadios Mediterrâneos*. Departamento de Engenharia Rural. Universidade de Évora. Évora.
- SETTER, T. L., FLANNIGAN, B., MELKONIAN, J. (2001). Loss of kernel set due to water deficit and shade in maize. *Crop Sci.* 41, 1530-1540.
- SIMS D. AND GAMON J. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sens. Environ.*, vol. 81, nº 2/3, pp 337-354.
- SINGH, R.K., AND A. LRMAK. (2009). Estimation of crop coefficients using satellite remote sensing. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 135:597-608.
- SINGH, R., VAN DAM, J.C., FEDDES, R.A. (2006). Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa District, India. *Agricultural Water Management*, 82: 253-278.46. Rome.
- SHANAHAN, J.F., J.S. SCHEPERS, D.D. FRANCIS, G.E. VARVEL, W.W. WILHELM, J.M. TRINGE, M.R. SCHLEMMER, AND D.J. MAJOR (2002). Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield, *Agron. J.*, 93:583-589.
- SHANAHAN, J.F., J.S. SCHEPERS, D.D. FRANCIS, G.E. VARVEL, W.W. WILHELM, J.S. TRINGE, M.R. SCHLEMMER AND D.J. MAJOR. (2001). Use of remote sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agron. J.* 93:583–589.
- SHANAHAN, J.F., K. HOLLAND, J.S. SCHEPERS, D.D. FRANCIS, M.R. SCHLEMMER AND R. CALDWELL. (2003). Use of crop reflectance sensors to assess corn leaf chlorophyll content. p. 135–150. In *Digital imaging and spectral techniques: Applications to precision agriculture and crop physiology*. ASA Spec. Publ. 66. ASA, Madison, WI.
- SHUTTLEWORTH, W. J. AND WALLACE, J. S. (1985) Evaporation from sparse crops - an energy combination theory. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, 111, 839-855.
- SHUTTLEWORTH, W. J. AND GURNEY, R. J. (1990) The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, 116, 497-519.
- SMITH, M. (1992). CROPWAT. A computer programme for irrigation planning and management, In *FAO irrigation and Drainage Paper nº*

- SOARES, A. (2006). Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente. Coleção Ensino da Ciência e da Tecnologia (2ª Edição). IST Press. Lisboa.
- SPITTERS, C.J.T., VAN KEULEN, H., VAN KRAALINGEN, D.W.G. (1989). A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. In: Rabbingre, R., Ward, S.A., Van Laar, H.H. (Eds.). Simulation and systems management in crop protection, Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, The Netherlands, pp. 147-181.
- STEWART, J.L., HAGAN, R.M., PRUITT, W.O. (1974). Functions to predict optimal irrigation programs. J. Am. Soc. Civil Eng. 100 (IR2): 179-199.
- STOCKLE, C.O., JAMES, L. G. (1989). Analysis of deficit irrigation strategies for corn growth simulation. Irrig. Sci.10, 85-98.
- STOCKLE CO, DUGAS WA. (1992). Evaluating temperature-based indices for irrigation scheduling. Irrigation Science13,31-37.
- STONE, L.R.; HORTON, M.L. (1974). Estimating evapotranspiration using canopy temperatures: field evaluation. Agronomy Journal, 66 (3): 450-454.
- STONE, L.R., SCHLEGEL, A.J., GWIN, R.E., KHAN, A.H. (1996). Response of corn, grain sorghum and sunflower to irrigation in the High Plains of Kansas. Agric. Water Manage 30:251-259.
- STONE, P.J., WILSON, D.R., BEID J.B., GILLESPIE, R.N. (2001). Water deficit effects on sweet corn I. water use, radiation use efficiency, growth and yield. J. Agric Res 52: 103-113.
- SU, Z. (2002) The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes, Hydrol. Earth Sys. Sci., 6(1), 85-99.
- SUÁREZ L, ZARCO-TEJADA PJ, BERNI JAJ, GOONZÁLEX-DUGO V, FERERES E. (2009). Modelling PRI for water stress detection using radioactive transfer models. Remote Sensing of Environment; 113.730-744.
- SUÁREZ L., ZARCO-TEJADA P.J., BERNI J.A.J, GONZÁLEX-DUGO V., FERERES E. (2009). Modelling PRI for water stress detection using radiative transfer models. *Remote Sensing of Environment*. 113. 730-744.
- SUÁREZ L., ZARCO-TEJADA P.J., SEPULCRE-CANTÓ G., PÉREZ-PRIEGO O., MILLER J.R., JIMÉNEZ-MUÑOZ J.C., SOBRINO J. (2008). Assessing canopy PRI for water stress detection with diurnal airborne imagery. *Remote Sensing of Environment*. 112. 560-575.
- SUGIURA R., NOGUCHI N. AND ISHII. (2005). Remote Sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter. Biosyst. Eng., vol. 90, nº 4, pp. 369-379.
- SUPIT, I., HOOYER, A.A., VAN DIEPEN, C.A. (Eds) (1994). System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Vol.1: Teory and algorithms. EUR publication 15956, Agricultural series, Luxembourg, 146 pp.

