



Universidade de Évora

CLIMATOLOGIA E QUALIDADE DA ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO GUADIANA

Miguel Joaquim Fernandes Potes

Sob a orientação de:

Professor Doutor Rui Salgado

Professora Doutora Maria João Costa

Dissertação submetida à Universidade de Évora para a obtenção do grau de mestre em
Ciências da Terra, da Atmosfera e do Espaço, área de especialização em Física da
Atmosfera e do Clima

2008



Universidade de Évora

**CLIMATOLOGIA E QUALIDADE DA ÁGUA
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO GUADIANA**

Miguel Joaquim Fernandes Potes



169270

Sob a orientação de:

Professor Doutor Rui Salgado

Professora Doutora Maria João Costa

Dissertação submetida à Universidade de Évora para a obtenção do grau de mestre em Ciências da Terra, da Atmosfera e do Espaço, área de especialização em Física da Atmosfera e do Clima

2008

AGRADECIMENTOS

Venho por este meio expressar os mais sinceros agradecimentos:

À *Universidade de Évora*, em particular ao *Centro de Geofísica de Évora*, pelas facilidades concedidas, nomeadamente em meios técnicos e instalações.

Ao *Instituto de Meteorologia*, em particular à *Mestre Vanda Pires*, pelo acolhimento e ajuda concedidos.

À *EDIA* e ao *INAG* pela disponibilidade em fornecer os dados *in situ* de qualidade da água da Albufeira de Alqueva utilizados neste trabalho.

À *ESA* por disponibilizar as imagens MERIS utilizadas, ao abrigo dos projectos ENVISAT **AOPT-2423** e **AOPT-2357** e ainda aos projectos FCT **PDCTE/CTA/49826/2003**, **PDCTE/CTA/49953/2003** e **PTDC/AMB/73338/2006**.

Ao meu orientador *Professor Doutor Rui Salgado* e à minha orientadora *Professora Doutora Maria João Costa* pelo apoio, interesse e empenho demonstrado ao longo da realização deste trabalho.

À *Professora Ana Maria Silva* pela manutenção do site AERONET e pela sua disponibilidade e ajuda na realização deste trabalho.

À *Professora Maria Manuela Morais* e ao *Laboratório da Água do Centro de Ecologia e Ambiente da Universidade de Évora* pela ajuda na compreensão de alguns resultados.

À *minha família*, em especial aos *meus pais e irmão*, pela oportunidade de realização deste curso.

A todos a minha gratidão pelo apoio demonstrado.

Índice

Índice	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
Lista de Acrónimos	v
1. Introdução	1
2. Climatologia de uma região da bacia do Guadiana	4
2.1 Metodologia	5
2.2 Temperatura do ar	6
2.2.1 Índices de temperatura	7
2.3 Precipitação	9
2.3.1 Índices de precipitação	11
2.4 Insolação	12
2.5 Evapotranspiração	12
3. Tendências climáticas observadas na bacia da ribeira da Pardiela	15
3.1 Metodologia	16
3.1.1 Estações utilizadas	16
3.1.2 Preenchimento de falhas	17
3.1.3 Teste estatístico de Mann-Kendall	17
3.2 Tendências observadas na temperatura	19
3.3 Tendências observadas na precipitação	22
3.4 Índices Climáticos	24
3.4.1 Índices de temperatura	24

3.4.2 Índices de precipitação	25
3.4.3 Extremos	26
3.5 Análise de situações de seca	28
4. Qualidade da água da albufeira de Alqueva utilizando medidas de satélite	31
4.1 Metodologia	33
4.1.1 Dados, área e período de estudo	33
4.1.2 Correção atmosférica	35
4.1.3 Parametrizações	37
4.2 Resultados	39
4.2.1 Validação	39
4.2.2 Distribuição espacial dos dois pigmentos estudados	41
5. Campanha de observações na bacia da ribeira da Pardiela	45
5.1 Estação Meteorológica	45
5.1.1 Base de dados do CGE	47
5.1.2 Primavera e Verão 2008	47
5.2 Índice de Vegetação NDVI_MERIS	49
6. Conclusões e perspectivas de trabalho futuro	54
Bibliografia	58

RESUMO

A garantia da qualidade da água de Alqueva pressupõe diversas actividades e abordagens, entre elas a reabilitação dos afluentes e a monitorização da qualidade da água. Como contributo para a definição de estratégias de reabilitação, efectuou-se uma climatologia 1961-1990 para uma região da bacia do Guadiana e analisaram-se as tendências em algumas variáveis meteorológicas, utilizando testes estatísticos. Verificou-se que existe uma tendência de aumento da temperatura média na bacia e de diminuição da precipitação, surgindo secas mais intensas na última década.

Como contributo para a monitorização da qualidade da água desenvolveu-se um método para obter a concentração de clorofila *a* e a densidade de cianobactérias, resultante da combinação de medições da reflectância espectral de satélite (MERIS) e de análises *in situ*. Foram obtidas boas correlações (clorofila *a*: $R=0.84$; cianobactérias: $R=0.97$). Além disso, quando alargado a toda a superfície da albufeira, o método apresenta resultados de acordo com as medidas *in situ*.

“CLIMATOLOGY AND WATER QUALITY IN GUADIANA HYDROLOGICAL BASIN“

ABSTRACT

The guarantee of good water quality in Alqueva reservoir demands for several activities and approaches. Amongst them are the preservation and rehabilitation of tributaries, as well as the water quality monitoring. In the present work, the 1961-1990 climatology was developed, for a region of the Guadiana basin, being also analyzed significant trends of some meteorological variables, using Mann-Kendall statistical test. Two mains trends arise from the analysis: increase of the mean temperature at the basin and a reduction of the precipitation, causing more intense droughts in the last decade.

A method was developed to retrieve chlorophyll *a* concentration and cyanobacteria density from the combination of satellite (MERIS) spectral reflectance measurements and *in situ* analysis. The method was tested against independent measurements with good correlations ($R=0.84$ to chlorophyll *a*; $R=0.97$ to cyanobacteria). Moreover, when extended to the whole dam surface, the method presents results in good agreement with *in situ* measurements.

Lista de Acrónimos

6S – Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum

AERONET – AErosol RObotic NETwork

CGE – Centro de Geofísica de Évora

EDIA – Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva

ENVISAT – ENVIronmental SATellite

ESA – European Space Agency

ETP – Evapotranspiração Potencial

FAO – Food and Agriculture Organization

FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia

FR – Full Resolution

IM – Instituto de Meteorologia

INAG – Instituto da Água

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

MERIS – Medium Resolution Imaging Spectrometer

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

OMM – Organização Meteorológica Mundial

PDSI – Palmer Drought Severity Index

RGB – Red, Green and Blue

SIAM – Scenarios, Impacts and Adaptation Measures

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

UE – Universidade de Évora

UTC – Universal Time Coordinated

Capítulo 1

Introdução

Apesar da sua extensão relativamente pequena, Portugal Continental tem um clima que varia significativamente de região para região e de local para local. As principais causas desta variação são a orografia, a latitude, a distância ao mar. Enquanto a região noroeste de Portugal Continental é uma das zonas mais húmidas da Europa, com média anual de precipitação acumulada acima dos 3000 mm, no interior do Alentejo a precipitação média é da ordem dos 500 mm com grande variabilidade interanual (SIAM, 2005).

Assim, com o objectivo de constituir um reservatório estratégico de água essencial na região, foi criada a albufeira de Alqueva, que permite a retenção e uso de água, até durante os períodos de seca extensos. O controlo e monitorização da qualidade da água de lagos artificiais são acções essenciais, já que estes constituem um importante recurso hídrico renovável para o abastecimento doméstico, agrícola, e industrial, entre muitas outras aplicações. A albufeira de Alqueva, com 250 km² de área superficial (maior reservatório artificial da Europa ocidental), constitui um bom exemplo da importância do controlo da qualidade da água de albufeiras.

A garantia da qualidade da água da albufeira de Alqueva pressupõe diversas actividades e abordagens. Entre estas inclui-se a preservação e reabilitação dos afluentes e a monitorização em tempo real da qualidade da água. Este trabalho pretende ser um contributo para estas duas vertentes.

No que respeita à primeira vertente, tem-se em conta que entre os afluentes que desaguam no Guadiana, a montante de Alqueva, existem alguns rios temporários, sistemas aquáticos em que durante um determinado período do ano não existe caudal superficial. São sistemas comuns nas regiões de clima Mediterrânico e de clima semi-árido, de grande importância também em outras regiões da Europa. A sua preservação, ou requalificação, exige uma intervenção em várias frentes e pressupõe a existência de estudos multidisciplinares.

Com este objectivo foi desenhado e está em curso o Projecto “Estratégias de Conservação e Reabilitação de rios Temporários: caso estudo da bacia do rio Pardielas, sul de Portugal (bacia do Guadiana)” (PTDC/AMB/73338/2006). Este projecto que envolve investigadores das áreas da biologia, hidrologia, ecologia e meteorologia tem

por objectivo, como o título indica, o estudo e o encontro de propostas de estratégias de conservação e reabilitação de rios temporários. A metodologia do projecto assenta no estudo das interacções entre o clima, a hidrologia, os processos ecológicos e a biodiversidade de uma bacia temporária piloto, a bacia do rio Pardiela. Nesse sentido está a ser recolhida e trabalhada informação climática, hidrológica, morfológica e das actividades e pressões humanas, respeitante aos últimos 70/50 anos. Foi igualmente montada uma experiência observacional que está a permitir recolher dados actuais de variáveis climáticas, hidrológicas, ecológicas e de qualidade da água que irá permitir caracterizar o estado actual da bacia e estudar os complexos mecanismos de interacção entre os fenómenos relevantes na dinâmica deste sistema aquático.

Nesta tese apresentam-se os trabalhos desenvolvidos e resultados referentes à componente climática do projecto. Inclui-se neste âmbito a caracterização do clima na região no período de referência 1961-1990, o estudo de algumas tendências climáticas ao longo das últimas décadas e a descrição da campanha de observações meteorológicas na Ribeira de Pardiela.

No que concerne ao contributo na monitorização da qualidade da água, o objectivo deste trabalho é o desenvolvimento de um método de detecção remota fiável, que permita a monitorização global e contínua de parâmetros fitoplanctónicos relacionados com a qualidade da água e estado trófico, nomeadamente a clorofila *a* e a densidade total de cianobactérias. Os métodos de observação remota podem ser muito úteis no apoio ao controle que actualmente é efectuado pelas entidades competentes e que está limitado a observações e medições *in situ*.

Por outro lado, o lançamento do satélite ENVISAT (ENVIRONMENTAL SATellite) em Março de 2002, pela Agência Espacial Europeia (ESA), abriu novos horizontes no estudo de massas de água natural de dimensões reduzidas quando comparadas com mares e oceanos, sendo a Albufeira de Alqueva um bom exemplo. A grande melhoria deve-se à existência do espectrómetro Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS), a bordo do satélite ENVISAT, o qual combina uma elevada resolução espacial (300×300 m² no nadir) com uma resolução espectral adequada no domínio do visível e infra-vermelho próximo, permitindo assim monitorizar a “cor” dessas massas de água naturais.

As propriedades ópticas de uma massa de água natural são determinadas maioritariamente pelo material vivo e não vivo que estão presente em solução ou suspensão aquosa. Este estudo vai incidir na determinação da concentração da clorofila-

-*a* e da densidade de cianobactérias. A clorofila *a* é o único pigmento fotossintético presente em todas as plantas, sendo conseqüentemente um bom indicador de biomassa e da actividade fotossintética. As cianobactérias, também conhecidos por algas azuis-esverdeadas, são organismos unicelulares que obtêm a sua energia pela fotossíntese, podendo agrupar-se em colónias de grande dimensão. Estas podem formar filamentos, tornando-se perceptíveis à “vista desarmada” e desenvolvendo uma coloração azul esverdeada. Podem desenvolver-se em grandes densidades, provocando as fluorescências (>2000 cél/ml). O efeito mais grave resultante do desenvolvimento de fluorescências de cianobactérias é a produção de toxinas, constituindo estas um grave risco para a saúde pública.

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos. O primeiro capítulo constitui uma introdução ao tema do trabalho desenvolvido, sendo também apresentado os objectivos e a estrutura da tese. No capítulo 2 é discutida a climatologia 1961-1990 para a bacia do Guadiana. São apresentados mapas de temperatura, precipitação, insolação e evapotranspiração potencial para o período de referência. No capítulo 3 são analisadas as tendências climáticas da bacia da ribeira da Pardiela, bacia do Guadiana, observadas ao longo do século XX. Os parâmetros analisados provêm de três estações que se situam junto à bacia da ribeira de Pardiela. No capítulo 4 é desenvolvido um método de detecção remota que permite estimar e monitorizar a qualidade da água, à superfície, da Albufeira de Alqueva. São apresentados mapas de concentração de clorofila *a* e densidade de cianobactérias para a totalidade da albufeira. No capítulo 5 é apresentada a campanha de observações realizadas na bacia da ribeira da Pardiela. São apresentados alguns resultados preliminares resultantes da estação meteorológica instalada na bacia. É também estudado, utilizando detecção remota por satélite, o estado da vegetação da mesma bacia utilizando o índice MERIS_NDVI. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões, assim como algumas perspectivas de trabalho futuro.

Capítulo 2

Climatologia de uma região da bacia do Guadiana

O conhecimento do clima de uma região é fundamental para o planeamento e gestão das actividades socioeconómicas, e também essencial para mitigar as consequências dos riscos climáticos.

Na acepção geral o clima é a síntese do tempo e a nossa expectativa sobre as condições meteorológicas. E este é, em essência, o conceito que convém preservar. Cientificamente há que definir os atributos da definição em termos quantitativos, sendo que no clima os fenómenos interessam pela sua duração ou persistência, pela sua repetição e são caracterizados por valores médios, variâncias, probabilidades de ocorrência de valores extremos dos parâmetros climáticos.

Frequentemente ocorre confusão conceptual entre clima e tempo, duas grandezas que se distinguem, designadamente, pelo espaço temporal de referência. Numa simplificação de abordagem poderá dizer-se que o estado do tempo se refere ao conjunto das condições meteorológicas num dado local, designadamente a temperatura e a humidade do ar, a precipitação, a nebulosidade, o vento e à sua evolução no dia-a-dia. Por outro lado o Clima pode traduzir-se pelo conjunto de todos os estados que a atmosfera pode ter, num determinado local, durante um tempo longo, mas definido. Este intervalo de tempo durante o qual podemos dizer que existe um determinado tipo de clima é escolhido como “suficientemente longo”, em geral 30 anos, definido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM).

Apesar da sua extensão relativamente pequena, Portugal Continental tem um clima que varia significativamente de região para região e de local para local. As principais causas desta variação são a orografia, a latitude, a distância ao mar. Enquanto a região noroeste de Portugal Continental é uma das zonas mais húmidas da Europa, com média anual de precipitação acumulada acima dos 3000 mm, no interior do Alentejo a precipitação média é da ordem dos 500 mm com grande variabilidade interanual (SIAM, 2005).

O Sul de Portugal Continental, assim como outras regiões do Sul da Europa, é um exemplo do clima Mediterrânico. São regiões de clima temperado com Verão seco,

quente e longo (clima Csa, na classificação de Köppen, ver Peixoto, 1987) e com grande vulnerabilidade à ocorrência de secas e desertificação.

2.1 Metodologia

Os mapas utilizados neste capítulo foram extraídos de grelhas com resolução de 1000×1000 m, resultantes de uma rede de estações do Instituto de Meteorologia (IM) que diverge de parâmetro para parâmetro. Foi utilizada interpolação através de métodos de Kriging (Krige, 1951) com regressão de resíduos tendo em conta a altitude e a distância ao litoral (sempre que as variáveis geográficas tivessem bons coeficientes de correlação entre o parâmetro seleccionado). Os valores foram posteriormente extraídos das grelhas, tendo em conta a região em estudo.

A Figura 2.1 ilustra a orografia da área de estudo que engloba parte dos distritos de Évora e Beja e onde está localizada a ribeira da Pardiela e a estação meteorológica de Pardiela (CGE – Centro de Geofísica de Évora). A ribeira da Pardiela tem a sua nascente junto à Serra d'Ossa e vai desaguar no Rio Dejebe a jusante da Barragem de Monte Novo.

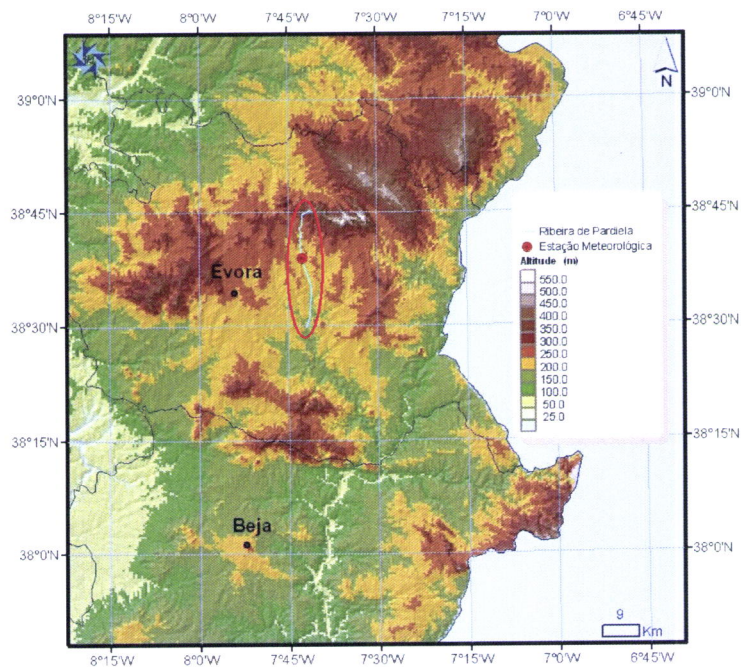


Figura 2.1 – Área de estudo da climatologia 1961-1990. Localização das cidades de Évora e Beja, da ribeira da Pardiela e da estação meteorológica da Pardiela (CGE).

2.2 Temperatura do Ar

A distribuição espacial dos valores médios anuais da temperatura média do ar, baseada em observações feitas durante o período 1961-1990, é ilustrada na Figura 2.2. Variam entre um mínimo de 13°C nas zonas altas (Serra d'Ossa) e um máximo de 16°C nas regiões do Sul e interior.

Os valores da temperatura média mensal variam regularmente durante o ano, atingindo o valor máximo no Verão e o valor mínimo no Inverno. Os valores médios da temperatura mínima do ar no Inverno são apresentados na Figura 2.3a, onde se verifica que os valores mínimos ocorrem nas zonas altas, da ordem dos 4°C, e os valores máximos ocorrem no Sul, da ordem dos 5.5°C. No Verão os valores médios da temperatura máxima variam entre 27°C nas zonas altas e 32°C no interior Alentejano junto ao Rio Guadiana (Fig. 2.3b).



Figura 2.2 – Valores médios anuais da temperatura média do ar no período 1961-1990.

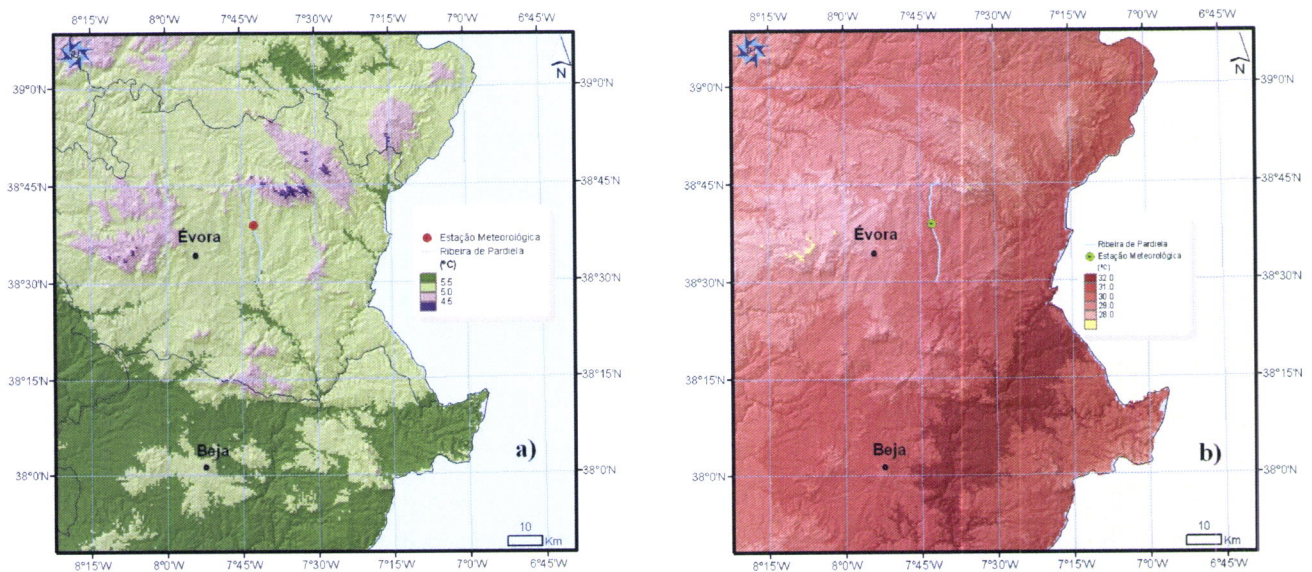


Figura 2.3 – (a) Valores médios da temperatura mínima do ar no Inverno (Dezembro, Janeiro, Fevereiro) e (b) Valores médios da temperatura máxima do ar no Verão (Junho, Julho, Agosto). Período de 1961-1990.

