

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

FACULDADE DE CIÊNCIAS DO MAR E AMBIENTE

**MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA
E DA QUALIDADE DA ÁGUA DA ALBUFEIRA DE ALQUEVA**

(dissertação para a obtenção do grau de mestre em Gestão e Conservação da Natureza)

ANA ROSARIA OLIVEIRA GONÇALVES

FARO

2008

NOME: Ana Rosária Oliveira Gonçalves

DEPARTAMENTO: Faculdade de Ciências do Mar e Ambiente

ORIENTADOR: Doutor Pedro Manuel da Silva Duarte

CO-ORIENTADOR: Doutor Luís Manuel Quintais Cancela da Fonseca

DATA: 10 de Julho de 2008

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Modelação Hidrodinâmica e da Qualidade da Água da Albufeira de Alqueva

JÚRI:

PRESIDENTE: Doutora Maria Leonor Quintais Cancela da Fonseca

VOGAIS: Doutor Pedro Manuel da Silva Duarte

Doutor Tomás Lopes Cavaleiro Ponce Dentinho

Doutor Luís Miguel de Amorim Ferreira Nunes

Doutor Luís Manuel Quintais Cancela da Fonseca

Guadiana: O rio *Ana*.

Uádi, rio em árabe, e Ana ou Anãs nome dado ao próprio rio pelos romanos.

Agradecimentos:

Ao Prof. Pedro Duarte pela sua fantástica e incansável orientação desta tese. A sua insuperável dedicação permitiu que concluísse um trabalho do qual me posso orgulhar.

Ao Prof. Luís Fonseca pelo importante apoio no acompanhamento da realização deste trabalho e a quem ainda devo uma Nossa Senhora de Fátima fluorescente que indica o estado do tempo.

À EDIA nas pessoas da Eng. Ana Ilhéu, Eng. Martinho Murteira e Eng. David Carreira, pela facultação dos dados das campanhas de amostragem e topografia.

A todas as pessoas que têm vindo a trabalhar comigo nos Serviços Sub-regionais de Beja da CCDR por toda a paciência demonstrada, nomeadamente ao Eng. Rui Sequeira por ter possibilitado a compatibilização entre o trabalho e o desenvolvimento do mestrado.

Ao Dr. André Matoso pelo apoio constante ao longo dos últimos meses, quando aumenta a dificuldade na conciliação do trabalho com a realização desta tese. Tudo se torna mais fácil quando sabemos que não estamos sozinhos.

À Alice, pela amizade demonstrada, o acompanhamento e o aconchego que me faz sentir ensinando-me a viver um mundo novo; e ao Quim Zé, pelos constantes, mesmo que indirectos, incentivos para fazer sempre um pouco mais, e a nunca desistir.

A todos os meus mesmo amigos que vêm acompanhando o meu percurso sem nunca deixar de dar todo o apoio sempre que necessário: o Dias, o Chaveiro, a Sónia, o João, o Luís, o Balsa e o Paulinho; assim como aqueles que os tem vindo a fazer mais felizes, a Ana, o Rubim, o João, a Flor e a Fátima.

Em especial, à Nice e à sua caneta vermelha que está sempre disposta a entrar ao serviço na correcção dos meus trabalhos, e à Alex pela disponibilidade para ajudar e pelo incrível talento na realização da capa.

Ao "pai" Orlando, à "mãe" Elizabete e à "mãe" Otília, que foram a minha segunda família e de quem fui a "menina" nas minhas constantes viagens ao Porto.

Um obrigado muito especial à Mara e aos seus homens, e que daqui a dez anos me consiga aproximar da grande mulher que ela é hoje.

À minha família que é a base de todas as minhas conquistas, em especial à maíinha, ao pápi e ao Cisco por tudo.

Ao Edgar, por saber do que sou capaz.

Resumo:

A modelação matemática pode ser uma ferramenta útil de apoio à decisão, pois permite avaliar diferentes cenários de gestão de um ecossistema integrando o conhecimento sobre ele existente. A utilização de modelos matemáticos está prevista na Directiva Quadro da Água (DQA), embora sem uma clara referência aos tipos de utilização esperados, ou a quaisquer especificações técnicas dos referidos modelos. Os trabalhos de modelação realizados até ao presente sobre a albufeira de Alqueva foram baseados em modelos com simplificações pouco realistas, sobretudo nas situações em que a circulação hidrodinâmica depende menos dos caudais afluentes e mais da velocidade e direcção do vento. Em função do exposto, implementou-se um modelo tridimensional para a referida albufeira, com o objectivo de avaliar a contribuição relativa dos caudais fluviais e do vento nos processos de mistura/estratificação vertical da água. Os objectivos do trabalho incluem ainda a avaliação da importância relativa das descargas fluviais e dos processos físicos, químicos e biogeoquímicos na qualidade da água de Alqueva. O software utilizado para implementar o modelo, o EcoDynamo (Ecological Dynamics Model), é baseado numa metodologia de programação orientada por objectos. O modelo simula os processos hidrodinâmicos, os processos termodinâmicos e os processos biogeoquímicos. O modelo foi implementado e os resultados obtidos apresentam uma boa aproximação à evolução observada de algumas das variáveis estudadas. Conseguiram-se bons resultados no que diz respeito à estratificação e demonstrou-se que a circulação residual no Verão é condicionada pelo vento dominante e pouco influenciada pelos caudais afluentes. Os teores de oxigénio dissolvido e as concentrações dos nutrientes são fundamentalmente condicionados pelos processos biogeoquímicos internos.

Palavras-chave: modelação, albufeira de Alqueva, hidrodinâmica, estratificação vertical, qualidade da água, EcoDynamo.

Title: Hydrodynamic and Water Quality Modelling in Alqueva Reservoir

Abstract:

Mathematical modelling helps decision makers by incorporating full knowledge of ecosystems to be taken into account in the evaluation of several complex ecosystems management scenarios. The European Water Framework Directive establishes the basis for Community action in water policy, and refers the usage of mathematical models. Previous water quality modelling works in Alqueva reservoir were based in simplified and less realistic models, especially when concerning hydrodynamics that depend more on wind speed and direction, then on stream flows, during summer. Hence, implementing a three-dimensional model allowed the evaluation of wind and streams contribution to stratification regimes. The main objectives to this work were to qualify the comparative importance of the physical, chemical and biological processes in Alqueva water quality. EcoDynamo (Ecological Dynamics Model) is an application built to enable physical and biogeochemical simulation processes of aquatic ecosystems. It's an object oriented program application. The simulated processes include: hydrodynamics of aquatic systems: current speeds and directions; thermodynamics: energy balances between water and atmosphere and water temperature; biogeochemical: nutrient and biological species dynamics; and anthropogenic pressures, such as biomass harvesting. The results of the implemented model show that for some of the variables, the model responded effectively. It was able to represent the water stratification as well as the dependence of summer residual currents on dominant wind rather than on stream flows. Dissolved oxygen and nutrient concentrations are strongly conditioned by biogeochemical internal processes.

Key-words: Modelling, Alqueva reservoir, hydrodynamics, vertical stratification, water quality, EcoDynamo.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento geral	1
1.2. Âmbito e objectivo	3
1.3. Organização do texto	4
2. Estado da arte	5
2.1. Área de estudo	5
2.1.1. Bacia hidrográfica do rio Guadiana.....	5
2.1.2. O empreendimento de Alqueva	6
2.1.3. Barragem de Alqueva	7
2.1.4. Hidrografia.....	9
2.1.5. Climatologia.....	11
2.1.6. Fisiografia	15
2.1.7. Solos e ocupação do solo	17
2.1.8. Fontes de poluição.....	18
2.1.9. Conservação da Natureza	19
2.2. Qualidade da água	20
2.2.1. Principais impactes resultantes da criação de uma albufeira	20
2.2.2. Análise preliminar da qualidade da água.....	22
2.2.3. Qualidade da água antes e depois da albufeira de Alqueva	23
2.3. Avaliação do estado trófico	25
2.3.1. Classificação do estado trófico	25
2.3.2. Albufeiras do Alentejo	26
2.3.3. Albufeira de Alqueva.....	28
2.4. Modelação da qualidade da água da albufeira de Alqueva	28
2.4.1. Resumo histórico.....	29

3. Metodologia	32
3.1. Modelo da albufeira de Alqueva	32
3.2. Dados forçadores	40
3.2.1. Origem dos dados	41
3.2.2. Dados meteorológicos.....	44
3.2.3. Dados de qualidade da água	49
3.3. Dados para comparação entre valores observados e valores do modelo	53
3.4. Organização e metodologia das simulações	54
3.4.1. Organização das simulações.....	54
3.4.2. Determinação do passo de cálculo	58
3.5. Análise do desempenho e verificação do modelo	59
4. Resultados e discussões	60
4.1. Série I – Implementação do modelo	60
4.1.1. Simulações I.1.	60
4.1.2. Simulação I.2.	65
4.1.3. Simulações I.3.	68
4.1.4. Simulações I.3.V, I.3.DH e I.3.DMV	74
4.2. Série II – Processos físicos, químicos e biológicos	77
4.2.1. Simulação II.1.	77
4.2.2. Simulação II.2.	79
4.2.3. Simulação II.3.	86
4.2.4. Simulações II.4., II.4.Pmax e II.4.Iopt.....	92
4.3. Comparação dos principais resultados dos trabalhos de modelação na albufeira de Alqueva	95
5. Conclusões.....	97
6. Referências Bibliográficas	100

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Bacias hidrográficas Luso-Espanholas (adaptado de MAA (2006)) e bacia hidrográfica portuguesa do Guadiana.....	5
Figura 2.2 – Bacia hidrográfica portuguesa da albufeira de Alqueva.....	8
Figura 2.3 – Rede Hidrográfica da albufeira de Alqueva, com identificação dos três braços principais.	9
Figura 2.4 – Sub-bacias hidrográficas da albufeira de Alqueva.	11
Figura 2.5 – Distribuição espacial da temperatura do ar média anual (°C), precipitação anual total (mm) e escoamento médio anual (mm) na bacia hidrográfica da albufeira de Alqueva - da esquerda para a direita (adaptada de IA (2003)).....	13
Figura 2.6 – Distribuição espacial da insolação média anual (horas), humidade relativa do ar (%) às 9 T.M.G (média anual) e evapotranspiração real média anual (mm) na bacia hidrográfica da albufeira de Alqueva - da esquerda para a direita (adaptado de IA (2003)).....	15
Figura 2.7– Histograma representativo da curva hipsométrica de classes de altitude, da área interior ao NPA da albufeira de Alqueva (adaptado de INAG (2000a)).	16
Figura 2.8 – Variação mensal da concentração de fósforo total em mg.l^{-1} de P, na albufeira de Alqueva, em três níveis de profundidade e ordenados de montante para jusante (adaptado de Gonçalves (2005)).	23
Figura 2.9 – Variação mensal da concentração de Clorofila <i>a</i> em $\mu\text{g.l}^{-1}$, na zona eutrófica, na albufeira de Alqueva, ordenados de montante para jusante (adaptado de Gonçalves (2005)).	28
Figura 3.1 – Visualização do interface principal do modelo sobreposta com a janela de selecção de variáveis.	32
Figura 3.2 – Identificação do domínio e sub-domínio.	39
Figura 3.3 – Localização das estações meteorológicas automáticas SNIRH seleccionadas e dos locais de amostragem da EDIA.....	43

Figura 3.4 – Dados de batimetria para uma resolução de 200 m por 200 m. Profundidades com valor positivo e altitudes com valor negativo relativo ao NPA, cota 152 m.	44
Figura 3.5 – Valores horários da temperatura do ar para o ano de 2004 (°C).....	45
Figura 3.6 - Valores horários de humidade relativa do ar para o ano de 2004 (%).....	45
Figura 3.7 - Valores horários da velocidade do vento para o ano de 2004 (m.s ⁻¹).....	46
Figura 3.8 - Valores horários da direcção do vento para o ano de 2004 (rad).....	46
Figura 3.9 – Valores horários da radiação solar para o ano de 2004 (W.h.m ⁻²).....	47
Figura 3.10 - Valores médios diários de caudal afluente para parte do ano de 2006 (m ³ .s ⁻¹).....	48
Figura 3.11 - Valores médios diários de caudal efluente para parte do ano de 2006 (m ³ .s ⁻¹).....	48
Figura 3.12 – Localização dos pontos de descarga do efluente e dos afluentes no modelo da albufeira de Alqueva.....	49
Figura 3.13 – Valores de temperatura da água observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 (°C).	50
Figura 3.14 – Valores de oxigénio dissolvido observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 (mg.l ⁻¹).	50
Figura 3.15 – Valores de nitratos observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 (µg.l ⁻¹).....	51
Figura 3.16 – Valores de nitritos observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 (µg.l ⁻¹).....	51
Figura 3.17 – Valores de azoto amoniacal observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 (µg.l ⁻¹).	51
Figura 3.18 – Valores dos fosfatos observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 (µg.l ⁻¹).....	52

Figura 3.19 – Valores de sólidos suspensos totais observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 (mg.l^{-1}).....	52
Figura 3.20 – Valores de clorofila <i>a</i> observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 ($\mu\text{g.l}^{-1}$).....	52
Figura 3.21 – Localização das estações meteorológicas automáticas SNIRH seleccionadas e dos locais de amostragem da EDIA.....	54
Figura 4.1 – Simulação I.1. (cf. - 3.4.1) com 5 camadas verticais. Distribuição espacial da temperatura da água simulada ($^{\circ}\text{C}$).	61
Figura 4.2 – Simulação I.1. (cf. - 3.4.1) com 7 camadas verticais. Distribuição espacial da temperatura da água simulada ($^{\circ}\text{C}$) para as 4 camadas superficiais.	61
Figura 4.3 – Simulações I.1. (cf. – 3.4.1) com 5 e 7 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores observados e simulados pelo modelo para a temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” (AMontante) e “Albufeira de Alqueva – Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).	62
Figura 4.4 – Simulação I.1. (cf. - 3.4.1) com 5 camadas verticais. Perfis verticais de temperatura da água simulada ($^{\circ}\text{C}$) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” e “Albufeira de Alqueva – Mourão” (cf. – 3.3).....	63
Figura 4.5 – Simulação I.1. (cf. - 3.4.1) com 7 camadas verticais. Perfis verticais de temperatura da água simulada ($^{\circ}\text{C}$) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” e “Albufeira de Alqueva – Mourão” (cf. – 3.3).....	63
Figura 4.6 – Simulação I.1. (cf. - 3.4.1) com 7 camadas verticais. Variação temporal do balanço energético à superfície (W.m^{-2}) em “Albufeira de Alqueva-Montante” e “Albufeira de Alqueva – Mourão” (cf. – 3.3).....	64
Figura 4.7 – Simulação I.2. (cf. - 3.4.1) com 5 camadas verticais. Distribuição espacial da temperatura da água simulada ($^{\circ}\text{C}$).	65

Figura 4.8 – Simulação I.2. (cf. – 3.4.1) com 5 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores simulados pelo modelo para a temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” (AMontante) e “Albufeira de Alqueva – Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).	66
Figura 4.9 – Simulação I.2. (cf. - 3.4.1) com 5 camadas verticais. Perfis verticais de temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” (cf. – 3.3).	67
Figura 4.10 – Simulação I.2. (cf. - 3.4.1) com 5 camadas verticais. Campos de velocidades médias das correntes na confluência do rio Alcarrache. Os contornos da albufeira são delimitados pelas profundidades dentro das respectivas camadas.	68
Figura 4.11 – Simulação I.3. (cf. - 3.4.1) com 7 camadas verticais à superfície. Distribuição espacial da temperatura (°C). Destaque para a camada de superfície na descarga de montante (início do regolfo da albufeira) e para a ribeira de Lucefecit.	69
Figura 4.12 – Simulações I.2. e I.3. (cf. – 3.4.1) com 5 camadas verticais. Campos de velocidades médias das correntes à superfície. Representação de 4 pontos de descarga de afluentes colocados por ordem decrescente de caudal descarregado: Rio Degebe, Montante, Ribeira de Alcarrache e ribeira de Guadelim e ribeira de Lucefecit. Os contornos da albufeira são delimitados pelas profundidades dentro das respectivas camadas.	70
Figura 4.13 – Simulações I.1, I.2. e I.3. (cf. – 3.4.1) com 5 e 7 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores observados e simulados pelo modelo para a temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” (AMontante) (cf. – 3.3).	70
Figura 4.14 – Simulação I.3. (cf. - 3.4.1) com 5 camadas verticais. Perfis verticais de temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” (cf. – 3.3).	71
Figura 4.15 – Simulação I.3. (cf. - 3.4.1) com 7 camadas verticais. Perfis verticais de temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” (cf. – 3.3).	71
Figura 4.16 – Simulação I.3. (cf. - 3.4.1) com 7 camadas verticais. Distribuição espacial da temperatura da água simulada (°C) das 4 camadas mais superficiais.	72

- Figura 4.17 – Simulação I.3. (cf. - 3.4.1) com 7 camadas verticais. Campos de velocidades médias das correntes na confluência do rio Alcarrache. Os contornos da albufeira são delimitados pelas profundidades dentro das respectivas camadas. 73
- Figura 4.18 – Simulações I.1, I.2, I.3, I.3.V, I.3.DH e I.3.DMV (cf. – 3.4.1) com 5 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores simulados pelo modelo para a temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” (AMontante) (cf. – 3.3). 74
- Figura 4.19 – Simulações I.3.V, I.3.DH e I.3.DMV, (cf. - 3.4.1) com 5 camadas verticais. Perfis verticais de temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” (cf. – 3.3). 75
- Figura 4.20 – Simulações I.3.V, I.3.DH e I.3.DMV (cf. - 3.4.1) com 7 camadas verticais. Campos de velocidades médias das correntes, na confluência do rio Alcarrache. A imagem b) corresponde a um excerto da imagem a). A imagem b) tem o dobro da resolução. Os contornos da albufeira são delimitados pelas profundidades dentro das respectivas camadas. 76
- Figura 4.21 – Simulação II.1. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Distribuição espacial da temperatura da água (°C) simulada para as 3 camadas superficiais. 77
- Figura 4.22 – Simulação II.1. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores observados e simulados pelo modelo para a temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva – Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3). 78
- Figura 4.23 – Simulação II.1. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Perfis verticais de temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (cf. – 3.3). 79
- Figura 4.24 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais, para o dia 5 de Agosto de 2008. Distribuição espacial da temperatura da água simulada (°C). 80
- Figura 4.25 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Campos de velocidades médias das correntes das 2 primeiras camadas, na confluência das ribeiras do Álamo e da Pêga (cf. – Figura 2.4). Os contornos da albufeira são delimitados pelas profundidades à superfície. 80

Figura 4.26 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores observados e simulados pelo modelo para a temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).	81
Figura 4.27 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de temperatura da água (°C) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).....	82
Figura 4.28 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores observados e simulados pelo modelo para o oxigénio dissolvido (mg O ₂ .l ⁻¹) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).	83
Figura 4.29 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de oxigénio dissolvido (mg O ₂ .l ⁻¹) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).	83
Figura 4.30 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de azoto amoniacal (μmol NH ₄ ⁺ - N.l ⁻¹) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).	84
Figura 4.31 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de nitratos (μmol NO ₃ ⁻ - N.l ⁻¹) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).	85
Figura 4.32 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de nitritos (μmol NO ₂ ⁻ - N.l ⁻¹) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3). ..	86
Figura 4.33 – Simulação II.2. (cf. - 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de fosfatos (μmol PO ₄ ³⁻ - P.l ⁻¹) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3). ..	86
Figura 4.34 – Simulação II.3. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores observados e simulados pelo modelo para o oxigénio dissolvido (mg O ₂ .l ⁻¹) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).	87
Figura 4.35 – Simulação II.3. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de oxigénio dissolvido (mg O ₂ .l ⁻¹) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).	88

- Figura 4.36 – Simulação II.3. (cf. - 3.4.1) com 6 camadas verticais à superfície. Distribuição espacial da concentração de oxigénio dissolvido ($\text{mg O}_2\cdot\text{l}^{-1}$). Destaque para a camada de superfície na descarga de montante (início do regolfo da albufeira) e para a ribeira de Lucefecit. 88
- Figura 4.37 – Simulação II.3. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de azoto amoniacal ($\mu\text{mol NH}_4^+ - \text{N}\cdot\text{l}^{-1}$) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3). 89
- Figura 4.38 – Simulação II.3. (cf. - 3.4.1) com 6 camadas verticais à superfície. Distribuição espacial da concentração de nitratos ($\mu\text{mol NO}_3^- - \text{N}\cdot\text{l}^{-1}$). Destaque para a camada de superfície na descarga de montante (início do regolfo da albufeira) e para a ribeira de Lucefecit. 90
- Figura 4.39 – Simulação II.3. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de nitratos ($\mu\text{mol NO}_3^- - \text{N}\cdot\text{l}^{-1}$) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3). 90
- Figura 4.40 – Simulação II.3. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de nitritos ($\mu\text{mol NO}_2^- - \text{N}\cdot\text{l}^{-1}$) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3). . 91
- Figura 4.41 – Simulação II.3. (cf. - 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de fosfatos ($\mu\text{mol PO}_4^{3-} - \text{P}\cdot\text{l}^{-1}$) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3). 92
- Figura 4.42 – Simulação II.4. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores observados e simulados pelo modelo para o oxigénio dissolvido ($\text{mg O}_2\cdot\text{l}^{-1}$) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3). 92
- Figura 4.43 – Simulações II.4.Pmax e II.4.Iopt (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores observados e simulados pelo modelo para o oxigénio dissolvido ($\text{mg O}_2\cdot\text{l}^{-1}$) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3). 93
- Figura 4.44 – Simulação II.4. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de azoto amoniacal ($\mu\text{mol NH}_4^+ - \text{N}\cdot\text{l}^{-1}$) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3). 94

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Principais rios drenantes da bacia hidrográfica da albufeira de Alqueva e respectivas áreas de escoamento.	10
Tabela 2.2 – Distribuição da carga poluente afluente à albufeira de Pedrógão, área e escoamento anual correspondente (retirado de EDIA, (2003a)).	19
Tabela 2.3 – Critério de avaliação do estado para lagoas e albufeiras (<i>in</i> INAG, (2004b)).....	26
Tabela 2.4 – Classificação do estado trófico de 21 albufeiras do Alentejo nos anos hidrológicos 2000/2001 a 2004/2005.	27
Tabela 3.1 – Objectos do EcoDynamo e principais variáveis associadas (adaptado de Pereira e Duarte (2005)).	37
Tabela 3.2 – Principais características das estações meteorológicas e hidrométricas seleccionadas e número de dados para cada um dos parâmetros utilizados. As estações seleccionadas são do tipo automática com transmissão de dados por telemetria.....	42
Tabela 3.3 – Principais características das estações de qualidade seleccionadas e número de dados para cada um dos parâmetros utilizados. As estações seleccionadas são do tipo automática com transmissão de dados por telemetria.....	53

1. Introdução

1.1. Enquadramento geral

A água é essencial a todas as formas de vida. Actualmente, dois terços da superfície terrestre estão cobertos por mares e oceanos, num total de 1 386 000 000 km³. Apesar da água ser um recurso renovável, apenas 3 % da sua totalidade é doce e somente 0,26 % desta é potável (Gleick, 1996). Para o consumo humano, mesmo esta quantidade de água aproveitável é um recurso com distribuição heterogénea no espaço e no tempo. Segundo INAG (2006b), cerca de 1 200 milhões de pessoas em todo o mundo não têm acesso a água potável e o seu consumo e necessidade crescem exponencialmente de dia para dia.

Em resposta a esta escassez e distribuição, foi sentida a necessidade de construir barragens para a criação de reservas estratégicas de água tendo em conta a sua utilização. Num panorama mundial onde aproximadamente 60 % dos grandes rios são considerados modificados ou fragmentados, cerca de 3/5 dos grandes rios são regulados por barragens, não incluindo os projectos de irrigação (WCD, 2000; Nilson et al., 2005). Pelo menos quarenta e cinco mil grandes barragens foram construídas em todo o mundo para atender à procura de água ou energia. Em média, as taxas de evaporação das grandes barragens poderão atingir os 5 % (WCD, 2000). À escala global, as barragens aumentam o tempo de residência das águas nos rios, por um factor de 3: de 16 para 47 dias. O volume retido mundialmente por barragens é cerca de 8 400 km³, comparado com os 1 200 km³ a que corresponde o volume de água nos rios (não represados) representa um aumento de 700 % da água que não flui (Vörösmarty et al., 1997; Bergkamp et al., 2000).

Embora a criação de reservatórios artificiais seja necessária, Crouzet et al. (1999) e Bergkamp et al. (2000), entre outros, mostram que os impactes sobre os ecossistemas são inevitáveis, profundos, complexos, variados, múltiplos, cumulativos e, na sua maior parte, irreversíveis e negativos, tanto durante como após a construção da barragem. No entanto, sendo algumas mudanças óbvias, outras suscitam dúvidas. Algumas podem apenas manifestar-se a longo termo como a destruição dos ecossistemas, a degradação das áreas de captação a montante devido à inundação da área do reservatório, a redução da biodiversidade aquática, a diminuição das áreas de desova a montante e a

jusante, bem como o declínio dos serviços ambientais prestados pelas planícies aluviais a jusante (Oliveira et al., 2000; WCD, 2000).

A construção de barragens leva a alterações no regime de escoamento com a diminuição da velocidade e aumento do tempo de permanência/retenção. Assim, a taxa de sedimentação cresce abruptamente levando ao assoreamento da albufeira, à erosão do leito aluvial a jusante do corpo da barragem e à modificação da vegetação ripícola, aumentando exponencialmente o risco de eutrofização (Morris e Fan, 1998; Rocha, 2002). Também o leito é alterado, quer em termos paisagísticos, quer em termos geomorfológicos (Friedl, 2002; Rocha, 2002).

A transformação de um sistema fluvial num sistema lacustre provoca alterações nas características da massa de água, tanto mais acentuadas quanto maiores forem as variações inter e intra-anuais dos rios afluentes (Friedl, 2002, Huang e Foo, 2002). De acordo com Edwards (1973), os afluentes são os principais responsáveis pela variação da qualidade da água.

A eutrofização é causada pelo excesso de nutrientes. É alterado o equilíbrio do ecossistema com consequente deterioração da qualidade da água, condicionando a sua utilização. As mudanças devido ao enriquecimento das águas são inicialmente benéficas. Porém, com o aumento da quantidade de nutrientes e/ou matéria orgânica num ecossistema aquático, resulta numa maior produtividade primária e numa consequente diminuição do volume total do ecossistema. Alguns exemplos nefastos desta degradação são: a diminuição da transparência da água, a proliferação das plantas aquáticas que constituem um obstáculo à prática da navegação de lazer e incómodo para o banho, a complicação nos processos de tratamento das águas para a distribuição de água potável, o sabor e odor desagradáveis, a redução da biodiversidade aquática e terrestre e consequente degradação da qualidade da paisagem.

Nas albufeiras da região do Alentejo regista-se uma tendência geral para a eutrofização. A intensificação agrícola e a conversão de culturas de sequeiro em regadio e a desadequação dos sistemas de tratamento de águas residuais associadas às condições hidro-climáticas características da região são os factores de maior risco. Como medida de protecção, de acordo com SNIRH (2008), as massas de água encontram-se já classificadas como:

- zonas vulneráveis: protecção das águas contra a poluição difusa causada por nitratos de origem agrícola, de acordo com a Directiva 91/676/CEE¹.
- zonas sensíveis: protecção das águas superficiais dos efeitos das descargas das águas residuais urbanas conforme o estipulado na Directiva 91/271/CEE².

A Directiva-Quadro da Água (DQA) da União Europeia (European Commission, 2000), conduziu a uma abordagem mais holística no que se refere à gestão da água³. Os Estados-Membros devem pôr em prática programas de medidas destinados a assegurar que as massas de água na União Europeia alcancem um "bom estado ecológico" até 2015.

Em função do exposto, é indispensável fazer uma gestão integrada de todos os recursos inerentes às albufeiras. Como ferramenta de apoio à decisão, a monitorização é um dos principais instrumentos de informação. A DQA e consequente transcrição nacional (Lei da Água - Lei n.º 58/2005, de 29 de Dezembro) obriga à caracterização e monitorização das regiões hidrográficas, no quadro de uma política sustentável de uso da água. A utilização de modelos matemáticos, permite avaliar diferentes cenários de gestão integrando o conhecimento existente e assim, ajudar a compatibilizar necessidades ao nível do uso e qualidade da água, em conjunto com a conservação do património natural.

As técnicas de modelação são usadas extensivamente tendo em atenção a protecção, conservação, manutenção e gestão da qualidade ambiental dos recursos (Haefner, 1996; Portela, 1996; Antunes, 1998; Saraiva, 2005; Trindade, 2005; Pereira et al., 2006; e outros).