- SWMRG (2003). Comprehensive assessment of water resources of Mkoji sub-catchment, its current uses and productivity. FNPP-Soil Water Management Research Group Report, p. 113.
- TANNER, C.B. (1963). Basic instrumentation and measurements for plant environment and micrometeorology. *Soil Bull.*, 6 University of Wisconsin, Madison, WI.
- TANNER C.B, JURY W.A. (1976). Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. *Agronomy Journal*, 68: 239-243.
- TASUMI, M., TREZZA, R., ALLEN, R.G. & WRIGHT, J.L. (2003). Some U.S. Validation Tests on the SEBAL Model for Evapotranspiration via Satellite. *Proceedings of the ICID Workshop on Remote Sensing of Evapotranspiration for Large Regions*. 13 p.
- TASUMI, M., ALLEN, R.G., TREZZA, R. & WRIGHT, J.L. (2005a). Use of SEBAL to assess the band width of crop coefficient curves in Idaho. *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131(1): 94–109.
- TASUMI, M., TREZZA, T., ALLEN, R.G. & WRIGHT, J.L. (2005b). Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. *Journal of Irrigation and Drainage Systems* 19: 355–376.
- TASUMI M, ALLEN RG, TREZZA R (2006). Calibrating satellite-based vegetation indices to estimate evapotranspiration and crop coefficients. In: Wichelns D, Anderson SS (eds). *Proceedings of the 2006 USCID Water Management Conference. Ground Water and surface water under stress: competition, interaction, solutions*. Publisher USCID, Denver.
- TEIXEIRA JL (1992). ISAREG Modelo para Gestão da Água de Rega. Instituto Superior de Agronomia.
- TEIXEIRA, J.L. (1986). Modelação das necessidades de água para rega à escala regional (Aplicação à Bacia Hidrográfica do Rio Ave). Tese apresentada para obtenção do grau de Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos. Instituto Superior Técnico. Lisboa. 196 pp.
- TEIXEIRA, J.L. (1990). Modelação da Condução e Programação da Rega. Tese de Doutoramento. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa. 303 pp.
- TEIXEIRA JL, PEREIRA LS, 1992. ISAREG, an irrigation scheduling model. *ICID Bulletin*, 41(2): 29-48.
- TEIXEIRA, J.L., FARRAJOTA, M.P., PEREIRA, L. S. (1993). PROREG, a Design model for simulating the demand in irrigation projects. *Workshop on Crop Water Models, ICID, The Hague*.
- TEIXEIRA, J.L., FERNANDO, R.M., PEREIRA, L.S. (1995). Irrigation scheduling alternatives for limited water supply and drought. *ICID J.* 44 (2), 73-88.
- THENOT F., MÉTHY M., WINKEL T (2002). The Photochemical Reflectance Index (PRI) as a water-stress index. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (23), pp. 5135–5139.