2.2.1 Índices de Temperatura

Os índices climáticos têm uma importante função na identificação de extremos climáticos e no estudo da variabilidade climática. Uma das muitas informações possíveis de retirar dos indicadores de temperatura, serão relativas a alterações de valores médios, variabilidade e extremos, em escalas temporais que variam de dias a décadas.

As séries diárias da temperatura do ar, nomeadamente as séries diárias das temperaturas máxima e mínima, constituem, em geral, o ponto de partida para a determinação dos diversos indicadores de alterações nos extremos de temperatura.

Para a região em estudo foram analisados vários índices de temperatura como o número anual de dias de geada ($T_{\min} \leq 0^{\circ}\text{C}$), o número anual de dias com temperatura mínima igual ou superior a 20°C (noites tropicais), com temperatura máxima igual ou superior a 25°C (dias de Verão) e com temperatura máxima igual ou superior a 35°C (dias quentes).

A média anual do número de dias do ano com temperatura mínima igual ou inferior a 0°C (dias geada) apresenta alguma variação dentro da região em estudo (Fig. 2.4a). É mínimo em algumas regiões nomeadamente junto das cidades de Évora e Beja, e atinge o máximo de 8 dias por ano no interior Alentejano e a Oeste das mesmas cidades. A média anual do número de dias do ano com temperatura mínima igual ou superior a 20°C (noites tropicais) é máximo nas regiões fronteiriças, com cerca de 15 dias por ano, diminuindo à medida que se avança para as regiões mais a Oeste (Fig. 2.4b).

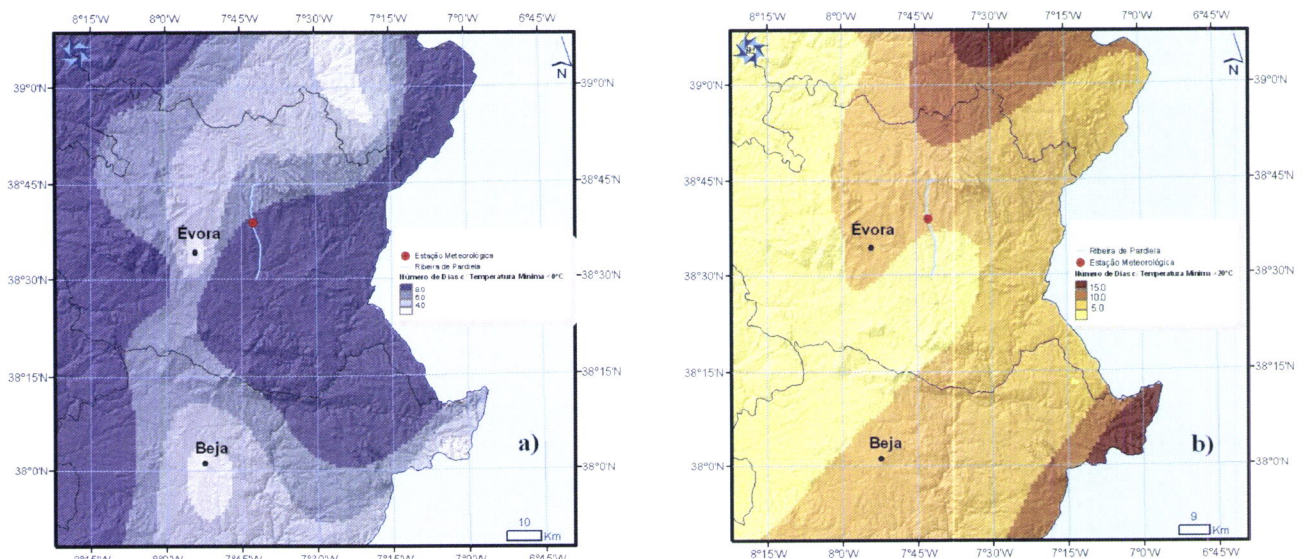


Figura 2.4 – Média anual de número de dias com temperatura mínima: (a) igual ou inferior a 0°C (dias geada) e (b) igual ou superior a 20°C (noites tropicais). Período de 1961-1990.

A média anual do número de dias do ano com temperatura máxima igual ou superior a 25°C (dias de Verão) é máximo em quase a totalidade da região com cerca de 125 dias por ano, exceptuando em Évora e na região a Nordeste da cidade onde os valores andam perto dos 100 dias por ano (Fig. 2.5a). A média anual do número de dias do ano com temperatura máxima igual ou superior a 35°C (dias quentes) é máximo na região interior do Alentejo com 25 dias por ano, diminuindo à medida que se avança para Oeste, com cerca de 10 dias por ano para a cidade de Évora (Fig. 2.5b).

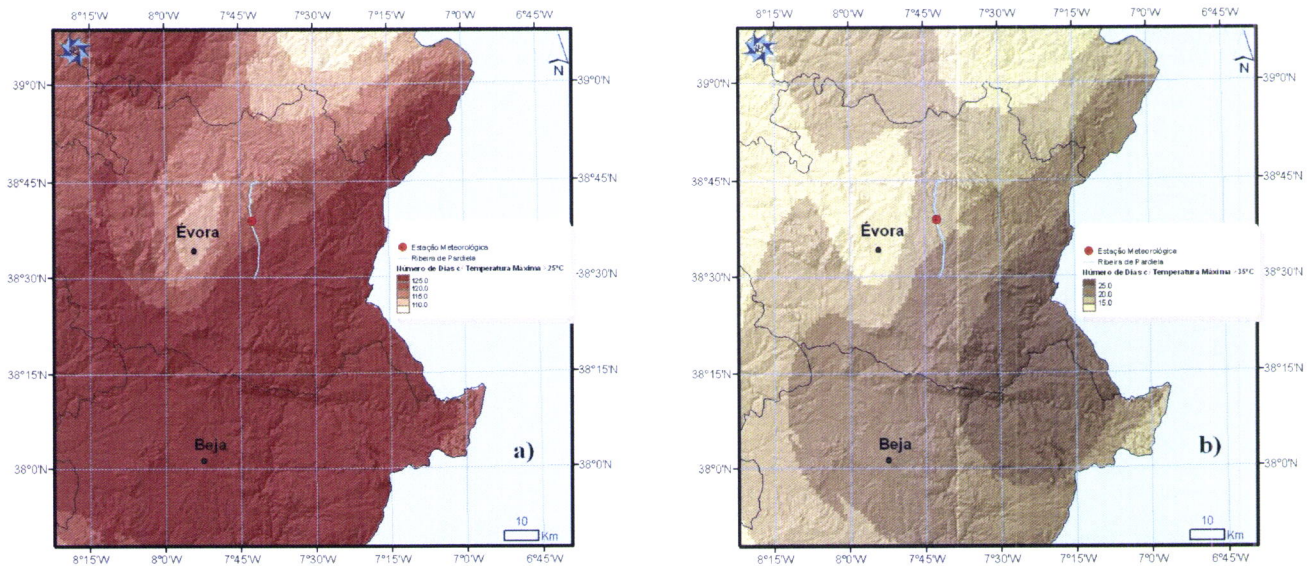


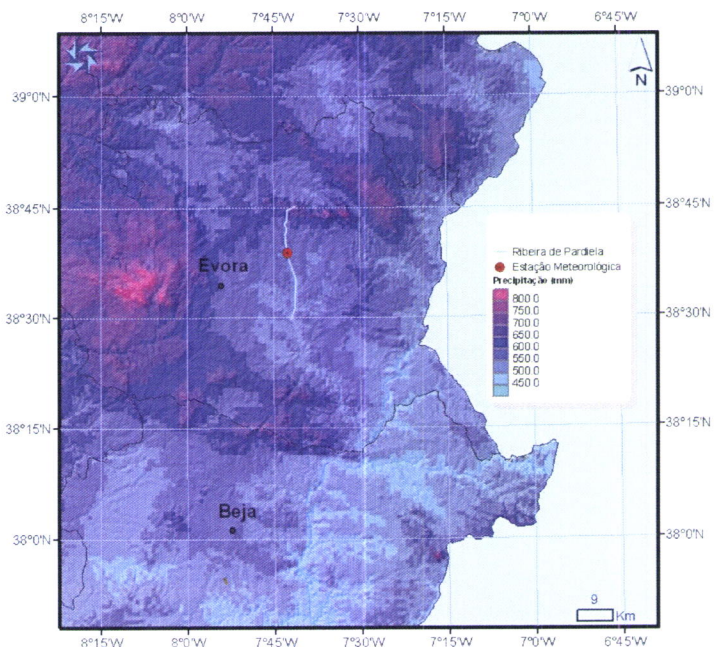
Figura 2.5 – Média anual de número de dias com temperatura máxima igual ou superior a: (a) 25°C (dias de Verão) e (b) 35°C (dias quentes). Período de 1961-1990.

2.3 Precipitação

A média anual da precipitação em Portugal Continental é cerca de 900 mm, com grande variação espacial. A região em estudo é uma das zonas do País que apresenta em média os valores mais baixos de precipitação anual, em particular na zona de Beja.

A Figura 2.6 ilustra a média anual da precipitação acumulada para o período de 1961-1990 na região em estudo. Os valores máximos situam-se nas regiões com maior relevo, valores na ordem dos 800 mm e os mínimos junto ao rio Guadiana com valores perto dos 400 mm.

Figura 2.6 – Média anual da precipitação acumulada. Período de 1961-1990.



Em Portugal Continental, em média, cerca de 42% da precipitação anual ocorre durante os três meses de Inverno (Dezembro a Fevereiro). Os valores mais baixos de precipitação ocorrem durante o Verão (Junho a Agosto), correspondendo a apenas 6% da precipitação anual. Na região em estudo verifica-se obviamente a mesma situação, com os máximos de precipitação a ocorrerem nos meses de Inverno com os valores mais elevados nas regiões mais altas, na ordem dos 340mm e os valores mais baixos ocorrem no Verão, inferiores a 20mm a Sul de Beja, valores de precipitação muito pouco significativos (Fig. 2.7). Como se pode observar na mesma Figura a precipitação nos meses de Primavera e Outono varia entre os 120 e os 200 mm.

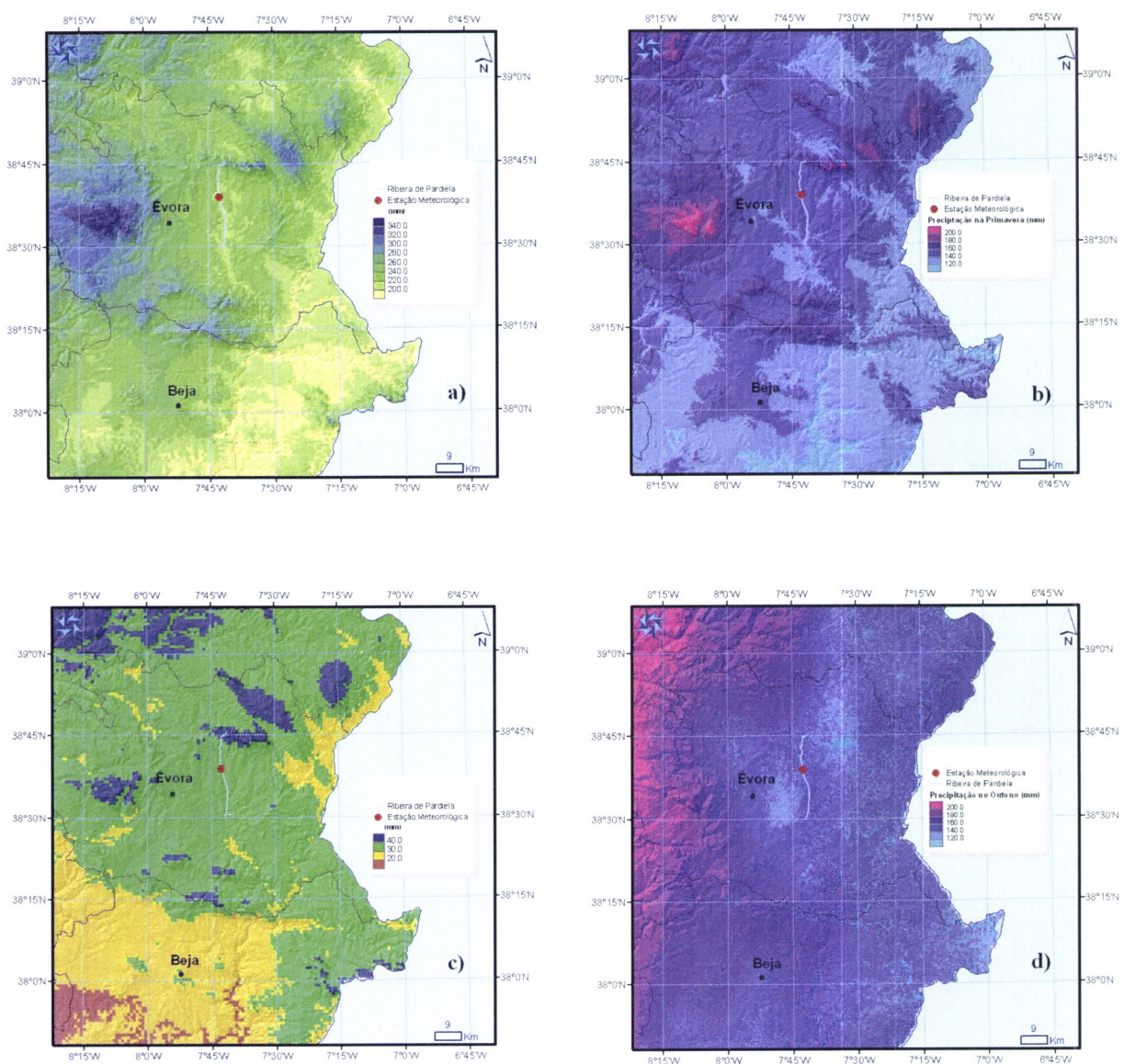
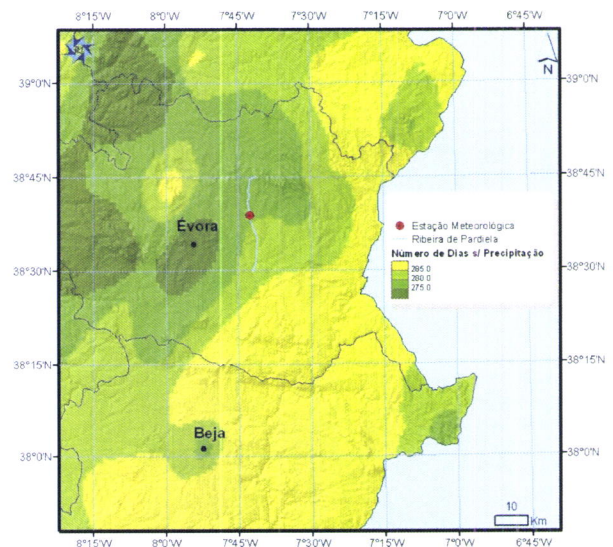


Figura 2.7 – Média sazonal da precipitação no (a) Inverno (DJF), (b) Primavera (MAM), (c) Verão (JJA) e (d) Outono (SON). Período de 1961-1990.

2.3.1 Índices de Precipitação

Para a região em estudo foram analisados alguns índices de precipitação nomeadamente: número de dias anual com precipitação igual ou superior a 0,1 mm; número de dias anual com precipitação igual ou superior a 10 mm; número de dias anual com precipitação inferior a 0,1 mm (número dias sem precipitação).

Figura 2.8 – Média anual do número de dias sem precipitação. Período de 1961-1990.



A média anual do número de dias sem precipitação varia entre os 270 dias, em Évora e a Oeste da cidade, e os 285 dias no interior Alentejano (Fig. 2.8). A média anual do número de dias com precipitação igual ou superior a 0.1 mm é cerca de 80 dias em grande parte da bacia, exceptuando o interior Alentejano com valores entre 60 e 70 dias (Fig. 2.9a). A média anual do número de dias com precipitação igual ou superior a 10 mm apresenta alguma variação na região em estudo, valores mínimos de 16 dias a Sul e no interior e valores máximos de 24 dias nas regiões mais elevadas (Fig. 2.9b).

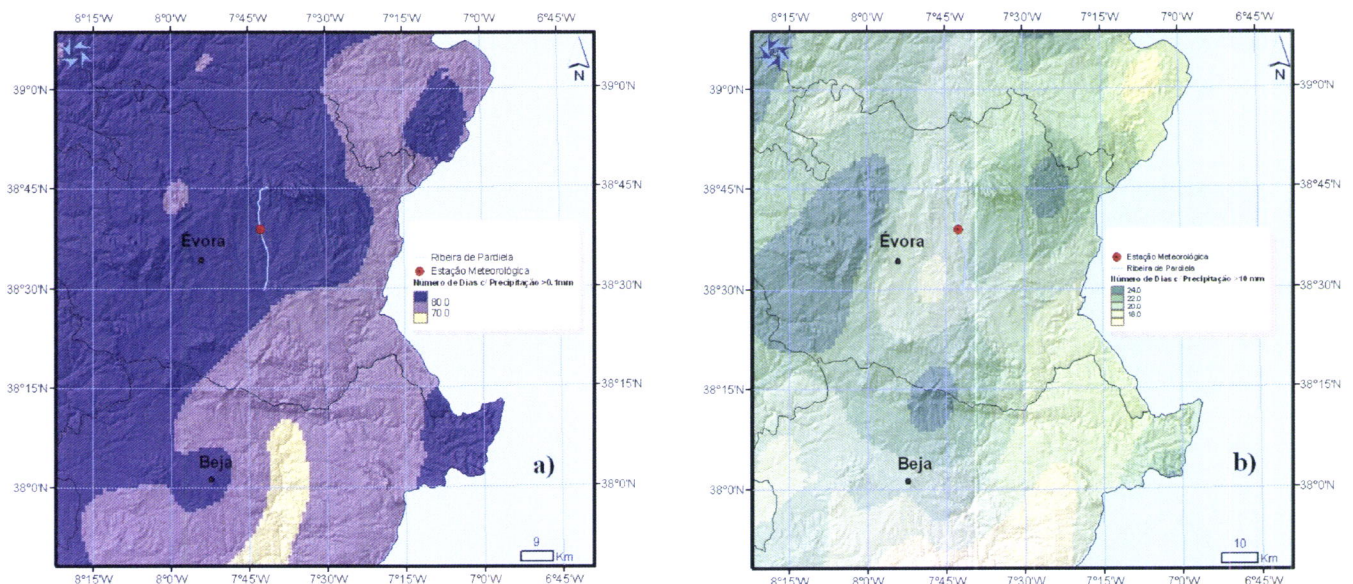


Figura 2.9 – Média anual do número de dias com precipitação igual ou superior a: (a) 0.1 mm e (b) 10 mm. Período de 1961-1990.

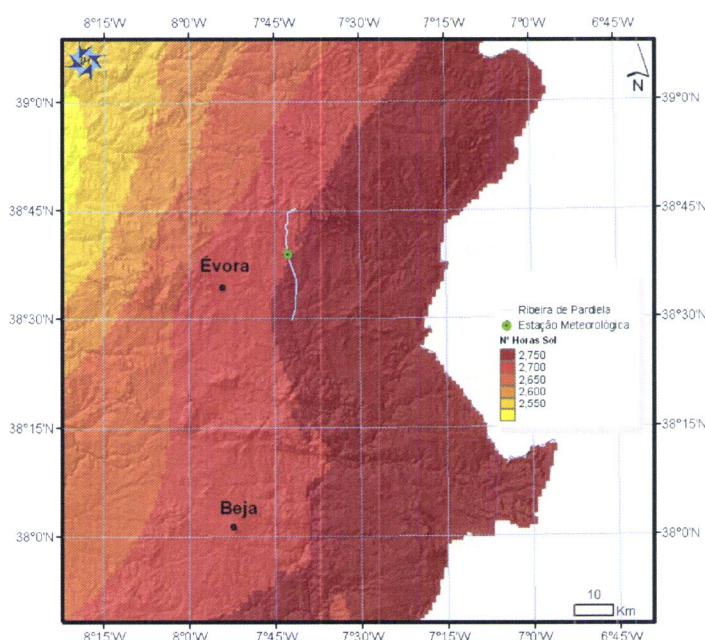
2.4 Insolação

A insolação, número de horas de sol, é um factor climático muito importante tanto pela influência que tem nos ecossistemas, como por contribuir para o desenvolvimento das actividades humanas (destinadas ao aproveitamento de energia solar, arquitectura, turismo, agricultura, etc.).

O valor médio da insolação em Portugal Continental, de uma forma geral aumenta de norte para sul (devido à diminuição da obliquidade dos raios solares e à diminuição da nebulosidade) e do litoral para o interior (o que se fica também a dever a uma maior nebulosidade das zonas costeiras).

A Figura 2.10 ilustra a média anual do número de horas de Sol, baseada em observações feitas no período de 1961-1990. Existe um aumento do número de horas de Sol de Oeste para Leste na região em estudo. A ribeira de Pardielas situa-se entre as 2700 horas por ano a montante e 2750 horas por ano a jusante.