1.2. Âmbito e objectivo

Apesar da importância da monitorização ambiental, como forma de seguir a evolução do estado ecológico da albufeira de Alqueva, importa utilizar ferramentas que permitam fazer uma previsão da

¹ Transposta para o direito interno português através do Decreto-Lei n.º 235/97, de 3 de Setembro.

² Transposta para o direito interno português através do Decreto-Lei n.º 152/97, de 19 de Junho.

³ As Directivas 91/271/CEE, 91/767/CEE e 96/61/CE são consideradas como "medidas básicas" no âmbito da DQA (Directiva 2000/60/CE) e deve haver um compromisso de coordenação e, sempre que necessário, estas devem ser complementadas para alcançar os objectivos impostos.

sua evolução, sobretudo a nível da qualidade da água. Assim, o objectivo deste trabalho é implementar um modelo para simular a variabilidade temporal e espacial da qualidade da água da albufeira de Alqueva, procurando identificar os fenómenos que mais contribuem para a eutrofização. Assim, o modelo será utilizado para responder à seguinte pergunta:

- Qual é a importância relativa dos processos termodinâmicos, hidrodinâmicos, químicos e biológicos na estratificação térmica e na qualidade da água da albufeira de Alqueva?

A qual se decompõe em quatro objectivos de âmbito específico:

- implementar um modelo tridimensional para a albufeira de Alqueva;
- avaliar a contribuição relativa dos caudais fluviais;
- avaliar a importância relativa dos processos termodinâmicos, hidrodinâmicos, com especial enfoque para a consideração do vento, na estratificação vertical da albufeira de Alqueva;
- avaliar a importância relativa dos processos biogeoquímicos na qualidade da água da albufeira de Alqueva.

1.3. Organização do texto

De modo a responder a estas questões, o presente trabalho está organizado em cinco partes. No capítulo 2 caracteriza-se a área de estudo (sub-capítulo 2.1) e a qualidade da água da albufeira de Alqueva (sub-capítulo 2.2). É feita uma síntese dos principais estudos realizados na temática da modelação da qualidade da água da albufeira de Alqueva. No capítulo 3 descreve-se o modelo utilizado neste trabalho, as funções forçadoras e as simulações efectuadas, com vista ao cumprimento dos respectivos objectivos. No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos pela calibração do modelo e discutidos os resultados das diferentes simulações e, finalmente no capítulo 5 são apresentadas as conclusões.

2. Estado da arte

2.1. Área de estudo

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica e a albufeira de Alqueva localizadas no Sul de Portugal, na região do Alentejo. A albufeira de Alqueva situa-se no troço principal do Rio Guadiana constituindo o maior lago artificial da Península Ibérica, com uma esfera de influência supranacional. O encerramento das comportas realizou-se a 8 de Fevereiro de 2002, dando início ao primeiro enchimento da albufeira de Alqueva.

2.1.1. Bacia hidrográfica do rio Guadiana

O Guadiana, sendo um rio internacional, dá origem à quarta maior bacia hidrográfica da Península Ibérica, onde apenas 17,2 % da sua área total (66 800 km²) se localizam em solo português. O rio Guadiana nasce nas lagoas de Ruidera, em Campo Montiel (Espanha) a 1 700 m de altitude, estendendo-se por 810 km até à sua foz no Oceano Atlântico, entre Vila Real de Santo António e Ayamonte. Em território português o rio percorre 260 km, dos quais 110 km são fronteiriços. A bacia estende-se na direcção E-W em Espanha e N-S em Portugal (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Bacias hidrográficas Luso-Espanholas (adaptado de MAA (2006)) e bacia hidrográfica portuguesa do Guadiana.

A bacia, estreita e comprida, é acompanhada de vales encaixados, maioritariamente entre os 50 e os 100 m de altitude, com uma rede hidrográfica muito densa. Os seus principais afluentes em Portugal são os rios Caia, Degebe, Cobres, Vascão e Odeleite, na margem direita e Ardila e Chança na margem esquerda. O perfil longitudinal é muito regular com excepção da planície aluvial onde o rio se espraia entre Mérida e Badajoz (INAG, 2006a).

2.1.2. O empreendimento de Alqueva

O projecto da barragem de Alqueva teve início nos anos 50, tendo surgido no 2.º Plano de Fomento do Estado Novo, integrado no Plano de Rega do Alentejo. Os principais objectivos eram o desenvolvimento da região, com o abastecimento de água a uma parte significativa do Baixo Alentejo, de modo a satisfazer as necessidades das populações e proporcionar água de rega.

As albufeiras de Alqueva e de Pedrógão são parte da estratégia de desenvolvimento económico da região do Baixo Alentejo, integradas no projecto de Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva (EFMA). Este tem como objectivo o abastecimento público, a rega e a produção de energia eléctrica, a partir desta reserva estratégica de água, criando um plano de água contínuo.

O EFMA (criado pelo Decreto-Lei n.º 33/95, de 11 de Fevereiro) representa uma obra de aproveitamento estratégico dos recursos naturais e tem como finalidade o desenvolvimento regional económico e social. Como resultado da magnitude dos impactes ambientais e sociais, o EFMA tem sido um projecto controverso.

A Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva, S.A. (EDIA) foi criada pelo Ministério do Planeamento e da Administração do Território no Decreto-Lei n.º 32/95, de 11 de Fevereiro. Tem como objectivos a concepção, a execução, a construção e a exploração do EFMA.

Segundo o Decreto-Lei que o criou, tem os seguintes objectivos:

- Constituir uma reserva estratégica de água que regularize o rio Guadiana;
- Garantir o abastecimento de água para consumo industrial, agrícola e humano (regularizar o abastecimento nos distritos de Beja e Évora);

- Alterar o sistema agrícola do sul do país, de sequeiro para regadio, disponibilizando uma área de rega de 110 mil hectares;
- Produzir energia hidroelétrica;
- Criar potencialidades turísticas a partir das margens da albufeira;
- Combater a desertificação física e as alterações climáticas com a introdução de um coberto vegetal que permita a fixação dos solos, combatendo a erosão;
- Articular o ambiente e o ordenamento do património, potenciando as áreas de relevância temática;
- Dinamizar o mercado de emprego regional.

2.1.3. Barragem de Alqueva

A barragem é do tipo Arco – Abóbada (de dupla curvatura), localizada a 38° 11' 43'' de latitude e 7° 29' 42'' de longitude, fundada em rocha, tem uma cota de 154 m, com um coroamento de 458 m de comprimento e 7 de largura, localizado a 96 m acima da fundação. Apresenta dois descarregadores de superfície tipo soleira WES⁴ com canal a jusante em forma de trampolim como forma de dissipação de energia, cuja cota da crista é de 139 m, descarregando cerca de 6 300 m³.s⁻¹. A barragem tem ainda um descarregador de fundo incorporado na galeria de derivação provisória, em que a secção da conduta é de 3 m, com dissipação de energia sob a forma de trampolim e um caudal máximo de 160 m³.s⁻¹ (EDIA, 2004; CNPGB, 2007).

A central hidroelétrica, situada no pé da barragem com bombagem, está equipada com 2 grupos reversíveis tipo Turbo/Francis, com uma potência máxima no eixo de 120 MW por grupo e produz num ano médio 269 GWh de energia (INAG, 2000a; CNPGB, 2007). A barragem de Pedrógão, situada a 22,3 km a jusante da barragem de Alqueva, desempenha a função de: (i) atenuar o impacto da concentração dos caudais turbinados na central de Alqueva; e (ii) maximizar os benefícios da componente hidroelétrica do empreendimento, exercendo contra-embalse da barragem de Alqueva. Esta condição permite que a central hidroelétrica de Alqueva possa funcionar de forma reversível,

⁴ Waterways Experiment Station – United States Army Corps of Engineers

aproveitando os períodos de tarifa de electricidade mais económicos. A barragem é em betão compactado com cilindros, com o perfil de gravidade e cerca de 42 m de altura.

A albufeira de Alqueva situa-se na bacia hidrográfica do Guadiana, mais propriamente no leito do rio a 11 km a NW de Moura, no distrito de Beja. A albufeira criada com o nível de pleno armazenamento (NPA) à cota 152 m, estende-se por 83 km com margens dentiformes a ultrapassar os 1 100 km de extensão e uma área de drenagem aproximada de 55 000 km², em que apenas 4 310 km² são em Portugal (Figura 2.2) repartidos por dezasseis concelhos.

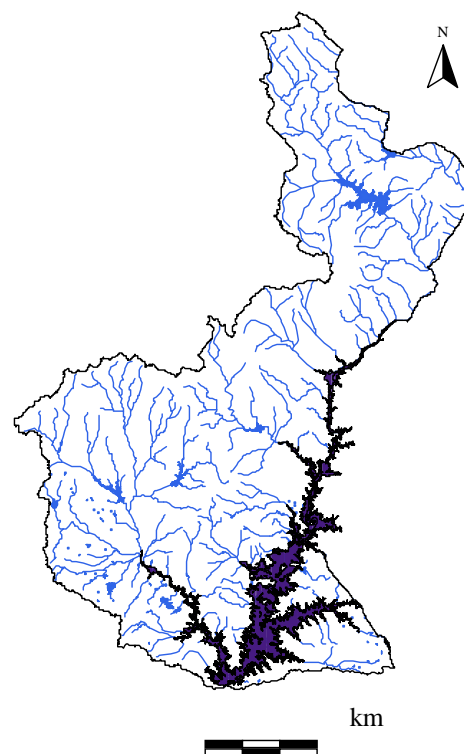


Figura 2.2 – Bacia hidrográfica portuguesa da albufeira de Alqueva.

A albufeira que ainda se encontra na fase do primeiro enchimento, terá um espelho de água de 250 km², distribuídos por oito concelhos portugueses: Elvas, Alandroal, Vila Viçosa, Évora, Reguengos de Monsaraz, Mourão, Portel e Moura. Juntamente com os 35 km² em Espanha, província de Badajoz e Comunidad de Extremadura, a albufeira originará um volume total de armazenamento de 4 150 hm³ dos quais 3 150 hm³ são capacidade útil (EDIA, 2004).

2.1.4. Hidrografia

A albufeira de Alqueva apresenta três braços principais (Figura 2.3) que se estendem ao longo dos vales do rio Guadiana, do rio Degebe e do rio Alcarrache:

- rio Guadiana, constituindo o troço principal, com um comprimento aproximado de 91 km; e uma amplitude de valores de largura bastante elevada, com um valor médio de 2 100 m. A profundidade a média deste troço é de 17 m, oscila entre o valor máximo junto ao coroamento, até valores muito próximos de zero em Jorumenha;
- rio Degebe, localizado na margem direita da albufeira com uma área de drenagem aproximada de 1 539 km², um comprimento de 34 km e uma largura média de 700 m;
- ribeira de Alcarrache, com uma bacia hidrográfica com cerca de 991 km² (parte portuguesa 203 km² e 789 km² na parte espanhola), um comprimento de 19 km e uma largura média de 1 500 m, situado na margem esquerda da albufeira (INAG, 2006a e Trindade, 2005).

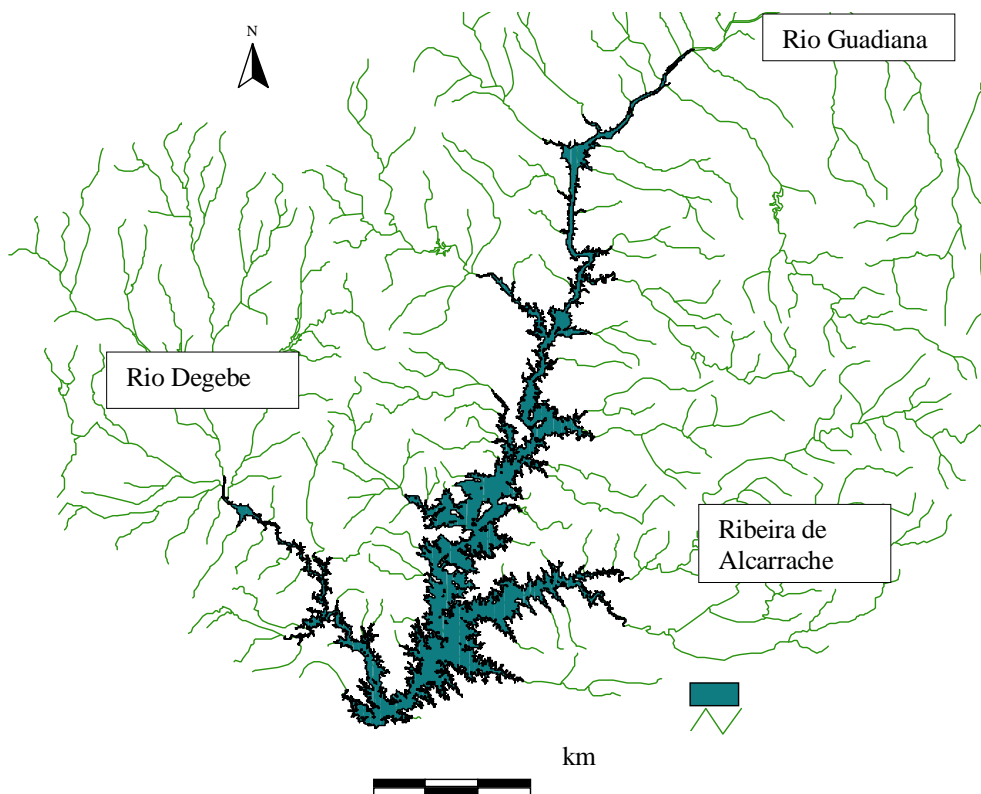


Figura 2.3 – Rede Hidrográfica da albufeira de Alqueva, com identificação dos três braços principais.

Os principais cursos de água afluentes à albufeira de Alqueva, para além dos três troços já referidos, são: Caia, Mures, Asseca, Pardais, Lucefécit, Azével e Álamos na margem direita; Olivença, Frigamiñoz, Táliga (Ribeiras Espanholas), Amoreira e Alcarrache na margem esquerda. A Tabela 2.1 apresenta as áreas drenantes de cada sub-bacia e na Figura 2.4 é possível observar a sua localização geográfica. Nesta figura, a sub-bacia denominada “Ribeiras Espanholas” inclui as bacias hidrográficas do rio de Olivença, da ribeira da Charca, do ribeiro da Figueira dos Freixiais, do regato de Valongo, do regato do Pinheiro, da ribeira de São Bento, da ribeira de Taliga, do regato da Bufanda, do arroio del Carambio, do arroio del Morón, do arroio de Arriba, do arroio de los Cabrilos, do arroio Frigamiñoz e do arroio de Santa Catalina.

Tabela 2.1 – Principais rios drenantes da bacia hidrográfica da albufeira de Alqueva e respectivas áreas de escoamento.

Bacia Hidrográfica		Bacia Hidrográfica	
Margem direita	Área (km ²)	Margem esquerda	Área (km ²)
Ribeira de Mosqueiros	16.70	Rio de Olivença**	297.52
Ribeira de Varche	52.92	Ribeira de Charca**	73.33
Ribeira de Mures	93.10	Ribero de Figueira dos Freixiais**	56.13
Ribeira de Asseca	165.31	Regato do Valongo**	17.19
Ribeira de Pardais	47.48	Ribeira de São Bento**	55.33
Ribeira de Províncias	18.27	Ribeira de Taliga**	163.98
Ribeira de Lucefecit	356.93	Arroio del Carambio**	33.60
Ribeira de Azével	99.29	Arroio del Moron**	23.54
Ribeira de Pêga	24.38	Arroio de los Cabrilos**	48.49
Ribeira de Álamo	91.50	Arroio Frieganunoz**	130.59
Ribeira de Cabanas	26.53	Arroio de Santa Catalina**	30.70
Rio Degebe	1172.20	Ribeira de Cunchos*	42.23
Afluente Rio Degebe 1	53.72	Ribeira de Vinhas	18.47
Afluente Rio Degebe 2	24.73	Ribeira de Alcarrache**	426.70
Ribeira de Cagavai	16.49	Ribeira de Guadalim*	363.56
Ribeira de Amieira	53.68	Ribeira de Zebro	57.37
Ribeira de Calastrão	15.56	Arroio de Arriba***	3.33
Ribeira de Codis	17.18	Regato do Pinheiro***	5.26
		Regato da Bufanda***	11.05
Total	2345.95		1858.36
Área restante Total	863.32		

Nota: * Bacias comuns a Portugal e Espanha** Bacias exclusivamente espanholas *** Bacias exclusivamente espanholas mas de pouca expressão – não estão ordenadas de montante para jusante.

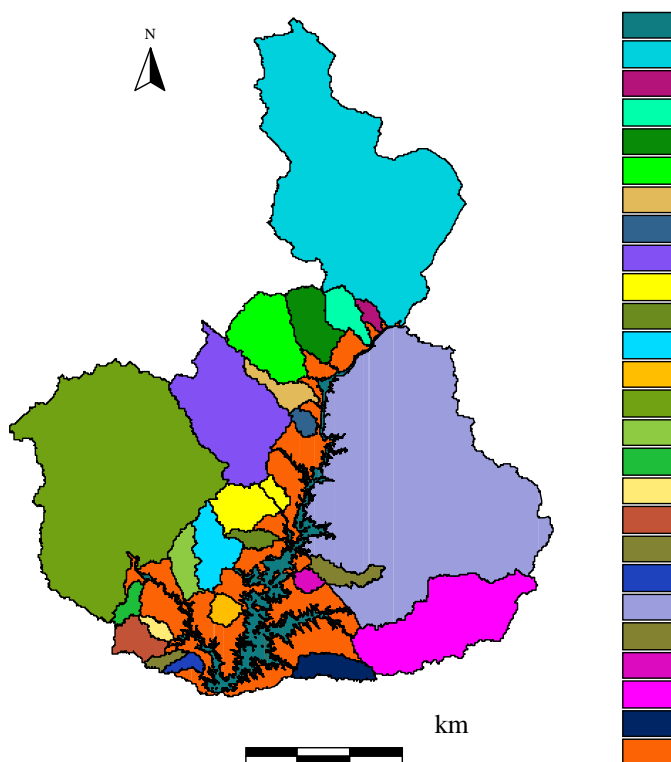


Figura 2.4 – Sub-bacias hidrográficas da albufeira de Alqueva.

A Sub-bacia, designada como “montante da albufeira de Alqueva”, na ilustração, contempla unicamente a parte portuguesa, onde estão abrangidas as bacias hidrográficas das ribeiras de Can-cão e Lã e do rio Caia. Porém, para efeitos do presente trabalho, todas as sub-bacias a montante da albufeira são aglutinadas numa só, com ponto de referência no início do regolfo da albufeira de Alqueva.

2.1.5. Climatologia

O clima da bacia é bastante homogéneo com características mediterrânicas secas: acentuadas amplitudes térmicas; verões secos com temperaturas médias altas; precipitação fraca e concentrada no período de Inverno; baixa humidade relativa e nebulosidade; e elevada insolação e evapotranspiração.

Em termos gerais, a bacia hidrográfica do Guadiana é qualificada como sendo do tipo Csa, segundo a classificação de Köppen, isto é: “C” – mesotérmico: clima temperado húmido; “sa” – com Inverno chuvoso e verão seco (em que a temperatura do mês mais frio do ano varia entre 0° C e 18° C; “s” -

Verão seco; “a” - Verão quente, em que a temperatura média do mês mais quente do ano é superior a 22° C) (Köppen e Geiger, 1928; Köppen 1931). Segundo a classificação de Thornthwaite (classificação pelo índice hídrico) o clima da bacia é Mesotérmico (B’3 e B’2). É Mesotérmico (pouco) Húmido (B1) na região Norte, Mesotérmico Sub-húmido Seco (C1) em toda a bacia, com exceção da zona de Moura, onde o clima é Semi-árido (D) (Thornthwaite, 1948; Morais, 1995; INAG, 1999a; IA, 2003).

a) Temperatura do ar

Na região em que se insere a albufeira de Alqueva, a temperatura é influenciada pela continentalidade, latitude, relevo e exposição aos ventos. Em termos gerais, a temperatura média anual ronda os 16° C; em média, o mês mais quente é Junho e o mês mais frio Janeiro. A média das temperaturas mínimas ronda os 4° C e a média das máximas os 34° C. A temperatura média anual da bacia tem uma pequena variação longitudinal aumentando de N-S (Figura 2.5). Nos meses mais quentes a temperatura média é de 26° C, enquanto que nos meses mais frios a temperatura é de 9° C (INAG, 1999a; IA, 2003).

b) Precipitação

A precipitação anual é distribuída uniformemente sobre a bacia e, num panorama mensal, 80 % do total anual de precipitação ocorre no período Outubro – Abril. Os meses de Julho e Agosto têm precipitações praticamente nulas. Muitas vezes a passagem de estações é muito brusca. O valor médio anual ponderado é de 550 mm (Figura 2.5). Em anos secos este valor desce para os 450 mm e em anos húmidos o valor máximo pode atingir os 1 100 mm onde o relevo é mais acentuado. As zonas menos pluviosas correspondem ao vale do Guadiana, na zona de Moura e entre Serpa e Alcoutim (INAG, 1999a; IA, 2003).

c) Escoamento

Entre anos secos e anos húmidos as amplitudes dos valores de escoamento, assim como dos de precipitação, são muito acentuadas. Esta variação conjuga-se com a variabilidade intra-anual em que

podem ocorrer severas estiagens (3 meses em média), desprovendo o leito de escoamento. A bacia, em regime natural, transporta um escoamento anual médio de 150 mm e um valor global de 6 700 hm³, em que 4 900 hm³ são provenientes da parte espanhola da bacia (Figura 2.5).

O escoamento afluente à barragem de Alqueva é fortemente dependente das afluências provenientes de Espanha, sobretudo da gestão das albufeiras existentes nesse país, visto totalizarem cerca de 97 % da capacidade de armazenamento instalada na bacia. Embora a contribuição espanhola tenha reduzido para 55 % o escoamento médio anual em regime natural (INAG, 1999b; INAG, 2000b; IA, 2003), a assinatura e a ratificação da Convenção sobre Cooperação para a Protecção e o Aproveitamento Sustentável das Águas das Bacias Hidrográficas Luso-Espanholas estabelece o valor de 600 hm³ como valor mínimo anual de escoamento que deve afluir a Portugal na secção de Badajoz (Convenção de Albufeira, 1998).

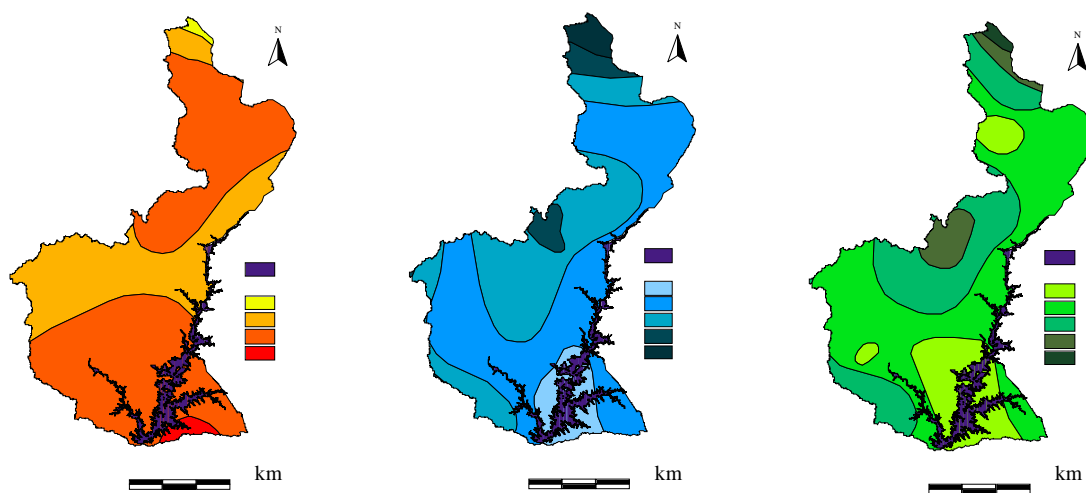


Figura 2.5 – Distribuição espacial da temperatura do ar média anual (°C), precipitação anual total (mm) e escoamento médio anual (mm) na bacia hidrográfica da albufeira de Alqueva - da esquerda para a direita

(adaptada de IA (2003)).

d) Insolação e nebulosidade

Em função da elevada nebulosidade, a insolação é baixa no período chuvoso e pelo contrário, a insolação é alta na estação seca. A insolação anual ponderada é de 2 829 horas (Figura 2.6), sendo o mês de Julho, aquele que apresenta maior tempo de exposição solar (370 horas) e Dezembro, o de

menor (147 horas). A insolação apresenta heterogeneidade espacial, sendo gradualmente maior para Sul. A nebulosidade diminui de Norte para Sul, apresentando um nível médio de 4 (escala de 0 a 10 por números inteiros) (INAG, 1998a; IA, 2003).

e) Humidade relativa do ar

O estado higrométrico do ar atinge valores mais elevados no Inverno (sendo o mês de Janeiro, o mais húmido com 88 % de humidade relativa) e mais baixos no Verão (com o mês de Julho a registar o valor mínimo de 59 %). A humidade relativa ponderada para a bacia da albufeira de Alqueva é de 75 % (Figura 2.6). Ao longo do dia, a humidade relativa do ar atinge valores mínimos durante a tarde coincidindo com o período de máxima temperatura diária (INAG, 1999a; IA, 2003).

f) Vento

Os ventos do quadrante NW são dominantes durante a maior parte do ano com maior expressão no Verão. Além destes, no Inverno sobressaem também os ventos orientados de NE e SW. A velocidade média anual na bacia é de 8,7 km.h⁻¹, sendo Março o mês mais ventoso (9,3 km.h⁻¹) e Novembro o menos ventoso (7,9 km.h⁻¹) (INAG, 1998a).

g) Evapotranspiração

A evapotranspiração média anual de referência da bacia é de 1 227 mm pelo método de Penman-Monteith (FAO, 1998), com Julho a registar os valores mais elevados (204 mm) e Dezembro os valores mais baixos (29 mm). De acordo com a Figura 2.6, a evapotranspiração apresenta uma distribuição regular ao longo da bacia (INAG, 1998a; IA, 2003).

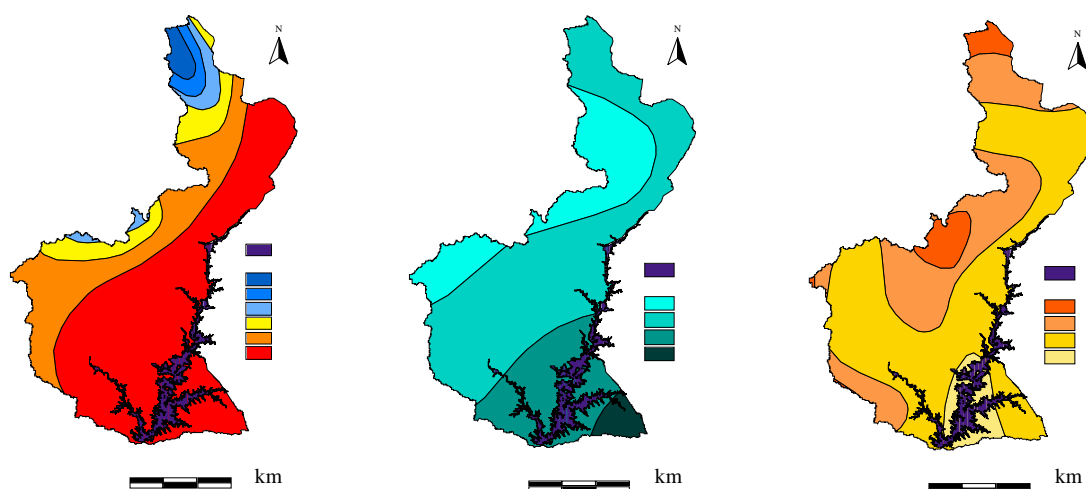


Figura 2.6 – Distribuição espacial da insolação média anual (horas), humidade relativa do ar (%) às 9 T.M.G (média anual) e evapotranspiração real média anual (mm) na bacia hidrográfica da albufeira de Alqueva - da esquerda para a direita (adaptado de IA (2003)).

2.1.6. Fisiografia

a) Geomorfologia

A bacia desenvolve-se essencialmente sobre unidades de superfície aplanada (Peneplanície Alentejana) com declives médios dominantes muito suaves que variam entre os 0 % e os 5 % com uma altitude média de 237 m. Na fraca ondulação do terreno facilmente sobressaem alguns relevos incidentes como as serras de S. Mamede, serra de Ossa e zona de Portel, que apresentam declives até 30 %. Surgem pontualmente relevos superiores a 400 m e declives superiores a 30 % nas vertentes das cristas quartzíticas (INAG, 1999c; IA, 2003).