- THIRUVENGADACHARI S, SAKTHIVADIVEL R. (1997). Satellite remote sensing techniques to aid irrigation system performance assessment: a case study in Índia ; Research Report 9, International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka: 23 pp.
- TOCONET, O.; BERNARD, R.; VIDAL-MADJAR, D. (1986). Evapotranspiration over na agricultural region using a surfasse flux/temperature model based on NOAA-AVHRR data. *Journal of Climate applied Meteorology*, 25 (3): 284-307.
- TOUREIRO, C.; SERRALHEIRO, R.; OLIVEIRA, M.R. (2007). Maximização da Economia da Água em Regadio: Rega Deficitária Controlada. *Revista "Tecnologia da Água"*.
- TROTTER G.M., WHITEHEAD D., PINKNEY E.J. (2002). The photochemical reflectance index as a measure of photosynthetic light use efficiency for plants with varying foliar nitrogen contents. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (6), 1207-1212.
- TUONG, T.P., PALICO, P.P., YAMAUCHI, M., CONFESOR, R., MOODY, K. (2000). Increasing water productivity and weed suppression of wet seeded rice: effect of water management and rice genotypes. *Exp. Agric.* 36 (1), 71-89.
- UTSET, A., MARTÍNEZ-COB, A., FARRÉ, I., CAVERO J. (2006). Simulating the effects of extreme dry and wet years on the water use of flooding-irrigated maize in a Mediterranean landplane.
- VAN DAM, J.C. E MALIK, R.S Eds. (2003). Water productivity of irrigated crops in Sirsa district, India. Integration of remote sensing, crop and soil models and geographic Information Systems. WATPRO. Final Report. ISBN 90-6464-864-6, pp 173.
- VAN DAM, J.C., HUYGEN, J., WESSELING, J.G., FEDDES, R.A., KABAT, P., VAN WALSUM, P.E.V., GROENENDIJK, P., VAN DIEPEN, C.A. (1997). Theory of SWAP version 2.0 Simulation of water flow, solute transport and growth in the soil-water-atmosphere-plant environment. Report 71, Sub department of Water Resources, Wageningen University, Technical document 45, Alterra Green World Research, Wageningen, The Netherlands, 167 pp.
- VERHAEGHE, R.J, WNM VANDER KROGT (1993). Crop water modelling with an operational management perspective. 15th Intl. Congress of Irrigation and Drainage. 1-15 pp. Netherlands.
- VERHOEF W., BACH H. (2003). Remote Sensing data assimilation using coupled radiative transfer models. *Chem. Earth A/B/C*, 28 (1-3): 2-13.
- VERMA, S. B., ROSENBERG, N. J., BLAD, B. L., AND BARADAS, M. W. (1976). Resistance-energy balance method for predicting evapotranspiration: Determination of boundary layer resistance and evaluation of error effects, *Agronomy J.*, 68, 776-782.
- VILLALOBOS, F.J., FERERES, E. (2004). Climate change effects on crop water requirements in Southern Spain. II. Contrasting meteorological and agronomic viewpoints. In: Jacobsen, S.E., Jensen, C.R., Porter, J.R. (Eds.), *Proceedings of VIII Congress of the European Society of Agronomy*, KVL, Copenhagen, pp. 349-350.