Figura 2.10 – Média anual do número de horas de Sol. Período de 1961-1990.



2.5 Evapotranspiração

A evapotranspiração é a transferência de água para a atmosfera, sob a forma de vapor com origem na respiração e transpiração dos seres vivos, bem como na evaporação directa da água existente nos solos e nas superfícies líquidas.

A evapotranspiração depende do clima, da humidade do solo, da vegetação e da mobilização de terras, sendo o clima e a humidade os factores mais influentes. Ao contrário da precipitação, a evapotranspiração é uma grandeza difícil de medir, sendo

para o efeito necessário instrumentação científica não convencional. As estações sinópticas e climatológicas não efectuam medições de evapotranspiração.

A evapotranspiração potencial (ETP) é um elemento meteorológico normal, padrão, representando a precipitação necessária para atender à necessidade de água da cobertura vegetal. A ETP é a quantidade máxima de água que pode evaporar de uma superfície com disponibilidade de água para a realização do processo para vaporizá-la, é calculada através do método de Penman, recomendado por organizações internacionais como a FAO (Food and Agriculture Organization). A equação de Penman (1948) é do tipo:

$$ETP = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (2.1)$$

Onde:

ETP – ETP de referência [mm/dia]

R_n – Radiação solar [MJ/m²dia]

G – Densidade de fluxo de energia térmica no solo [MJ/m²dia]

T – Temperatura média do ar a 2m de altura do solo [°C]

u_2 – Velocidade média do vento a 2m de altura do solo [m/s]

e_s – Tensão de saturação do vapor de água [kPa]

e_a – Tensão actual do vapor de água [kPa]

Δ – Declive da tangente à curva de tensão de saturação do vapor de água em função da temperatura [kPa/°C]

γ – Constante psicrométrica [kPa/°C]

A Figura 2.11 ilustra a média anual da evapotranspiração potencial para o período de 1961-1990. A evapotranspiração potencial é máxima em todo o interior Alentejano, incluindo Évora e Beja, com valores de 1150 mm, diminuindo em direcção a Oeste.

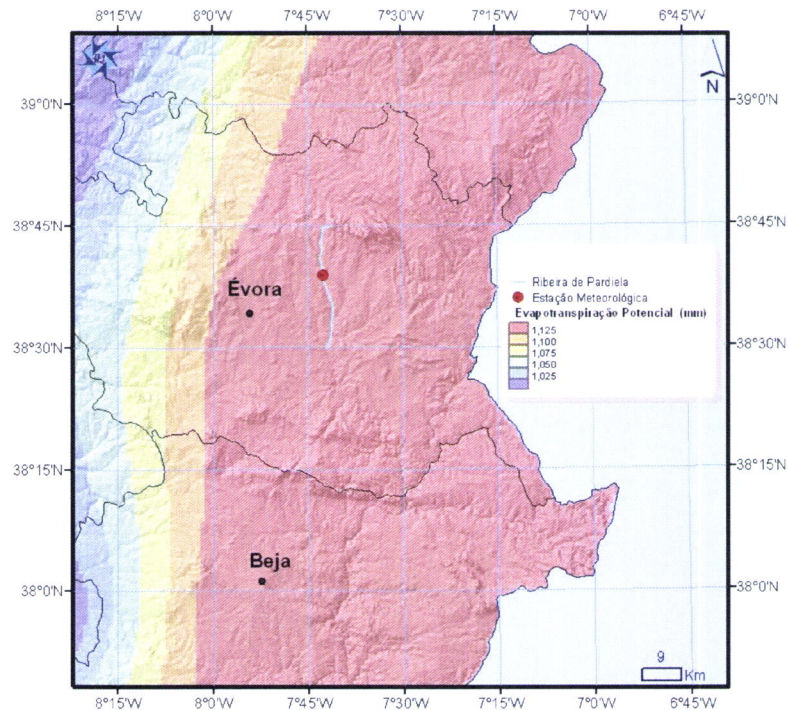


Figura 2.11 – Média anual da evapotranspiração potencial. Período de 1961-1990.

Quando a precipitação (R) é inferior à evapotranspiração potencial ($R < ETP$), diminui a armazenagem da água no solo até perfazer a diferença. Se a água útil que ficou armazenada no balanço do mês anterior é insuficiente para compensar a diferença entre a precipitação R e a evapotranspiração potencial ETP , então toda a reserva de água é agora utilizada, ficando a armazenagem reduzida a zero. Assim, quando $R < ETP$, há cedência de água pelo solo à atmosfera, enquanto nele houver água disponível.

Quando a precipitação é superior à evapotranspiração potencial ($R > ETP$), a diferença é somada à “armazenagem de água útil”. Se ainda sobrar água, esta escoar tanto à superfície como no subsolo. Assim, quando $R > ETP$, há restituição de água pela atmosfera ao solo até estar amplamente abastecido de água (Feio, 1991).

A média anual de ETP interpolada para a estação meteorológica da ribeira da Pardielas (no período de referência 61-90) é de 1151 mm, enquanto que, a média anual da precipitação acumulada é apenas de 555 mm, ou seja, existe um deficit hídrico no solo. Este deficit é muito acentuado especialmente devido aos meses de Verão onde a precipitação é muito reduzida (cerca de 30 mm para o mesmo período de referência).

Capítulo 3

Tendências climáticas observadas na bacia da ribeira da Pardiela

As tendências climáticas observadas em Portugal Continental têm de ser avaliadas no contexto das alterações climáticas globais. A existência de uma tendência de aquecimento global foi um facto estabelecido na última década do século XX onde foram observados um número significativo de anos mais quentes. O aquecimento do sistema climático é inequívoco, evidenciado a partir do aumento das temperaturas globais do ar e do oceano, fusão do gelo e neve e subida do nível médio do mar.

Com efeito, no período 1906-2005, a temperatura média à superfície aumentou. No último relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007), reporta-se que a tendência da temperatura média é de $+0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$), no período 1906-2005, superior à tendência expressa no relatório de 2001 (IPCC, 2001), que era de $+0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$), para o período 1901-2000.

Neste intervalo de tempo (1906-2005), Jones et al. (1999) e Karl et al. (2000) identificaram dois períodos de aquecimento, entre 1910-1945 e desde 1976. Segundo Salinger (2003) a temperatura média global sofreu um aumento de $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$ entre 1910-1945 e um aumento de $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$ desde 1976.

Na Europa, o maior aquecimento coincide com os dois períodos de aquecimento global (Klein Tank et al., 2002). Saliente-se que cerca de dois terços do aumento verificado no séc. XX ($0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$) ocorreram desde a década de 1970 (IPCC, 2007). A temperatura mínima também aumentou e houve uma redução na frequência de extremos de temperaturas mínimas, assim como um aumento na frequência de extremos de temperaturas máximas.

Em Portugal Continental a taxa de aquecimento, especialmente desde a década de 70, foi mais elevada do que a taxa média observada no planeta, uma vez que a temperatura média anual em todas as regiões aumentou a uma taxa de aproximadamente $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$, sendo este um valor superior ao dobro do observado para a temperatura média global. A precipitação é um parâmetro que apresenta grande irregularidade e variabilidade interanual, sendo de realçar a sua redução na Primavera das últimas três décadas do século XX (SIAM, 2005).

3.1 Metodologia

3.1.1 Estações utilizadas

Os parâmetros analisados provêm de três estações que se situam junto à bacia da ribeira de Pardiela (Figura 3.1, Tabela 3.1). Fornecem pelo menos 30 anos de dados, período necessário para se descrever um determinado clima. As estações do INAG disponibilizam apenas dados de precipitação (postos udométricos) enquanto que a estação do IM disponibiliza os restantes dados meteorológicos.

Tabela 3.1 – Características das estações utilizadas.

Estação	Latitude (N)	Longitude (W)	Altitude (m)	Período utilizado	Instituição
Évora/Cidade (557)	38.5725	7.9064	309	1941-2006	IM
Azaruja	38.7026	7.7747	270	1932-2007	INAG
Santa Susana	38.5754	7.6583	208	1950-2006	INAG

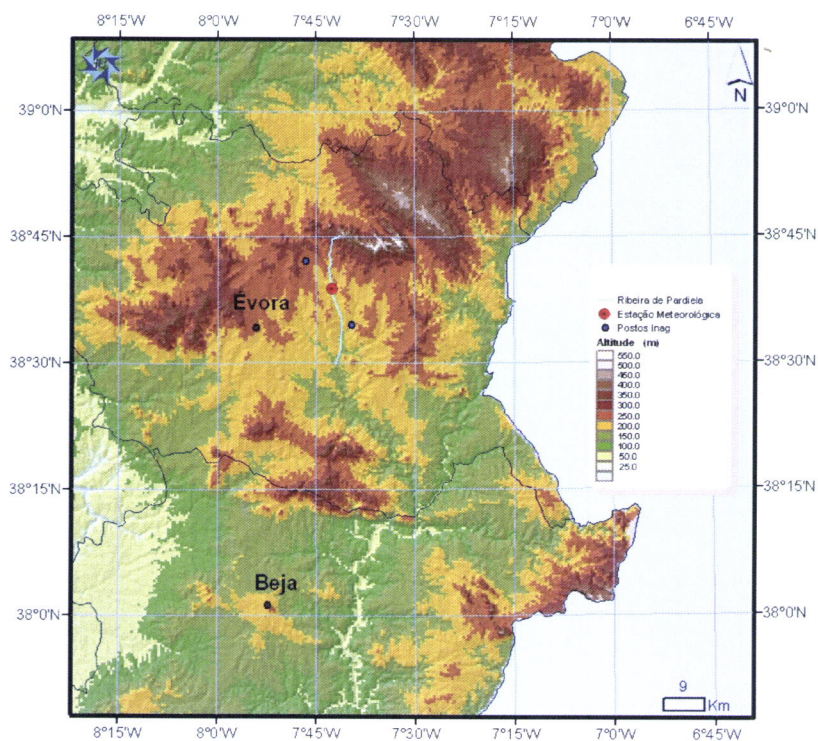


Figura 3.1 – Localização da ribeira de Pardiela, da estação meteorológica da Pardiela (a vermelho), das cidades de Évora e Beja e dos dois postos udométricos do INAG (a azul).

3.1.2 Preenchimento de falhas

Para colmatar as falhas de valores em ficheiros de temperatura média mensal e total de precipitação mensal utilizou-se a metodologia descrita em Pires (2008). No caso da temperatura utilizou-se uma média curta e para a precipitação uma média longa. Os dois métodos utilizam o mesmo algoritmo, variando apenas as condições iniciais.

Estes métodos verificam se as séries de temperatura e precipitação têm falhas, corrigindo-as através do valor médio dos valores vizinhos do mesmo mês, para os anos anteriores e posteriores ao valor em falta. No caso da média curta, utiliza-se um número máximo de 10 anos para se efectuar a média, enquanto que no caso da média longa o número máximo de anos vai até aos 30. Os valores de 10 e 30 anos, foram adoptados porque permitiam definir intervalos de tempo suficiente para se obter valores médios representativos quer da precipitação quer da temperatura.

3.1.3 Teste estatístico de Mann-Kendall

Para verificar a existência de tendências significativas foi utilizado o teste estatístico de Mann-Kendall, proposto inicialmente por Sneyers (1975). O que se pretende com este teste é aceitar a hipótese alternativa e rejeitar a hipótese nula baseada na estatística do teste. O teste vai ter uma precisão (probabilidade de errar) definida como nível de significância (α), que corresponde a rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira. Convém, que este valor seja pequeno, normalmente inferior a 5% e é este valor que nos define a região de rejeição na curva de distribuição. O teste será tanto melhor quanto menor a probabilidade de rejeição da hipótese nula, quando esta é verdadeira, e maior a probabilidade de rejeição de hipótese nula quando é falsa (Wilks,1995).

Cada elemento x_i é ordenado numa série crescente e é-lhe atribuído um número com o número da posição na série original. Para cada elemento da série ordenada de forma crescente y_i , o número n_i é o número de elementos y_j que o precedem ($i > j$) tal que $y_i > y_j$.

A estatística t do teste é dada pela relação:

$$t = \sum_{i=1}^n n_i \quad (3.1)$$

onde a lei de repartição, para a hipótese nula, é assintoticamente uma lei normal de média e variância:

$$E(t) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (3.2)$$

$$\text{var } t = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (3.3)$$

normalizando obtém-se:

$$u(t) = [t - E(t)] / \sqrt{\text{var } t} \quad (3.4)$$

A partir da tabela da lei normal reduzida temos que a probabilidade do teste é:

$$\alpha_1 = P(|u| > |u(t)|) \quad (3.5)$$

a hipótese nula (inexistência de tendência) é aceite ou rejeitada no nível α_0 quando $\alpha_1 > \alpha_0$ ou $\alpha_1 < \alpha_0$. Se a hipótese nula for rejeitada, ou seja, se se aceitar a hipótese alternativa, estamos perante uma possível tendência significativa. Com os valores $u(t)$ significativos, podemos concluir que existe uma tendência crescente ou decrescente tal que $u(t) > 0$ ou $u(t) < 0$.

Segundo Sneyers (1975) a série original pode ser analisada através de duas sequências de valores (Reis et al, 1992):

- A sequência progressiva de valores $u(t_i)$ que corresponde a uma série parcial que começa em x_1 e termina em x_i , com $i = 1, \dots, n$;
- A sequência regressiva dos valores de $u'(t_i)$ que começa em x_i e termina em x_n , com $i = 1, \dots, n$.

Para o cálculo da série regressiva é necessário calcular o número de elementos n'_i , tal

que $y_i > y_j$ com $i < j$

$$n_i + n'_i = y_i - 1 \quad (3.6)$$

e

$$i' = (n+1) - i \text{ onde } n'_i = n_i \quad (3.7)$$

Os valores de u'_i para a série retrógrada são estabelecidos através das relações:

$$u'_i = -u(t_i') \quad (3.8)$$

$$u'_1 = u_n \quad (3.9)$$

No caso de existir uma tendência significativa, através da intercepção das duas séries, $u(t)$ e $u'(t)$, podemos definir onde, aproximadamente, a tendência começa – ponto de inflexão (break-point).

3.2 Tendências observadas na temperatura

Da análise da série climatológica da média anual da temperatura média do ar de Évora, no período 1941-2006, e das séries progressivas e regressivas (Fig.3.2), verifica-se a existência de uma tendência de diminuição da temperatura média anual da década de 50 até 1989, visto que a série progressiva é inferior a zero ($u(t) < 0$), e de aumento até à década de 90 e a partir de 1990 ($u(t) > 0$). Através do ponto de inflexão das séries progressiva e regressiva, que indica aproximadamente o início da tendência significativa, podemos afirmar que a partir do ano de 2003 a tendência de aumento de temperatura é significativa, segundo o teste estatístico de Mann-Kendall. De salientar que desde 1987 houve apenas 1 ano (1993) em que a média anual da temperatura média do ar foi inferior à normal 61-90 (a tracejado).

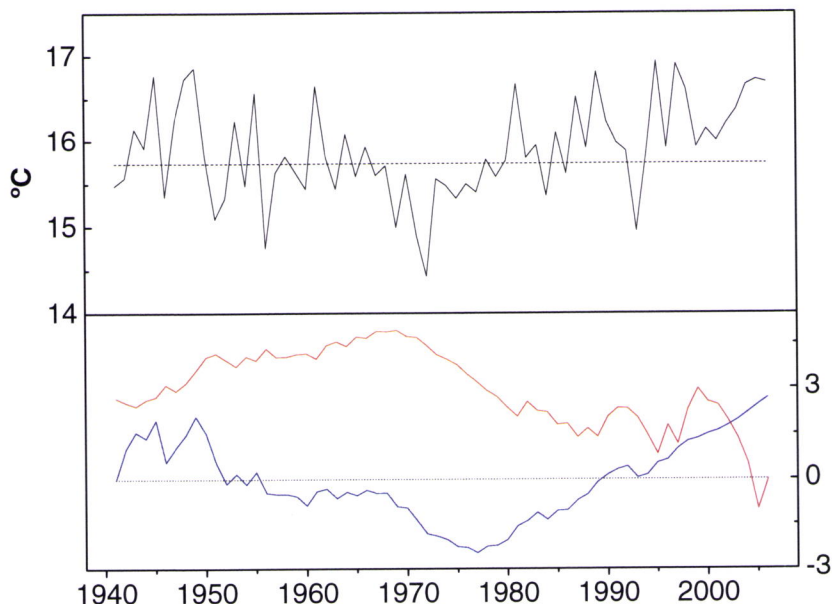


Figura 3.2 – Variabilidade da média anual da temperatura média do ar em Évora, a tracejado o valor médio no período 61-90, e representação das séries progressiva (azul) e regressiva (vermelho).

As séries climatológicas da média anual da temperatura máxima e mínima do ar de Évora são apresentadas na Figura 3.3. A série da temperatura máxima (fig. 3.3a) apresenta comportamento idêntico à série da temperatura média, com tendência significativa de aumento de temperatura, segundo o mesmo teste estatístico. A série da temperatura mínima (fig. 3.3b) apresenta tendência de diminuição apenas no período 1970-1988 ($u(t) < 0$), sendo que os restantes períodos são de aumento e, a partir de 2002 esta tendência de aumento de temperatura é significativa estatisticamente.

O ano de 1972 foi o que apresentou temperatura mais baixa para as temperaturas média, máxima e mínima. O ano de 1997 corresponde ao valor mais elevado da média anual da temperatura mínima e 1945 para a máxima, no período de 1941 a 2006.

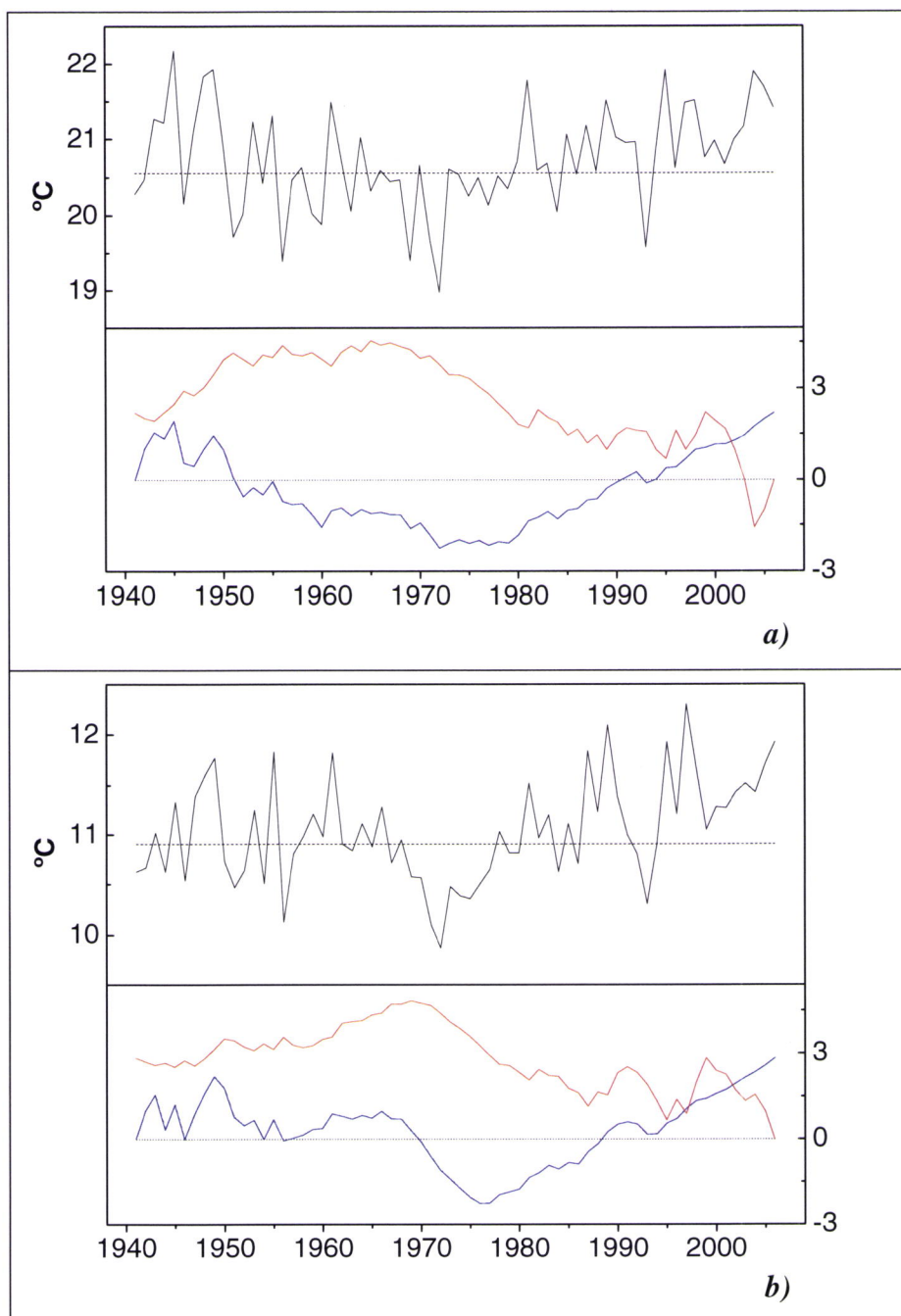


Figura 3.3 – Variabilidade da média anual da temperatura máxima (a) e mínima (b) do ar em Évora, a tracejado o valor médio no período 61-90, e representação das séries progressiva (azul) e regressiva (vermelho).