A bacia da albufeira de Alqueva localiza-se sobre a unidade litológica: Maciço Antigo. Esta é formada por terrenos antigos de rochas metamórficas (xistos, micaxistos, mármore, entre outras), sedimentares (xistos calcários, grauvaques, quartzitos, entre outras) e eruptivas (gabros, pórfiros, granitos, entre outras) do Precâmbrico e final do Paleozóico (INAG, 1999d; CCR-A, 2001).

A homogeneidade orográfica é quebrada junto aos principais cursos de água e seus afluentes devido a processos eruptivos em que estes se apresentam numa forma encaixada com pequenos e escassos

fundos aluviais. As ribeiras intermédias demonstram a sua efemeridade torrencial, com leitos de substrato rochoso à vista (INAG, 1999c).

Os materiais rochosos mais abundantes são os xistos (do Silúrico ao Carbónico) que ocupam a maior parte da superfície da bacia (cerca de 2/3). Existem também manchas de rochas eruptivas (maioritariamente do tipo ácido) que se evidenciam no mesclado do conjunto pelo seu tamanho avultado (INAG, 1999d; CCR-A, 2001).

b) Morfologia da área inundada

Segundo a curva hipsométrica de classes de altitude (Figura 2.7), 60 % da área interior ao limite do NPA encontra-se entre os 130 e os 150 m de altitude. A análise desta representação gráfica revela que as duas classes mais baixas e a classe mais alta apenas representam 38 % da área do espelho de água (50-130 m: 28 % - 6 800 ha; 150-152 m: 10 % - 2 280 ha) (INAG, 2000a; Trindade, 2005). De acordo com estes valores, 77 % da área inundada tem uma altitude abaixo dos 147 m (18 590 ha), o que demonstra que: cerca de 55 % da área inundada tem uma profundidade inferior a 15 m; aproximadamente 30 % da área total tem profundidades superiores a 20 m; 40 % da área tem profundidades compreendidas entre os 25 e os 45 m; e apenas 5 % apresenta profundidades superiores a 45 m.

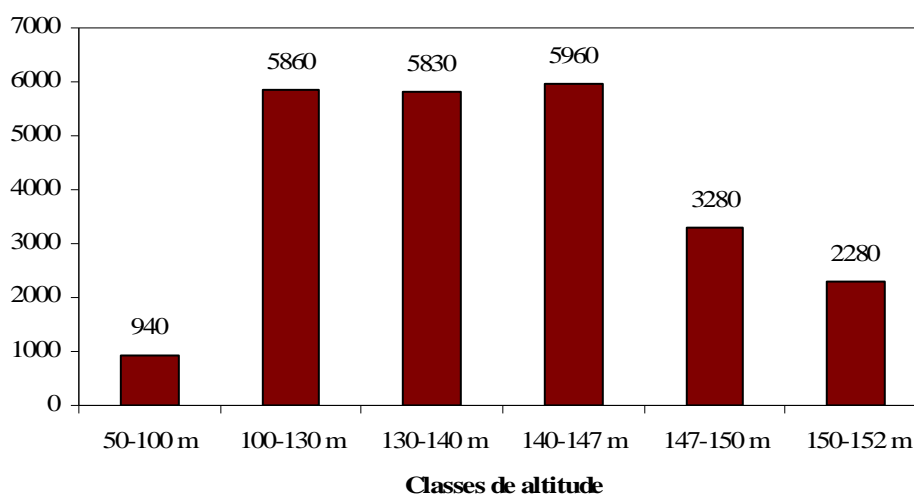


Figura 2.7– Histograma representativo da curva hipsométrica de classes de altitude, da área interior ao NPA da albufeira de Alqueva (adaptado de INAG (2000a)).

A morfologia da albufeira possibilita a existência de áreas isoladas que se localizam acima da cota do NPA. Estas ilhas, ou quase ilhas, totalizam uma área de 8 km² (INAG, 2000a).

2.1.7. Solos e ocupação do solo

Em território nacional, os solos derivam de xistos e granitos. Os Litossolos êutricos (origem em xistos) ocupam cerca de 50 % da bacia hidrográfica portuguesa. Os Litossolos caracterizam-se por terem baixos horizontes orgânicos e perfis culturais, com estrutura, textura e capacidade de retenção de água impróprias para a maioria das culturas agrícolas. A litologia metamórfica e xisto-grauvática (sedimentar) também poderá originar Luvisolos, solos mediterrâneos, pardos, vermelhos ou amarelos, bastante degradados e com fraca capacidade de uso. São normalmente utilizados para produção florestal, pastagens ou matos. Nos maciços graníticos ocorrem solos litólicos, mediterrâneos para-hidromorfos e para-barros. Os Luvisolos êutricos, vérticos e órticos ocupam uma área de cerca de 16 % do total da bacia. Os solos arenosos (Regossolos êutricos e Podzois gleizados) abrangem apenas uma pequena área (INAG, 1998b; IA, 2003).

Tendo em conta a litologia do leito dos cursos de água, a erosão, em regime natural, não tem grande importância. No entanto, as zonas de maior sensibilidade são os vales encaixados e associados a sistemas geológicos de relevo acentuado devido a fortes enrugamentos orogénicos. Os níveis de erosão estão compreendidos entre 0 e mais de 25 t.ha⁻¹.ano⁻¹. Cerca de 12 % da bacia apresenta níveis de erosão superiores a 25 t.ha⁻¹.ano⁻¹ (INAG, 1998c, IA, 2003)).

O INAG (1998c), seguindo a classificação Corine Land Cover, adoptou 5 unidades de ocupação do solo, das quais a Superfície Agrícola Usada (SAU) representa 75,8 %, dividindo-se em espaços agrícolas (55,8 %) e agro-florestais (20 %). Dos espaços agrícolas, 98 % são de sequeiro e o restante de regadio de tipo intensivo. A floresta ocupa 12,2 % e os matos pouco degradados 10,6 % da área total. Os restantes 1,4 % são ocupados por espaços naturais e/ou protegidos.

O nível de eutrofização é frequentemente associado ao uso e ocupação do solo predominante na bacia hidrográfica. As modificações no estado trófico com ocupação do solo por meios urbanos são causadas principalmente devido ao assoreamento, drenagem pluvial urbana e esgotos (Xavier,

2005). Em bacias rurais a poluição difusa é mais intensa e o processo de eutrofização depende fortemente dos sistemas agrícolas e pecuários intensivos (Merten e Minella, 2002).

2.1.8. Fontes de poluição

As fontes de poluição pontual na sub-bacia portuguesa podem dividir-se em três grupos: industrial, agro-industrial e urbana, em que metade das actividades ainda rejeitam os seus efluentes no meio ambiente, originando uma grande carga de poluentes. Mais de 90 % destas cargas provêm de indústrias não ligadas a redes públicas onde não é efectuado qualquer tratamento.

A carga total de poluição na bacia tem duas origens: portuguesa e espanhola. Apesar da carga total da sub-bacia espanhola ser muito superior à portuguesa, verifica-se que os valores da carga industrial são muito semelhante nos dois países. Consequentemente existe uma maior carga poluente industrial por unidade de área em Portugal. Segundo a EDIA (2003a) a carga poluente na bacia portuguesa é mais centralizada (Tabela 2.2).

Relativamente à água afluente até à albufeira de Pedrógão, as bacias do Degebe, do Ardila e do Caia são aquelas que em território português geram maiores cargas poluentes, respectivamente 33 %, 23 % e 8,5 % do total em termos de CBO₅ (Carência Bioquímica de Oxigénio aos 5 dias). No seu conjunto produzem 87 % da totalidade da carga poluente na bacia hidrográfica do Guadiana a montante da barragem de Pedrógão na região portuguesa (EDIA, 2003a).

A montante de Pedrógão, das 412 fontes de poluição tónica industrial potencialmente relevantes, 48 % são unidades da indústria transformadora, 44 % são unidades pecuárias e 8 % são lagares de azeite. Das 107 fontes de poluição tónica urbana potencialmente relevantes, 42 são estações de tratamento de águas residuais (ETAR), 45 fossas sépticas individuais e 20 consistem em pontos de descarga sem tratamento. Das 42 ETAR, em 24 foram efectuadas auditorias em que 8,3 % estão em funcionamento e sem defeitos, 50 % estão em funcionamento parcial com defeitos não interferentes e 41,7 % estão fora de funcionamento com defeitos interferentes (EDIA, 2003b).

No rio Guadiana a carga anual poluente rejeitada pelas actividades económicas é de 37 081 000 kg. A probabilidade de poluição difusa de origem rural é de 99 % visto a agricultura ser

a principal actividade da região. As regiões mais afectadas por este problema são as regiões contíguas ao rio Caia e a Zona dos Mármore (abrange parcialmente os concelhos de Borba, Estremoz e Vila Viçosa) (INAG, 2000b).

No que se refere ao território espanhol, os dados são agregados por grandes sectores de actividade industrial e por sub-bacia hidrográfica dos principais afluentes do Guadiana. São traduzidos por quantitativos anuais da carga poluente, bruta e tratada, expressos em população equivalente em função de CBO₅, Azoto (N) e fósforo (P) na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Distribuição da carga poluente afluente à albufeira de Pedrógão, área e escoamento anual correspondente (retirado de EDIA, (2003a)).

Sub-bacias	Escoamento anual médio (hm ³)	Carga de poluição tópica afluente (t.ano ⁻¹)								População equivalente industrial (hab. eq.)
		Sub-total	Área (km ²)	Média anual	Ano seco	Total			Industrial	
CBO ₅	N					P	CBO ₅	N	P	
Português	6 480,00	3 641,35	1 006,49	3 735,90	883,84	226,15	2 455,45	474,88	144,19	108 311
Espanhol	56 238,60	4 567,00	1 721,92	19 728,09	3 058,74	629,69	2 963,21	383,09	99,65	136 133
TOTAL	62 718,60	8 208,35	2 728,41	23 463,98	3 942,58	855,84	5 418,65	857,97	243,84	244 444

2.1.9. Conservação da Natureza

Da mesma forma que as barragens são potenciais redutores de biodiversidade original, também fornecem novas oportunidades com a criação de novos habitats que, a médio-longo prazo, as suas albufeiras podem ser consideradas como parte integrante do novo ecossistema. Na perspectiva de haver uma compensação ecológica, alguns ecossistemas podem beneficiar certas espécies, mas outras podem sofrer perdas significativas dos efectivos populacionais, podendo até mesmo ser extintas (Azevedo, 2004).

A existência de três áreas classificadas nas proximidades da albufeira revela a importância dos valores naturais de interesse comunitário: Zona de Protecção Especial (ZPE) Mourão/Moura/Barrancos, criada ao abrigo da Directiva Aves (Directiva Comunitária 79/409/CEE)

o Sítio Moura/Barrancos e o Sítio Guadiana/Juromenha constituídos ao abrigo da Directiva Habitats (Directiva Comunitária 92/43/CEE) (ICNB, 2006).

No que diz respeito à avifauna, esta tem sofrido, segundo o CEAI (2006), impactes muito significativos na nidificação de algumas espécies, como o Bufo real (*Bubo bubo*), a Águia de Bonelli (*Hieraaetus fasciatus*) e a Cegonha-preta (*Ciconia nigra*). As recentes mudanças no habitat, devido à construção da barragem de Alqueva, tornaram as ilhas num importante local de refúgio para a fauna, principalmente para a avifauna. Presentemente, as ilhas servem de refúgio para cerca de 14 espécies de aves. Entre estas encontram-se exemplares de: Tagaz, (*Sterna nilotica*); Perdiz-do-mar, (*Glareola pratincola*); Borrelho-pequeno-de-coleira (*Charadrius dubius*); Perna-longa, (*Himantopus himantopus*) e Bufo-real (*Bufo bubo*), das quais 10 estão no Anexo I da Directiva Aves. Algumas destas espécies aumentaram o efectivo populacional após a formação de ilhas, como é o caso do Tagaz e da Perdiz-do-mar.

Os ecossistemas terrestres localizados em áreas de reservatório são substituídos por habitats litorais, sub-litorais e lacustres e circulações de massas de água características dos lagos substituem as correntes padrão dos rios. Porém, as barragens permanecem obstáculos às trocas longitudinais ao longo dos rios (McCartney et al., 2001).

Também os ecossistemas a jusante das barragens são condicionados pela passagem de caudais ecológicos que tendem a ser menores em magnitude e periodicidade.

2.2. Qualidade da água

2.2.1. Principais impactes resultantes da criação de uma albufeira

Os efeitos da variação da qualidade da água podem ser verificados simultaneamente à criação da barragem, influenciando as transferências de energia e matéria entre o rio e os sistemas ecológicos que o rodeiam. Estas consequências exercem um efeito dominó exponencial sobre as espécies ao longo da cadeia alimentar, até que seja reinstaurado um novo equilíbrio (WCD, 2000).

Uma albufeira é composta por três partes formando um sistema híbrido: parte rio (lótico), parte em evolução de lótico para lântico, e parte lago (lântico). Apresenta características lânticas regulando e retardando o fluxo do rio, com uma taxa de renovação mais lenta que a de um sistema lótico, mas mais rápida que a de um lago (Wetzel, 1993). A disposição vertical do lago e a vertical do rio são substituídas por uma organização intermédia e característica. Num sistema lântico, a alternância entre períodos de mistura e de estratificação, provocadas pela passagem e pelas diferentes estações do ano, é perturbada pelas variações dos movimentos horizontais da água do rio e da sua taxa de renovação, tendo como consequência a variação da qualidade da água (Friedl, 2002; Friedl e Wuest, 2002).

A redução da velocidade de escoamento potencia a estratificação da coluna de água. Assim, tende a formar-se uma termoclina durante a Primavera-Verão, que separa a camada de água superficial, epilímnion, da camada de água situada abaixo da termoclina, hipolímnion. Esta estratificação tem diversas consequências: (i) temperaturas elevadas da água junto à superfície; (ii) concentrações reduzidas de nutrientes acima da termoclina, devido ao consumo pelo fitoplâncton “aprisionado” no epilímnion; (iii) temperaturas relativamente baixas no hipolímnion; (iv) concentrações elevadas de nutrientes e compostos resultantes da decomposição anaeróbia da matéria orgânica junto ao fundo por oposição a concentrações reduzidas de oxigénio dissolvido. Deste modo, consoante a descarga da albufeira seja efectuada acima ou abaixo da termoclina, o seu efeito na qualidade da água a jusante da barragem será diverso (Odum, 1971). O aumento da temperatura à superfície na Primavera-Verão, em conjunto com a redução da velocidade de escoamento e consequente diminuição da turbidez, potenciam o crescimento do fitoplâncton (Friedl, 2002; Poff e Hart, 2002).

Com a passagem de um regime lótico para um regime lântico, dá-se uma modificação dos ciclos biogeoquímicos do carbono (C), do fósforo (P), do azoto (N) e da sílica (Si), entre outros (Friedl, 2002). O aumento do tempo de residência, através do aumento da evaporação, do acréscimo da temperatura e da diminuição do oxigénio, conduz a um aumento da concentração de sais dissolvidos. Para além disto, quer o aumento do tempo de residência, quer a produção autóctone de biomassa, vão alterar a biogeoquímica dos sedimentos e podem conduzir à libertação de metais pesados, através duma alteração das condições de oxidação-redução. Todas estas transformações influenciam a qualidade da água (Friedl, 2002; Friedl e Wuest, 2002).

2.2.2. Análise preliminar da qualidade da água

Segundo Gonçalves (2005), a análise da variação da qualidade da água aponta para um sistema altamente dinâmico, primeiramente dependente das influências climáticas, identificando-se facilmente características distintas associadas ao período húmido e ao período seco. O enchimento da albufeira criou um novo ecossistema, iniciando-se um processo de evolução ao nível físico-químico e biológico da massa de água.

De salientar a existência de um período inicial de maior enriquecimento que se deve à libertação de elementos presentes no solo inundado. A análise dos resultados obtidos até então revela que os principais problemas de qualidade se associam ao transporte acentuado de matéria orgânica e nutrientes através de afluentes com origem em fontes de poluição existentes na bacia de drenagem. O caso mais preocupante foi detectado na ribeira do Zebro, que se caracterizou por uma condutividade média de $1070 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ e valores de azoto amoniacal superiores a $1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, demonstrando assim os efeitos da poluição proveniente, por exemplo, do efluente da ETAR da Póvoa de S. Miguel (Gonçalves, 2005). A contaminação microbiológica também se revela importante neste local atingindo os estreptococos fecais $1,00 \times 10^6 \text{ células}\cdot 100 \text{ ml}^{-1}$ em Novembro 2003. Na albufeira, a presença de estreptococos fecais e/ou *Salmonella spp.* é frequentemente negligenciável, visto que as situações de maior contaminação ocorrem nos afluentes ao sistema.

Relativamente às concentrações de fósforo total (Figura 2.8) refira-se que apenas 6,82 % das amostragens revelaram valores muito elevados ($> 500 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1} \text{ P}$). No entanto, estas correspondem a colheitas junto ao fundo onde decorre a normal acumulação de fósforo (Gonçalves, 2005).

Segundo as classes de qualidade para usos múltiplos definidas pelo INAG (2004a), relativas às concentrações de azoto amoniacal, apenas 0,38 % das amostragens classificam a água como muito poluída. No entanto, estas referem-se a situações de fundo registadas durante o período seco, em que as condições de anóxia potenciam esta forma reduzida de azoto. Na generalidade das amostragens, o fósforo total é aquele que apresenta uma maior frequência de locais de amostragem de pior qualidade. Em oposição, a condutividade eléctrica é aquela que engloba mais locais de amostragem em classes de melhor qualidade.

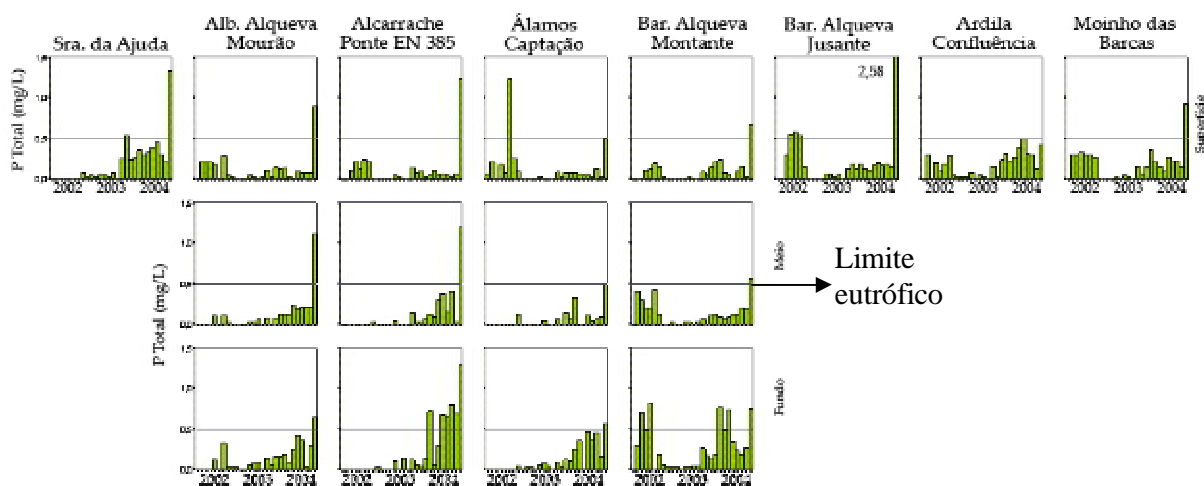


Figura 2.8 – Variação mensal da concentração de fósforo total em mg.L^{-1} de P, na albufeira de Alqueva, em três níveis de profundidade e ordenados de montante para jusante (adaptado de Gonçalves (2005)).

Em relação aos descritores Carência Química de Oxigénio (CQO), CBO_5 e a oxidabilidade, as maiores concentrações também se associam ao fundo, apresentando porém teores elevados à superfície associados aos elevados níveis de biomassa algal característicos das situações de Verão, em climas mediterrâneos. Ainda assim, 71,69 % dos ensaios de CBO_5 indicam uma boa qualidade da água.

A sucessão fitoplânctónica em Alqueva favorece o grupo das Cianobactérias durante o período seco. No entanto, a redução do fotoperíodo, entre outros factores, promovem a dominância dos grupos das Bacilariofitas, Criptofitas e Clorofitas durante o Inverno (Gonçalves, 2005).

2.2.3. Qualidade da água antes e depois da albufeira de Alqueva

A análise dos dados históricos da evolução de qualidade da água antes e depois da construção da barragem revelaram importantes características dos cursos de água em climas semi-áridos. Indicam-se dois processos responsáveis pela variabilidade observada: (i) sedimentação e elevada biodegradação potenciada pelas situações de baixo caudal e elevada temperatura; (ii) diluição e mesmo limpeza durante as enxurradas decorrentes nos períodos húmidos (Gonçalves, 2005).

Os principais benefícios para a qualidade da água introduzidos pelo enchimento da albufeira de Alqueva, segundo Gonçalves, (2005), podem-se resumir da seguinte forma:

- a albufeira integra a variabilidade da bacia, amortecendo-a. Potencia a sedimentação dos poluentes e constitui um local onde diversos mecanismos prevalecem em profundidade (p.e. desnitrificação), que proporcionam uma melhoria da qualidade da água a jusante da albufeira (desgarga da barragem de meio-fundo). O facto da descarga de caudal ecológico permitir uma forte oxigenação da água a jusante da barragem de Alqueva contribui para uma melhoria da água da albufeira de Pedrógão.
- verifica-se um efeito de diluição sobre os elementos presentes nas afluências, como a redução da mineralização da água (dureza total, condutividade e cloretos);
- a albufeira funciona como um agente tampão à enorme variabilidade verificada a montante originada pelos ciclos de seca e enxurrada e pelos agentes poluidores. É exemplo disso a diminuição da variabilidade temporal em alguns parâmetros, como o caso da oxidabilidade.

No entanto, o enchimento da albufeira também envolve alguns impactes negativos:

- a introdução de um regime de estratificação térmica e química proporciona uma alteração de funcionamento do sistema com reflexo na qualidade da água em profundidade caracterizada pela prevalência de um ambiente anóxico e redutor. Este efeito potencia o aumento das formas reduzidas, que condicionam fortemente os usos da água. É o caso do azoto amoniacal;
 - um dos principais impactes do ambiente redutor são os processos de recirculação interna de fósforo, apenas visíveis a longo prazo. A libertação de metais do sedimento e a libertação de compostos sulfurosos são outros impactes importantes. No entanto a inexistência de dados consistentes neste campo não permite fazer uma avaliação nesse sentido;
 - um outro condicionante da qualidade a jusante é o funcionamento da central hidroeléctrica de Alqueva que descarrega água por vezes anóxica e redutora (descarga de fundo e meio fundo).
-

De acordo com Gonçalves (2005) o enchimento da albufeira de Alqueva provocou uma grande alteração da qualidade da água no rio Guadiana. No troço da albufeira correspondente aos rios Guadiana e Degebe apresenta-se uma melhoria da qualidade da água no que diz respeito à mineralização, enquanto que no rio Alcarrache este efeito é menos visível o que pode resultar da inundação de solos com elevado teor de sais ou da libertação de nutrientes por parte da vegetação submersa (zona não incluída no programa de desmatção) (Gonçalves, 2005).

O fenómeno de mistura vertical provoca o afloramento de nutrientes e de matéria orgânica, que têm um efeito indutor da actividade biológica na albufeira. Consequentemente a qualidade da água deteriora-se ao longo do período Primavera-Verão, época em que se acentua a estratificação da massa de água (Gonçalves, 2005). A albufeira de Alqueva apresenta assim, uma elevada vulnerabilidade ao processo de eutrofização, podendo ocorrer surtos de fitoplâncton, nomeadamente, *blooms* de algas verdes e de cianobactérias que podem ter efeitos tóxicos (Cruz e Braz, 2000; Gonçalves, 2005).

2.3. Avaliação do estado trófico

2.3.1. Classificação do estado trófico

A classificação do estado trófico das águas doces superficiais definida pelo INAG (2004b) no âmbito da aplicação da DQA, apresenta-se na Tabela 2.3. O fósforo total na coluna de água (P total, em mg P.m^{-3} amostrado a meio metro de profundidade) é o indicador do estado trófico, enquanto que a biomassa clorofilina (clorofila *a* em mg.m^{-3}) é o elemento indicador da resposta do ecossistema. O fósforo também pode ser o causador da eutrofização secundária. Esta ocorre quando o fósforo depositado nos sedimentos é arrastado para as camadas superiores amplificando a concentração de fósforo total (Wetzel, 1993). Mesmo que as fontes externas sejam eliminadas, a libertação de fósforo a partir dos sedimentos, em condições de anóxia, pode causar problemas de eutrofização. Os valores correspondem a médias geométricas, em que o estado trófico é determinado pelo critério mais desfavorável. As médias têm de incluir no mínimo uma amostragem por estação do ano.

Tabela 2.3 – Critério de avaliação do estado para lagoas e albufeiras (*in* INAG, (2004b)).

Parâmetros	Estado trófico		
	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico
Fósforo total (mg.m^{-3} P)	< 10,0	10,0 – 35,0	> 35,0
Clorofila <i>a</i> ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	< 2,5	2,5 – 10,0	> 10,0
Oxigénio Dissolvido (% sat.) (no início do hipólímnion)			< 40,0

Nota: Os valores correspondem a médias geométricas; Conformidade: A classe atribuída corresponde ao valor mais desfavorável

2.3.2. Albufeiras do Alentejo

A estratificação térmica estival é uma das principais propriedades das albufeiras em climas mediterrânicos, como o de Portugal Continental. As bacias do Alentejo são caracterizadas por escoamentos sazonais e altas temperaturas do ar e da água, onde por vezes se detectam *blooms* de fitoplâncton e morte da fauna aquática. As albufeiras do Alentejo são caracterizadas por períodos de forte estratificação térmica, com elevadas concentrações de fósforo e em que a libertação de nutrientes a partir dos sedimentos é de grande importância (CCDR-A, 2006).

Consultados os Anuários da Qualidade da água no Alentejo dos anos hidrológicos 2000/2001 a 2004/2005 foi possível elaborar a Tabela 2.4 (CCDR-A, 2006). A análise desta permite verificar que, de acordo com o critério de avaliação do estado trófico estabelecido pelo INAG (cf. Tabela 2.3), nenhuma das albufeiras amostradas é classificada como Oligotrófica. Das 21 albufeiras monitorizadas a situação geral tende para a eutrofia, com picos ocasionais de clorofila *a* ao longo dos anos, sobretudo nos meses de Verão e no início de Outubro, associadas a altos teores de fósforo total.

De acordo com CCDR-A (2006) constatou-se que o parâmetro oxigénio dissolvido nunca funcionou como critério orientador da classificação, visto que os resultados se revelaram sempre superiores a 40 % de saturação. O parâmetro orientador da classificação verificou-se ser o alto teor de concentração de fósforo total, por vezes associado a elevados valores de clorofila *a*.

Tabela 2.4 – Classificação do estado trófico de 21 albufeiras do Alentejo nos anos hidrológicos 2000/2001 a 2004/2005.

Albufeiras	Anos hidrológicos				
	2000/2001	2001/2002	2002/2003	2003/2004	2004/2005
Alvito	Mesotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Mesotrófico	Mesotrófico
Apartadura	Mesotrófico	Mesotrófico	Mesotrófico	Mesotrófico	Mesotrófico
Boavista	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Caia	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Crato	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Enxoé	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Gáfete	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Maranhão	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Montargil	Mesotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Divor	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Lucefecit	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Monte da Rocha	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Monte Novo	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Póvoa e Meadas	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Roxo	Mesotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Santa Clara	Mesotrófico	Mesotrófico	Mesotrófico	Mesotrófico	Eutrófico
Odivelas	Mesotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Mesotrófico	Eutrófico
Pêgo do Altar	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Vale de Gaio	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Tapada Grande	Mesotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Vigia	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico

O panorama verificado no ano hidrológico 2004/2005 deveu-se à seca extrema verificada em todo o país nesse ano, com graves problemas de eutrofização em todas as massas de água da região sul do país (Alentejo e Algarve), onde a seca se instalou mais cedo e com maior severidade, alargando-se às restantes regiões do país. A situação assistida refere-se a problemas de grande degradação da qualidade da água, com a implementação de sistemas de tratamento de águas residuais e de abastecimento público mais eficazes, como forma de mitigar o risco de saúde pública.

2.3.3. Albufeira de Alqueva

Na albufeira de Alqueva, a classificação do estado trófico é maioritariamente devido à concentração de clorofila *a*, visto que 2,8 % das amostragens revelam que as concentrações de fósforo total (Figura 2.8) se localizam, abaixo dos 10 mg.l⁻¹ (estado oligotrófico). As concentrações de clorofila *a* (Figura 2.9), em Senhora da Ajuda são muito elevadas. Estas contrastam com os valores observados nos locais de amostragem com características lênticas que apresentam teores próximos do limite mínimo a partir do qual o sistema é classificado como eutrófico e que é 10µg.l⁻¹ segundo a classificação do INAG (2004a).