- WALSH S (1992). Spatial Education and Integrated Hands-on Training: Essential Foundations of GIS. *Journal of Geography*; 91/2: 54-61
- WALSH, MICHAEL R. (1993). Toward Spatial Decision Support Systems in Water Resources. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 119(2): pp. 158-169.
- WANJURA DF, UPCHURCH DR, MAHAN JR. (1990). Evaluating decision criteria for irrigation scheduling of cotton. *Trans ASAE* 1990; 33(2):512-518.
- WANJURA DF, UPCHURCH DR. (2000). Canopy temperature characterization of corn and cotton water status. *Trans ASAE*; 43(4):857-875.
- WIEGAND, C. L., RICHARDSON, A. J. & KANEMASU, E. T. (1979) Leaf area index estimates for wheat from Landsat and their implications for évapotranspiration and crop modeling. *Agron. J.* 71, 336-342.
- WIEGAND, C. L., AND RICHARDSON, A. J. (1984), Leaf area, light interception, and yield estimates from spectral components analysis, *Agron. J.* 76:543-548.
- WOLF, P. R. (1983). *Elements of Photogrammetry, With Air Photo Interpretation and Remote Sensing.*
- WOLF, J., VAN OIJEN, M. (2003). Model simulation of effects of changes in climate and atmospheric CO₂ and O₃ on tuber yield potential of potato (*c.v. Bintje*) in the European Union. *Agric. Ecosyst. Environ.* 94, 141-147.
- WRIGHT J.L. (1982). New évapotranspiration crop coefficients. *Journal of Irrigation and Drainage*, 108: 57-74.
- YAZAR, A., HOWELL, T.A, DUSEK, D.A., COPELAND, K.S. (1999). Evaluation of crop water stress index for LEPA irrigation corn. *Irrig. Sci.* 18, 171-180.
- ZAIRI, A., EL ARMAMI, H., STATNI, A., PEREIRA, L.S., RODRIGUES, P.N., MACHADO, T., TEIXEIRA, J.L. (2001). Irrigation scheduling strategies for cereals and field horticultural crops under limited water availability in Tunisia. In: *Proceedings of the Workshop and Expert Consultation FAO-ICARDA-EU on Drought Mitigation for the Near East and the Mediterranean.* ICARDA, Aleppo, Syria, pp 2.1-2.17.
- ZARCO-TEJADA, P., MILLER, J., NOLAND, T., MOHAMMED, G. AND SAMPSON, P. (2001). Scaling up and model inversion methods with narrow-band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.39, n° 7, pp.1491-1507.
- ZARCO-TEJADA, P. MILLER, J., HARRON, J. HU, B., NOLAND, T., GOEL, N., MOHAMMED, G AND SAMPSON, P. (2004). Needle chlorophyll content estimation through model inversion using hyperspectral data from boreal conifer forest canopies. *Remote Sensing. Environ.* vol. 89, n° 2, pp.189-199.

ZARWART, SANDER J. E BASTIAANSEN, WIM G. M. (2004) Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management*. 69. pp.115-133.

ZHANG, Y., WEGEHENKEL, M. (2006): Integration of MODIS data into a simple model for the spatial distributed simulation of soil water content and evapotranspiration. - *Remote Sensing of Environment* .104 (4): 393-408.

ZHANG, H., OWIE, T. (1999). Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in Mediterranean region. *Agric. Water Manage.* 38, 195-211.

ZIBOGNON, M., CRAGO, R.D., AND SULEIMAN, A.A. (2002) Conversion of radiometric to aerodynamic surface temperature with an anisothermal canopy model. *Water Resour. Res.*, 38(6), 3-1 to 3-6.

ZINSELMEIER, C., JEONG, B., BOYER, J.S. (1999). Starch and the control of kernel number in maize at low water potentials. *Plant Physiol.* 121, 25-36.

YODER, B. J., & PETTIGREW-CROSBY, R. E. (1995). Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400– 2500 nm) at leaf and canopy scales. *Remote Sensing of Environment*, 53, 199– 211.



Contactos:

Universidade de Évora

Instituto de Investigação e Formação Avançada - IIFA

Palácio do Vimioso | Largo Marquês de Marialva, Apart. 94

7002-554 Évora | Portugal

Tel: (+351) 266 706 581

Fax: (+351) 266 744 677

email: iifa@uevora.pt