A Figura 3.4 mostra a evolução da média sazonal da temperatura média do ar em Évora. As estações são definidas, segundo a metodologia habitual em climatologia, em períodos de 3 meses, a Primavera consiste no período de Março a Maio (MAM), o Verão de Junho a Agosto (JJA), o Outono de Setembro a Novembro (SON) e o Inverno de Dezembro a Fevereiro (DJF).

No Verão, e em especial no Inverno, existe tendência de aumento de temperatura

média do ar, estatisticamente significativo, desde 2003 para o Verão e desde 1976 para o Inverno. Estas duas estações do ano contribuem, assim, para a tendência crescente verificada na média anual da temperatura média do ar (fig. 3.2). De salientar que, para a Primavera, desde 1993 que a temperatura média do ar não é inferior à média 61-90, ainda que para esta estação apenas desde 1999 existe tendência de aumento de temperatura, embora não significativa estatisticamente.

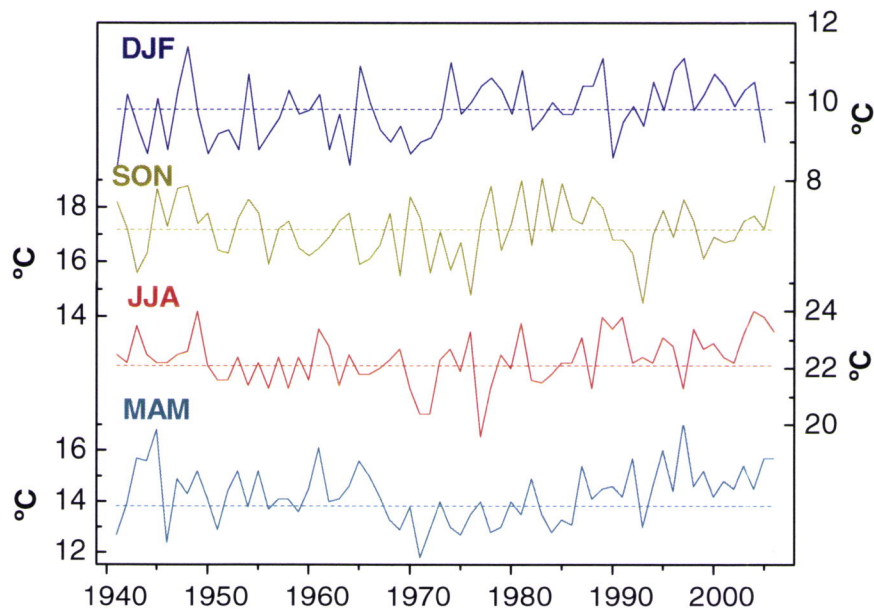


Figura 3.4 – Variabilidade da média sazonal da temperatura média do ar em Évora. A tracejado os valores médios no período 61-90.

3.3 Tendências observadas na precipitação

A título exemplificativo são analisadas neste subcapítulo as séries climatológicas da precipitação média anual para Santa Susana e da precipitação média sazonal para Azaruja. Da análise da série de precipitação média anual de Santa Susana, no período 1950-2006, e das séries progressivas e regressivas (Fig.3.5), verifica-se a existência de uma tendência de diminuição da precipitação média anual a partir de 1971, ano em que se verifica a intersecção das séries progressiva e regressiva. Tendência estatisticamente significativa segundo o teste de Mann-Kendall. De salientar que desde 1970 houve apenas 6 anos em que a precipitação média anual foi superior à média no período 61-90 (a tracejado).

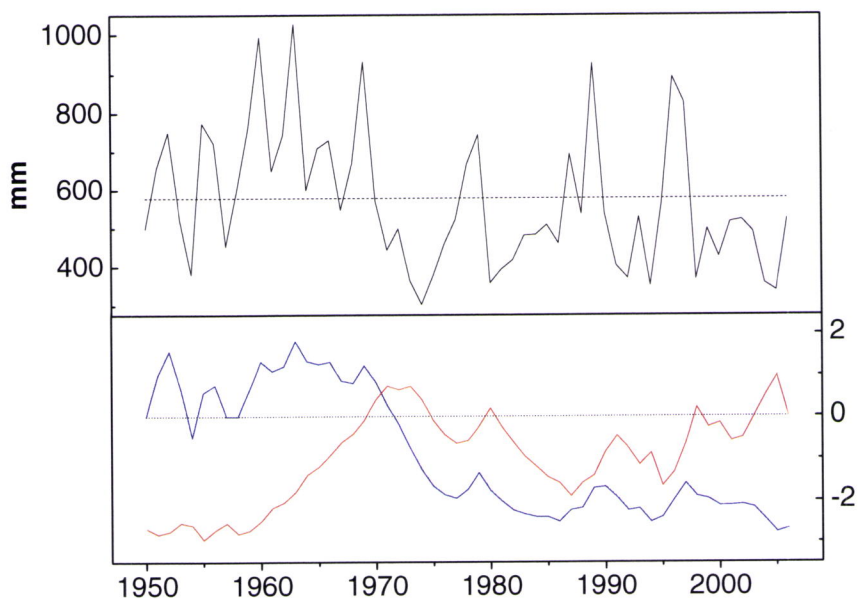


Figura 3.5 – Variabilidade anual da precipitação acumulada em Santa Susana, a tracejado o valor médio no período 61-90, e representação das séries progressiva (azul) e regressiva (vermelho).

Da análise da série de precipitação média sazonal de Azaruja (fig.3.6), no período 1932-2007, verifica-se a existência de uma tendência significativa de diminuição da quantidade de precipitação no Inverno e, em especial, na Primavera (desde 1979), Sendo esta a principal estação do ano que contribuiu para a tendência de diminuição da precipitação média anual.

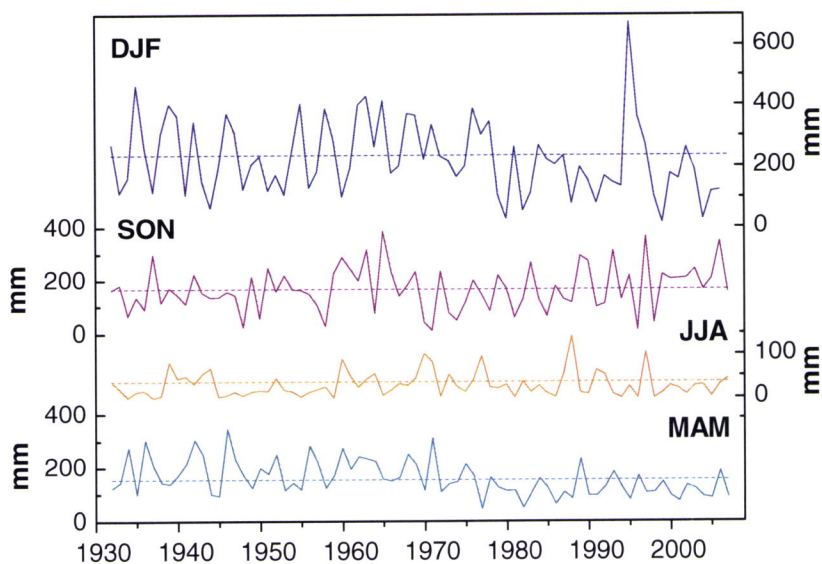


Figura 3.6 – Variabilidade sazonal da precipitação acumulada para Azaruja. A tracejado os valores médios no período 61-90.

3.4 Índices climáticos

Os índices climáticos têm uma importante função na identificação de extremos climáticos e no estudo da variabilidade climática e podem ser definidos de diferentes maneiras. Estes índices são calculados através de séries diárias de temperatura do ar e de precipitação acumulada diária.

Os índices seleccionados, variabilidade e extremos, destacam desvios à média para escalas de tempo de dias a décadas. Os índices considerados neste trabalho são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Índices climáticos considerados.

INDICES DE TEMPERATURA	
Dias de geada	Número de dias anual com $T_{\min} \leq 0^{\circ}\text{C}$
Noites tropicais	Número de dias anual com $T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$
Dias de Verão	Número de dias anual com $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$
Dias quentes	Número de dias anual com $T_{\max} \geq 35^{\circ}\text{C}$
INDICES DE PRECIPITAÇÃO	
Número de dias anual com precipitação ≥ 0.1 mm	
Número de dias anual com precipitação ≥ 10 mm	
Número de dias anual com precipitação < 0.1 mm (nº dias sem precipitação)	

3.4.1 Índices de temperatura

Dos índices de temperatura considerados, o único que apresenta tendência significativa estatisticamente é o número anual de dias de geada (Tabela 3.2), o qual tem vindo a diminuir para o período considerado (1941-2000), como mostra a Figura 3.7 para Évora. De realçar também é o aumento do número de noites tropicais na década de 80, embora este aumento não seja significativo. Estas tendências observadas estão claramente relacionadas com a tendência crescente da temperatura mínima (fig. 3.3). O número anual de dias quentes é máximo em 1943 e 1991 (27 dias) e as décadas de 40, 80 e 90 (períodos de aquecimento global) apresentam uma frequência grande para este índice.

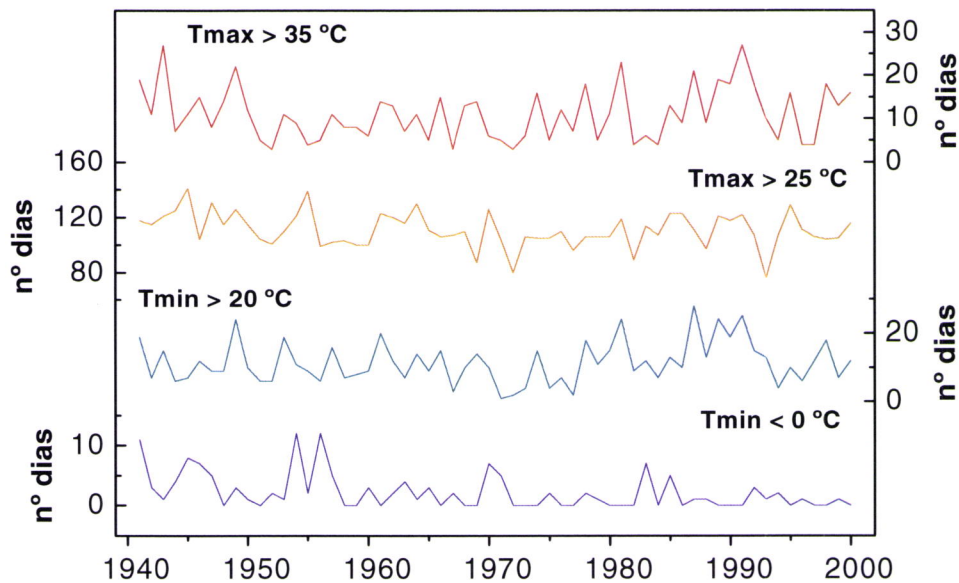


Figura 3.7 – Índices de temperatura para Évora. Período de 1941-2000.

3.4.2 Índices de precipitação

Os índices de precipitação podem ser utilizados para identificar episódios de chuva forte bem como a presença de anos secos. A Figura 3.8a mostra o número anual de dias sem precipitação para as três estações utilizadas neste estudo (Tabela 3.1, pág.16), onde é evidente a tendência positiva (embora não significativa) a partir da década de 80 para as estações de Azaruja e Évora e, em toda a série para a estação de Santa Susana, onde se verifica tendência significativa. O número anual de dias com precipitação ≥ 10 mm (precipitação intensa) (fig. 3.8b) apresenta uma variação irregular para as estações de Évora e Santa Susana, sem tendência aparente, enquanto que, para a estação da Azaruja existe uma tendência de diminuição do número anual de dias com precipitação intensa. Esta tendência é significativa desde a década de 70.

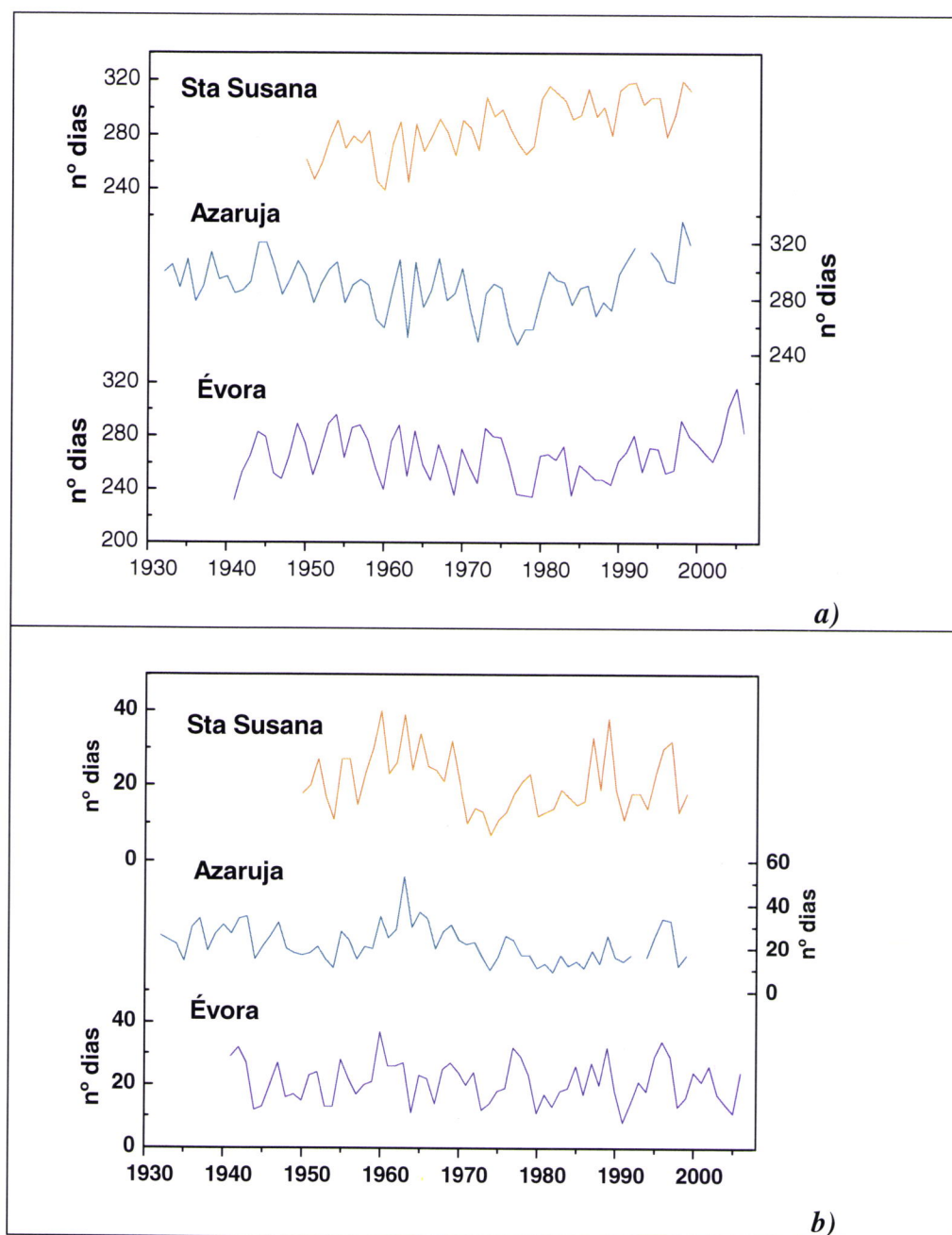


Figura 3.8 – Número anual de dias sem precipitação (a) e número anual de dias com precipitação ≥ 10 mm (b) para Évora, Azaruja e Santa Susana.

3.4.3 Extremos

Há, em geral, acordo na ideia que as mudanças na frequência e intensidade dos eventos e extremos climáticos têm profundo impacto na sociedade e ambiente. (Karl et al., 2000). Existe também um crescente consenso que o aumento de eventos meteorológicos extremos como cheias, secas, períodos severos de calor e frio são resultado do aquecimento global (Easterling et al., 2000 e IPCC, 2007). Desta forma,

quando se consideram tendências climáticas observadas é importante ter em conta não só alterações médias, mas também as correspondentes modificações na variabilidade climática em diferentes escalas temporais.

Os extremos de temperatura são definidos como a temperatura mínima e máxima absoluta registada num ano, e o extremo de precipitação é definido como o máximo de precipitação diária ocorrida num ano.

A série da temperatura mínima absoluta (fig. 3.9) apresenta uma tendência crescente (estatisticamente significativa desde 1966), enquanto que, a série da máxima não apresenta tendência aparente. A temperatura mínima anual absoluta registada na estação de Évora, no período de 1941-2000, foi de -5 °C no ano de 1956, e a máxima foi de 42,3 °C em 1944.

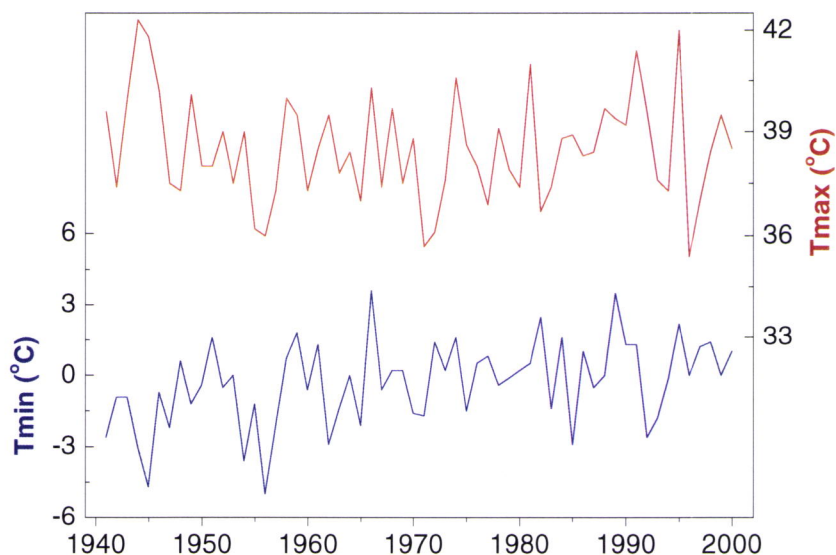


Figura 3.9 – Temperatura máxima e mínima absoluta de para Évora. Período de 1941-2000.

Ao analisar os extremos de precipitação para os três locais (fig. 3.10), verifica-se uma variação irregular ao longo das séries de Santa Susana e Azaruja. Para a série de Évora existe uma ligeira tendência de diminuição, embora não significativa estatisticamente. O máximo absoluto na estação de Évora foi de 104 mm no ano de 1944, em Santa Susana foi de 89 mm em 1991 e na Azaruja foi de 69 mm em 1951.

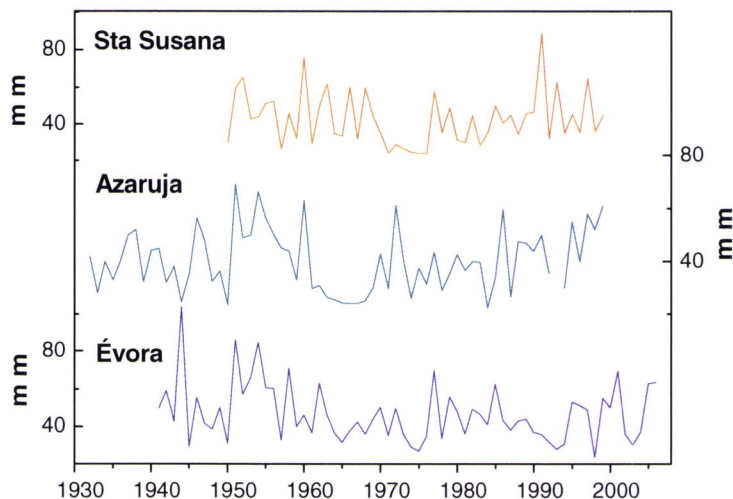


Figura 3.10 – Extremos de precipitação para Évora, Azaruja e Santa Susana.

3.5 Análise de situações de seca

As situações de seca constituem uma ocorrência natural associada essencialmente à falta de precipitação, que se verifica todos os anos em diversas regiões do mundo. A seca é o desastre natural de origem meteorológica e climatológica mais complexo e que afecta mais pessoas e durante mais tempo que qualquer outro (Pires, 2003).

Para caracterizar a evolução histórica das situações de seca em Évora, utilizou-se o índice meteorológico PDSI – Palmer Drought Severity Index (Palmer, 1965). Este índice meteorológico PDSI detecta períodos de seca e classifica-os em termos da sua intensidade (Pires, 2003). O acompanhamento mensal deste índice (ou em escalas temporais mais curtas) dá uma boa indicação da evolução inicial da seca, assim como, a avaliação da sua intensidade e duração.

O cálculo do índice PDSI baseia-se no conceito do balanço da água tendo em conta dados da quantidade de precipitação, temperatura do ar e capacidade de água disponível no solo; permite detectar a ocorrência de períodos de seca e classifica-os (Tabela 3.3) em termos de intensidade (fraca, moderada, severa e extrema) (Palmer, 1965).