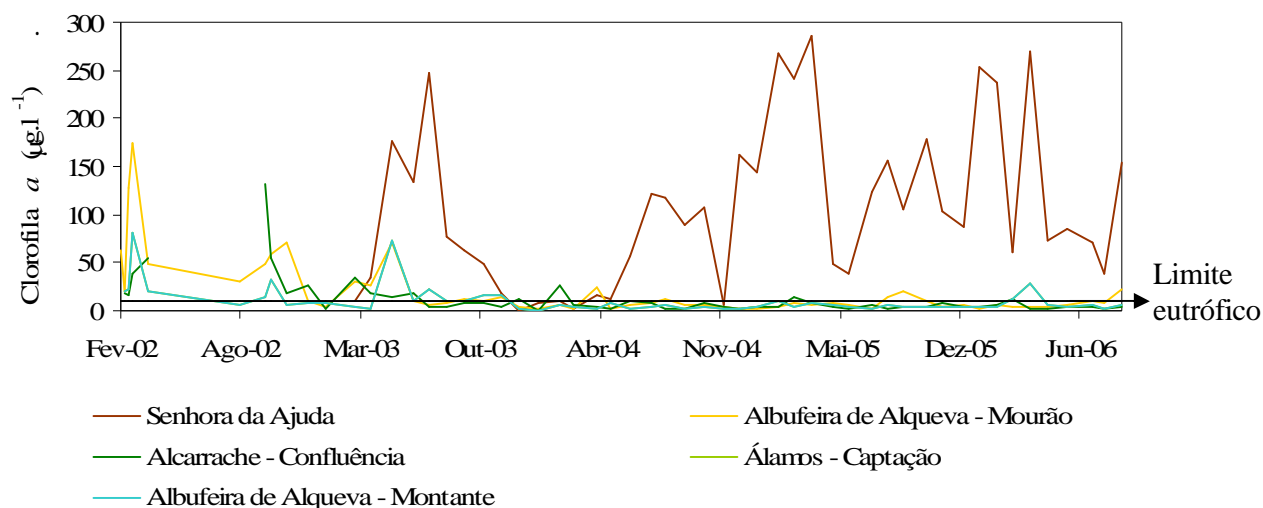


Figura 2.9 – Variação mensal da concentração de Clorofila *a* em µg.l⁻¹, na zona eutrófica, na albufeira de Alqueva, ordenados de montante para jusante (adaptado de Gonçalves (2005)).

A análise da produtividade geral da albufeira, desencadeou a classificação da metade N como sendo eutrófica. Apesar da melhoria observada a jusante, a média geométrica permite classificar este troço como mesotrófico.

2.4. Modelação da qualidade da água da albufeira de Alqueva

Um dos grandes desafios inerentes ao projecto do Alqueva é a conservação da qualidade da água da albufeira, dentro de limites adequados aos usos pretendidos e à conservação do bom estado ecológico do meio aquático, tendo em conta a importância dos valores naturais da região. Apesar da importância da monitorização ambiental, como forma de seguir a evolução temporal e espacial do

estado da albufeira de Alqueva, importa utilizar ferramentas que permitam fazer uma previsão da evolução do sistema e sobretudo a nível da qualidade da água. Neste sentido, a utilização de modelos matemáticos surge como a opção adequada.

Um modelo é, na sua essência, uma visão simplificada da realidade, contendo apenas as características específicas que são essenciais à descrição e resolução da questão que se quer retratar. O grau de detalhe empregue é determinado pelo conhecimento disponível e pela importância assumida pelos diferentes processos de um determinado ecossistema (Jørgensen, 1997).

Em 1920 surgiu o primeiro modelo matemático para o ambiente aquático nos Estados Unidos da América. Este teve origem na equação de Streeter-Phelps, que permite calcular o balanço de oxigénio num rio. Desde então o uso de modelos matemáticos para simular as condições ambientais e as interações com a qualidade da água tem crescido drasticamente, com especial destaque nas últimas décadas (Pereira et al., 2006).

2.4.1. Resumo histórico

Dos trabalhos de modelação da qualidade da água destaca-se a aplicação do modelo unidimensional WQRRS (*Water Quality for River – Reservoir Systems*⁵), em que SISIDRO (1996), estudou a distribuição, em profundidade, da temperatura, do oxigénio dissolvido e dos nutrientes, sendo o primeiro estudo a simular a qualidade da água na albufeira de Alqueva. O WQRRS é um modelo de qualidade da água dinâmico e unidimensional, que permite simular a variação temporal da concentração de diversos parâmetros de qualidade da água. É um modelo para simular rios e reservatórios, em que são representados vários níveis tróficos, incluindo organismos como o zooplâncton, peixes e algas bentónicas e em que são considerados também os ciclos do azoto e do fósforo (Araújo, 2005).

O modelo mais frequentemente utilizado é o CE-QUAL-W2. Este é um modelo bidimensional hidrodinâmico e de qualidade da água (longitudinal e vertical). Foi aplicada à albufeira de Alqueva por vários autores, como Diogo e Rodrigues (1997), Brandão e Rodrigues (2000), Rodrigues e

⁵ *Hydrologic Engineering Center (HEC) Institute for Water Resources do United States Army Corps of Engineers.*

Diogo (1997), FCT/UNL (1997), Oliveira et al. (2000), INAG (2000a), Rodrigues e Diogo (2000), Diogo et al. (2003) e Trindade et al. (2004), para além de Diogo et al. (2005). Existem incertezas significativas associadas aos resultados dos estudos anteriores a 2002, dada a impossibilidade de validar os modelos, tendo em conta que só foi possível calibrá-los após o início do enchimento da albufeira (8 de Fevereiro de 2002).

Os diversos estudos tiveram como objectivo a antecipação de possíveis medidas de gestão que permitissem minimizar os problemas de qualidade da água que pudessem surgir após o período de enchimento da albufeira.

A aplicação do modelo bidimensional para modelação longitudinal e em profundidade por FCT/UNL (1997) e Oliveira et al. (2000) caracterizou o oxigénio dissolvido e a temperatura, assim como a matéria orgânica, os principais nutrientes e a biomassa algal. No âmbito da elaboração do Plano de Ordenamento das Albufeiras de Alqueva e de Pedrógão (POA-AP) e da verificação compatibilidade com os futuros usos, Oliveira et al. (2000) verificou a alternância entre períodos de homogeneização e de estratificação da massa de água, constatou a influência negativa da água proveniente de Espanha e identificou a eutrofização como um problema.

O trabalho desenvolvido por Diogo et al. (2003) modela a temperatura e oxigénio dissolvido, durante a fase de enchimento, até Junho de 2003 (1 ano e 4 meses após o encerramento das comportas). Como ferramenta importante na gestão da qualidade da água no empreendimento de Alqueva, Diogo et al. (2003) conseguiu uma boa aproximação as observações de campo e reconheceu a necessidade de quantificação de caudais laterais afluentes.

Trindade et al. (2004) explorou os dados disponíveis para caracterizar a distribuição da temperatura, oxigénio dissolvido, matéria orgânica, nutrientes e biomassa algal, de Abril de 2002 a Outubro de 2003. Segundo este autor, a albufeira é classificada como monomíctica quente, de acordo com a periodicidade anual da mistura vertical. Trindade et al. (2004) realçou os impactes da eutrofização numa massa de água das dimensões de Alqueva sugerindo existir uma maior concentração de fontes de poluição a montante da albufeira.

Posteriormente Diogo et al. (2005), aplicando uma nova versão do modelo CE-QUAL-W2, analisou a importância do contra-embalse de Pedrógão, com reprodução da hidrodinâmica e dos processos

que controlam a qualidade da água e estimou as cargas difusas, cargas pontuais industriais e urbanas, reforçando a importância de tratar as cargas afluentes provenientes de Espanha e as cargas geradas em território nacional.

Relativamente à qualidade da água, o modelo CE-QUAL-W2, tem um único compartimento fitoplanctónico de entrada; o zooplâncton não é calculado, logo não é contabilizado o seu efeito sobre as algas e na reciclagem de nutrientes; as macrófitas não são incluídas; e em termos de consumo de oxigénio pelos sedimentos, o modelo CE-QUAL-W2 apresenta uma aproximação simplista ao cálculo deste parâmetro, em que não são calculadas dinamicamente as reacções nos sedimentos e fluxos de interface água-sedimentos, o que influencia a capacidade de previsão a longo prazo. Este modelo, devido à homogeneidade lateral utilizada (segmentos transversais), não permite a contabilização de uma das componentes horizontais. De acordo com Cole e Buchak (1995), devido a esta discretização espacial, o CE-QUAL-W2 apresenta um melhor ajustamento a massas de água longas e estreitas, o que apenas se verifica em Alqueva em situações pontuais (zonas de afunilamento geográfico e onde acaba o regolfo da albufeira). A representação da quantidade de movimento na vertical é limitativa, e o modelo não integra a variabilidade da componente horizontal do vento, que se revelou ser de elevada importância na albufeira de Alqueva.

Somente em albufeiras cujos afluentes sejam relativamente grandes é que as correntes da massa de água são influenciadas de forma significativa por esses caudais descarregados. Em oposição a circulação da albufeira é dominada pela acção do vento e as vazões dos tributários têm importância secundária (Liu et al., 2006; Koelmans, 2001). No caso da albufeira de Alqueva o regime de escoamento é torrencial, estando sujeito a severos períodos de estiagem durante o Verão. Na ausência de caudais e descargas apreciáveis, a circulação na albufeira depende do forçamento pela direcção e intensidade do vento que não podem ser integrados num modelo que não resolva as duas dimensões horizontais. Deste modo, tornou-se necessária a criação/implementação de um novo tipo de modelo que ultrapasse estas limitações e que acrescente a dimensão lateral – um modelo tridimensional.

3. Metodologia

3.1. Modelo da albufeira de Alqueva

O software utilizado no presente trabalho para implementar o modelo foi o EcoDynamo (Pereira e Duarte, 2005), implementado em C++ com base numa metodologia de programação orientada por objectos. O EcoDynamo foi especialmente desenvolvido para permitir a implementação de modelos hidrodinâmicos-biogeoquímicos acoplados.

O modelo EcoDynamo tem uma interface amigável em Windows (Figura 3.1) que permite definir quais os objectos a incluir numa simulação, quais as variáveis a visualizar e o tipo de dados de saída.

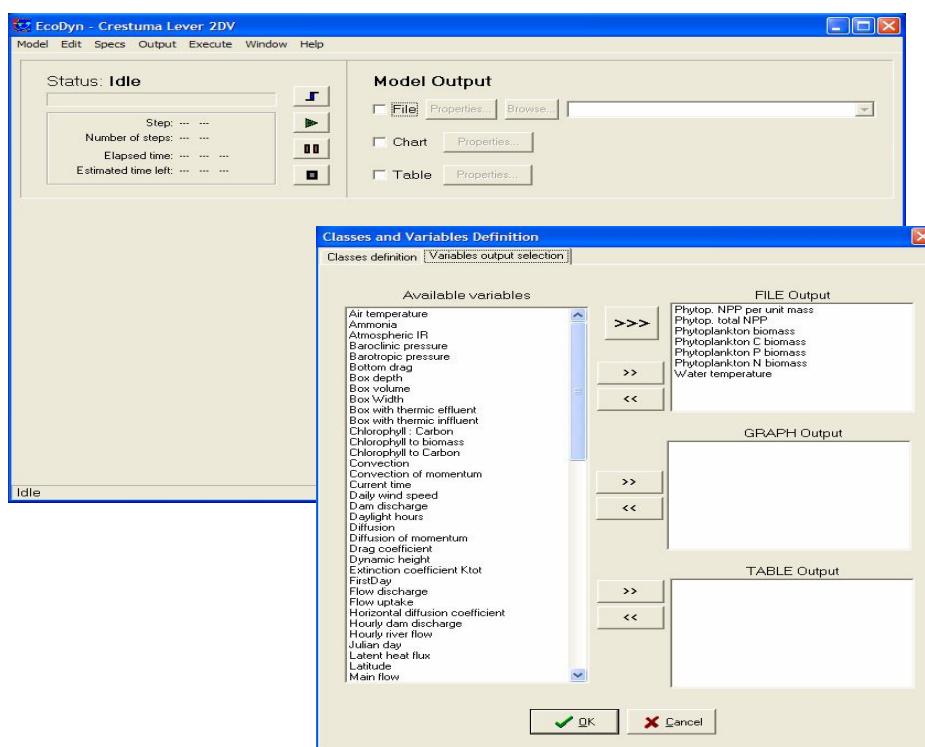


Figura 3.1 – Visualização do interface principal do modelo sobreposta com a janela de selecção de variáveis.

Os processos simulados pelos diferentes objectos são descritos em Duarte et al. (2007) e Duarte et al. (em prep.). Estes incluem:

- termodinâmica:

Simula a temperatura da água à superfície a partir de equações descritas em Portela e Neves (1994). Os processos termodinâmicos são forçados pelas trocas de água, simuladas no objecto hidrodinâmico, pela radiação solar e pelas trocas energéticas com a atmosfera. O balanço energético calculado pelo modelo, também referido como a quantidade líquida de radiação solar à superfície (R_B) pode ser apresentada sob a seguinte forma:

$$R_B = R_S + R_{IV-ATM} + R_{IV-ÁGUA} + R_{CL} + R_{CS} \quad 3.1$$

onde:

R_S – radiação solar (+);

R_{IV-ATM} – radiação infra-vermelha atmosférica (+);

$R_{IV-ÁGUA}$ – radiação infra-vermelha da água (-);

R_{CL} – perdas ou ganhos de calor latente (+/-);

R_{CS} – perdas ou ganhos de calor sensível (+/-);

Os valores são apresentados em $W.m^{-2}$ e os sinais (+) e (-) representam ganhos ou perdas de calor pela massa de água. O balanço nas camadas abaixo da superfície apenas são contabilizadas as diferenças entre os valores da radiação sub-superficial de uma camada e os valores da camada que lhe está imediatamente abaixo;

- hidrodinâmica dos sistemas aquáticos:

Simula a elevação da água (gradientes de pressão barotrópicos), velocidade e direcção das correntes. O objecto hidrodinâmico simula o campo de velocidades da corrente com as equações de Navier-Stokes e a equação da continuidade, com base numa malha de diferenças finitas (Vreugdenhil, 1989). É forçado pelos caudais afluentes, pelo vento e pelos gradientes de densidade ao longo da albufeira. Trata-se de um modelo baroclínico que utiliza as aproximações hidrostática e de Boussinesq, considerando a tensão de corte causada pelo vento à superfície e um modelo de comprimento de mistura para resolver a turbulência junto ao fundo. Resolve a equação do transporte (Knauss, 1997) a partir do campo de velocidades e dos processos de produção e consumo de cada variável. Estes processos são calculados pelos restantes objectos que simulam as diferentes variáveis

de estado. Tanto o campo de velocidades horizontais como as variações do nível da água são resolvidos implicitamente, de modo a reduzir estrangimentos temporais ao passo de cálculo. O campo de velocidades verticais é resolvido através da equação da continuidade. O objecto hidrodinâmico rege-se pelas seguintes equações gerais: da conservação da quantidade de movimento (Equações 3.2 e 3.3), da continuidade (Equações 3.4 e 3.5) e do transporte (Equação 3.6):

Equação da conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{du_x}{dt} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} - v_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - v_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - v_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{\partial P}{\rho \partial x} - \frac{Cf|u|u}{H} + \frac{\partial \tau_x}{\rho \partial z} + f_{v_y} \quad 3.2$$

$$\frac{dv_y}{dt} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} - v_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - v_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - v_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = -\frac{\partial P}{\rho \partial y} - \frac{Cf|v|v}{H} + \frac{\partial \tau_y}{\rho \partial z} - f_{u_x} \quad 3.3$$

Equações da continuidade:

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \quad 3.4$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0 \quad 3.5$$

Equação do transporte:

$$\frac{dS}{dt} + \frac{\partial(uS)}{\partial x} + \frac{\partial(vS)}{\partial y} + \frac{\partial(wS)}{\partial z} = \frac{\partial \left(A_x \frac{\partial S}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(A_y \frac{\partial S}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(A_z \frac{\partial S}{\partial z} \right)}{\partial z} \quad 3.6$$

Onde,

u, v e w – Velocidade horizontal (direcção x e y) e vertical (direcção z) da corrente ($m.s^{-1}$);

t – Tempo (s);

x e y – Distâncias horizontais e verticais (m);

v_x e v_z – Coeficientes horizontais e verticais de difusão turbulenta ($m^2.s^{-1}$);

P – Pressão ($N.m^{-2}$);

ρ – Densidade ($kg.m^{-3}$);

Cf – Coeficiente de atrito;

H – Profundidade (m);

ξ – Elevação da superfície (m);

τ – Tensão de corte do vento ($N.m^{-2}$).

Os primeiros termos das Equações 3.2 e 3.3 representam a variação de caudal ao longo do tempo, a convecção e a difusão turbulenta nas três direcções. Os termos da direita representam o atrito, a tensão de corte do vento e o gradiente de pressão, conforme as suas duas componentes, uma barotrópica e uma baroclínica. A equação da continuidade (Equações 3.4 e 3.5), para que haja conservação do volume, condiciona a variação de caudal ao longo do rio a produzir variações correspondentes na altura de água da camada superficial. Estas variações na altura da água dão origem à componente barotrópica do gradiente de pressão. A componente baroclínica resulta de gradientes de pressão causados por variações de densidade. A Equação 3.5 calcula as velocidades verticais. Esta é uma forma simplificada da equação que a precede e é aplicada a todas camadas não superficiais.

Para que este objecto funcione precisa de um grande número de parâmetros. É necessário fixar um conjunto de parâmetros do modelo que dependem das características do sistema, como é o caso do coeficiente de pressão do vento, também denominada de coeficiente de tensão de corte do vento, do coeficiente de difusão horizontal ou difusividade horizontal e da difusividade vertical. Estes parâmetros são estabelecidos preferencialmente a partir da calibração do modelo. Os valores iniciais são escolhidos em função da bibliografia disponível. Contudo, numa análise de sensibilidade a partir de parâmetros com influência nos resultados, o seu estudo permite interpretar os resultados do modelo em função dos valores adoptados.

O coeficiente de pressão do vento é de carácter semi-empírico em que a quantificação dos valores de aplicação destas tensões não é totalmente apreendida (Pinho, 2001). A tensão do vento é uma força de atrito com origem na sua acção na superfície da água (Stewart, 2005). A energia resultante da acção do vento na superfície da massa de água, é transferida para as camadas inferiores por um escoamento turbulento da água. Assim, é frequente a consideração de uma relação constante que permite quantificar as tensões superficiais devidas ao vento (Ghisolfi, 1995). Embora para a maior parte das massas de água, e durante quase todo ano, as velocidades dos ventos sejam menores que 10 m.s^{-1} (Hellerman, 1967), o coeficiente de pressão do vento constitui uma das principais acções forçadoras dos gradientes térmicos à superfície. A gama de valores apresentada por Stewart (2005) varia entre 0,0005 e 0,0025 (para velocidades entre 7 e $22,5 \text{ m.s}^{-1}$). De acordo com Simpson e Dickey (1981), para velocidades do vento inferiores a 10 m.s^{-1} a temperatura à superfície é

principalmente influenciada pela difusão e pela troca de calor com a atmosfera enquanto que, para velocidades do vento superiores a $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a mistura vertical é muito mais intensa, tendendo a “erodir” a estratificação vertical (Ghisolfi, 1995).

A difusão pode ocorrer nas três direcções mas normalmente é anisotrópica (direcções preferenciais em função da fricção entre linhas de corrente). Segundo Okubo (1971), a difusividade horizontal situa-se entre $1 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ e $100 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$. A mistura turbulenta de calor na coluna de água é devida à difusividade vertical, com valores de 1×10^{-5} a $1\times 10^{-2} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ (Ghisolfi, 1995);

- biogeoquímica:

Dinâmica de nutrientes, matéria em suspensão e fitoplâncton. Os processos são forçados pela intensidade da luz solar, velocidade da corrente, descargas dos rios, temperatura da água - calculada pelo módulo termodinâmico - e trocas com a atmosfera, no caso do oxigénio. As principais variáveis simuladas são as concentrações de nutrientes, oxigénio dissolvido, matéria em suspensão e fitoplâncton na coluna de água, concentrações de nutrientes e oxigénio na água intersticial dos sedimentos e teores em azoto e fósforo dos sedimentos. Pode incluir-se qualquer número de espécies ou grupos de espécies de fitoplâncton, em que a produção de fitoplâncton é função da intensidade da luz, temperatura da água e da concentração dos nutrientes. A simulação das variáveis referidas implica o cálculo de um número elevado de processos: (i) físicos, tais como as trocas difusivas entre os sedimentos e a coluna de água e os processos de adsorção/desorção dos fosfatos; (ii) biogeoquímicos, tais como a mineralização, nitrificação e desnitrificação (ciclos do azoto e do fósforo); (iii) fisiológicos, tais como a fotossíntese e a respiração. A produtividade do fitoplâncton limitada pela luz é calculada através de uma versão integrada em profundidade da equação de Steele (Steele, 1962). A limitação da temperatura é considerada usando uma formulação exponencial padrão. A limitação dos nutrientes é calculada a partir das cotas internas de nutrientes.

Também para este objecto existe um elevado número de parâmetros que definem a fotossíntese, como a taxa máxima de produção e a intensidade luminosa óptima para a fotossíntese. A produtividade máxima, segundo a bibliografia consultada (Duarte e Ferreira, 1996) varia entre 0,02 e $0,2 \text{ h}^{-1}$. A intensidade luminosa óptima para a fotossíntese pode variar entre 400 e $650 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Os processos relativos às interações água-sedimento, bem como aos ciclos do fósforo e do azoto são simulados conforme descrito em Chapelle (1995) e Chapelle et al. (2000). A Tabela 3.1 apresenta a relação das principais variáveis associadas por objecto e em que cada objecto simula um conjunto de processos e de variáveis de forma modular.

Tabela 3.1 – Objectos do EcoDynamo e principais variáveis associadas (adaptado de Pereira e Duarte (2005)).

Tipos de objectos	Nomes dos objectos	“Outputs” dos objectos
Objectos responsáveis pelo forçamento	1. “Temperatura do ar”	Temperatura do ar (a partir de séries temporais)
	2. “Temperatura da água”	Fluxos radiativos entre a água e a atmosfera e temperatura da água
	3. “Vento”	Velocidade do vento (a partir de séries temporais)
	4. “Intensidade luminosa”	Radiação solar à superfície e a qualquer profundidade
	5. “Hidrodinâmico”	Nível da água, velocidade e direcção da corrente
	6. “Biogeoquímica dos sedimentos”	Concentrações de amónia, nitrato, nitrito, fosfato e oxigénio na água intersticial, fosfato adsorvido, carbono, azoto e fósforo orgânicos
Objectos que simulam variáveis de estado	7. “Substâncias dissolvidas”	Concentrações de amónia, nitrato, nitrito, fosfato e oxigénio na coluna de água
	8. “Matéria em suspensão”	Concentrações de matéria particulada total e orgânica, carbono, azoto e fósforo particulados e turbidez da água
	9. “Fitoplâncton”	Biomassa, produtividade e quotas celulares dos diversos nutrientes

É possível ligar ou desligar diversos objectos para avaliar a importância relativa de cada um dos processos por eles representados nas previsões do modelo. Os objectos foram programados de modo a incluir uma interface com outros programas em Fortran, permitindo que sejam utilizados por outras plataformas de modelação. Os resultados podem ser exportados em formato *.xls (Microsoft Excel) e em formato *.hdf (HDF - Hierarchical Data Format), possibilitando obter, através de outros softwares, tais como o MatLab ou o Noesys, imagens interpoladas ou campos de vectores (Pereira e Duarte, 2005).

O EcoDynamo pode funcionar em multi-processamento para aplicações mais complexas, em que os cálculos relativos a cada objecto podem ser efectuados em processadores diferentes. A sincronização entre os diferentes processos é feita pela “shell” do modelo.

O modelo admite a simulação de descargas em qualquer ponto da malha, o que possibilita a criação de uma rede de influxos de poluição pontual na albufeira. Permite ainda a remoção de camadas de água quando o nível da albufeira baixa. A dimensão da malha é variável, sendo apenas fixo o comprimento das células ao longo de cada coluna j e a espessura ao longo de cada camada i , excepto a da superfície, devido às oscilações na elevação da água simuladas pelo modelo.

A malha de diferenças finitas utilizada para implementar o modelo tridimensional, é do tipo descentrado (Vreugdenhil, 1989). As propriedades vectoriais, tais como as velocidades e os caudais, são calculadas nos lados das células da malha. As propriedades escalares, como as concentrações das diversas variáveis, são calculadas no centro.

As características e propriedades do ecossistema são descritas na base de dados do modelo nos diferentes ficheiros de:

- Morfologia – representação geométrica do modelo e das dimensões da malha utilizada;
- Classes – lista dos objectos disponíveis para um determinado modelo, dependendo dos processos e variáveis considerados;
- Variáveis – lista das variáveis, assim como os seus valores iniciais para cada célula da malha;
- Parâmetros – lista dos parâmetros e respectivos valores;
- Rios – valores e localização da entrada de afluentes dentro do domínio;
- Perdas – valores e localização das descargas dentro do domínio.

O corpo da albufeira foi dividido na vertical e horizontal: uma grelha horizontal e um conjunto de camadas verticais, que compõem o domínio do modelo (Figura 3.2). Inicialmente, foi implementada uma quadrícula de 50 m de resolução, perfazendo 1 504 linhas por 1 104 colunas. Porém, o elevado número de células, iria implicar um tamanho dos ficheiros e um tempo de cálculo incomportável,

pelo que foi definida uma nova grelha de 200 m por 200 m, correspondendo a 376 linhas por 276 colunas (Figura 3.2).

A transformação do ficheiro original em formato *ascii* (American Standard Code for Information Interchange) foi estabelecida através de interpolação utilizando o software Surfer (R) Version 8.0. A conversão para o formato (X, Y, Z) em (linha, coluna, profundidade) e a criação da matriz de domínio (conjunto de pontos que formam um rectângulo com a albufeira inscrita) foi através do MatLab 6.5, tendo em conta a origem da matriz total no canto inferior esquerdo, a cota a Janeiro de 2004 (143,13 m) e a indicação do valor “-9999” para as células sem informação de profundidade. Para que este ficheiro fosse lido por um sistema de informação geográfica, foi georeferenciada a malha que contém a albufeira a partir das coordenadas Hayford-Gauss Militares: do o canto inferior esquerdo do ficheiro da batimetria ($X = 134967,9$ m e $Y = 237470,7$ m). A tabela foi importada por meio do Microsoft Access (ficheiros *.dbf) para o ArcMap e a conversão em *.shp (ShapeFile) em ArcCatalog.

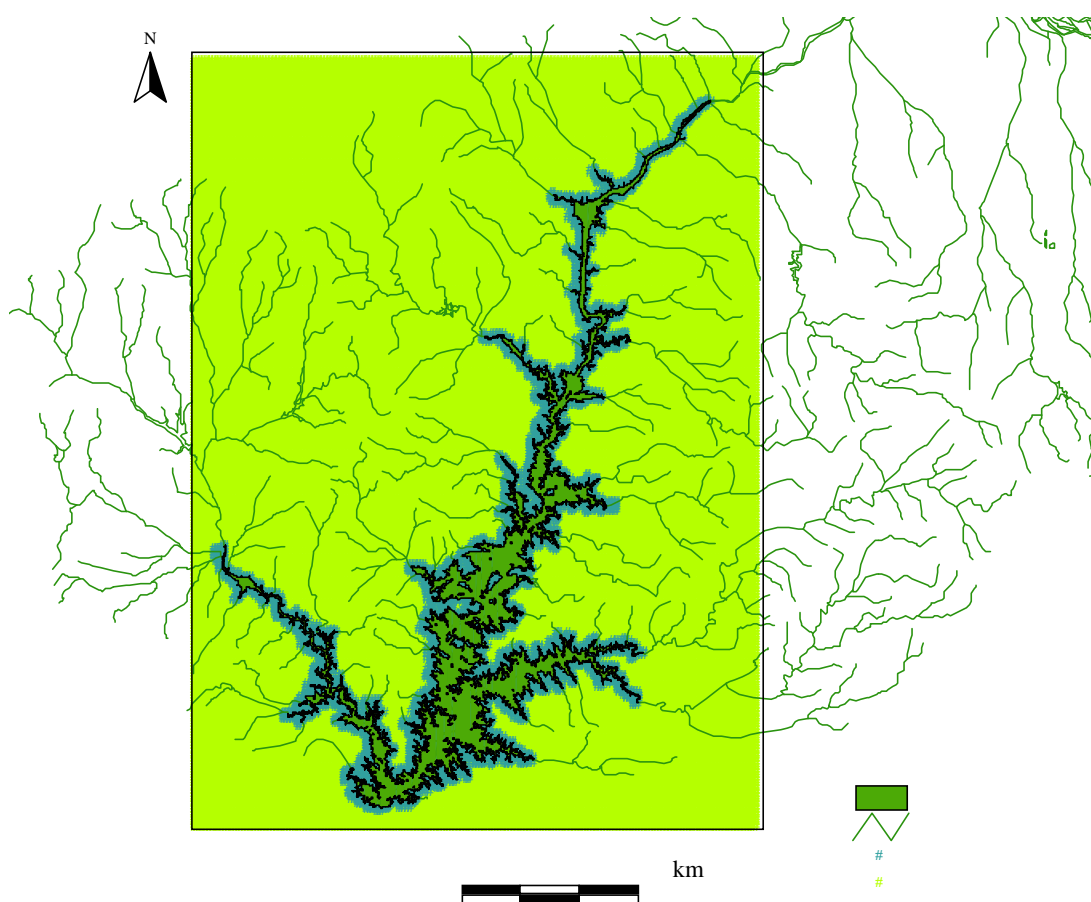


Figura 3.2 – Identificação do domínio e sub-domínio.

Foi ainda elaborado um ficheiro de sub-domínio, em que apenas são consideradas as células que estão contidas no espelho de água e as células abrangidas por um contorno até 200 m a partir do NPA da albufeira (*buffer*). Este sub-domínio permite que o modelo seja mais célere, efectuando cálculos apenas nestas células (Figura 3.2). O sub-domínio resultou da intercepção da ShapeFile do *buffer* de 200 m do contorno da albufeira com a ShapeFile contendo as coordenadas do modelo. A exportação do ficheiro resultante é em *.txt e em *.xls sendo utilizado pelo Surfer e pelo EcoDynamo respectivamente.

3.2. Dados forçadores

O trabalho de modelação numérica pressupõe a existência de dados relativos às características climatéricas, biofísicas, morfológicas da bacia de drenagem e albufeira, assim como dados hidrológicos, hidrodinâmicos e de qualidade da água com a maior resolução temporal possível (preferencialmente valores horários). Importa salientar que é possível definir uma simulação com condições meteorológicas médias e dentro de uma gama de valores representativos da região em causa, embora, os resultados tendam a ser menos realistas.

Deste modo, para a caracterização das condições locais são necessários dados de:

- climatologia: temperatura do ar, humidade do ar, velocidade e direcção do vento, intensidade da luz, humidade relativa e radiação solar;
 - geomorfologia: topografia da albufeira com uma resolução inferior ou igual a 200 m, com identificação das condições de fronteira;
 - hidrodinâmica: caudais afluentes à albufeira com identificação da localização de descarga, temperatura e qualidade química e biológica da água afluente;
 - qualidade da água da albufeira para iniciar o modelo: temperatura, concentrações de sólidos suspensos e respectivos teores em azoto e fósforo, concentrações de amónia, nitrito, nitrato e fosfato, oxigénio dissolvido, azoto e fósforo orgânico dissolvidos, clorofila *a*, e coeficiente de extinção da luz.
-

A concentração de qualquer variável depende não só dos seus processos de produção e decaimento, mas também do seu transporte (advecção e difusão) pela corrente do rio. O transporte horizontal e vertical depende do caudal do rio e dos gradientes de pressão horizontais provocados pelas diferenças na elevação da água e de densidade (gradientes de pressão baroclínicos).

3.2.1. Origem dos dados

Os dados usados para forçar e validar o modelo foram obtidos através do Instituto Nacional da Água, I.P. (INAG), pelo Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), e através de dados disponibilizados pela EDIA:

a) SNIRH

Os dados meteorológicos foram disponibilizados por este sistema. Estes encontram-se distribuídos por estações que constituem a rede meteorológica automática. Os critérios de selecção das estações tiveram em conta não só a representatividade para toda a bacia dos valores observados (localização geográfica (interior da albufeira)), mas também a possibilidade de comparação com registos obtidos de outras fontes, assim como a qualidade e quantidade dos dados disponíveis para o ano de 2004. As características das estações automáticas seleccionadas encontram-se indicadas na Tabela 3.2 e representados na Figura 3.3, assim como o número de registos por parâmetro.

Os dados das estações automáticas têm um elevado detalhe visto correspondem a leituras instantâneas feitas a cada 15 minutos. Estas constituem a base de cálculo para as séries de valores médios horários. Os concentradores destes dados são interrogados presentemente a cada quatro horas pelo servidor do INAG e são validados instantaneamente através de um programa automático de pós-processamento sobre os quais incide ainda uma contra-análise mensal por um técnico especializado.

Os caudais de exploração do volume armazenado da estação de Alqueva explorada pela EDIA/CPPE (Companhia Portuguesa de Produção de Electricidade, SA) não são obtidos por medição directa, mas sim por divisão da variação do volume pelo tempo, verificados pela CPPE

mais tarde. Como o volume é obtido indirectamente através da cota e dadas as dimensões do lago artificial de Alqueva, por vezes a variação das cotas entre leituras subestima o volume, que se acumula na leitura seguinte (INAG, 2006b).

Tabela 3.2 – Principais características das estações meteorológicas e hidrométricas seleccionadas e número de dados para cada um dos parâmetros utilizados. As estações seleccionadas são do tipo automática com transmissão de dados por telemetria.

	Albufeira de Alqueva - Montante	Albufeira de Alqueva (Mourão)	Alqueva (EDIA/CPPE*)
Código	24L/02F	22M/05F	24F/07A
Distrito	Beja	Évora	Beja
Concelho	Moura	Mourão	Moura
Freguesia	São João Baptista	Mourão	São João Baptista
Entrada funcionamento	19-07-2002	26-09-2002	19-07-2002
N.º de dados em 2004:			
Direcção do vento horária (rad)	8530	8552	
Velocidade do vento médio horário (m.s ⁻¹)	8530	8780	
Temperatura do ar horária (°C)	8530	8602	
Humidade relativa média horária (%)	8530	8598	
Radiação horária (Wh.m ⁻²)	8530	7880	
N.º de dados em 2006:			
Caudal efluente médio diário (m ³ .s ⁻¹)			232
Caudal afluente médio diário (m ³ .s ⁻¹)			230
Tipo de estação automática	Climatológica flutuante	Climatológica flutuante	Hidrométrica com sensor automático

b) EDIA

A EDIA facultou os dados de qualidade da água, pois esta é monitorizada mensalmente desde o início do enchimento da Albufeira. São analisados parâmetros químicos, microbiológicos e fitoplanctónicos no âmbito do Programa de Monitorização da Qualidade da Água nas Albufeiras de Alqueva e Pedrógão – Fase de Enchimento – em locais que possibilitam uma monitorização nas vertentes de fluxo de entrada, estado e fluxo de saída.

Do total de locais amostrados, no âmbito deste trabalho, apenas foram utilizados os três locais que caracterizam os fluxos de entrada. Os respectivos resultados foram usados para forçar e calibrar o modelo, caracterizando os fluxos de entrada: rio Guadiana – Senhora da Ajuda, rio Degebe – Álamos – Captação e rio Alcarrache – Alcarrache (Figura 3.3).

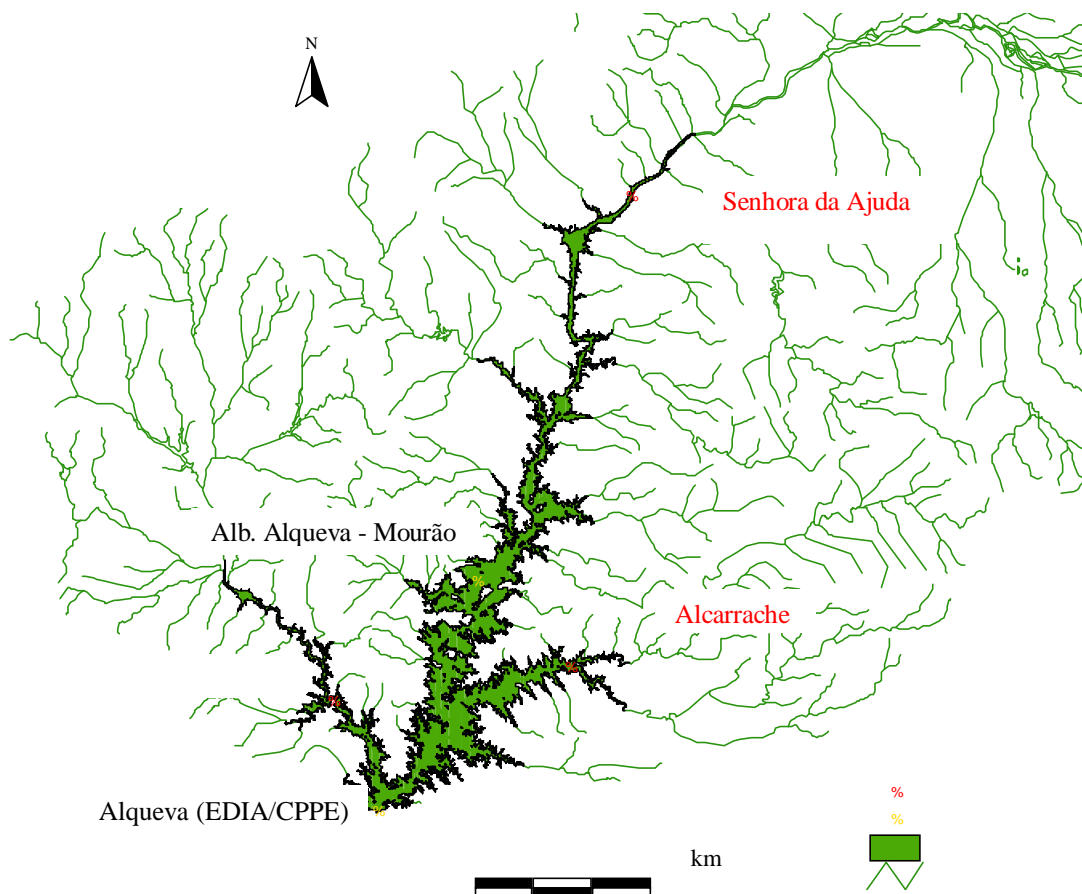


Figura 3.3 – Localização das estações meteorológicas automáticas SNIRH seleccionadas e dos locais de amostragem da EDIA.

Para cada local de amostragem são utilizados dados de medições *in loco*, com equipamento apropriado, de parâmetros físico-químicos (temperatura e oxigénio dissolvido) e dados de colheitas de amostras de água para posterior análise em laboratório (nitratos, nitritos, azoto total, fosfatos, sólidos suspensos totais (SST) e clorofila *a*).

Esta empresa ainda forneceu a altimetria, em formato *ascii*, com uma resolução de 50 m por 50 m, posteriormente convertida para uma resolução de menor detalhe e convertida em batimetria conforme se apresenta na Figura 3.4 (cf. – 3.1).

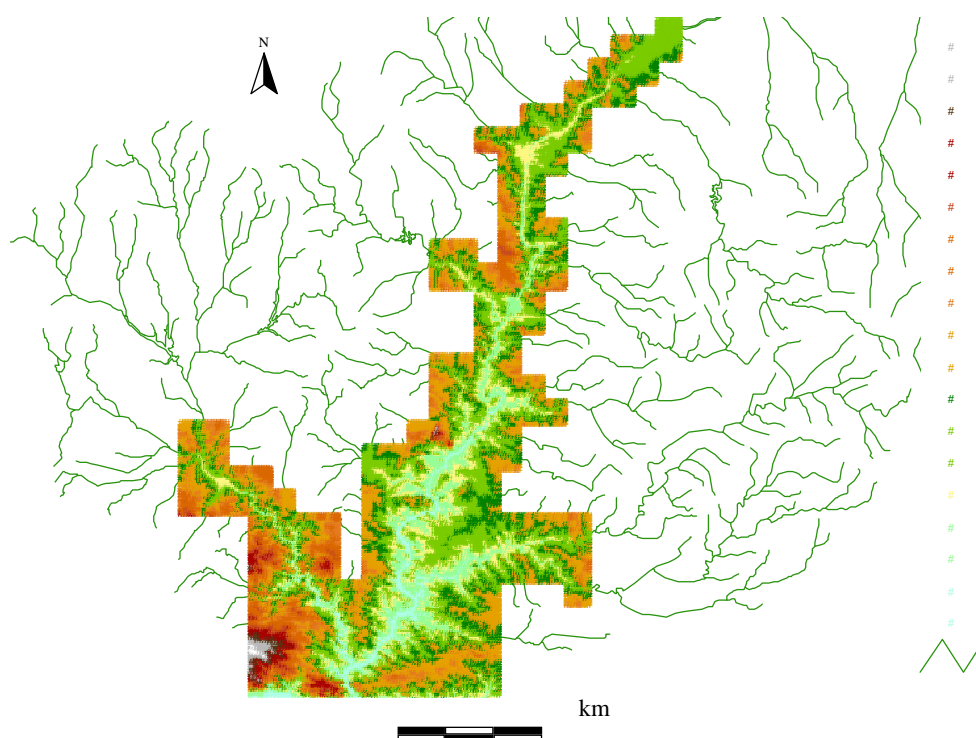


Figura 3.4 – Dados de batimetria para uma resolução de 200 m por 200 m. Profundidades com valor positivo e altitudes com valor negativo relativo ao NPA, cota 152 m.

3.2.2. Dados meteorológicos

A qualidade da água na albufeira é influenciada directamente pelos factores meteorológicos. Com efeito, ao nível das trocas de calor na interface ar-água, ou ao nível da força do vento, são desencadeados processos físicos de grande importância quer ao nível das trocas gasosas, por influência da velocidade do vento, quer ao nível de fenómenos como a evaporação. Por sua vez, a produção primária tem como factor chave a radiação solar, que por sua vez controla o desenvolvimento de processos de eutrofização.

Para o período simulado, mês de Julho de 2004, surgiu a necessidade de utilizar a média ponderada entre os dados medidos nas estações automáticas de Albufeira de Alqueva e Albufeira de Alqueva – Mourão, devido ao facto de existirem lacunas nas séries disponíveis, verificando-se a existência de tendências temporais entre as variáveis com um elevado valor de correlação.

a) Temperatura do ar

Os valores da temperatura do ar foram introduzidos no modelo com frequência horária (Figura 3.5). Por conseguinte, minimiza-se a probabilidade de não se observar o efeito da mistura convectiva ocorrida durante a noite. Este pode ser um importante processo que afecta a profundidade do epilímnion.

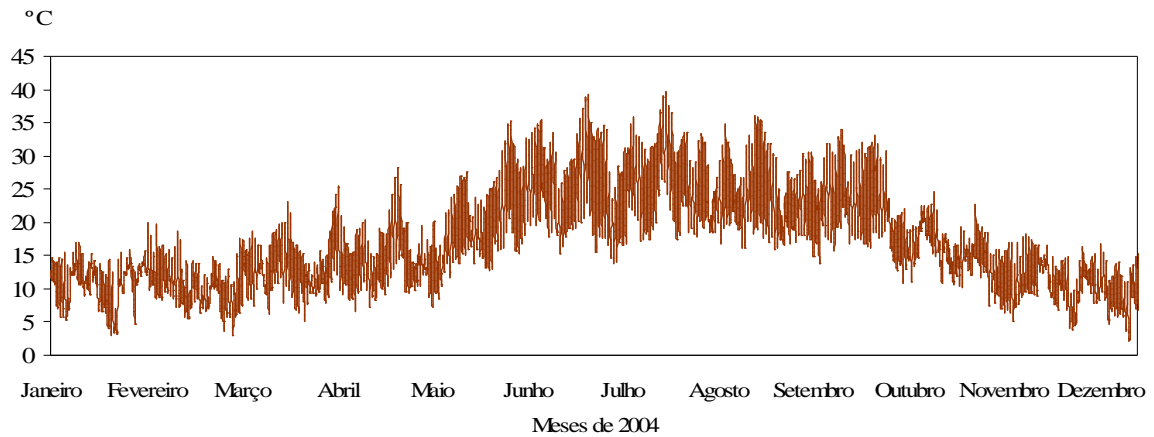


Figura 3.5 – Valores horários da temperatura do ar para o ano de 2004 (°C).

b) Humidade relativa do ar

A humidade relativa condiciona a taxa de evaporação e a perda do calor latente, influenciando também a temperatura da água. A Figura 3.6 ilustra a variação dos valores de humidade relativa para o ano de 2004.

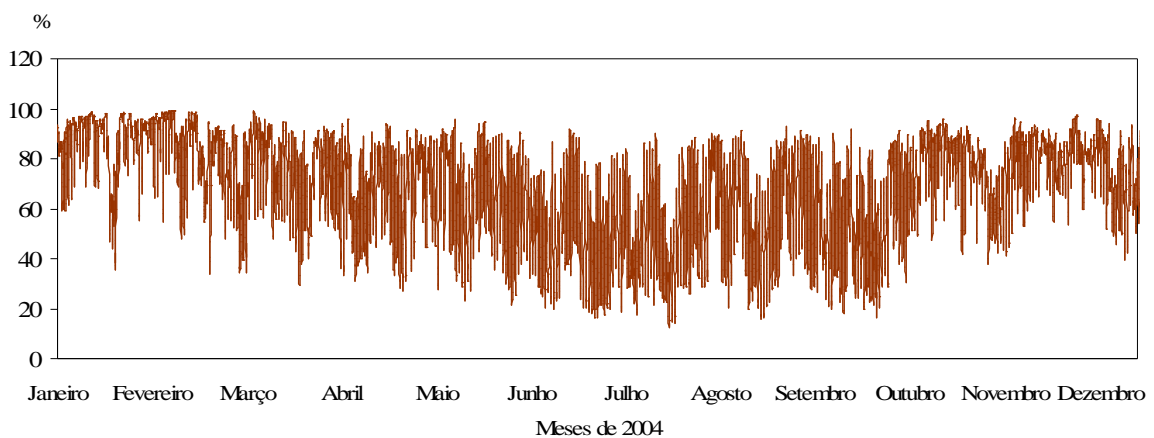


Figura 3.6 - Valores horários de humidade relativa do ar para o ano de 2004 (%).

c) Vento – velocidade e direcção

A acção do vento na camada de mistura superficial, conjuntamente com a temperatura é o fenómeno físico que mais condiciona a localização e o formato da termoclina, pela mistura que induz na massa de água, introduzindo variações sazonais de acordo com os ventos dominantes. Aliás, o vento é o elemento forçador da circulação principal quando os caudais são reduzidos. As Figura 3.7 e Figura 3.8 apresentam as variações médias horárias da velocidade e direcção do vento para a albufeira de Alqueva, formando dois ficheiros forçadores do modelo.

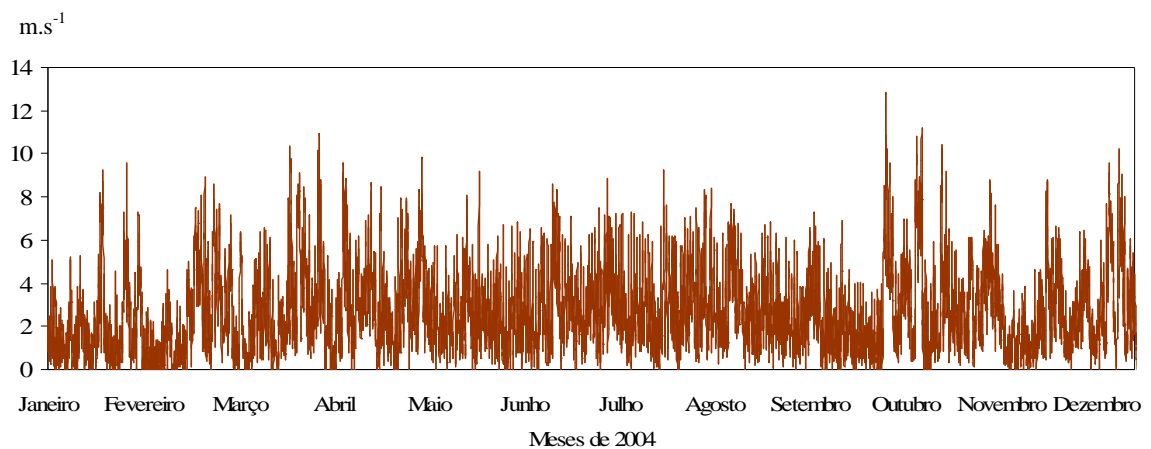


Figura 3.7 - Valores horários da velocidade do vento para o ano de 2004 ($m.s^{-1}$).

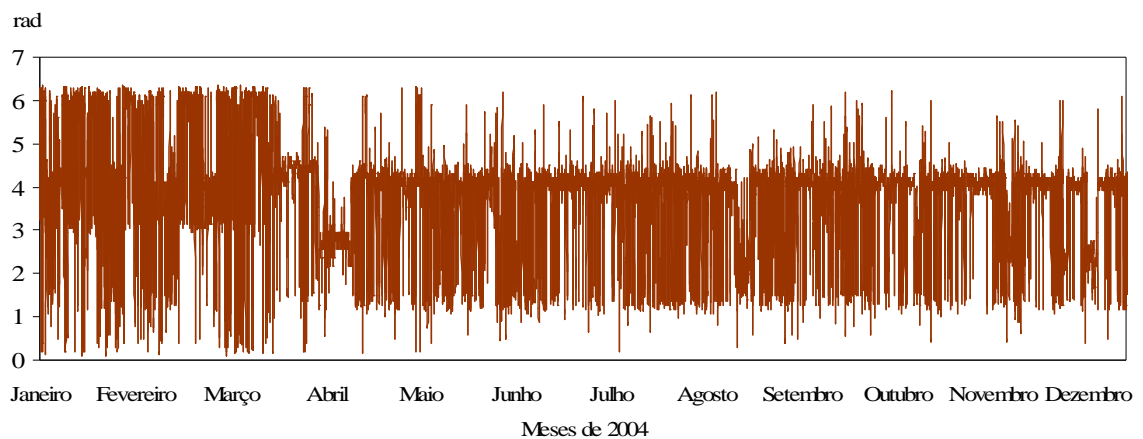


Figura 3.8 - Valores horários da direcção do vento para o ano de 2004 (rad).

d) Radiação

A radiação solar contribui para o aquecimento da camada superficial e influencia a produtividade das algas. As estações meteorológicas do SNIRH contabilizam a radiação solar global incidente (Figura 3.9).

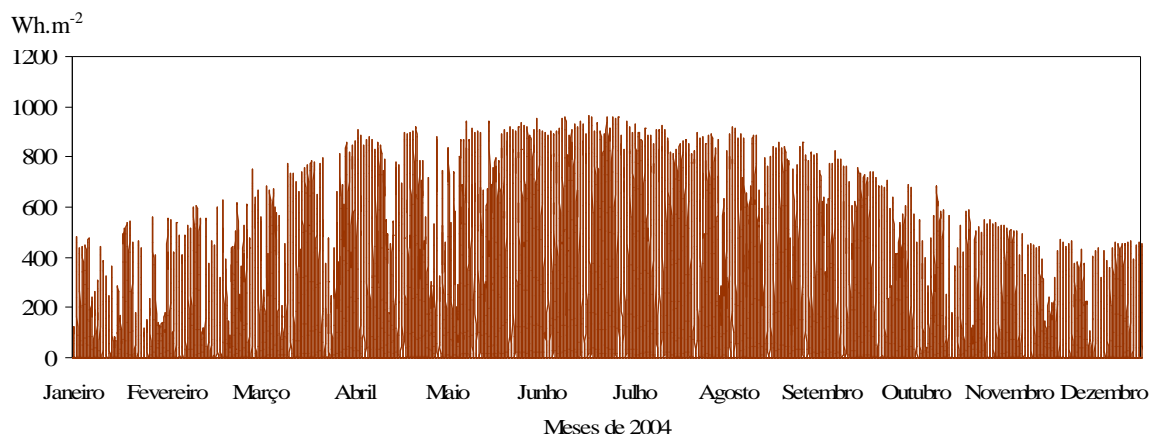


Figura 3.9 – Valores horários da radiação solar para o ano de 2004 (W.h.m⁻²).

e) Caudais afluentes e efluentes

É fundamental a correcta contabilização dos caudais de água afluentes e efluentes, uma vez que determinam as condições hidrodinâmicas existentes no sistema, de que dependem os resultados da qualidade da água. No entanto, nem sempre é possível obter dados fíáveis e consistentes, o que torna limitante a identificação de padrões de variação. No presente trabalho, foram usados os valores da estação Alqueva (EDIA/CPPE) para caracterizar caudais de entrada e saída da albufeira relativos ao ano de 2006. Esta escolha deveu-se à inexistência de dados de caudal afluente e efluente medidos para a mesma estação para o ano de 2004, apenas há registos de ambos os parâmetros a partir de Novembro de 2005. Deste modo, evitam-se discrepâncias entre valores resultantes de diferentes sistemas de recolha de dados, de medição, registo e validação da informação armazenada. Tendo em conta que o objectivo deste trabalho é direccionado para a reprodução dos fenómenos de maior relevo que ocorrem na albufeira, é possível utilizar dados fora do ano de 2004, desde que representativos da albufeira.

Os valores de caudais afluentes apresentam-se na Figura 3.10, assim como os valores da descarga da albufeira se apresentam na Figura 3.11. Foram efectuadas pequenas interpolações para colmatar as falhas existentes nas séries de dados.

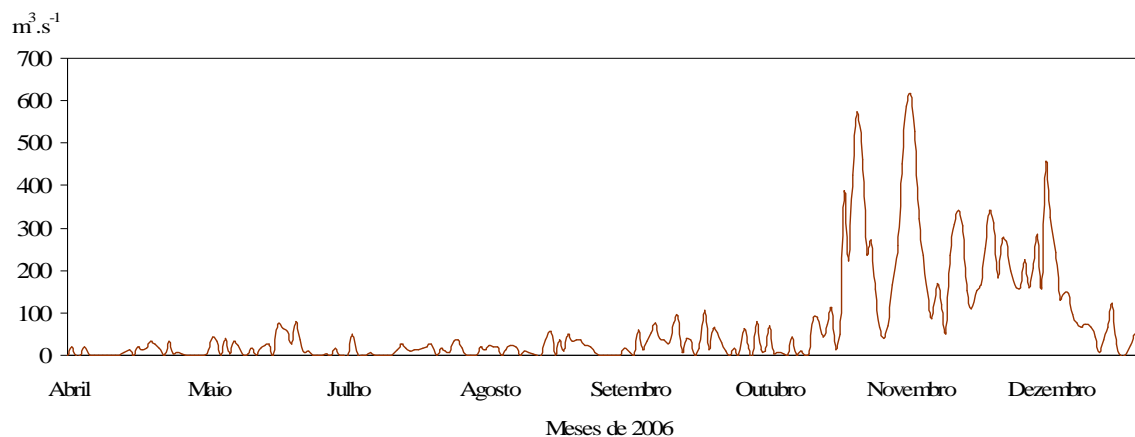


Figura 3.10 - Valores médios diários de caudal afluente para parte do ano de 2006 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

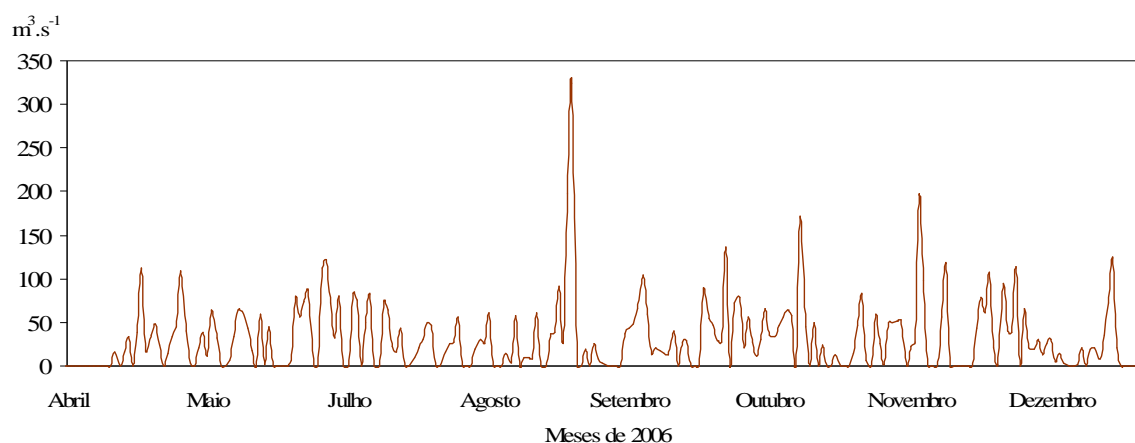


Figura 3.11 - Valores médios diários de caudal efluente para parte do ano de 2006 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Os valores de caudais afluentes foram distribuídos pelos diferentes tributários (rios e ribeiras) tendo em conta a proporção entre as respectivas áreas de drenagem. Na Figura 3.12 estão representados os 38 pontos de entrada (afluentes) e o único ponto de saída de caudais da albufeira (descarga de fundo da barragem).

os restantes afluentes, foi considerado um valor médio das três amostragens nos três locais da EDIA: Senhora da Ajuda, Alcarrache e Álamos – Captação (cf. – Figura 3.3).