Tabela 3.3 – Classificação para períodos secos/chuvosos do índice PDSI (Palmer, 1965).

Categoria	Classificação PDSI
Chuva extrema	4.00 ou superior
Chuva severa	3.00 a 3.99
Chuva moderada	2.00 a 2.99
Chuva fraca	0.50 a 1.99
Normal	- 0.49 a 0.49
Seca fraca	-0.50 a -1.99
Seca moderada	-2.00 a -2.99
Seca severa	-3.00 a 3.99
Seca extrema	-4.00 ou inferior

Na Tabela 3.4 é apresentada a ocorrência de situações de seca para a série longa de Évora (1901-2006), sendo ainda indicado o número de situações de seca, sua duração (número de meses) e correspondentes anos de início e fim, intensidade e número de meses consecutivos nas classificações mais graves: severa e extrema.

Alguns episódios de seca destacam-se, não só pela sua duração, mas também pelo número de meses consecutivos em situação de seca severa e extrema.

Em termos de duração é de realçar:

- 1979 – 1982 - 33 Meses
- 1943 – 1946 - 29 Meses
- 1953 – 1954 – 23 Meses

Em termos de intensidade (n.º de meses consecutivos em seca severa ou extrema) é de realçar:

- 9 Meses – Janeiro a Setembro 2005
- 8 Meses – 1943-1946
- 7 Meses – 1991-1992

Tabela 3.4 – Anos de seca na série longa de Évora.

Estações (período)	Nº Secas	Nº Meses	Anos de Seca	Intensidade	Duração nº meses consecutivos em Seca severa ou extrema
Évora (1901-2006)	25	33	Nov. 1979 – Jul. 1982	Fraca a extrema	3
		29	Nov. 1943 – Mar. 1946	Fraca a extrema	8
		23	Fev. 1953 – Dez. 1954	Fraca a severa	1
		20	Mar. 1994 – Out. 1995	Fraca a extrema	6
		19	Abr. 1904 – Out. 1905	Fraca a severa	2
		18	Jan. 1991 – Jun. 1992	Fraca a extrema	7
		17	Mai. 1964 – Set. 1965	Fraca a extrema	4
		17	Mai. 2003 – Set. 2004	Fraca a severa	2
		16	Set. 1917 – Dez. 1918	Fraca a extrema	3
		16	Set. 1924 – Dez. 1925	Fraca a severa	1
		16	Nov. 2004 – Fev. 2006	Fraca a extrema	9
		15	Set. 1957 – Nov. 1958	Fraca a extrema	2
		14	Fev. 1970 – Mar. 1971	Fraca a extrema	3
		13	Nov. 1928 – Nov. 1929	Fraca a severa	2
		12	Set. 1948 – Ago. 1949	Fraca a extrema	6
		11	Set. 1930 – Jul. 1931	Fraca a severa	2
		10	Jan 1983 – Out 1983	Fraca a extrema	1
		10	Out. 1998 – Jul. 1999	Fraca a extrema	4
		8	Set. 1934 – Abr. 1935	Fraca a severa	3
		6	Set. 1941 – Fev. 1942	Fraca a severa	1
		6	Dez. 1966 – Mai. 1967	Fraca a moderada	0
		6	Set. 1974 – Fev. 1975	Fraca a severa	2
		6	Nov. 1999 – Abr. 2000	Fraca a extrema	3
		5	Dez. 1906 – Abr. 1907	Fraca a extrema	3
		5	Dez. 1988 – Abr. 1989	Moderada	0

Capítulo 4

Qualidade da água da albufeira de Alqueva utilizando medidas de satélite

O controlo e monitorização da qualidade da água de lagos artificiais são acções essenciais, já que estes constituem um importante recurso hídrico renovável para o abastecimento doméstico, agrícola, e industrial, entre muitas outras aplicações.

A região do Alentejo, localizada a sul de Portugal (Fig. 4.1a), representa aproximadamente um terço do país e tem aproximadamente 5% da população nacional. O Alentejo é uma região que há muito tempo é conhecida pela irregularidade na disponibilidade hídrica como consequência da irregularidade da precipitação média anual. De facto, esta região é caracterizada por Verões secos e quentes e Invernos regularmente frios, ocasionalmente chuvosos (Capítulo 2). A época de chuva normalmente concentra-se num período curto do ano, tipicamente de Novembro a Fevereiro. Por outro lado, os períodos de chuva são irregulares e a região enfrenta períodos da seca que podem durar mais de um ano consecutivo (Secção 3.5). Assim, com o objectivo de constituir um reservatório de água essencial na região, a Albufeira de Alqueva foi desenvolvida, levando em conta a preservação e uso de água, até durante os períodos de seca extensos. O Alqueva é um dos maiores lagos artificiais da Europa quanto a área superficial (250 km²) e representa um bom exemplo da importância do controle de qualidade de água em lagos artificiais, devido à sua importância na região onde é localizado.

O controle de qualidade da água é assegurado pelas entidades responsáveis, no entanto, as medições *in situ* realizadas regularmente, são limitadas espacial e temporalmente. A existência de um método de detecção remota fiável, que permita a monitorização global e contínua de certos parâmetros biológicos, que condicionam a qualidade de água seria muito útil, constituindo um dos objectivos do presente estudo. Além disso, o lançamento do satélite ENVISAT (ENVironmental SATellite) em Março de 2002 pela Agência Espacial Europeia (ESA) abriu novos horizontes no estudo de massas de água de dimensões reduzidas, quando comparadas com mares e oceanos, sendo a Albufeira de Alqueva um bom exemplo. O espectrómetro MEdium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS), a bordo do satélite ENVISAT, combina uma elevada resolução espacial (300×300m² no nadir) com uma resolução espectral adequada no

domínio do visível e infravermelho próximo (<http://envisat.esa.int/instruments/meris/>), permitindo assim monitorizar a "cor" dessas massas de água naturais, relacionadas com os parâmetros biológicos e conseqüentemente a qualidade de água. Existem outros sensores a bordo de satélites com maior resolução espacial do que o MERIS, mas com desvantagens na sua utilização: menor frequência de passagem sobre a mesma área e resoluções espaciais e espectrais inferiores. A utilização do MERIS representa uma escolha eficaz, que permite uma monitorização frequente (diária) de baixo custo sobre lagos (artificiais ou naturais).

As propriedades ópticas de uma massa de água natural são determinadas maioritariamente pelo material vivo e não vivo que estão presente em solução ou suspensão aquosa. Este estudo vai incidir na determinação da concentração da clorofila *a* e da densidade de cianobactérias. A clorofila *a* é o único pigmento fotossintético presente em todas as plantas, sendo conseqüentemente um bom indicador de biomassa e da actividade fotossintética. As cianobactérias, também conhecidos por algas azuis-esverdeadas, são organismos unicelulares que obtêm a sua energia pela fotossíntese, podendo agrupar-se em colónias de grande dimensão. Estas podem formar filamentos, tornando-se perceptíveis à "vista desarmada" e desenvolvendo uma coloração azul esverdeada. Podem desenvolver-se em grandes densidades, provocando as fluorescências (>2000 cél/ml). O efeito mais grave resultante do desenvolvimento de fluorescências de cianobactérias é a produção de toxinas, constituindo estas um grave risco para a saúde pública.

Vários estudos de qualidade de água, utilizando medidas de satélite, sobre alguns lagos mundiais foram apresentados (Peña-Martínez et al., 2003; Floricioiu et al., 2004; Reinart and Pierson, 2004; Giardino et al., 2007; Odermatt et al., 2007) no entanto, tal estudo nunca foi tentado antes em lagos portugueses, em particular sobre a Albufeira de Alqueva, que pelas suas características (dimensão) permite o seu estudo através de detecção remota por satélite.

4.1 Metodologia

4.1.1 Dados, área e período de estudo

A albufeira de Alqueva está localizada na secção portuguesa do Rio Guadiana, como ilustrado na Figura 4.1a. Ao nível máximo de armazenamento de 152 m, a albufeira tem uma capacidade total de 4150hm^3 e uma área superficial de 250km^2 . O presente estudo diz respeito a um período de cinco anos, de 2003 a 2007 e inclui a maior parte das análises *in situ* disponíveis para os três locais escolhidos da albufeira de Alqueva (Fig.4.1b), com uma frequência mensal. O estudo começou em 2003 e foi condicionado pelo enchimento da albufeira, que fechou as comportas em Fevereiro de 2002 e durou aproximadamente um ano para conseguir um nível de armazenamento estável de aproximadamente 135 m.

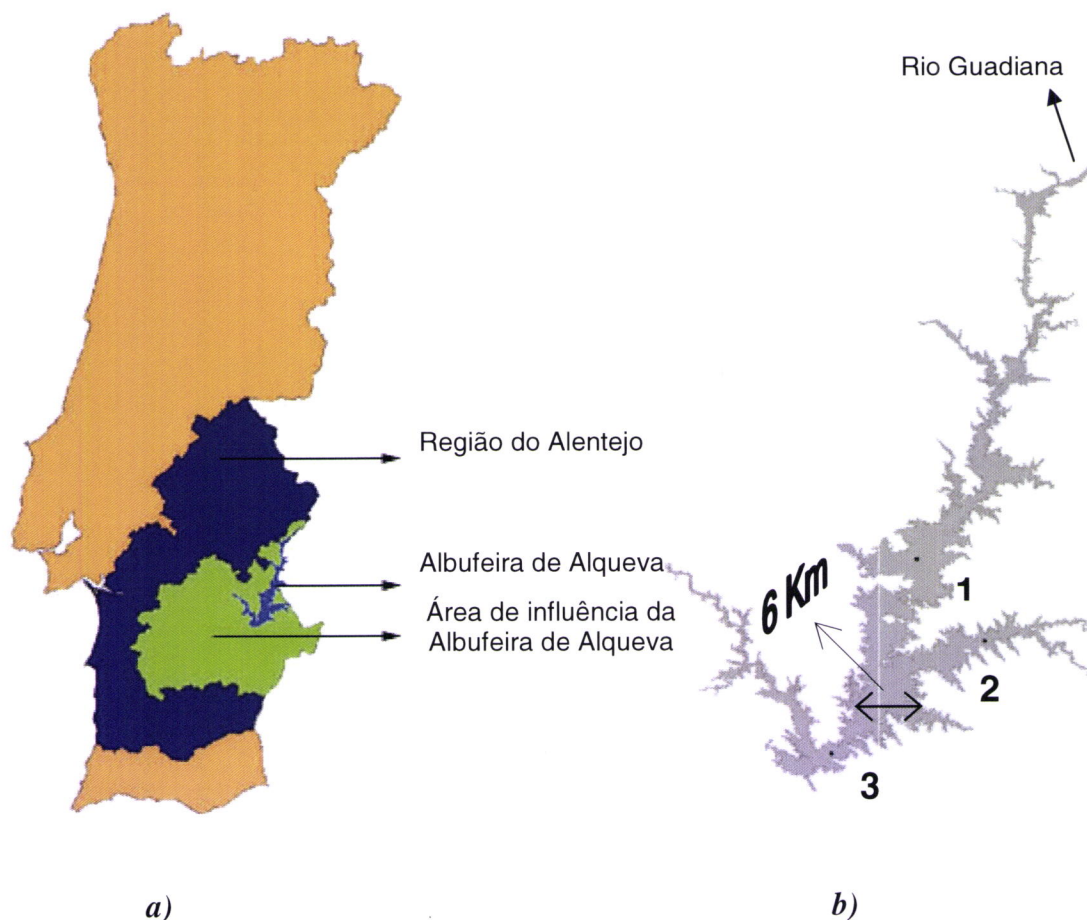


Figura 4.1 – a) Localização da Albufeira de Alqueva e sua área de influência (Fonte: Instituto da Água – INAG); b) Posição dos três locais utilizados neste trabalho, onde as amostras de água são recolhidas para análise *in situ*: 1 – Alqueva-Mourão, 2 – Alcarrache e 3 – Alqueva-Montante.

As medições *in situ* utilizadas no presente trabalho foram gentilmente cedidas pela Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva (EDIA), realizadas no Laboratório da Água do Centro de Ecologia e Ambiente da Universidade de Évora (Serafim et al., 2006), e também pelo Instituto da Água (INAG) através do endereço: <http://snirh.pt/>.

O Laboratório da Água do Centro de Ecologia e Ambiente da Universidade de Évora recolhe e analisa mensalmente amostras de água em oito locais da albufeira de Alqueva: quatro com características lênticas (águas paradas), onde as amostras são recolhidas ao longo da coluna de água (superfície, meio e fundo) e outros quatro, onde as amostras são recolhidas à superfície, em cursos de água que apresentam características lóticicas (água corrente), durante o período húmido. Três locais foram seleccionados para este estudo (todos com características lênticas), considerando não só as suas posições geográficas dentro da albufeira, mas também a dimensão do pixel do satélite ($300 \times 300 \text{ m}^2$). A Figura 4.1b ilustra a posição desses três locais, Alcarrache, Alqueva-Mourão, e Alqueva-Montante. Os parâmetros físico-químicos, microbiológicos e fitoplanctónicos são analisados. Os parâmetros estudados no presente trabalho são a concentração de clorofila *a*, obtida através de espectroscopia de absorção molecular e determinada segundo método desenvolvido por Lorenzen (1967) e a densidade de cianobactérias, determinada utilizando o método de Utermöhl com identificação microscópica (Utermöhl, 1958).

Durante 2003 e 2004, os mesmos três locais escolhidos (Alcarrache, Montante e Mourão) foram alvo de semelhante análise por parte do Instituto da Água (a par de outros locais), com ligeiras diferenças na posição geográfica em relação aos mesmos locais do Laboratório da Água. Dos parâmetros estudados estavam disponíveis apenas dados da concentração de clorofila *a*, não estando disponíveis dados da concentração de cianobactérias.

Foram utilizadas imagens MERIS FR (full resolution) de nível 1b, com medidas de radiância de topo da atmosfera para cada canal espectral MERIS, com resolução espacial máxima de $300 \times 300 \text{ m}^2$ no nadir. A selecção das imagens MERIS utilizadas é o resultado do cumprimento de três condições: céu limpo, ausência de eventos de aerossóis (normalmente poeiras do deserto e fumos de incêndios florestais) e a diferença mínima entre a data da imagem MERIS e da análise *in situ* (1 dia no caso das parametrizações e 3 dias para a validação conveniente para a cobertura temporal limitada de um ano) devido a possíveis alterações dos parâmetros superficiais da água.

4.1.2 Correção atmosférica

O estudo das propriedades de água superficiais a partir de técnicas de detecção remota de satélite necessita que seja feita a correção dos efeitos da atmosfera. A reflectância MERIS medida pelo espectrómetro deve ser corrigida para os efeitos atmosféricos, a fim de se obter a reflectância espectral da superfície da água, que por sua vez vai ser relacionada com as medições *in situ*. O estudo foi realizado para dias de céu limpo, por isso, todas as situações nubladas são descartadas. Esta selecção é feita pela inspecção visual das imagens MERIS sobre a área de estudo. As bandas de absorção dos principais gases são evitadas também, por isso, a correção atmosférica depende essencialmente do tipo e quantidade de aerossóis presentes na atmosfera. Por outro lado, as imagens utilizadas correspondem a situações de baixas quantidades de aerossol na atmosfera (dias "limpos"). O objectivo de utilizar dias atmosféricos "limpos" e "céu limpo" é reduzir ao mínimo o impacto que a correção atmosférica (devido a aerossóis) pode ter no cálculo da reflectância espectral da superfície da água. Em caso de eventos de aerossol, é difícil saber se o tipo e a espessura óptica de aerossóis sobre Évora são semelhantes sobre a albufeira. Desde que as concentrações de aerossol implicadas nesses casos são muito elevadas, também os erros associados com tais correções seriam elevados, por isso as situações de eventos de aerossol são descartadas. Este tipo de medidas (espessura óptica dos aerossóis, espectro de dimensão, índice de refração complexo) é obtido continuamente no Centro de Geofísica de Évora a partir da inversão de medidas radiativas espectrais feitas por um espectrofotómetro localizado no observatório do CGE em Évora, que faz parte da rede AEROSOL ROBOTIC NETWORK (AERONET) (Holben et al., 1998). Devido à curta distância entre Évora e a área de Alqueva (aproximadamente 40 km em linha recta), não se espera uma variação significativa, especialmente em relação ao tipo de aerossol. Por isso, a correção atmosférica sobre Alqueva é realizada usando a caracterização dos aerossóis obtida em Évora.

O código de transferência radiativo 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum; Vermote et al., 1997) é utilizado para corrigir o sinal medido pelo satélite no topo da atmosfera, relativamente à contribuição atmosférica. Este código pode simular medições de radiação de satélite em atmosferas sem nuvens, entre

0.25 e 4.0 μm , para uma vasta variedade de condições atmosféricas e superficiais. O 6S considera os compostos atmosféricos em 34 níveis atmosféricos distribuídos desde a superfície até à altitude de 100 km, que é considerada o topo da atmosfera. São utilizados na correcção atmosférica efectuada, a concentração de ozono (O_3) proveniente do produto MERIS 1b, a concentração de vapor de água (H_2O) na coluna vertical e a caracterização dos aerossóis (concentração, distribuição de tamanho e composição química) obtidas do produto AERONET, da estação localizada no observatório do CGE em Évora. A espessura óptica dos aerossóis é calculada a partir da distribuição de tamanho da partícula (com 22 valores logaritmicamente equidistantes de 0.05 a 15 μm) e do índice de refração complexo, ambos provenientes do produto AERONET (nível 1.5 e 2.0), que depois são utilizadas para os cálculos das propriedades ópticas dos aerossóis, utilizando a teoria de Mie, já que se assume que as partículas de aerossóis são esféricas. A espessura óptica aos 0.55 μm é obtida utilizando o expoente de Ångström entre 0.441 μm e 0.873 μm . Uma vez que os parâmetros de correcção atmosférica são conhecidos, assim como a geometria e a radiância espectral do satélite, a reflectância espectral de água é determinada, utilizando o código de transferência radiativa 6S, considerando que a superfície se comporta como um reflector Lambertiano, para as bandas MERIS.

A Figura 4.2 exemplifica a radiância MERIS medida no topo da atmosfera e a radiância à superfície, obtida com o código de transferência radiativa 6S, para o dia 13 de Outubro de 2007. Pode ser observado no gráfico a grande contribuição atmosférica na radiância do topo da atmosfera, especialmente para os comprimentos de onda mais baixos, com respeito ao sinal superficial.

Um total de 31 imagens MERIS foi seleccionado, resultando do cumprimento das três condições mencionadas anteriormente: céu limpo, ausência de eventos de aerossóis (normalmente poeiras do deserto e fumo de fogo florestal) e a diferença mínima entre a data da imagem MERIS e da análise *in situ*. As imagens escolhidas correspondem a valores de espessura óptica dos aerossóis entre aproximadamente 0.03 e 0.3, no comprimento de onda de referência de 550 nm.

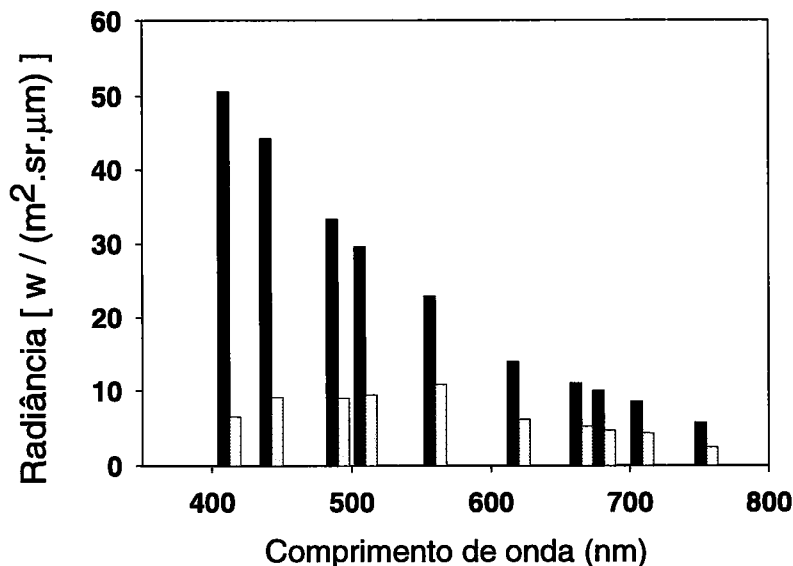


Figura 4.2 – Radiação espectral MERIS no topo da atmosfera (barras pretas) e à superfície (barras cinzentas) após correção atmosférica, no dia 13 de Outubro de 2007, 10:56 UTC.

4.1.3 Parametrizações

A reflectância espectral da superfície da albufeira obtida após ter sido aplicada a correção atmosférica (ver secção anterior) é relacionada com as medições *in situ*. Os dados utilizados nesta secção são referentes aos anos 2003-2006. As parametrizações obtidas são depois utilizadas para estimar a concentração de clorofila *a* e densidade de cianobactérias sobre toda a superfície do Alqueva e os resultados comparados com as medidas *in situ* de outro período (2007).