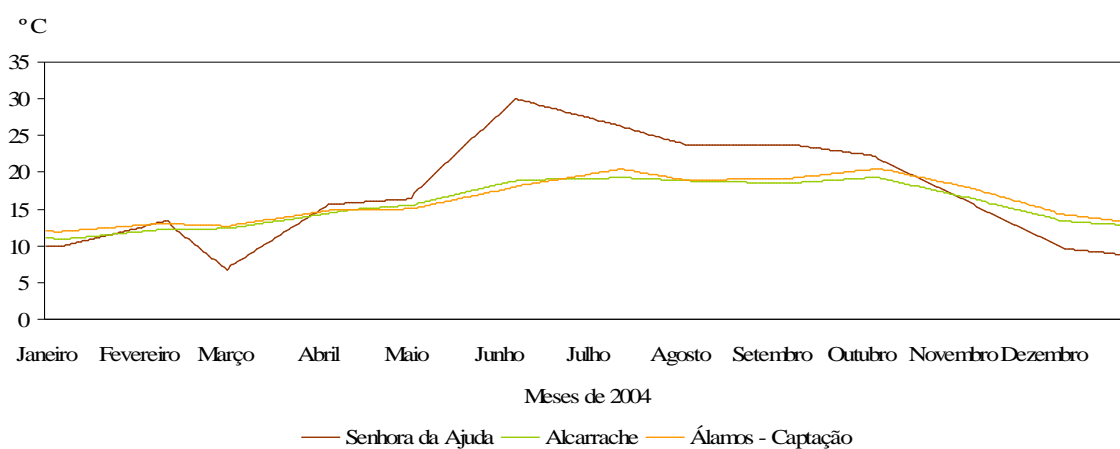


Figura 3.13 – Valores de temperatura da água observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 (°C).

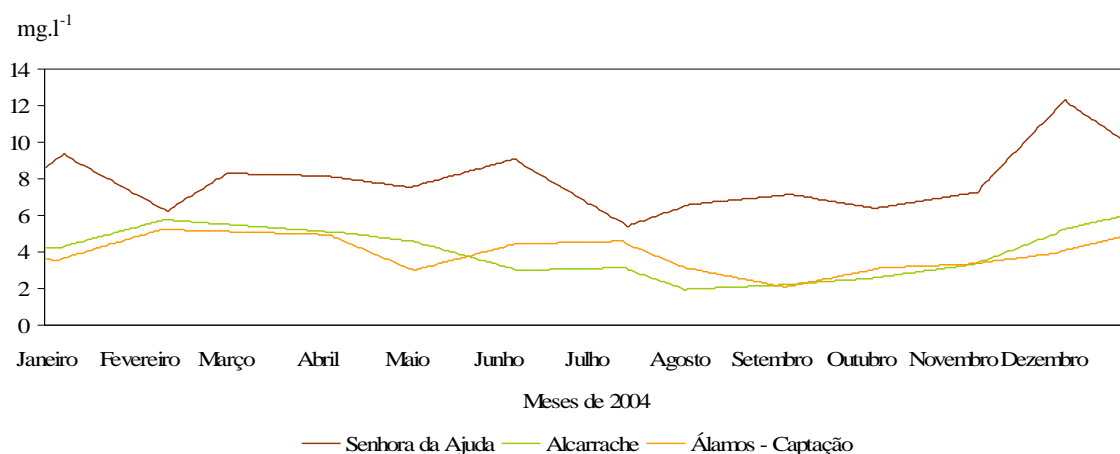


Figura 3.14 – Valores de oxigénio dissolvido observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 (mg.l⁻¹).

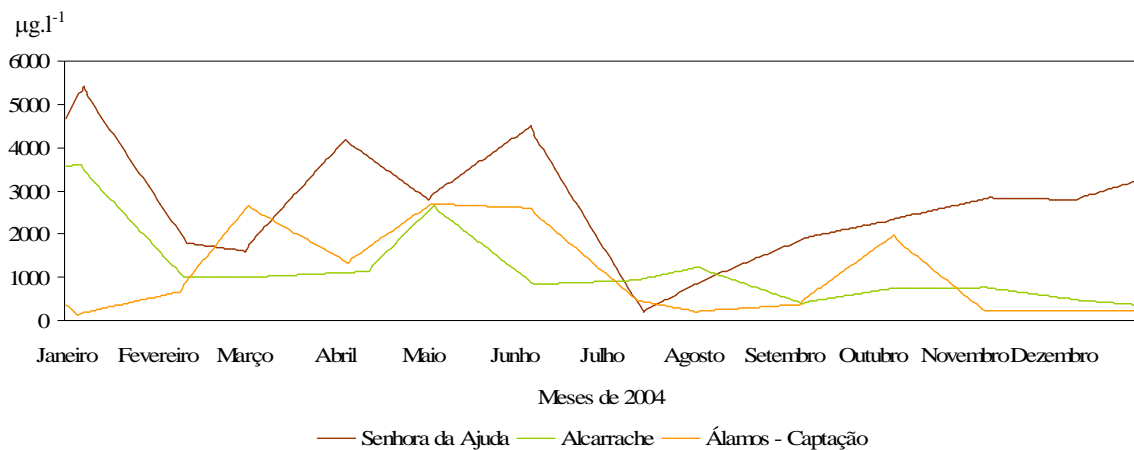


Figura 3.15 – Valores de nitratos observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 ($\mu\text{g.l}^{-1}$).

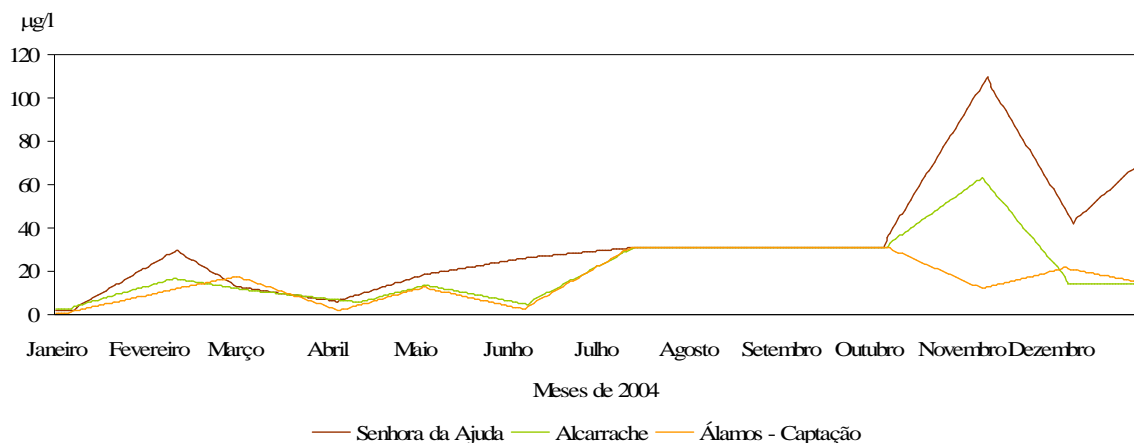


Figura 3.16 – Valores de nitritos observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 ($\mu\text{g.l}^{-1}$).

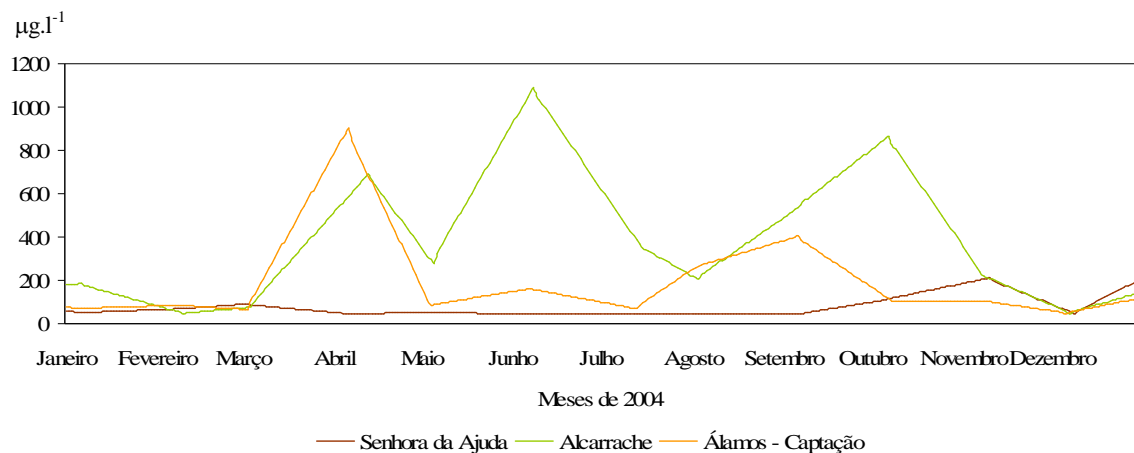


Figura 3.17 – Valores de azoto amoniaco observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 ($\mu\text{g.l}^{-1}$).

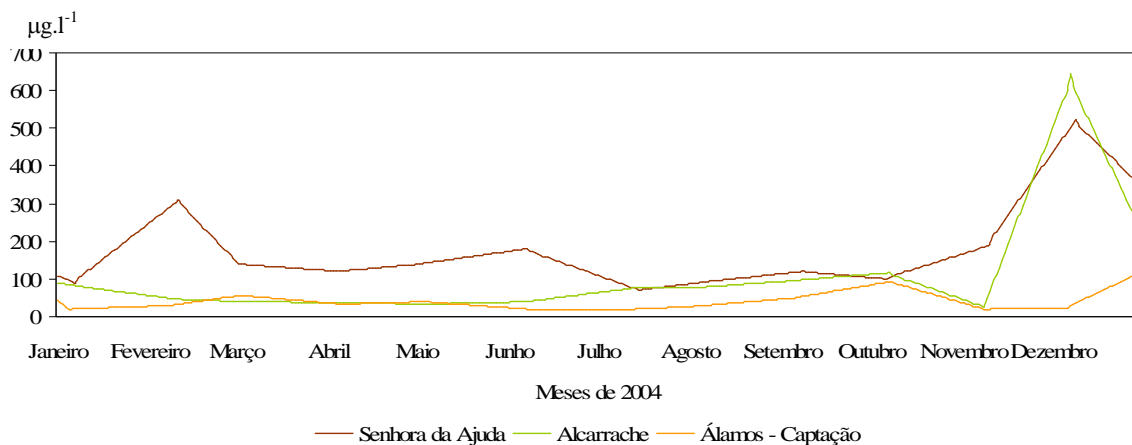


Figura 3.18 – Valores dos fosfatos observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 ($\mu\text{g.l}^{-1}$).

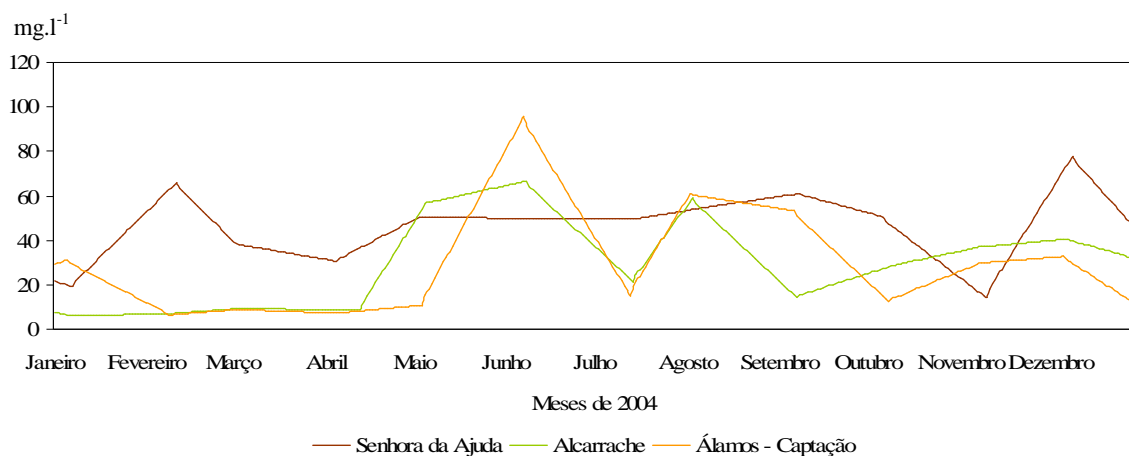


Figura 3.19 – Valores de sólidos suspensos totais observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 (mg.l^{-1}).

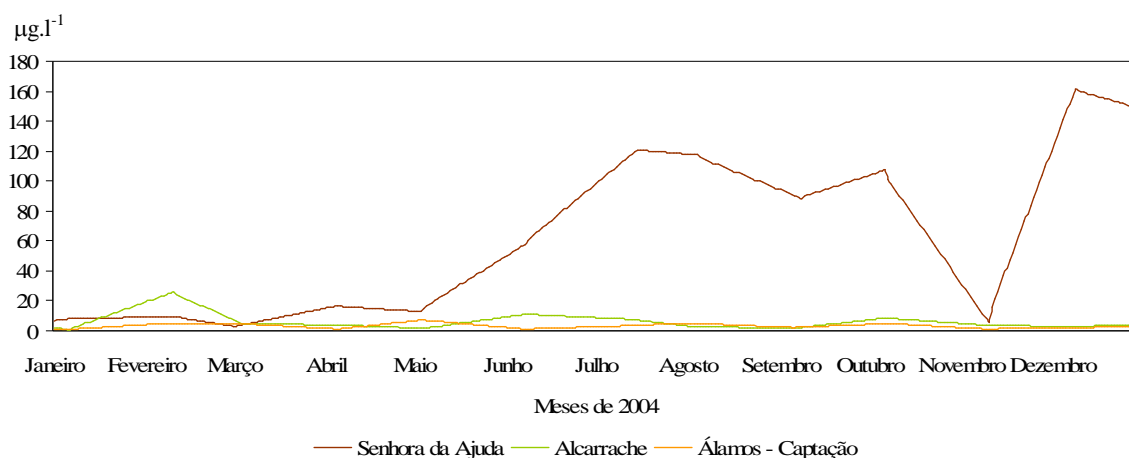


Figura 3.20 – Valores de clorofila *a* observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 ($\mu\text{g.l}^{-1}$).

3.3. Dados para comparação entre valores observados e valores do modelo

Para comparação dos valores simulados e os valores observados, foram utilizados dados mensais fornecidos pela EDIA (Figura 3.21) que caracterizam os fluxos de estado (Albufeira de Alqueva – Mourão e Albufeira de Alqueva – Montante) e de saída (Albufeira de Alqueva – Jusante). Para os dois primeiros locais (características lânticas) existem medições de superfície, meio e fundo, assim como conjuntos de valores que caracterizam os perfis verticais em termos de temperatura e oxigénio dissolvido.

Foram ainda utilizadas as séries de valores horários de temperatura e oxigénio dissolvido recolhidas nas estações do SNIRH (Tabela 3.3 e Figura 3.21). Estas localizam-se sobre o corpo da albufeira (Albufeira de Alqueva – Mourão e Albufeira de Alqueva – Montante), visto que apresentam maior detalhe em termos de variação temporal (séries de valores horários).

Tabela 3.3 – Principais características das estações de qualidade seleccionadas e número de dados para cada um dos parâmetros utilizados. As estações seleccionadas são do tipo automática com transmissão de dados por telemetria.

	Albufeira de Alqueva – Montante	Albufeira de Alqueva – Mourão
Código	24M/05	23M/03
Distrito	Beja	Évora
Concelho	Moura	Mourão
Freguesia	São João Baptista	Mourão
Entrada funcionamento	19-07-2002	12-03-2002
N.º de dados em 2004:		
Temperatura da amostra (°C)	8292	8253
Oxigénio dissolvido - campo (mg.l ⁻¹)	8304	8251
Tipo de estação automática	Qualidade automática	Qualidade automática

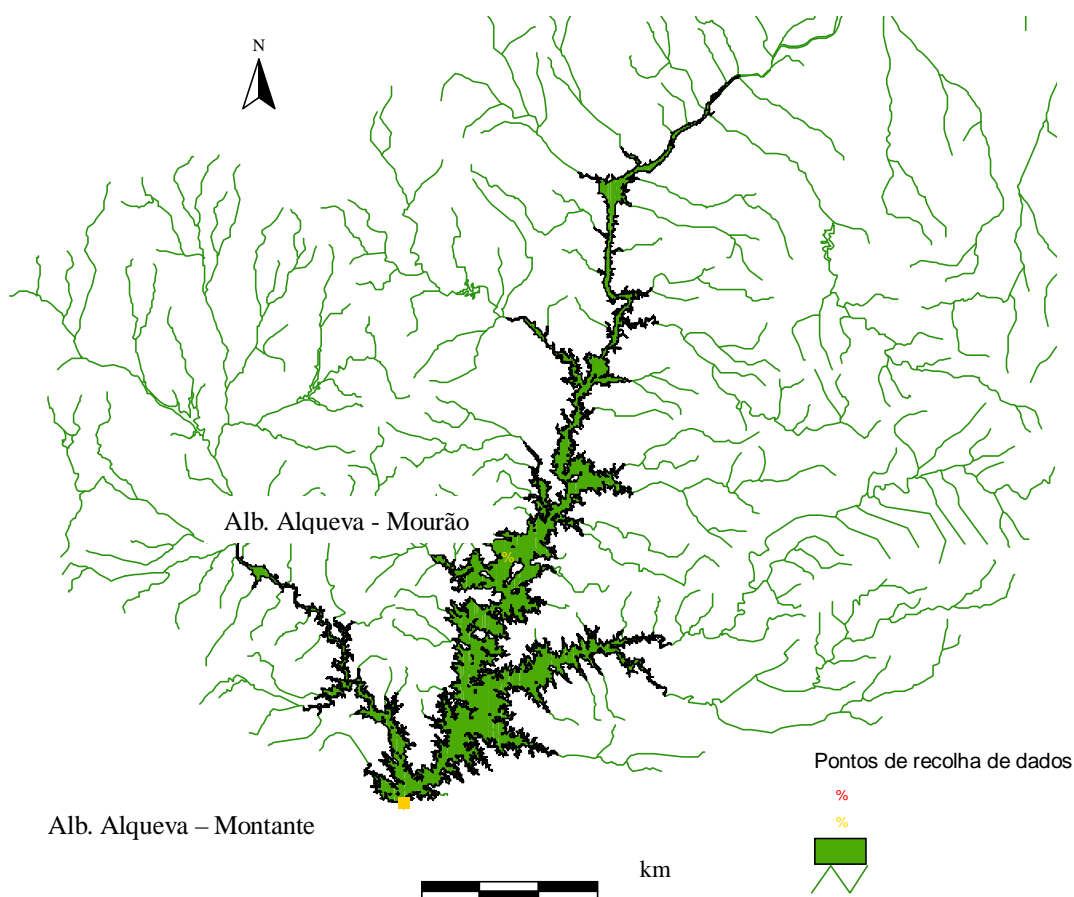


Figura 3.21 – Localização das estações meteorológicas automáticas SNIRH seleccionadas e dos locais de amostragem da EDIA.

3.4. Organização e metodologia das simulações

3.4.1. Organização das simulações

De modo a atingir os objectivos propostos para o presente trabalho, foram elaborados dois conjuntos de simulações de acordo com os objectivos específicos estipulados. O primeiro conjunto visa a implementação e verificação do modelo tridimensional para a albufeira de Alqueva; o segundo conjunto destina-se a avaliar importância relativa dos processos termodinâmicos, hidrodinâmicos – com especial enfoque para a consideração do vento, na estratificação vertical da albufeira – e biogeoquímicos na qualidade da água da albufeira de Alqueva.

I. O primeiro conjunto permitiu implementar o modelo. Este foi inicializado para valores homogêneos para todas as células com uma temperatura média de 16,7° C (média

ponderadas para o mês de Julho a partir dos dados disponíveis da EDIA). A simulação retrata o mês de Julho de 2004 (das 00:00 do dia 1 às 00:00 do dia 31).

Foi utilizado o valor para a difusividade horizontal de $20 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, para a difusividade máxima vertical de $0,005 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e para o coeficiente de pressão do vento de 0,001 (cf. – 3.1).

Este grupo inclui as simulações realizadas com a morfologia para 5 camadas. As 4 primeiras apresentam uma profundidade máxima de 10 m cada e a camada de fundo inclui as profundidades superiores a 40 m. A resolução vertical apresenta um total de 518 880 células. Esta condição revelou-se limitativa à representação da termoclina (espectável a 6-12 m), tornando-se necessário melhorar a resolução vertical à superfície. Em função dos resultados anteriores foi elaborada uma nova morfologia com 7 camadas. As primeiras três camadas apresentam uma profundidade máxima de 3,3(3) m e as camadas 4 e 5 têm no máximo 10 m, onde a última inclui as profundidades superiores a 40 m. Nestas circunstâncias a morfologia apresenta um total de 726 432 células. Apesar da representação da termoclina ser mais aproximada da realidade, as células demonstraram ser excessivas para a implementação do modelo, causando problemas de memória e inviabilizando o seguimento desta estrutura.

Com ambas as morfologias foram realizadas as seguintes simulações:

- I.1. Usando apenas o objecto termodinâmico, foram simuladas e analisadas as variações da temperatura da água ao longo do mês de Julho somente com base nas trocas de calor ar-água, fluxos radiativos do sol, da atmosfera e da água;
 - I.2. Utilizando os objectos termodinâmico e hidrodinâmico e os objectos que fornecem os valores das funções forçadoras: temperatura e humidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direcção do vento e caudais afluentes com valor constante nulo. Esta simulação apenas foi efectuada para a morfologia dividida em 5 camadas;
 - I.3. Igual à anterior excepto que se incluíram os valores dos caudais fluviais. Para a morfologia com 5 camadas, esta simulação foi feita até ao dia 21 de Julho de 2004.
-

Foi ainda efectuada uma pequena análise de sensibilidade, em que foram modificados os valores iniciais dos parâmetros de transporte (cf. – 3.1): coeficiente de difusão horizontal, difusidade máxima vertical e coeficiente de pressão do vento. Foram realizadas 3 simulações apenas para a morfologia com 5 camadas, para as condições definidas para a simulação I.3 e usando alternadamente o valor zero para cada parâmetro referido. Foram elaboradas as simulações:

- I.3.V com alteração apenas do coeficiente de pressão do vento;
- I.3.DH com alteração apenas da difusidade horizontal;
- I.3.DMV com alteração apenas da difusidade máxima vertical.

II. No segundo conjunto foi avaliada a importância relativa dos processos físicos, químicos (nutrientes e oxigénio) e biológicos. Em função das simulações anteriores, optou-se por uma morfologia final de 6 camadas com base na morfologia com 7 camadas e aglutinando as duas camadas de fundo. Nesta divisão, as três camadas superficiais apresentam uma profundidade máxima de 3,3(3) m, a quarta e a quinta 10 m e a camada de fundo inclui as profundidades superiores a 30 m. O ficheiro de morfologia final possui um total de 622 656 células com 200 m de largura e por 200 m de comprimento com altura variável, decompostas em 376 linhas, 276 colunas e 6 camadas. Para responder aos objectivos específicos foram elaboradas 3 simulações para o período de tempo compreendido entre o dia 1 de Julho de 2004 às 00:00:00 e o dia 5 de Agosto às 00:00:00 e as simulações II.4 decorrem apenas de dia 1 ao dia 22 de Julho às 00:00:00.

As simulações realizadas foram as seguintes:

- II.1. Com a morfologia com 6 camadas, repetiu-se as condições da simulação I.1, para reforçar os padrões dos resultados para 7 camadas;
- II.2. Além dos objectos utilizados na simulação II.1 (objectos 1., 2. e 4. cf. – Tabela 3.1), utilizaram-se o objecto da hidrodinâmica e das substâncias e o oxigénio dissolvido, tratando-se as respectivas variáveis como conservativas. Ou seja, fazendo com que as mesmas sejam alteradas somente por processos físicos;

II.3. Usando-se os mesmos objectos e funções forçadoras que em II.2, excepto que os nutrientes são sujeitos aos ciclos biogeoquímicos;

II.4. Configuração igual à anterior acrescentando ainda o objecto fitoplâncton.

À semelhança da simulação I.3, foi efectuada uma pequena análise de sensibilidade, em que foram modificados os valores iniciais dos parâmetros do fitoplâncton (cf. – 3.1): taxa máxima de produção e intensidade luminosa óptima para a fotossíntese. Dada a grande variedade de valores reportados na bibliografia destes parâmetros optou-se por realizar as seguintes simulações:

II.4.Pmax alteração apenas da taxa máxima de produção de $0,05 \text{ h}^{-1}$ para $0,1 \text{ h}^{-1}$;

II.4.Iopt alteração apenas da intensidade luminosa óptima para a fotossíntese de 850 para 425.

Todas as simulações foram realizadas para o mês de Julho de 2004 e de modo a avaliar o desempenho do modelo numa situação de Verão, em que a estratificação vertical da água tende a potenciar fenómenos relacionados com a estratificação. Assumiu-se uma temperatura inicial de $16,7^\circ \text{C}$ para todas as camadas (próximo do valor médio de Verão). Com a análise dos resultados das simulações pretende-se avaliar se o modelo prevê adequadamente o desenvolvimento do epilímnion.

Com as simulações termodinâmicas (I.1 e II.1) ambiciona-se analisar o tempo necessário para se atingir temperaturas e estratificação de Verão sem dinamismo, assim como avaliar a importância relativa dos diversos fluxos energéticos. Ao ser adicionado o objecto hidrodinâmico, espera-se identificar a importância relativa destes processos na mistura vertical e na variação da temperatura da água, assim como no desenvolvimento da termoclina. As simulações I.2 e I.3 visam apurar a contribuição relativa do efeito da descarga dos afluentes.

Na simulação II.2 e II.3 pretende-se avaliar a importância relativa dos processos físicos para compreender as variações das concentrações dos nutrientes e do oxigénio dissolvido devido aos processos físicos e posteriormente aos processos químicos. Não obstante da proximidade à complexidade real, a simulação II.4, pretende ser uma experiência virtual para perceber a importância relativa dos processos biológicos sobre a biogeoquímica do sistema, sendo estes determinantes no estado trófico da albufeira de Alqueva.

3.4.2. Determinação do passo de cálculo

Um dos factores que condiciona a estabilidade do modelo é o passo de cálculo. Deve ser, assegurando que em qualquer simulação numérica o passo de cálculo seja menor do que o espaço de tempo necessário para que qualquer acção significativa ocorra. Para tal, o *número de Courant* (Equação 3.7) deve ser inferior à unidade, segundo a *Condição de Courant-Friedrichs-Levy* (Dyke, 2001) e a celeridade da onda gravítica para águas pouco profundas (descrita pela Equação 3.8). Deste modo, a velocidade das ondas que ocorrem naturalmente no meio não é superior à velocidade da onda numérica.

$$C = v \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad 3.7$$

onde

$$v = \sqrt{g \times h} \quad 3.8$$

em que:

C – Número de Courant (adimensional);

v – Celeridade da onda gravítica (m.s^{-1});

Δt – Passo de cálculo (s);

Δx – Comprimento da célula (m);

g – Aceleração da gravidade (m.s^{-2});

h – Profundidade da célula (m).

Por conseguinte, no presente estudo foram aplicados dois valores de passo de cálculo. Decorrente da simplificação de factores em cálculo, na simulação sem hidrodinâmica, em que a *Condição de Courant-Friedrichs-Lev* não se aplica (simulações I.1 e II.1), a iteração de cálculo decorre em 10 minutos, enquanto nas restantes simulações, o passo de cálculo é de 10 segundos (considerando uma profundidade (h) aproximada de 40 m e o comprimento da célula (Δx) 200 m), de acordo com:

$$v = \sqrt{g \times h} \Leftrightarrow v = \sqrt{9,8 \times (\pm 40)} = \pm 20 \rightarrow C = v \frac{\Delta t}{\Delta x} \Leftrightarrow 1 < \pm 20 \frac{\Delta t}{200} \Leftrightarrow \Delta t \approx 10 \text{seg} \quad 3.9$$

3.5. Análise do desempenho e verificação do modelo

Será feita uma análise individual e comparativa entre os resultados das diferentes situações de morfologia e de processos (termodinâmicos, hidrodinâmicos e biogeoquímicos). Para melhor apreender os valores obtidos pelo modelo, pretendem-se elaborar e analisar as variações ao longo do tempo de simulação para toda a massa de água sob uma forma de séries temporais e de “mapas de cores” (distribuição espacial), assim como, gráficos da temperatura em função da profundidade.

A compreensão do hidrodinamismo é completada por imagens de excertos dos campos de velocidades residuais médias para as correntes da albufeira, onde é feita uma representação gráfica dos vectores resultantes.

Para o segundo conjunto de simulações, com o propósito de fazer uma segunda abordagem que reflecta a precisão do modelo, utilizam-se dois grupos de valores reais, um para o mês Julho e outro para o mês de Agosto, esperando-se que os resultados dos perfis verticais do modelo se aproximassem dos valores medidos em Agosto, quer para a temperatura, quer para as concentrações dos nutrientes.

4. Resultados e discussões

4.1. Série I – Implementação do modelo

4.1.1. Simulações I.1.

A correcta reprodução da variação da temperatura numa albufeira depende de uma representação adequada das condições termodinâmicas, sendo a temperatura da água um parâmetro fundamental, pois condiciona todos os processos bioquímicos e a própria hidrodinâmica. A qualidade da água é influenciada directamente pelos fenómenos resultantes da estratificação induzida pela temperatura e, consequentemente, pela densidade. A maior fonte de calor para a albufeira é a radiação solar, sendo a maior parte desse calor absorvido directamente pela água.

Verificou-se que a evolução da temperatura simulada é fortemente condicionada pela evolução da temperatura do ar, ao existir uma correlação entre estas duas variáveis de 0,31 e 0,36, para os valores obtidos para as simulações, com 5 e 7 camadas, respectivamente.

O modelo permite um aumento da temperatura da água à superfície, mas a partir dos 20 m de profundidade a temperatura mantém as condições iniciais, pois não há aquecimento da água por processos termodinâmicos por penetração de radiação, nem existem mecanismos que possibilitem o seu arrefecimento. Estando apenas a considerar os processos termodinâmicos a temperatura da água apenas varia nas camadas mais superficiais (Figura 4.1 e Figura 4.2). Tanto para a morfologia com 7 como com 5 camadas verticais, as condições iniciais do modelo são caracterizadas por uma temperatura igual a 16,7 °C para todas as células e camadas.

A Figura 4.1 caracteriza as condições simuladas para os dias 1(a) e 31(b) de Julho para a divisão da profundidade em 5 camadas. A temperatura é de 16,7 °C em toda a albufeira no dia 1, para todas as camadas, e no dia 31 nas duas camadas mais profundas e à superfície a temperatura média é de 21,3 °C.

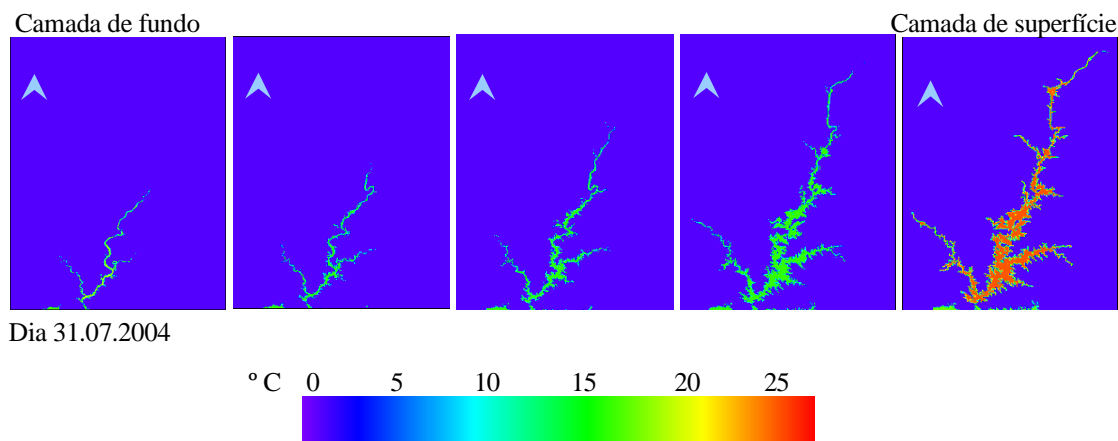


Figura 4.1 – Simulação I.1. (cf. - 3.4.1) com 5 camadas verticais. Distribuição espacial da temperatura da água simulada (°C).

Na Figura 4.2, em relação à camada localizada dos 10 aos 20 m, verificou-se que em todas as situações de morfologia adoptadas a temperatura ainda sofre a acção da radiação solar, mas em quantidades muito reduzidas. O valor médio da temperatura da água no final de simulação apenas acresce algumas décimas ao valor inicial de referência para todas as camadas (16,7 °C). Para as situações originadas nas simulações com 7 camadas, o valor médio da primeira camada é de 22,9 °C, da segunda camada, com profundidades compreendidas entre os 3,3(3) m e os 6,6(6) m, é de 18,7 °C e o da terceira camada é de 16,8 °C. A utilização de 7 camadas permite uma melhor representação do gradiente de temperatura com a profundidade, assim como da termoclina.

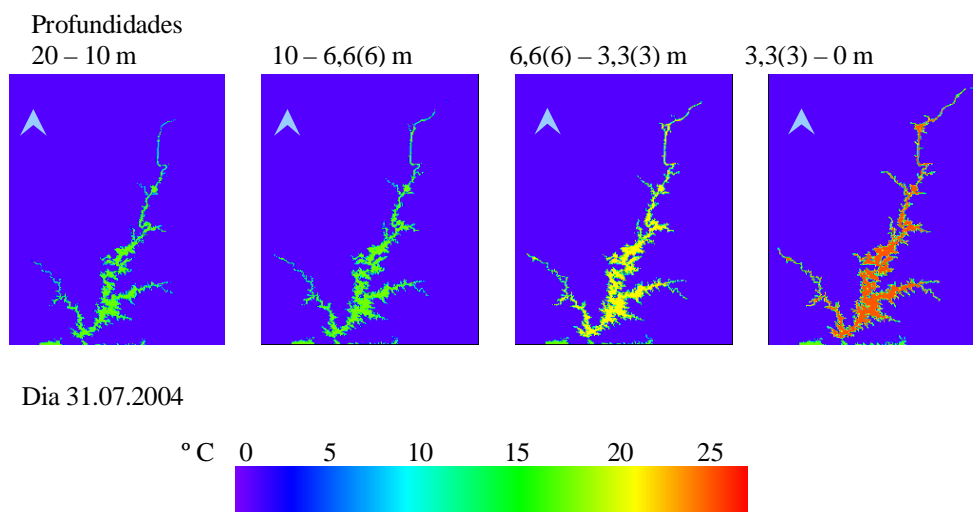


Figura 4.2 – Simulação I.1. (cf. - 3.4.1) com 7 camadas verticais. Distribuição espacial da temperatura da água simulada (°C) para as 4 camadas superficiais.

A Figura 4.3 apresenta os resultados simulados da temperatura da água à superfície para as células correspondentes às estações de Albufeira de Alqueva – Montante e Albufeira de Alqueva – Mourão (cf. – 3.3). Consta-se que os valores simulados são iguais para ambos os locais. O modelo, mesmo para a morfologia mais simplista, consegue seguir relativamente bem as grandes oscilações da temperatura na albufeira, durante o período simulado.

O aumento do número de camadas superiores permitiu uma aproximação mais rápida dos valores simulados aos observados. De acordo com a Figura 4.3, a simulações com 7 camadas também apresenta uma amplitude diária mais realista comparativamente aos valores registados na simulação com 5 camadas. Salienta-se a convergência entre os dados observados e os simulados.

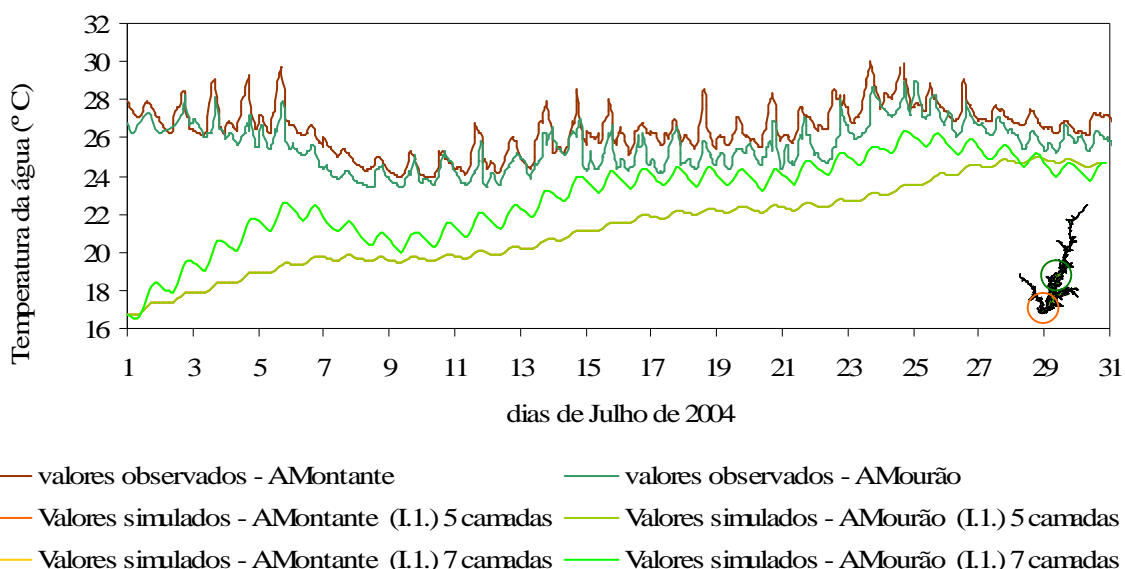


Figura 4.3 – Simulações I.1. (cf. – 3.4.1) com 5 e 7 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores observados e simulados pelo modelo para a temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” (AMontante) e “Albufeira de Alqueva – Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).

As Figura 4.4 e Figura 4.5 mostram a variação da temperatura em função da profundidade em Albufeira de Alqueva – Montante e Albufeira de Alqueva – Mourão (cf. – 3.3), visto os valores simulados serem iguais para as duas estações de amostragem. Ainda que os perfis de temperatura apresentados não sejam realistas para as camadas com profundidades superiores a 10 m, existe uma estratificação térmica, típica de lagos em regiões temperadas. Na Figura 4.4 verifica-se a formação da termoclina localizada na primeira camada.

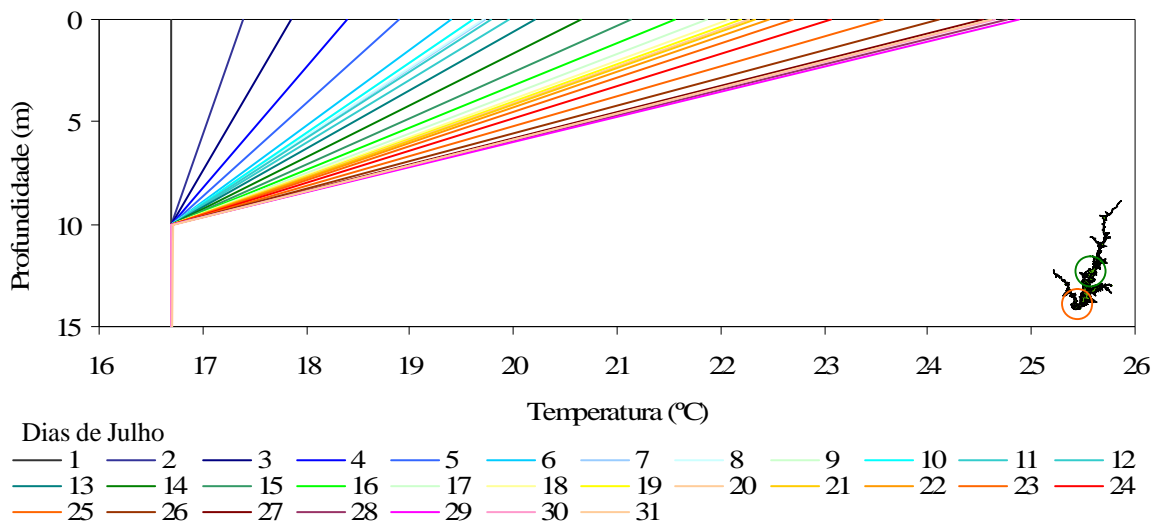


Figura 4.4 – Simulação I.1. (cf. - 3.4.1) com 5 camadas verticais. Perfis verticais de temperatura da água simulada (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” e “Albufeira de Alqueva – Mourão” (cf. – 3.3).

Com o aumento da resolução vertical nos primeiros 10 m (Figura 4.5) há uma melhor caracterização das camadas em relação à temperatura. Ao longo do tempo de simulação observa-se uma maior diferença entre a camada superior menos densa (dos 0 aos 3,3(3) m), que circula e possui alguma turbulência (epilímnion) e uma segunda camada de rápido arrefecimento (dos 3,3(3) m aos 6,6(6) m) e a camada inferior, constituída por águas mais densas, mais frias e relativamente calmas (hipolímnion – para profundidades abaixo dos 6,6(6) m).

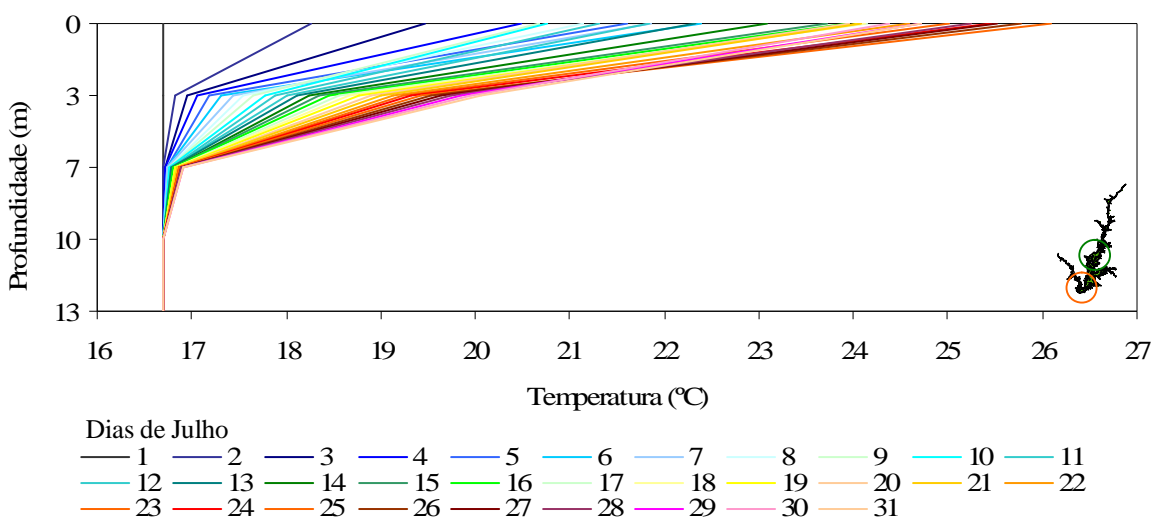


Figura 4.5 – Simulação I.1. (cf. - 3.4.1) com 7 camadas verticais. Perfis verticais de temperatura da água simulada (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” e “Albufeira de Alqueva – Mourão” (cf. – 3.3).

De um modo geral, à superfície (Figura 4.5) há uma subida gradual da temperatura da água, todavia, em alguns dias observam-se pequenas flutuações (inferiores a 1 °C), mas que não se observam na camada seguinte. Nos dias 7, 9 e 11 de Julho a temperatura simulada à superfície é mais baixa que no dia 5, assim como é mais alta no dia 25 que no dia 31 de Julho, demonstrando congruência com a evolução temporal da temperatura da água observada (Figura 4.3).

O balanço energético da camada superficial, calculado pelo modelo, é apresentado na Figura 4.6. Apenas é indicado o balanço energético para a morfologia com 7 camadas, visto esta ser mais representativa das condições reais. As oscilações correspondem aos ciclos diários de aquecimento diurno e arrefecimento nocturno. Para os locais Albufeira de Alqueva – Montante e Albufeira de Alqueva-Mourão (cf. – 3.3), o valor médio para o período de simulação é de 45,5 W.m⁻² à superfície, 18,1 W.m⁻² para a segunda camada e 1,2 W.m⁻² para a terceira. Após os 10 m o valor do balanço energético decresce exponencialmente com a profundidade.

A contribuição dos diferentes componentes do balanço energético, por ordem decrescente de valores médios, é a seguinte: radiação infra-vermelha da água, radiação infra-vermelha atmosférica, radiação solar, perdas de calor latente, ganhos de calor sensível e a radiação sub-superficial, que corresponde aos valores -422,7 W.m⁻², 386 W.m⁻², 298,2 W.m⁻², -229,7 W.m⁻², 31,2 W.m⁻² e 19,4 W.m⁻² respectivamente.

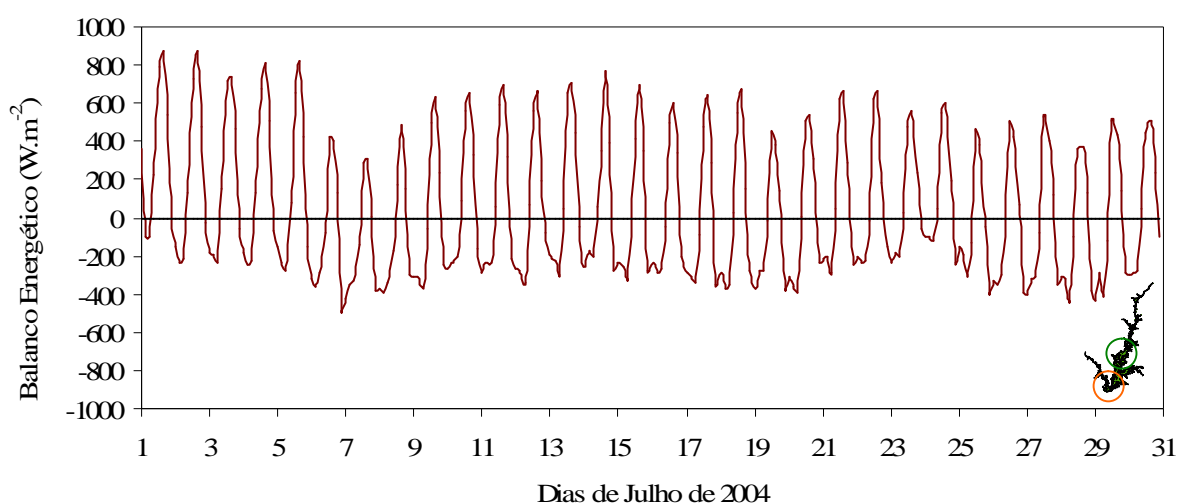


Figura 4.6 – Simulação I.1. (cf. - 3.4.1) com 7 camadas verticais. Variação temporal do balanço energético à superfície (W.m⁻²) em “Albufeira de Alqueva-Montante” e “Albufeira de Alqueva – Mourão” (cf. – 3.3).

4.1.2. Simulação I.2.

A simulação I.2. foi realizada com os objectos termodinâmicos e hidrodinâmicos apenas para a morfologia com 5 camadas verticais. Nela foi considerada a actuação do vento, sem influência de descargas de caudais afluentes e efluentes, de modo a avaliar a influência dos processos hidrodinâmicos sobre a termodinâmica na albufeira de Alqueva.

A Figura 4.7 mostra a evolução espacial da temperatura. Da sua análise pode aferir-se que o hidrodinamismo provoca o aquecimento/arrefecimento diferenciado da massa de água. Embora na simulação I.1. se tenha verificado que na albufeira existiam áreas isoladas com temperaturas mais elevadas (na confluência da ribeira da Asseca e na entrada do rio Degebe na albufeira – cf. – 2.1.4), nesta simulação, observam-se variações graduais da temperatura. Pode observar-se que as zonas interiores da albufeira têm uma inércia térmica maior (devido ao maior volume) do que as áreas periféricas à albufeira. Regista-se um gradiente decrescente de temperatura de montante dos três troços principais (rio Guadiana, rio Degebe e rio Alcarrache) para o corpo da barragem.

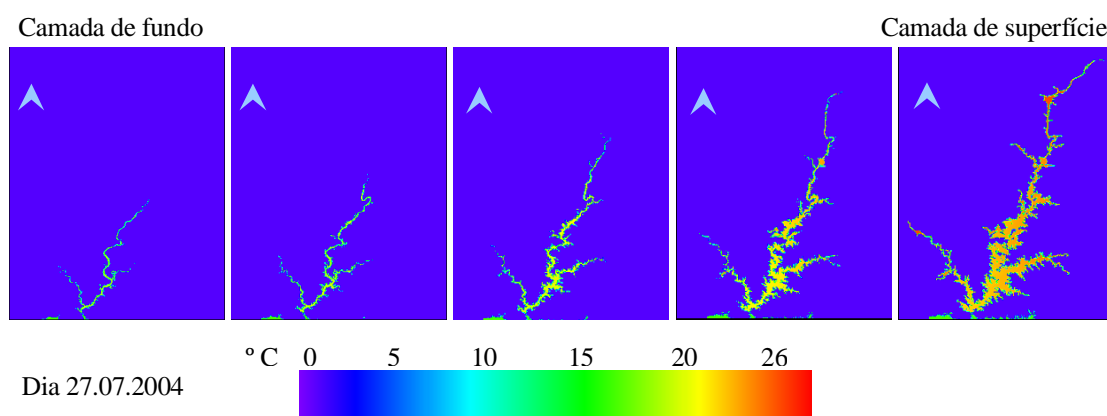


Figura 4.7 – Simulação I.2. (cf. - 3.4.1) com 5 camadas verticais. Distribuição espacial da temperatura da água simulada (°C).

Na camada superficial observam-se áreas de temperatura mais elevada onde a profundidade é menor e onde a largura da albufeira aumenta. Estas condições estão associadas ao nivelamento da orografia verificado na confluência da ribeira da Asseca e onde desagua a linha de água denominada, no presente trabalho, de afluente do rio Degebe II (cf. – 2.1.4) (zonas a vermelho na Figura 4.7). Na Figura 4.7 pode ainda observar-se a existência de estratificação térmica. A segunda camada e

seguintes denotam a mesma heterogeneidade espacial, que a de superfície, mas numa gama de valores inferiores.

Na Figura 4.8 pode observar-se a variação da temperatura da água à superfície para ambas as simulações, com e sem hidrodinamismo, nas células a montante e a meio da albufeira (Albufeira de Alqueva – Montante e Albufeira de Alqueva – Mourão). De facto, a temperatura média global para a simulação I.2. é aproximadamente 1,6 °C inferior à registada para a simulação I.1. (19,7 °C e 21,3 °C respectivamente) para os resultados em Albufeira de Alqueva – Montante (cf. – 3.3). Contudo, nas temperaturas médias das restantes camadas dá-se o efeito contrário. A segunda camada na simulação I.2. é 2,2 °C mais elevada do que na simulação I.1, e a diferença nas restantes camadas é abaixo dos 1,9 °C. Para os valores registados em Albufeira de Alqueva – Mourão, verifica-se que à superfície os valores para a simulação I.2. apresentam uma variabilidade temporal menor que a simulação I.1. A análise dos dados revela que existe uma amplitude térmica máxima de 2,4 °C.

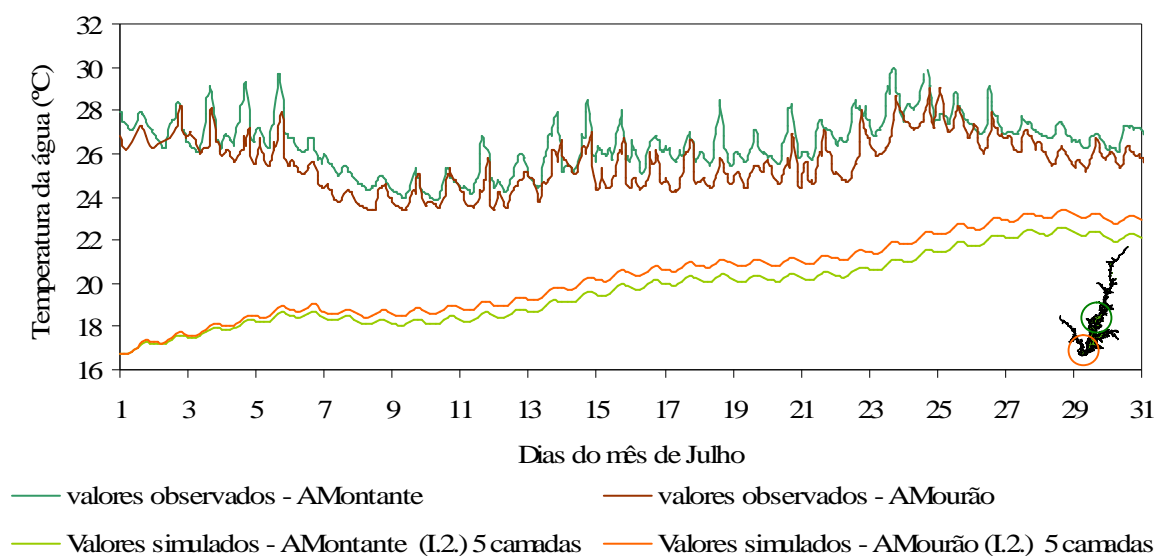


Figura 4.8 – Simulação I.2. (cf. – 3.4.1) com 5 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores simulados pelo modelo para a temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” (AMontante) e “Albufeira de Alqueva – Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).

A estratificação térmica resultante da simulação I.1. é atenuada pela mistura vertical da água simulada pelo objecto hidrodinâmico. A Figura 4.9 comprova essa mesma mistura por aquecimento das camadas mais profundas. A mesma demonstra ainda a diminuição das amplitudes térmicas

verificadas por perfil: na simulação I.2. a variação é de 1,5 °C, entre os 22,1 °C à superfície e os 20,6 °C registados em profundidade (dia 29 de Julho de 2004). Comparativamente na simulação I.1, para o mesmo dia, a variação é de 7,9 °C, entre os 16,7 °C no fundo e os 24,6 °C à superfície.

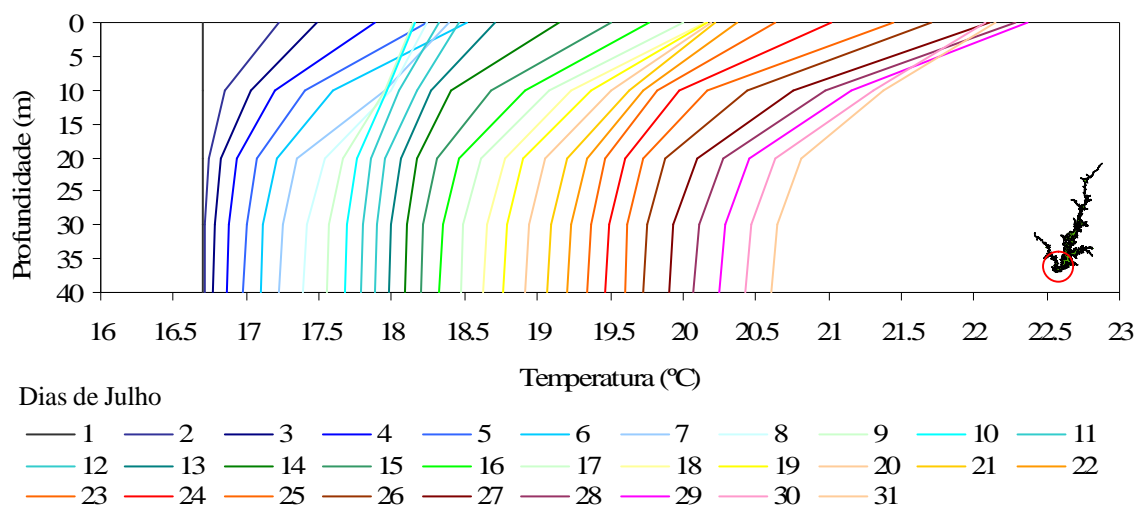


Figura 4.9 – Simulação I.2. (cf. - 3.4.1) com 5 camadas verticais. Perfis verticais de temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” (cf. - 3.3).

O regime eólico apresenta uma importância primordial para a caracterização das condições de circulação da água. A acção do vento sobre a superfície da água é responsável pela criação de ondas superficiais e formação de correntes. As correntes apresentam significativos gradientes verticais. Os ventos mais frequentes são de NW. Os campos de velocidades residuais são elaborados através de um campo vectorial realizado com as duas componentes horizontais da velocidade: u e v . Na Figura 4.10 a direcção destes campos à superfície é coincidente com a direcção predominante do vento, demonstrando que os vectores dos campos de velocidades resultantes são, na sua maioria, devidos à acção do vento.