A banda espectral 2 do MERIS (442.5nm) representa um máximo da absorção de clorofila *a* enquanto que a banda espectral 5 (560 nm) representa um mínimo (Bukata et al, 1995). Assim, a razão entre estas duas bandas é relacionada com medições *in situ* da concentração de clorofila *a*. Para cada local de amostragem (Alcarrache, Montante e Mourão; Fig.4.1b) o pixel MERIS mais próximo foi considerado. A regressão que melhor se adaptou é do tipo potência, com um coeficiente de correlação de 0.88, dada pela Equação 4.1 onde B2 e B5 representam a reflectância MERIS corrigida nas bandas 2 e 5 respectivamente.

$$\text{Clorofila} - a [\mu\text{g.L}^{-1}] = 4.93 * \left(\frac{B5}{B2} \right)^{3.90} \quad (4.1)$$

A Figura 4.3 mostra concentrações de clorofila *a* em função da razão das reflectâncias de superfície nas bandas 2 e 5 do MERIS, assim como a melhor curva de regressão obtida. Um total de 36 pontos foi utilizado, correspondendo aos três locais escolhidos (fig. 4.1b) e ao período de estudo, tendo em conta as condições impostas na selecção das imagens MERIS (céu limpo, ausência de eventos de aerossóis e a diferença mínima entre as datas das imagens MERIS e colheitas *in situ*).

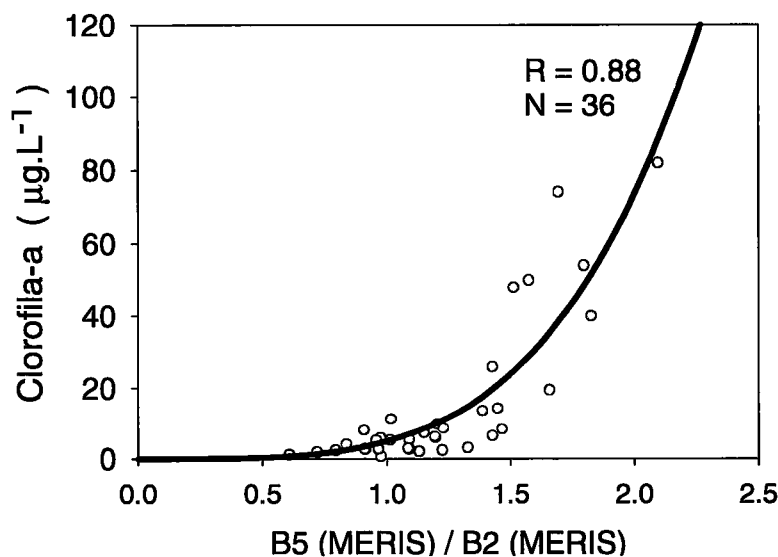


Figura 4.3 – Modelo de regressão para o cálculo da concentração de clorofila *a* utilizando as reflectâncias de superfície correspondentes às bandas 2 e 5 do MERIS.

A banda 3 (490 nm) representa um mínimo da absorção do pigmento phycocyanin (presente na cianobactérias), enquanto que a banda 5 (560 nm) representa um máximo relativo e a banda 6 (620nm) representa um máximo absoluto (Bukata et al, 1995).

A combinação destas três bandas foi relacionada com medições *in situ* da densidade de cianobactérias. A melhor relação obtida é dada pela Equação 4.2, de tipo potência, com um coeficiente de correlação de 0.83. B3, B5 e B6 representam as reflectâncias MERIS corrigidas dos efeitos atmosféricos nas bandas 3, 5 e 6

respectivamente. Uma vez mais, para os três locais considerados, o pixel MERIS mais próximo foi escolhido.

$$\text{Cianobacterias} [10^3 \text{ células.ml}^{-1}] = 422743.95 * \left(\frac{B5 * B6}{B3} \right)^{2.84} \quad (4.2)$$

A Figura 4.4 mostra densidades de cianobactérias em função da razão das reflectâncias de superfície nas bandas 3, 5 e 6 do MERIS, assim como a melhor curva de regressão obtida. Um número inferior de pontos foi considerado (23) no que diz respeito ao caso da clorofila *a* (36 pontos). Este facto está relacionado com a ausência de medidas de densidades de cianobactérias por parte do INAG, resultando aqui num número inferior de dias.

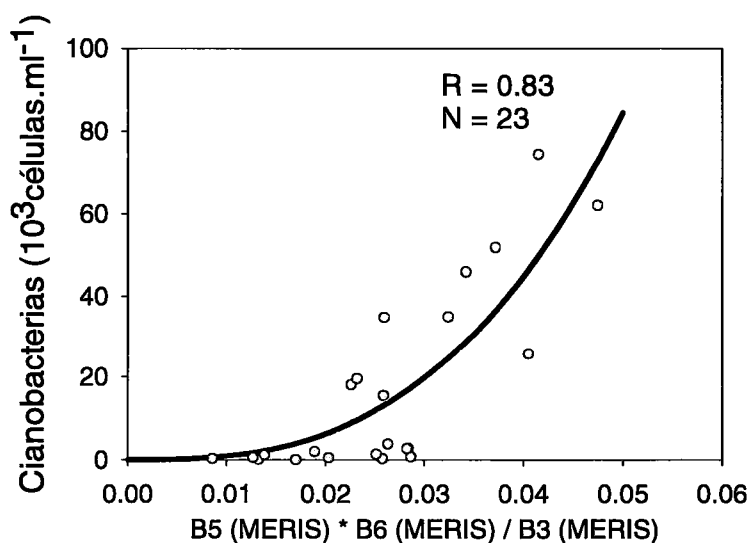


Figura 4.4 – Modelo de regressão para o cálculo da densidade de cianobactérias utilizando as reflectâncias de superfície correspondentes às bandas 3, 5 e 6 do MERIS.

4.2 Resultados

4.2.1 Validação

Nesta secção é apresentado um estudo comparativo entre os resultados obtidos pelas parametrizações bio-ópticas (secção anterior) e as medições *in situ*. Este estudo é realizado para o ano de 2007.

As parametrizações apresentadas na secção 4.1.3 foram aplicadas a uma caixa de quatro pixeis centrados nas coordenadas geográficas de cada um dos três locais onde as amostras de água foram recolhidas, e os resultados obtidos foram comparados com as análises *in situ* correspondentes. O valor médio foi utilizado para comparação com a medição *in situ*.

A Figura 4.5 mostra a relação entre a concentração de clorofila *a* obtida através das medidas de satélite MERIS e os respectivos valores medidos *in situ*, num total de 29 pontos. As barras de erro verticais representam o desvio padrão dos quatro pixeis seleccionados. Uma boa correlação ($R = 0.84$) foi encontrada entre medidas MERIS e *in situ*, com alguns valores MERIS ligeiramente sobrestimados para pequenas concentrações de clorofila *a* (abaixo dos $15 \mu\text{g.L}^{-1}$) e uma tendência para subestimar os valores mais elevados.

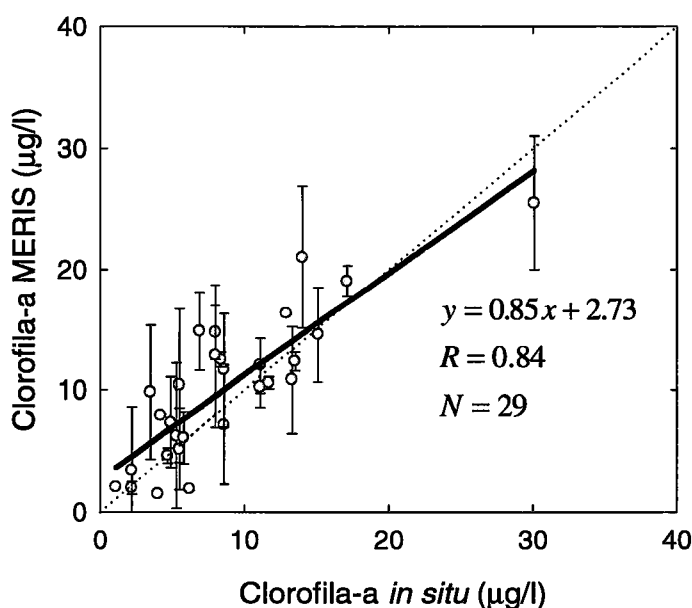


Figura 4.5 – Comparação entre a concentração de clorofila *a* obtida através das medidas de satélite MERIS e os respectivos valores medidos *in situ*.

Na Figura 4.6 é ilustrada a relação entre a densidade de cianobactérias obtida através das medidas de satélite MERIS e os respectivos valores *in situ*, num total de 29 pontos. As barras de erro verticais representam uma vez mais o desvio padrão correspondente aos quatro pixeis seleccionados. Para a densidade de cianobactérias foi encontrada uma correlação elevada ($R = 0.97$) entre medidas MERIS e *in situ*. A metodologia mostra bons resultados para toda a variedade de densidades. No entanto, o maior impacto que as cianobactérias podem ter na saúde pública, está relacionado com a

ocorrência de fluorescências devido à produção de toxinas. Os resultados demonstram a grande capacidade de MERIS na detecção de fluorescências de cianobactérias (Fig. 4.6), assim como para a detecção de baixas densidades de cianobactérias.

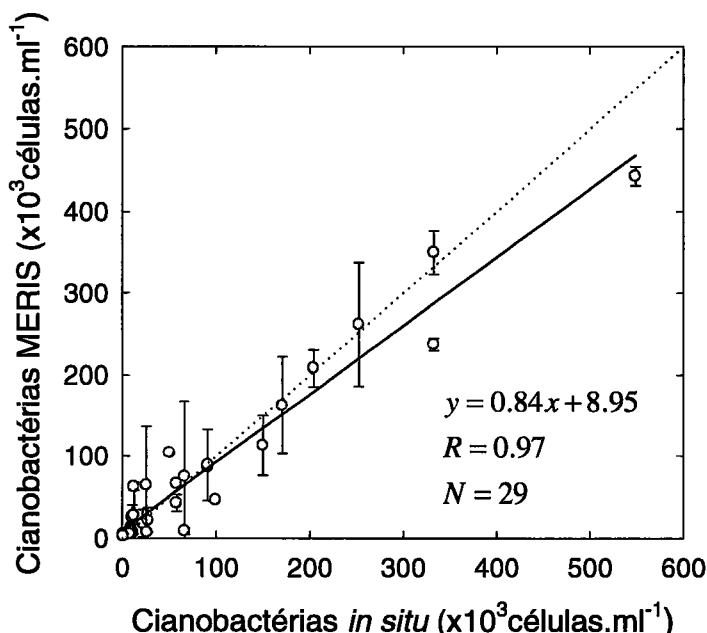


Figura 4.6 – Comparação entre a concentração de cianobactérias obtida através das medidas de satélite MERIS e os respectivos valores medidos *in situ*.

Os resultados obtidos, para a concentração de clorofila *a* e densidade de cianobactérias, demonstram o potencial que o presente método pode ter para a monitorização sistemática da qualidade da água da albufeira de Alqueva.

4.2.2 Distribuição espacial dos dois pigmentos estudados

As parametrizações desenvolvidas e apresentadas na Secção 4.1.3 são aplicadas sobre a totalidade da área da albufeira de Alqueva. São apresentados, nas Figuras 4.7 e 4.9, mapas de concentração de clorofila *a* e densidade de cianobactérias para dois meses do ano de 2007. É visível que em geral, as zonas dos afluentes da albufeira apresentam maiores concentrações e densidades, sendo estes afluentes responsáveis pela introdução de maiores quantidades de azoto e fósforo na albufeira que provocam um aumento da actividade biológica nestas zonas, gerando assim maior desenvolvimento fitoplanctónico.

O escoamento, especialmente através do Rio Guadiana (fig. 4.1b), introduz matéria orgânica e inorgânica que leva a um aumento da actividade biológica, como exemplificam os mapas para os dias 5 de Junho e 14 de Novembro de 2007 (Figuras 4.7 e 4.9).

Os mapas de concentração de clorofila *a* obtidos das imagens de satélite MERIS são exemplificados na Figura 4.7, para os dias 5 de Junho e 14 de Novembro de 2007. De salientar que para a Primavera (Fig. 4.7a) a parte Sul da albufeira (incluindo os locais Alcarrache e Montante) apresenta concentrações elevadas de clorofila *a*, enquanto que na imagem de Outono (Fig. 4.7b) observa-se o contrário. Estas observações estão de acordo com as medidas *in situ*, ilustradas na Figura 4.8, onde o local Montante (localizado a Sul da albufeira – Fig.4.1b) apresenta valores elevados em Abril e Junho. O baixo valor em Maio está provavelmente relacionado com a ocorrência de precipitação durante esse período. Por outro lado, a partir de Junho, no local Mourão (localizado no centro da albufeira – Fig.1b) prevalecem valores mais elevados do que em Alcarrache e Montante até ao fim do ano.

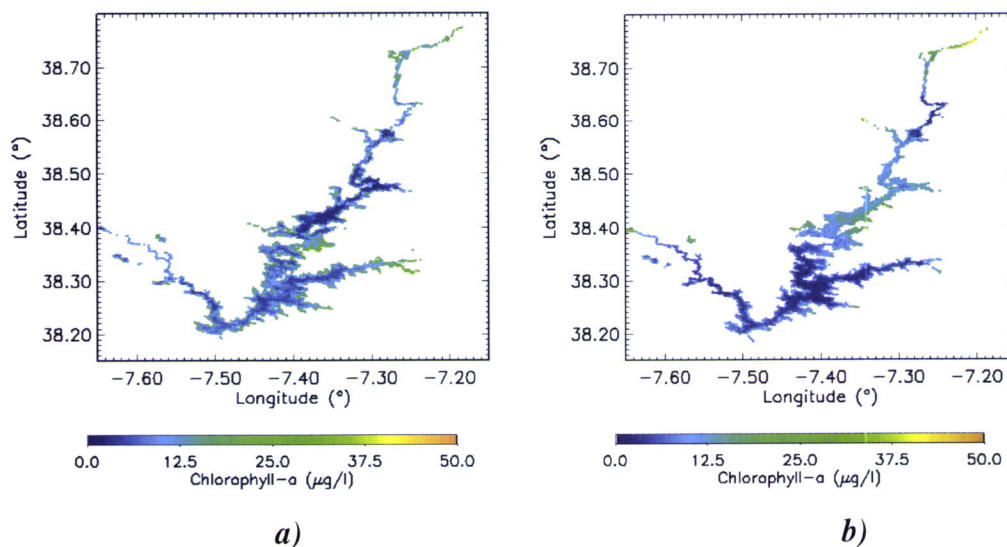


Figura 4.7 – Mapas de concentração de clorofila *a* para a totalidade da Albufeira de Alqueva no ano de 2007: a) 5 Junho e b) 14 Novembro.

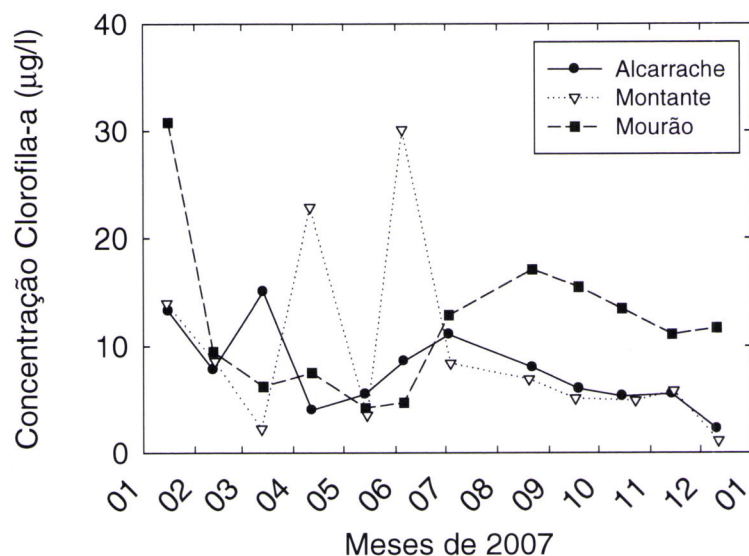


Figura 4.8 – Variação mensal das medidas *in situ* de concentração de clorofila *a* nos três locais de amostragem (Fig. 4.1b), para o ano de 2007.

Os mapas de densidade de cianobactérias obtidos das imagens de satélite MERIS são representados para os dias 5 de Junho e 14 Novembro de 2007 na Figura 4.9. É visível que o mapa de 5 de Junho apresenta valores mais elevados de cianobactérias em relação ao mapa de Novembro, onde apenas nas margens e nos ramos mais estreitos estão presentes densidades mais elevadas. Embora não seja mostrada aqui a totalidade dos meses, o mesmo pode ser observado para os mapas de cianobactérias durante os meses de Primavera e Verão (Junho, Julho, Agosto e Setembro), que apresentam valores mais elevados em toda a albufeira em relação ao resto do ano. Isto está provavelmente associado com a normal actividade das cianobactérias, que tendem a desenvolver-se melhor em condições mais quentes, dependendo também da composição química da água (Drikas et al, 2001). Estes resultados estão de acordo com as medidas *in situ*, que apresentam valores mais elevados de cianobactérias durante os meses de Primavera/Verão, nos três locais de amostragem, como é ilustrado na Figura 4.10.

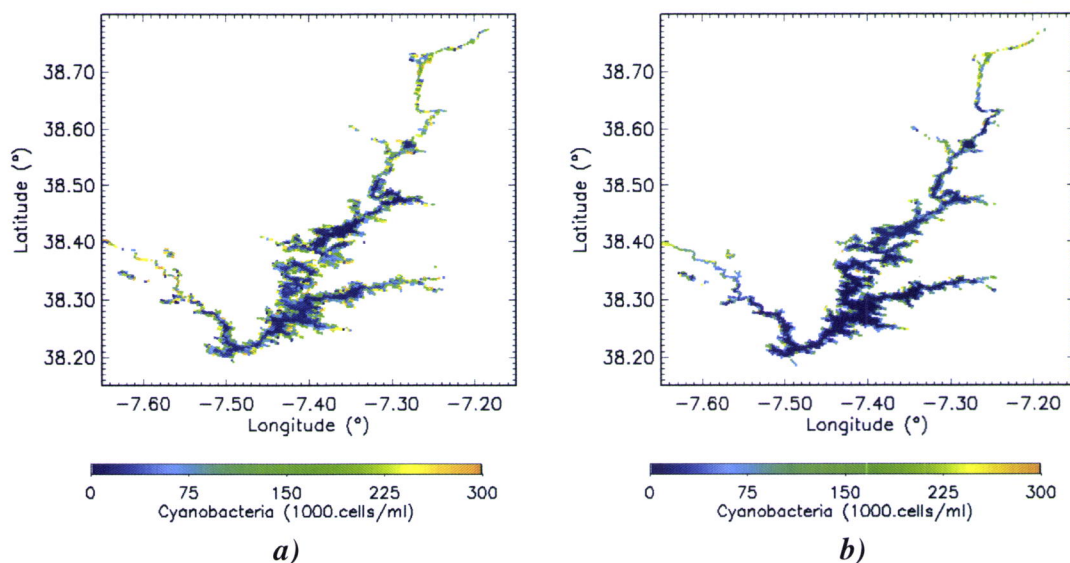


Figura 4.9 – Mapas de densidade de cianobactérias para a totalidade da Albufeira de Alqueva no ano de 2007: a) 5 Junho e b) 14 Novembro

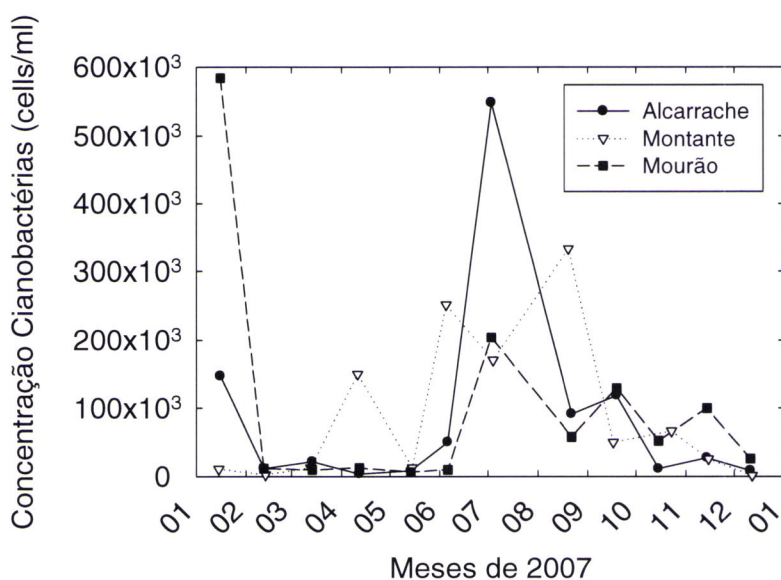


Figura 4.10 – Variação mensal das medidas *in situ* de densidade de cianobactérias nos três locais de amostragem (Fig. 4.1b), para o ano de 2007.

A metodologia desenvolvida e apresentada não tem como objectivo a substituição das medições *in situ*, mas sim constituir um método de controlo da qualidade de água de uma forma económica e regular, e fornecer a informação às autoridades responsáveis um mecanismo de apoio para melhor decidirem quando e onde as análises *in situ* devem ser executadas.

Capítulo 5

Campanha de observações na bacia da ribeira da Pardiela

A campanha de observações *in situ* teve início em Fevereiro 2008 com a instalação de uma estação meteorológica na bacia da ribeira da Pardiela no âmbito do projecto “Estratégias de Conservação e Reabilitação de rios Temporários: caso estudo da bacia do rio Pardiela, sul de Portugal (bacia do Guadiana)”, descrito no Capítulo 1. No âmbito deste projecto foi montada uma experiência observacional que está a permitir recolher informação de variáveis climáticas, hidrológicas, morfológicas, de qualidade da água e de pressão humana, que irá permitir caracterizar o estado actual da bacia e estudar os complexos mecanismos de interacção entre os fenómenos relevantes na dinâmica deste sistema aquático.

Neste capítulo é descrita a estação meteorológica e são apresentados alguns dados preliminares da Primavera e Verão de 2008. Será também estudado, com base em detecção remota por satélite, o estado da vegetação da bacia da ribeira da Pardiela durante os anos de 2003 a 2006, utilizando o índice de vegetação MERIS_NDVI descrito na Secção 5.2.

5.1 Estação Meteorológica

A estação foi instalada no vale da bacia da ribeira da Pardiela (38,64994 °N, 7,70741 °O, 222 metros de altitude) junto às localidades de São Miguel de Machede e Foros do Queimado. É neste local (troço experimental) que são realizadas observações/medições *in situ* por outras equipas do projecto acima mencionado. Entrou em funcionamento no dia 15 de Fevereiro de 2008 e, desde então, regista dados de temperatura e humidade relativa do ar, intensidade e direcção do vento, radiação solar global e precipitação.



Figura 5.1 – Estação meteorológica da ribeira da Pardiela (Outubro 2008).

Na Tabela 5.1 podem ser consultadas as principais características dos aparelhos de medida, leitura, armazenamento e transferência de dados presentes na estação meteorológica da ribeira da Pardiela. A última coluna indica a altura ao solo a que cada sensor está instalado. Os dados são amostrados de 10 em 10 segundos e as suas médias (totais no caso da precipitação) são armazenados de 10 em 10 minutos. No final do dia, são também registados os valores extremos observados.

Tabela 5.1 – Principais características da estação meteorológica da ribeira da Pardiela.

Aparelho	Marca	Modelo	Grandeza (s)	Erro	Altura (m)
Termo-Higrómetro	Thies Clima	1.1005.51.512	Temperatura (°C) HR (%)	± 0.3 °C ± 2 %	1.9
Anemómetro	Vector Instruments	A100R	Velocidade Vento (m/s)	± 1 % (10-55 m/s)	3
Cata-vento	Vector Instruments	W200P	Direcção Vento (°)	± 3 ° (> 5 m/s)	3
Udómetro	Campbell Scientific	ARG100	Precipitação (mm)	± 4 % (25 mm/h)	1.2
Pirradiómetro	Li-Cor	LI-200 (SZ)	Radiação Solar Global (W/m ²)	< 5 %	2.3
Datalogger	Campbell Scientific	CR10WP	-	-	-
Módulo armazenamento de dados	Campbell Scientific	SM 192	-	-	-
Modem	Siemens	M20 Terminal	-	-	-

5.1.1 Base de dados

Os dados meteorológicos da estação da Pardiela estão continuamente a ser armazenados na base de dados do Centro de Geofísica de Évora (<http://cge.dyndns.org/clima/>). Esta ferramenta disponibiliza os dados em intervalos de 10, 60 e 1440 minutos (sendo os dois últimos relativos às médias horárias e diárias, respectivamente) em diversos formatos, incluindo o gráfico (Figura 5.2). A recolha de dados, através de telemetria, é realizada de 12 em 12 horas possibilitando um acompanhamento diário das condições meteorológicas presentes na bacia da ribeira.

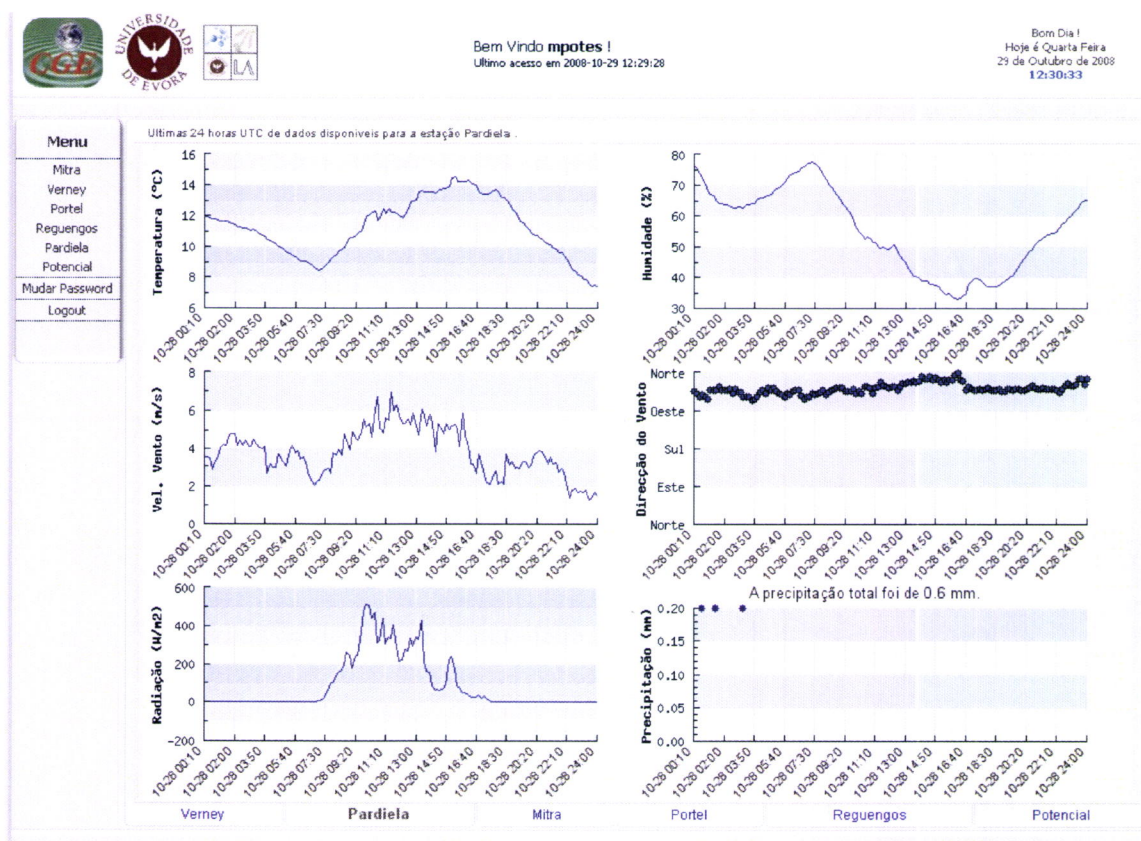


Figura 5.2 – Exemplo da visualização gráfica de dados da estação da Pardiela; “Print Screen” da base de dados do CGE (<http://cge.dyndns.org/clima/>).

5.1.2 Primavera e Verão 2008

A Figura 5.3 mostra a evolução da média diária da temperatura máxima, média e mínima do ar, assim como a precipitação diária acumulada para a Primavera (MAM) e

Verão (JJA) de 2008, na estação da ribeira da Pardiela. As médias sazonais destas quatro grandezas são posteriormente comparadas com as respectivas para o período de referência 61-90 (resultado de interpolação).

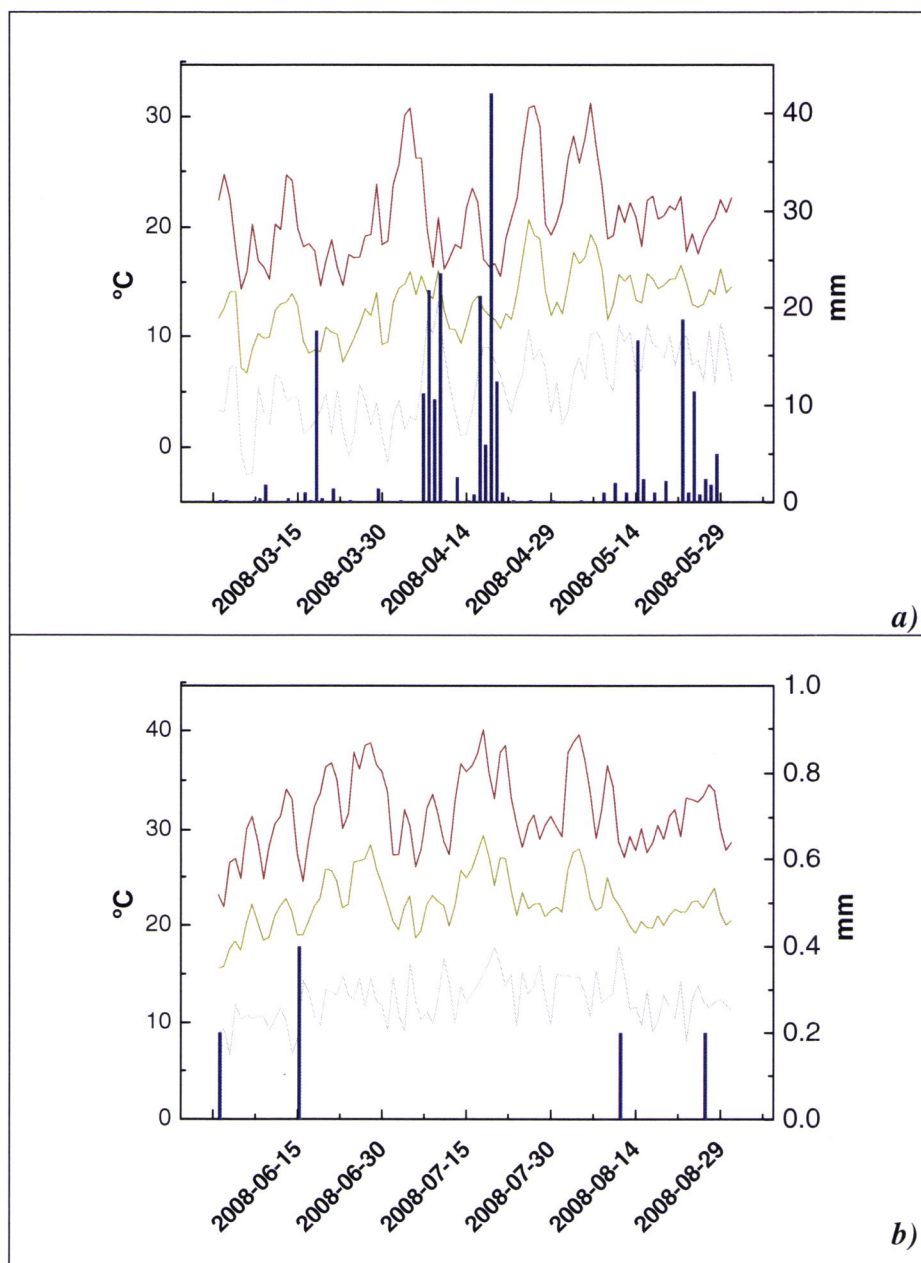


Figura 5.3 – Média diária da temperatura máxima (encarnado), média (verde) e mínima (cinzento) e precipitação diária acumulada (azul) para a Primavera (a) e Verão (b) de 2008, para a estação da Pardiela.

Na Tabela 5.2 é apresentada a comparação da Primavera e Verão de 2008 com o período de referência 61-90 para a estação da Pardiela. Os dados de 2008 são resultado da campanha observacional, enquanto que os dados 61-90 são resultado de interpolação (Capítulo 2).

Tanto a Primavera como o Verão de 2008 apresentaram uma temperatura mínima inferior ao período 61-90 (-2.6 e -1.7 °C respectivamente), enquanto que a temperatura máxima foi superior à do mesmo período (+1.5 e +1.2 °C respectivamente). A amplitude média diária é assim superior à obtida para o período 61-90 e a temperatura média para os dois períodos em 2008 foi inferior (-0.9 e -0.2 °C respectivamente). De salientar, uma vez mais, que os dados de 2008 são reais, enquanto que os dados do período 61-90 são interpolados.

A precipitação na Primavera de 2008 foi superior em relação ao período 61-90 (+105.3 mm), enquanto que no Verão foi inferior (apenas 1 mm contra os 33.7 mm no período de referência). Estes dados espelham a variabilidade interanual que este parâmetro apresenta em Portugal Continental (Capítulo 2).

Tabela 5.2 – Comparação da Primavera e Verão de 2008 (dados de observação) com período de referência 61-90 (dados interpolados) para a estação da Pardiela.

Data	Temperatura Média (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Precipitação (mm)
Março 2008	10.7	18.8	2.9	25.4
Abril 2008	13.8	22.1	6	154.4
Maio 2008	15	22.2	8.1	67.6
Primavera 2008	13.1	21.1	5.6	247.4
Primavera 61-90	14	19.6	8.2	142.1
Junho 2008	21.8	31.2	11.2	0.6
Julho 2008	23.1	32.2	13.2	0
Agosto 2008	22.2	32	12.6	0.4
Verão 2008	22.4	31.8	12.3	1
Verão 61-90	22.6	30.6	14	33.7

5.2 Índice de Vegetação NDVI_MERIS

As imagens de satélite apresentam a grande vantagem de permitirem o estudo simultâneo de uma área extensa. Utilizaram-se aqui imagens do instrumento MERIS a bordo do satélite ENVISAT (Capítulo 4), para analisar o tipo de superfície e as

variações sofridas (em termos de vegetação) na área de estudo – bacia da ribeira da Pardiela.

A Figura 5.4 mostra imagens RGB, obtidas através da combinação de três canais espectrais (Red – $0.9\mu\text{m}$, Green – $0.754\mu\text{m}$, Blue – $0.413\mu\text{m}$). Nas imagens, as regiões de menor temperatura encontram-se a azul (Oceano Atlântico e alguns lagos artificiais no território), enquanto que os tons de verde assinalam zonas de maior vegetação. De notar as zonas assinaladas pela seta branca, que indica no caso da imagem de 13 de Agosto de 2006 a presença de uma extensa área ardida, que não estava presente na imagem de 6 de Agosto de 2006, uma vez que o incêndio deflagrou no dia 7 de Agosto e foi dado como definitivamente extinto a 11 de Agosto.

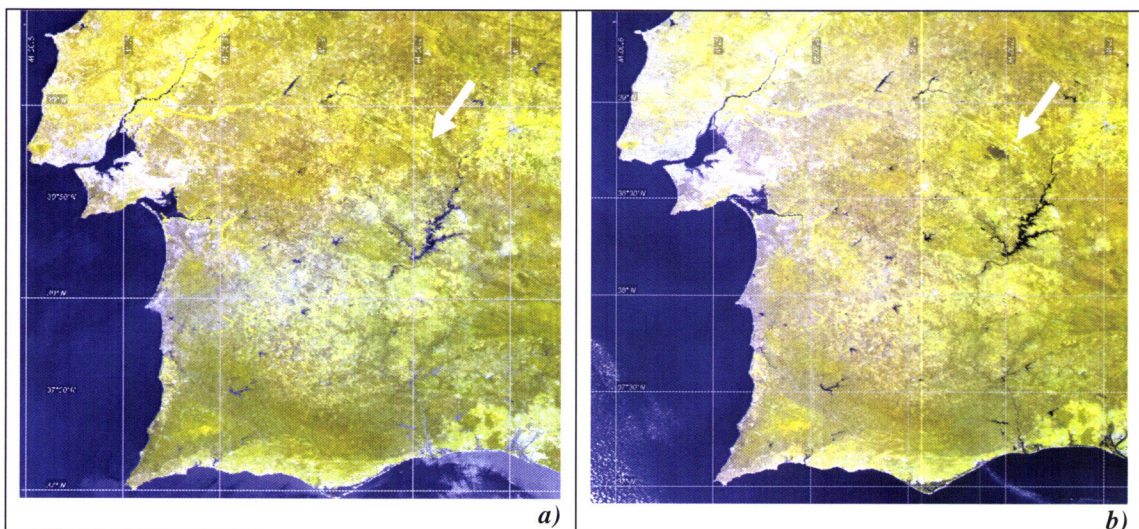


Figura 5.4 – Imagens RGB (Red – $0.9\mu\text{m}$, Green – $0.754\mu\text{m}$, Blue – $0.413\mu\text{m}$) do Sul de Portugal nos dias: a) 6 e b) 13 de Agosto de 2006.

O índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é muito utilizado para estimar mudanças no estado da vegetação. Este índice era originalmente utilizado como medida da biomassa verde (Tucker et al., 1986). Sendo também utilizado em estudos de mudança global, stress hídrico da vegetação, classificação do tipo de cobertura do solo. O índice NDVI utilizado nesta secção foi calculado através de reflectâncias de superfície do sensor MERIS a bordo do satélite ENVISAT (Capítulo 4) e relaciona a reflectância ρ_1 , no comprimento de onda de 665 nm, com a reflectância ρ_2 , no comprimento de onda de 865 nm, como mostra a equação 5.1:

$$MERIS_{NDVI} [0;1] = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (5.1)$$

sendo que ρ_1 representa valores baixos para a vegetação verde e ρ_2 valores elevados.

Este índice foi aplicado à bacia da ribeira da Pardiela durante os anos de 2003 a 2006. Nas Figura 5.5 e 5.6 são apresentados alguns mapas, deste índice, da bacia da ribeira; a azul está representada a ribeira da Pardiela e as albufeiras de Monte Novo (a Oeste da ribeira) e Vigia (a Este da ribeira) e a vermelho a localização da estação meteorológica da Pardiela (CGE).

É claramente visível que nos dias de Verão (Fig. 5.5a e 5.5b) o índice MERIS_NDVI é mais baixo, resultado da vegetação seca, e que nos dias de Inverno (Fig. 5.6a e 5.6b) este índice é mais elevado, indicando vegetação húmida. De salientar que o mapa do dia 2 Fevereiro de 2005 apresenta valores de NDVI inferiores ao mapa do dia 31 Janeiro de 2006, este facto está relacionado com a situação de seca extrema verificada de Fevereiro a Setembro de 2005, para a estação de Évora (ver secção 3.5).

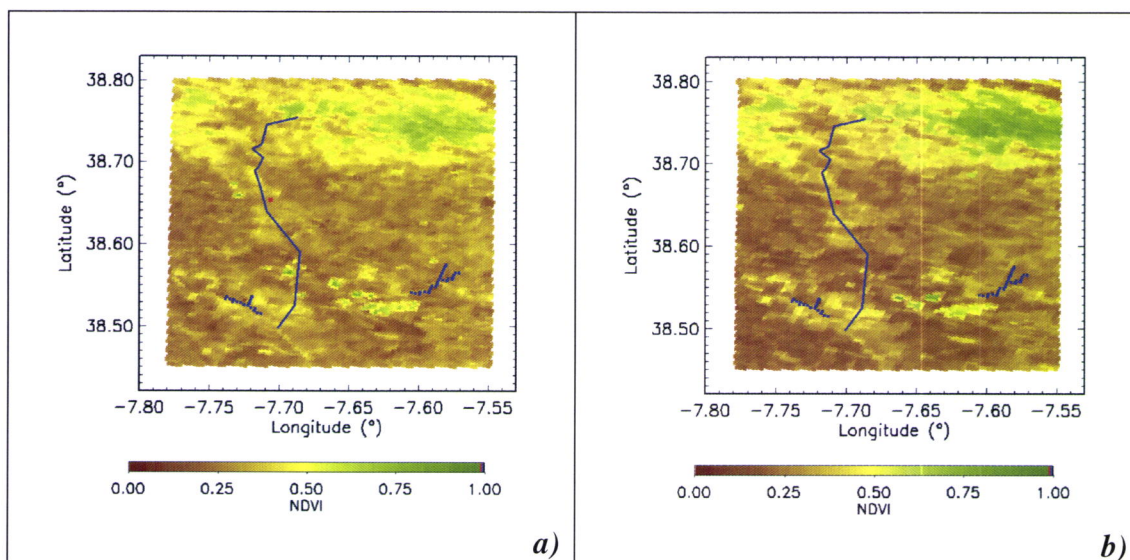


Figura 5.5 – Mapas de NDVI para a bacia da ribeira de Pardiela nos dias: a) 7 Julho 2003 e b) 11 Setembro de 2004. A azul está representada a ribeira da Pardiela e as albufeiras de Monte Novo (a Oeste da ribeira) e Vigia (a Este da ribeira) e a vermelho a localização da estação meteorológica da Pardiela (CGE).

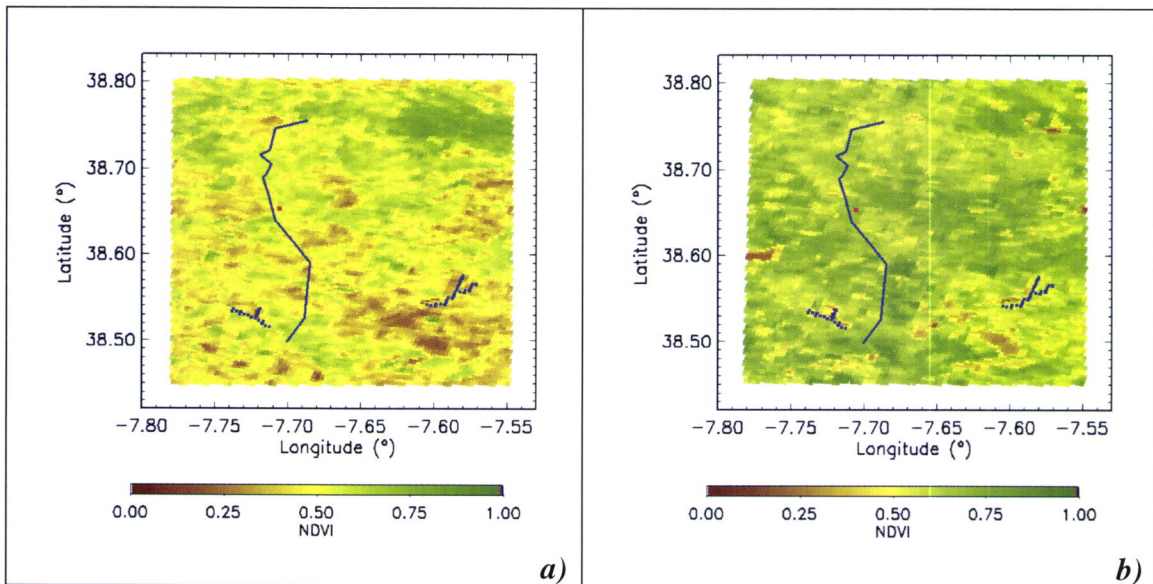


Figura 5.6 – Mapas de NDVI para a bacia da ribeira de Pardiela nos dias: a) 2 Fevereiro de 2005 e b) 31 Janeiro 2006. A azul está representada a ribeira da Pardiela e as albufeiras de Monte Novo (a Oeste da ribeira) e Vigia (a Este da ribeira) e a vermelho a localização da estação meteorológica da Pardiela (CGE).

Na Figura 5.7 são apresentados mapas, do índice MERIS_NDVI, da Serra d'Ossa aquando do incêndio florestal de Agosto de 2006. Segundo Lopes (2007) o incêndio teve início a 7 de Agosto 2006 por volta das 11h10m, foi dado como circunscrito no dia 8 mas na madrugada do dia 9 atingiu novamente proporções incontroláveis, sendo extinto apenas no dia 11 do mesmo mês. Os mapas apresentados na Figura 5.6 representam a Serra antes (a), durante (b), após (c) e algum tempo depois (d) do incêndio florestal que afectou cerca de 5,270 ha (Lopes, 2007). É visível que do dia 6 para o 9 Agosto grande parte da Serra passou de um índice elevado (entre 0.5 e 0.75) para um índice perto de zero, como resultado da queima florestal por parte do incêndio. Do dia 9 para o 13 Agosto mais uma parte da Serra (a Sul) sofre a mesma mudança de índice, e do dia 13 Agosto para o dia 4 Setembro é visível uma redução ligeira deste índice em toda a área do mapa resultante da deterioração da vegetação.

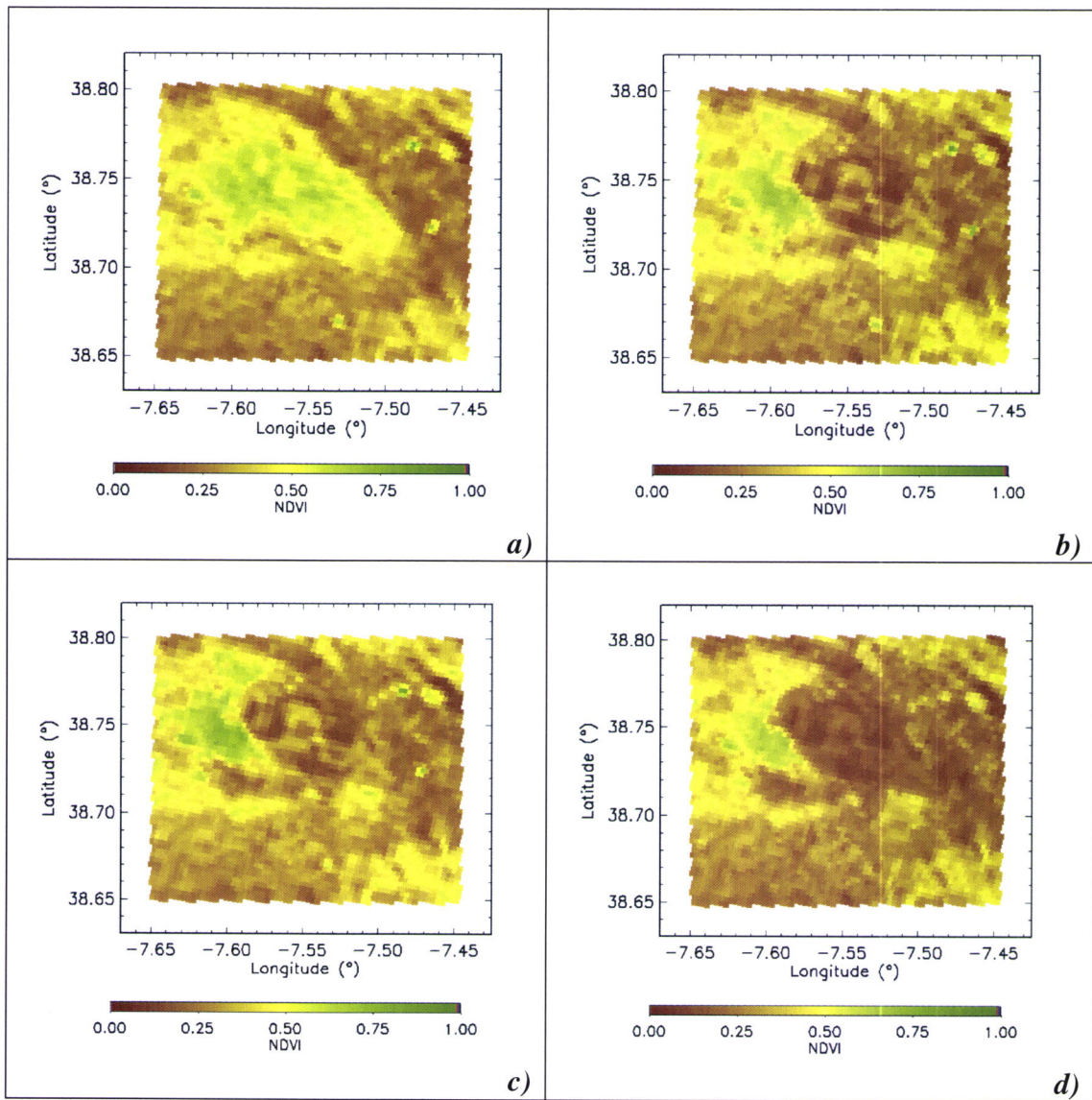


Figura 5.7 – Mapas de NDVI para a Serra d'Ossa nos dias: a) 6 Agosto; b) 9 Agosto; c) 13 Agosto e d) 4 Setembro de 2006.

Capítulo 6

Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

A garantia da qualidade da água da albufeira de Alqueva pressupõe diversas actividades e abordagens. Entre estas inclui-se a preservação e reabilitação dos afluentes e a monitorização em tempo real da qualidade da água. No que respeita à primeira vertente, tem-se em conta que entre os afluentes que desaguam no Guadiana, a montante de Alqueva, existem alguns rios temporários, sistemas aquáticos em que durante um determinado período do ano não existe caudal superficial. São sistemas comuns nas regiões de clima Mediterrânico e de clima semi-árido, onde assumem uma importância desconhecida em outras regiões da Europa. A sua preservação, ou requalificação, exige uma intervenção em várias frentes e pressupões a existência de estudos multidisciplinares.

No presente trabalho desenvolveu-se uma climatologia 1961-1990 para uma região da bacia do Guadiana. Como os resultados confirmam, esta região é um exemplo do clima Mediterrânico, prevacente no Sul de Portugal Continental, assim como em outras regiões do Sul da Europa. São regiões de clima temperado com Verão seco, quente e longo (clima Csa, na classificação de Köppen, ver Peixoto, 1987) e com grande vulnerabilidade à ocorrência de secas e desertificação. No interior Alentejano os valores médios da temperatura máxima do ar no Verão atingem os 32°C e a média anual da precipitação acumulada é em alguns locais de apenas de 400 mm. A média anual de evapotranspiração potencial (ETP) é da ordem de 1150 mm o que indica que existe um deficit hídrico no solo. Este deficit é muito acentuado especialmente devido aos meses de Verão onde a precipitação é muito reduzida e a ETP muito elevada.

A climatologia obtida com base em interpolação através de métodos de Kriging (Krige, 1951) com regressão de resíduos tendo em conta a altitude e a distância ao litoral, tem uma resolução de $1 \times 1 \text{ km}^2$, pelo que pode ser utilizada em estudos detalhados de zonas com escalas espaciais da ordem das poucas dezenas de km. Em particular, irá ser utilizada no estudo multidisciplinar sobre a dinâmica da ribeira da Pardiela em curso no âmbito do Projecto "Estratégias de Conservação e Reabilitação de rios Temporários: caso estudo da bacia do rio Pardiela, sul de Portugal (bacia do Guadiana)" (PTDC/AMB/73338/2006).

Foram igualmente analisadas tendências significativas nos últimos 50/70 anos, em algumas variáveis meteorológicas, utilizando o teste estatístico de Mann-Kendall. As tendências climáticas observadas em Portugal Continental têm de ser avaliadas no contexto das alterações climáticas globais. A existência de uma tendência de aquecimento global foi um facto estabelecido na última década do século XX tendo sido observados um número significativo de anos mais quentes.

O aumento significativo da temperatura média anual verificado na bacia da ribeira da Pardiela está de acordo com os períodos de aquecimento global. Foi observado um aumento significativo da temperatura média nos meses de Verão, e especialmente no Inverno desde a década de 70, sendo estas estações do ano as que mais contribuem para o aumento da temperatura média anual. As séries da temperatura máxima e mínima do ar apresentam um aumento significativo idêntico à temperatura média do ar, embora mais pronunciado para a mínima. Ao contrário da temperatura, a precipitação média anual acumulada apresenta uma diminuição significativa desde a década de 70, sendo que os meses de Primavera são os principais responsáveis pela tendência de diminuição anual. O aumento da temperatura em conjunto com a diminuição da precipitação origina um aumento da frequência de secas. O período de seca severa ou extrema verificado de Janeiro a Setembro de 2005 foi o mais extenso em termos de intensidade, no período 1901-2006.

Foram estudados os extremos de temperatura e precipitação para a bacia. De salientar a série da temperatura mínima absoluta que apresenta uma tendência de aumento significativa desde 1966, para o período 1941-2000.

Os índices climáticos têm uma importante função na identificação de extremos climáticos e no estudo da variabilidade climática e podem ser definidos de diferentes maneiras. Dos índices de temperatura considerados, o único que apresenta tendência significativa estatisticamente é o número anual de dias de geada ($T_{\min} \leq 0^{\circ}\text{C}$), o qual tem vindo a diminuir para o período 1941-2000. Esta tendência está claramente relacionada com a tendência significativa de aumento da temperatura mínima do ar. Os índices de precipitação podem ser utilizados para identificar episódios de chuva forte bem como a presença de anos secos. O número anual de dias sem precipitação apresenta uma tendência de aumento significativa, situação apenas verificada na zona Sul da bacia da ribeira.

Com o objectivo de caracterizar o estado actual da bacia da ribeira de Pardiela, foi instalada, no âmbito do presente trabalho, uma estação meteorológica no vale da ribeira. Tem-se procedido à manutenção regular da estação e os dados têm sido controlados diariamente de forma a garantir a sua qualidade e a minimizar as falhas. Os dados são armazenados na base de dados do CGE e estão acessíveis em <http://cge.dyndns.org/clima/>.

No que concerne ao contributo na monitorização da qualidade da água, o objectivo deste trabalho é o desenvolvimento de um método de detecção remota fiável, que permita a monitorização global e contínua de parâmetros fitoplanctónicos relacionados com a qualidade da água e estado trófico, nomeadamente a clorofila *a* e a densidade total de cianobactérias. Os métodos de observação remota podem ser muito úteis no apoio ao controle que actualmente é efectuado pelas entidades competentes e que está limitado a observações e medições *in situ*.

Foi desenvolvida uma metodologia para obter concentração de clorofila *a* densidade de cianobactérias, resultante da combinação de medições da reflectância espectral de satélite (MERIS) e de análises *in situ*. Uma questão crítica na obtenção de parâmetros de qualidade de água a partir de medidas de satélite é a existência de medições de alguns parâmetros atmosféricos que permitam uma correcção atmosférica adequada das imagens de satélite, sendo utilizadas no presente trabalho medições atmosféricas efectuadas regularmente no observatório do CGE, em Évora. As parametrizações foram conseguidas utilizando quatro anos de dados, desde 2003 para 2006. Um estudo de comparação entre os parâmetros fitoplanctónicos obtidos de medidas de satélite e as respectivas medidas *in situ* foi realizado utilizando dados de 2007. As boas correlações encontradas para a clorofila *a* ($R=0.84$) e cianobactérias ($R=0.97$) demonstram as grandes capacidades do sensor MERIS em monitorizar a qualidade de águas interiores. Além disso, as parametrizações quando aplicadas a toda a superfície da albufeira parecem ser consistentes, considerando as medidas *in situ* realizadas mensalmente em três locais diferentes da albufeira Alqueva.

A metodologia proposta pode constituir um instrumento valioso a ser utilizado em combinação com medições *in situ*, possibilitando a monitorização da qualidade de água de uma forma regular e económica, e contribuindo para a implementação de um sistema de vigilância, útil às autoridades responsáveis, no caso de serem detectados valores anómalos de parâmetros fitoplanctónicos.

Alguns aspectos poderão contribuir para melhorar o presente trabalho. Um dos temas abordados mais importante do trabalho desenvolvido é a correcção atmosférica, sendo para tal utilizadas medidas de concentração e tipo dos aerossóis, e de concentração de vapor de água, obtidas com o espectrofotómetro localizado no observatório do CGE em Évora, que fica a uma distância máxima de aproximadamente 40 km. A medição directa da reflectância espectral da superfície da água da Albufeira de Alqueva à hora da passagem do satélite ENVISAT permitiria a validação da reflectância espectral de superfície obtida após correcção atmosférica da radiância MERIS.

Por outro lado, a existência de mais medições *in situ* em outros locais da albufeira com largura superior à resolução espacial do MERIS ($300 \times 300 \text{ m}^2$), com maior frequência temporal e a horas próximas da passagem do satélite, iriam certamente contribuir para a diminuição do erro associado às parametrizações desenvolvidas para a determinação das concentrações de clorofila *a* e cianobactérias. Também o aumento do período de estudo com a utilização de um maior número de imagens de satélite poderá contribuir para o mesmo fim.

Bibliografia

- Bukata, R.P., J.H. Jerome, K.Ya. Kondratyev, and D.V. Pozdnyakov, 1995. Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters, *CRS Press*.
- Costa, M.J., 2004. Aerosol and cloud satellite remote sensing: monitoring and modelling using passive radiometers. *Ph.D thesis, Department of Physics of the University of Évora*, 233pp.
- Drikas, M.G., G. Newcombe, B. Nicholson, 2001. Water treatment options for cyanobacteria and their toxins. *Proceedings Water Quality Technology Conference*, November 11-15, Nashville, TN, Denver, CO, USA.
- Easterling, D.R., G.A. Meehl, C. Parmesan, S.A. Changnon, T.R. Karl, L.O. Mearns, 2000. Climate extremes: observations, modelling, and impacts. *Science*, **289**, 2068-2074.
- Feio, M., 1991. Clima e Agricultura. *Ministério da Agricultura, Pescas e Alimentação, Direcção-Geral de Planeamento e Agricultura*, Lisboa, 266 pp.
- Floricioiu, D., H. Rott, E. Rott, M. Dokulil, C. Defrancesco, 2004. Retrieval of limnological parameters of perialpine lakes by means of MERIS data. *Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium*, Salzburg, Austria.
- Gale, R.M., 1978. Water quality surveys. *IHD-WHO Studies and Reports in Hydrology*, UNESCO, Paris, 350 pp.
- Giardino, C., V.E. Brando, A.G. Dekker, N. Strömbeck, G. Candiani, 2007. Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion. *Remote Sens. Of Environ.*, **109**, 183-195.
- Holben B.N., T.F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J.P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J.A. Reagan, Y. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak, and A. Smirnov, 1998. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Rem. Sens. Environ.*, **66**,1-16.
- IPCC, 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., et al. (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, UK, and New York, USA, 881 pp. Disponível em http://grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, UK, and New York, 987 pp. Disponível em <http://www.ipcc.ch>

- Karl, T.R., R.W. Knight, and B. Baker, 2000. The record breaking global temperatures of 1997 and 1998: evidence for an increase in the rate of global warming? *Geophysical research letters*, **27**, 719-722.
- Klein Tank, A., J. Wijngaard, and A. van Engelen, 2002. Climate of Europe; Assessment of observed daily temperature and precipitation extremes. *KNMI, De Bilt, the Netherlands*, 36pp.
- Krige, D.G., 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *J. of the Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa*, **52**, 119-139.
- Lopes, C., 2007. 2º Relatório da Comissão Eventual para os Fogos Florestais. *Assembleia da republica*, 73 pp.
- Lorenzen C.J., 1967. Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations, *Limnol. Oceanogr.*, **12**.
- Martin, S., 2006. An introduction to ocean remote sensing. *Cambridge University Press*.
- Miranda, P., F. Abreu, R. Salgado, 1995. Estudo de impacto ambiental do Alqueva. *Relatório técnico do ICAT*.
- Jensen, J.R., 2000. Remote Sensing of the Environment: an earth resource perspective. *Prentice-Hall*. (Cota BISA U40-86)
- Jones, P.D., E.B. Horton, C.K. Folland, M. Hulme, D.E. Parker, T.A. Basnett, 1999. The use of indices to identify changes in climatic extremes. *Climate change*, **42**, 131-149.
- Lillesand, T.M., R. Kiefer, 2000. Remote Sensing and Image Interpretation. 4th edition, *Wiley*. (Cota BISA U40-88)
- Odermatt, D., J. Nieke, M. Kneubühler, K. Itten, 2007. Time Series of Automatically Determined Chlorophyll-a in Swiss Lakes based on MERIS Data in 2003-2006. *Proceedings of the Envisat Symposium 2007*, 23-27 April 2007, Montreux, Switzerland. SP-636, N° 462691.
- Palmer, W.C. 1965. Meteorological drought. *Research Paper*, **45**, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C., 58 pp.
- Peixoto, J. P., 1987. O Sistema climático e as bases físicas do Clima, SEARN-MPAT, 187 pp.
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. Lond., Ser. A*, **193**, 120-145.
- Peña-Martínez, R., J.A. Domínguez-Gómez, C. Hoyos, A. Ruiz-Verdú, 2003. Mapping of photosynthetic pigments in Spanish reservoirs. *MERIS user Workshop ESA-ESRIN*, Frascati, Itália.

- Pires, V., 2003. Frequência e intensidade de Fenómenos meteorológicos extremos associados a precipitação. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Ciências e Engenharia da Terra, Lisboa, 96 pp.
- Pires, V., 2008. CONTROLO DE QUALIDADE DOS DADOS: PREENCHIMENTO DE FALHAS EM SÉRIES DE TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO. NOTA TECNICA Nº DOMC1 19/2008-011. Instituto de Meteorologia, I.P. Lisboa, 16 pp.
- Reinart, A., and D. Pierson, 2004. Water Quality Monitoring of Large European Lakes using MERIS Full Resolution Data. *Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium*, Salzburg, Austria.
- Reis, M., F.R. Ferrão, M.H.L. Oliveira, 1992. Contribution to the study of trends in climatological séries of potencial evapotranspiration. *INMG, Divisão de Meteorologia Agrícola*, Lisboa, 46 pp.
- Robinson, I.S., 1983. Satellite observations of ocean colour, *Philos. Trans. Royal Soc. Of London, Series A, Volume 309*, 338-347.
- Salinger, M.J., 2003. Climate Variability and Change: Past present and future: An Overview, 44 pp.
- Santos, F.D., and P. Miranda, 2005. Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação (SIAM II). *Projecto SIAM*, Lisboa, 506 pp.
- Serafim, A., M. Morais, P. Guilherme, P. Sarmiento, M. Ruivo, and A. Magriço, 2006. Spatial and temporal heterogeneity in the Alqueva reservoir, Guadiana river, Portugal. *Limnetica*, **25**, 771-786.
- Sneyers, R., 1975. Sur L'Analyse Statistique Des Séries D'Observations. *OMM*, nº 415. 1-14.
- Tucker, C.J., I.Y. Fung, C.D. Keeling, and R.H. Gammon, 1986. Relationship between atmospheric CO₂ variations and a satellite-derived vegetation index. *Nature*, **319**, 195-199.
- Utermöhl, H., 1958. Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. *Mitteilungen Internationale Vereinigung Theoretische und Angewandte Limnologie*, **9**, 1-38.
- Vermote, E., D. Tanré, J.L. Deuzé, M. Herman, and J.J. Morcrette, 1997. Second simulation of the signal in the solar spectrum (6S): User guide version 2, 218pp.
- Wilks, D.S., 1995. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. *Academic Press*. Pp 115-133