A análise da Figura 4.10, indicia a existência de uma corrente com sentido SE – NW, na segunda camada (10 m – 20 m), embora de menor intensidade, que compensa o gradiente de pressão barométrico originado pela corrente superficial. Por conseguinte, há tendência para “acumular” água ao longo da margem esquerda da albufeira. Nas três camadas mais profundas a circulação não obedece a qualquer padrão evidente, caracterizando-se por velocidades de magnitude muito baixas.

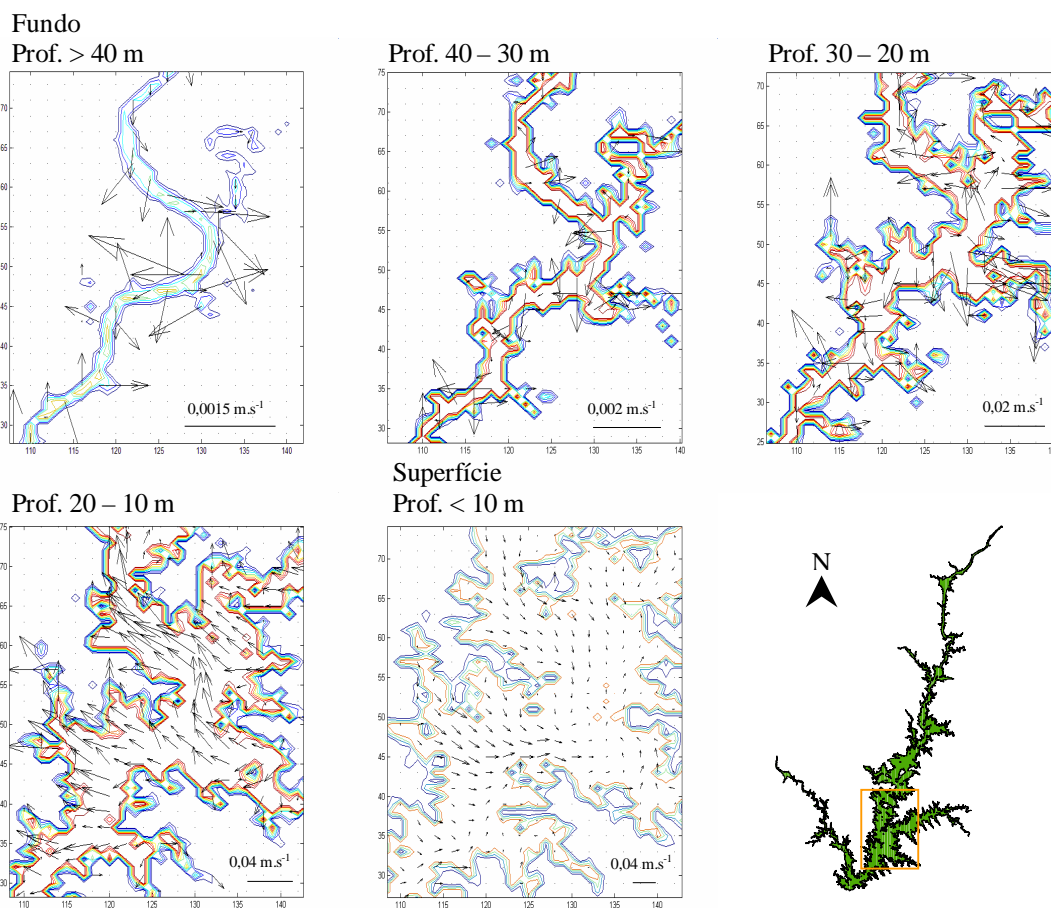


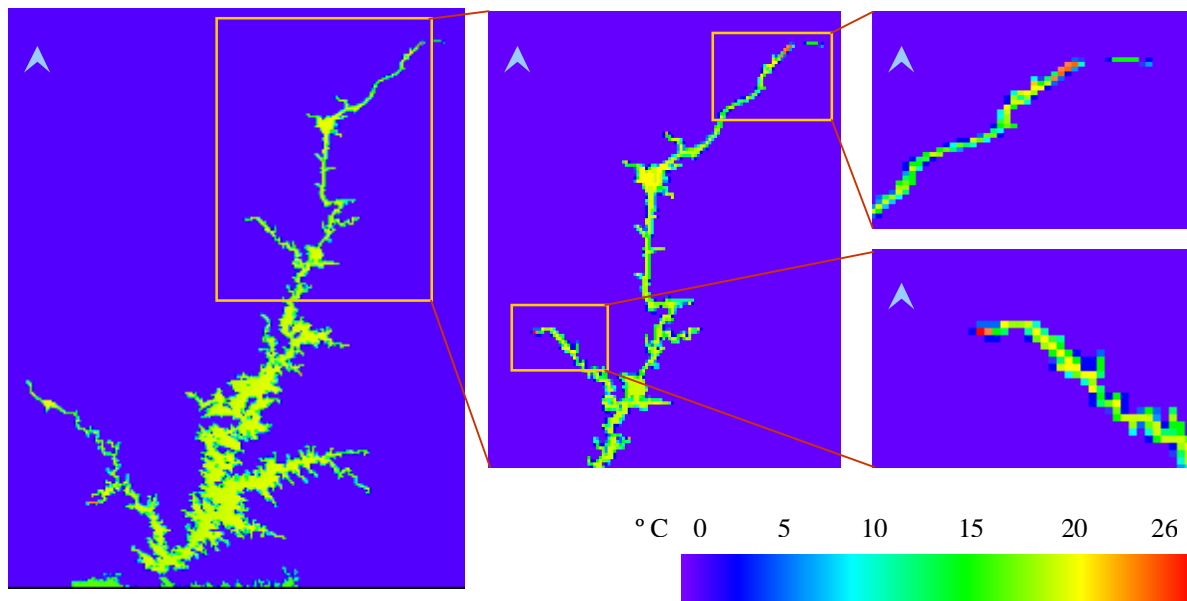
Figura 4.10 – Simulação I.2. (cf. - 3.4.1) com 5 camadas verticais. Campos de velocidades médias das correntes na confluência do rio Alcarrache. Os contornos da albufeira são delimitados pelas profundidades dentro das respectivas camadas.

As condições simuladas correspondem a uma circulação em duas camadas influenciada pelos ventos predominantes e pelos gradientes de densidade. De acordo com a Figura 4.10, existe ascensão de água a NW da albufeira e descida a SE. Estes episódios de *upwelling* poderão ser assim explicados pela acção do vento de NW.

4.1.3. Simulações I.3.

Para avaliar a influência dos processos hidrodinâmicos, de uma forma mais completa, sobre a termodinâmica, considerou-se a intervenção da descarga dos afluentes e dos efluentes. Os valores de caudais afluentes são distribuídos geograficamente pelos 38 pontos de entrada. O caudal efluente tem apenas um ponto de saída da albufeira (cf. – 3.2.1 e Figura 3.12).

Os valores mais elevados de temperatura registam-se nas confluências dos rios. Ao longo do tempo de simulação há um aumento da temperatura da água que apenas sobressai em fracções muito localizadas adjacentes às descargas dos afluentes (Figura 4.11 e Figura 4.12). Somente o caudal dos afluentes com maior expressão parece produzir algum efeito na temperatura da água da albufeira, embora bastante reduzido. Assim, na variação da temperatura, a importância das descargas é de pouca expressão.

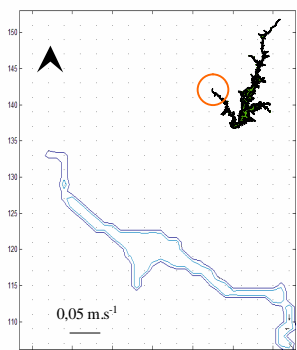


Dia 09.07.2004

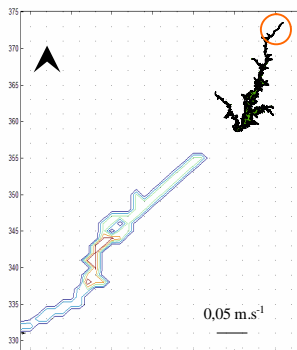
Figura 4.11 – Simulação I.3. (cf. - 3.4.1) com 7 camadas verticais à superfície. Distribuição espacial da temperatura (°C). Destaque para a camada de superfície na descarga de montante (início do regolfo da albufeira) e para a ribeira de Lucefecit.

Os resultados são muito semelhantes aos da simulação anterior. Tal como para a simulação I.2, a hidrodinâmica actua como atenuadora da temperatura superficial (Figura 4.13) e da estratificação térmica (Figura 4.14 e Figura 4.15). Dos perfis verticais é possível identificar a formação do epilímnion e do hipolímnion. Para a morfologia com melhor resolução vertical, o epilímnion desenvolve-se dos 0 aos 3,3(3) m, verifica-se a existência de uma termoclina entre os 3,3(3) e os 6,6(6) m e um hipolímnion nítido a partir dos 10 m.

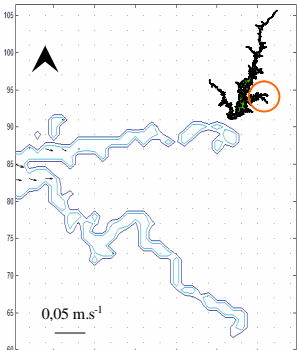
Simulação I.2.
rio Degebe



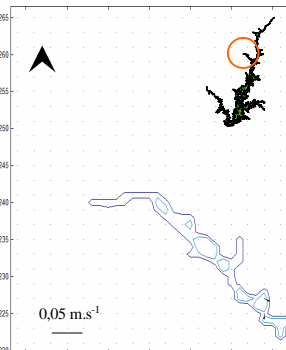
Montante



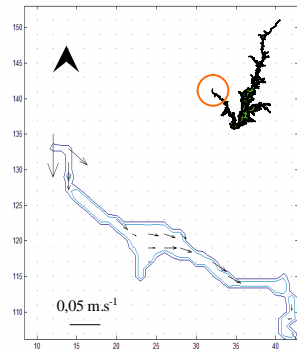
rib. Alcarrache e Guadelim



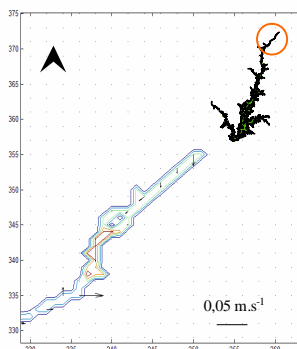
rib. Lucefecit



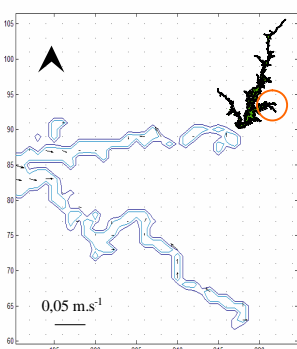
Simulação I.3.
rio Degebe



Montante



rib. Alcarrache e Guadelim



rib. Lucefecit

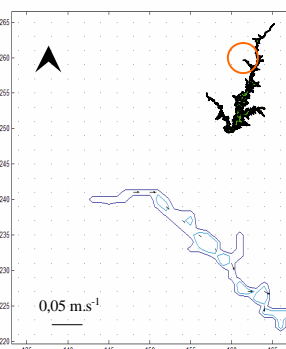
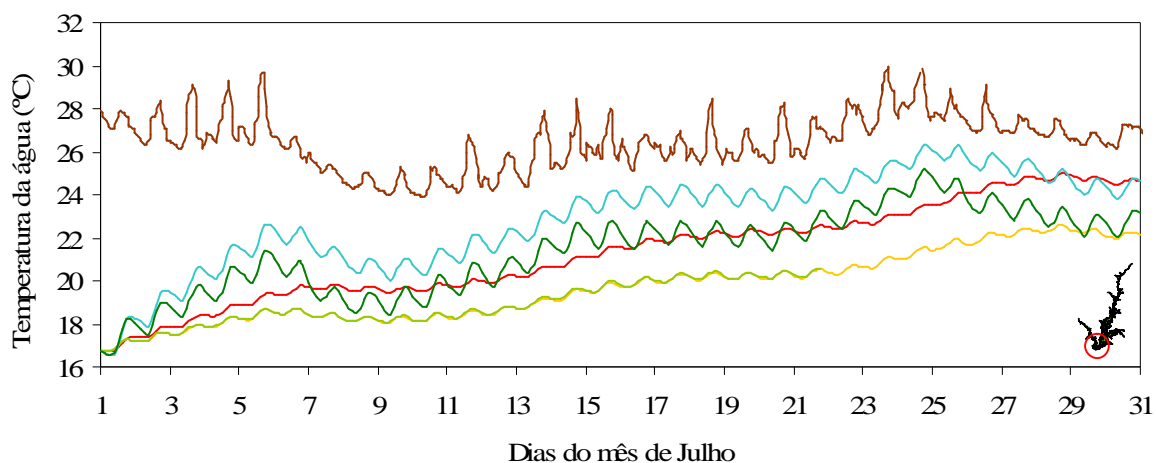


Figura 4.12 – Simulações I.2. e I.3. (cf. – 3.4.1) com 5 camadas verticais. Campos de velocidades médias das correntes à superfície. Representação de 4 pontos de descarga de afluentes colocados por ordem decrescente de caudal descarregado: Rio Degebe, Montante, Ribeira de Alcarrache e ribeira de Guadelim e ribeira de Lucefecit.

Os contornos da albufeira são delimitados pelas profundidades dentro das respectivas camadas.



- Valores simulados - AMontante (I.1) 5 camadas
- Valores simulados - AMontante (I.2) 5 camadas
- Valores simulados - AMontante (I.3) 5 camadas
- Valores observados
- Valores simulados - AMontante (I.1) 7 camadas
- Valores simulados - AMontante (I.3) 7 camadas

Figura 4.13 – Simulações I.1, I.2. e I.3. (cf. – 3.4.1) com 5 e 7 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores observados e simulados pelo modelo para a temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” (AMontante) (cf. – 3.3).

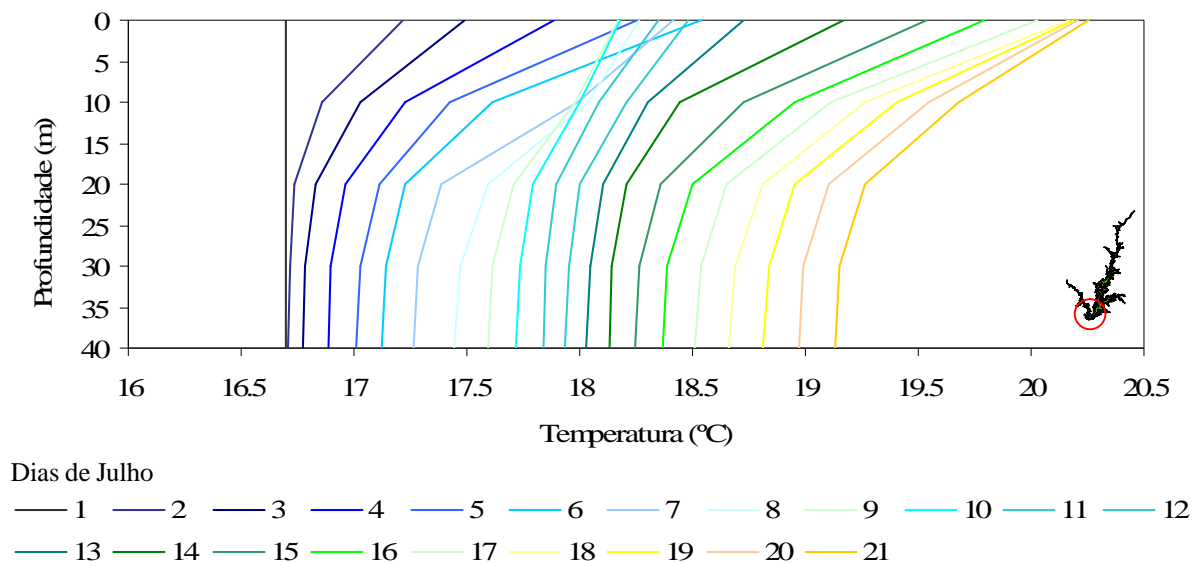


Figura 4.14 – Simulação I.3. (cf. - 3.4.1) com 5 camadas verticais. Perfis verticais de temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” (cf. – 3.3).

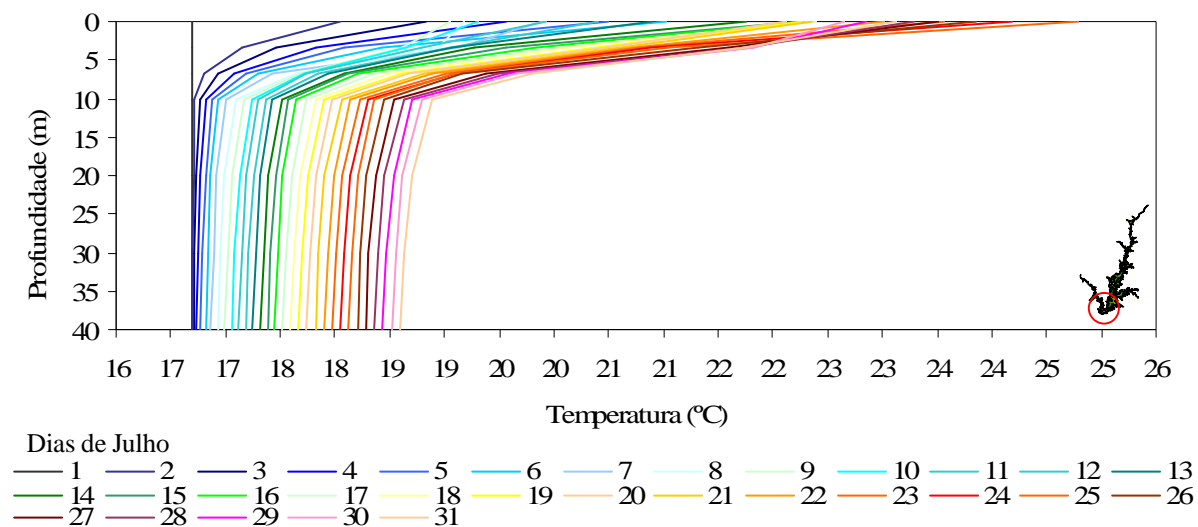


Figura 4.15 – Simulação I.3. (cf. - 3.4.1) com 7 camadas verticais. Perfis verticais de temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” (cf. – 3.3).

A comparação entre a Figura 4.10 (simulação I.2, com 5 camadas verticais) e a Figura 4.17 (simulação I.3, com 7 camadas verticais), mostra que o aumento da resolução vertical refina os campos das velocidades das correntes. Nomeadamente, na terceira camada a circulação ainda tem alguma intensidade: ao longo do troço do rio Guadiana, onde a profundidade da albufeira é maior.

Também para esta morfologia, nas camadas mais profundas, a circulação não obedece a qualquer padrão claro de direcção e apresenta velocidades muito reduzidas. Com a aproximação do fundo, devido ao atrito, diminui a velocidade da corrente.

Os perfis de estratificação (Figura 4.14 e Figura 4.15) são consistentes com a localização das camadas com circulação. Para a morfologia com 5 camadas, não parece haver circulação abaixo dos 20 m. No entanto, para a morfologia com maior resolução vertical, a circulação dá-se nos 10 primeiros metros, com um gradiente térmico maior.

Tal como em I.2, verifica-se a existência de uma de circulação superficial para SE, onde se acumula a água quente (Figura 4.16). Posteriormente esta água desce e circula em sentido inverso na camada imediatamente abaixo (dos 0 aos 3,3(3) m), com ascensão de água mais fria na margem direita da albufeira (Figura 4.17). Deste modo, a hidrodinâmica regula a distribuição espacial da temperatura na albufeira.

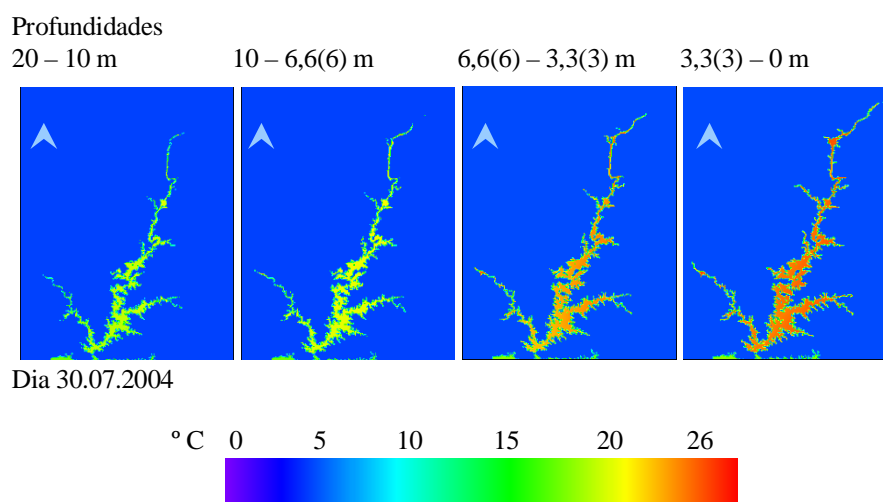


Figura 4.16 – Simulação I.3. (cf. - 3.4.1) com 7 camadas verticais. Distribuição espacial da temperatura da água simulada (°C) das 4 camadas mais superficiais.

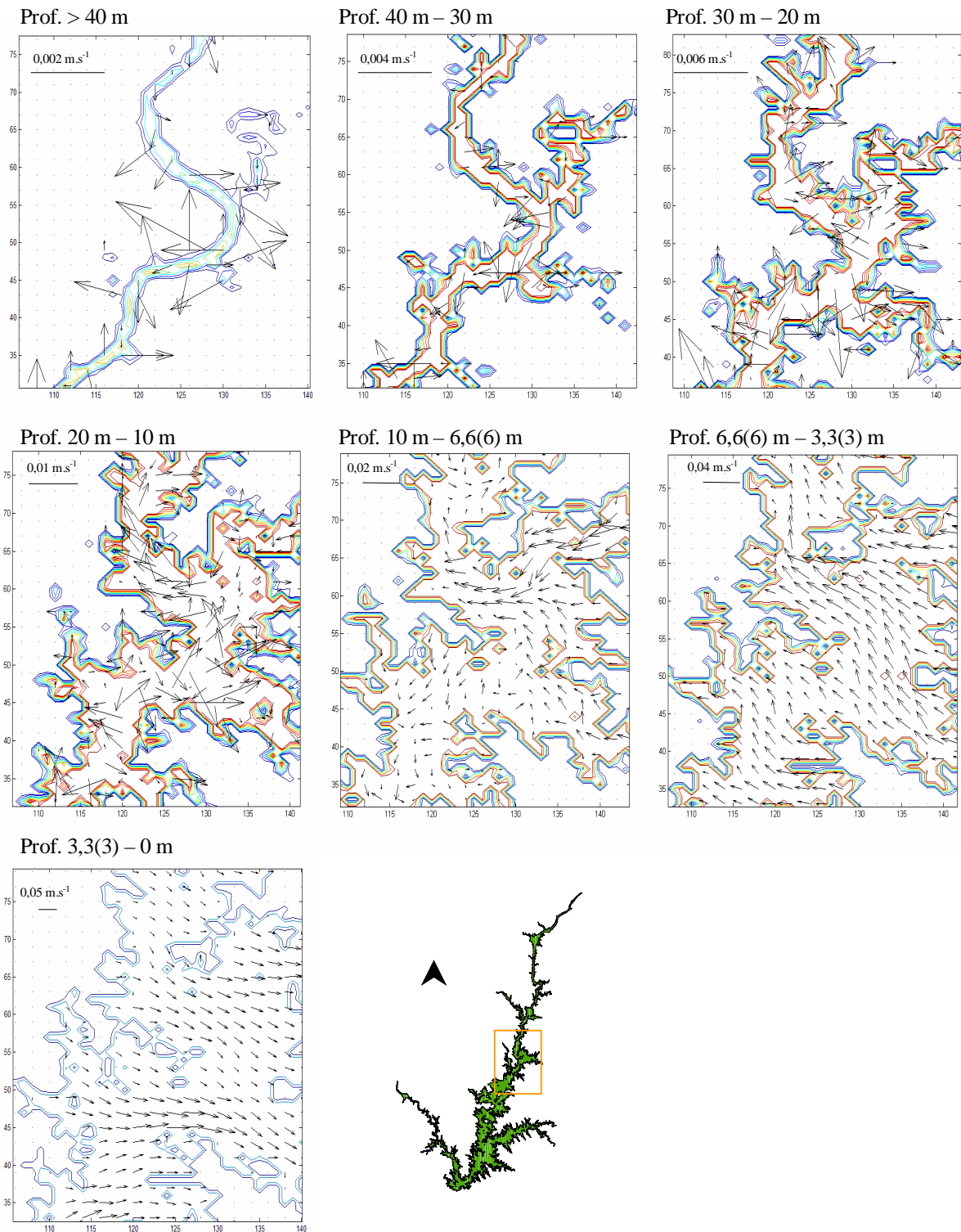


Figura 4.17 – Simulação I.3. (cf. - 3.4.1) com 7 camadas verticais. Campos de velocidades médias das correntes na confluência do rio Alcarrache. Os contornos da albufeira são delimitados pelas profundidades dentro das respectivas camadas.

4.1.4. Simulações I.3.V, I.3.DH e I.3.DMV

Com as simulações I.3.V, I.3.DH e I.3.DMV contabiliza-se a importância do coeficiente de pressão do vento, da difusividade horizontal e vertical. A observação comparativa foi apenas feita para a estação Albufeira de Alqueva-Montante (cf. – 3.3). A análise das Figura 4.18 e Figura 4.19 permite afirmar que a difusividade máxima vertical não apresenta uma influência determinante nos resultados relativos à temperatura da água, visto os valores resultantes da simulação I.3.DMV serem coincidentes com os valores derivados das simulações I.2. e I.3. (cf. – 4.1.1).

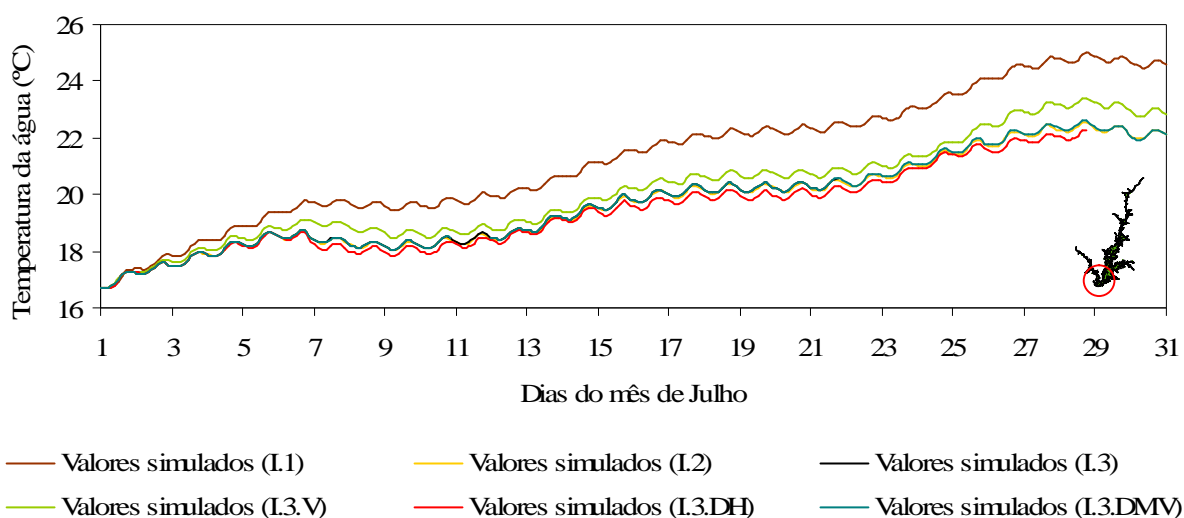


Figura 4.18 – Simulações I.1, I.2, I.3, I.3.V, I.3.DH e I.3.DMV (cf. – 3.4.1) com 5 camadas verticais.

Comparação entre a variação temporal dos valores simulados pelo modelo para a temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” (AMontante) (cf. – 3.3).

Comparando as séries temporais observa-se ainda que os valores de temperatura da simulação I.3. são ligeiramente mais baixos que na simulação I.3.V e mais altos que na simulação I.3.DH, apesar de se manterem aproximadamente paralelas entre si. Quanto ao perfil relativo ao valor nulo da difusividade horizontal, parece haver uma boa aproximação dos valores abaixo dos 10 m, embora na camada superficial a temperatura é um pouco mais baixa do que o esperado. A importância relativa do coeficiente de pressão do vento na mistura da camada vertical é evidenciada na Figura 4.19. Removendo a acção do vento, a camada superficial aquece mais e mais rapidamente.

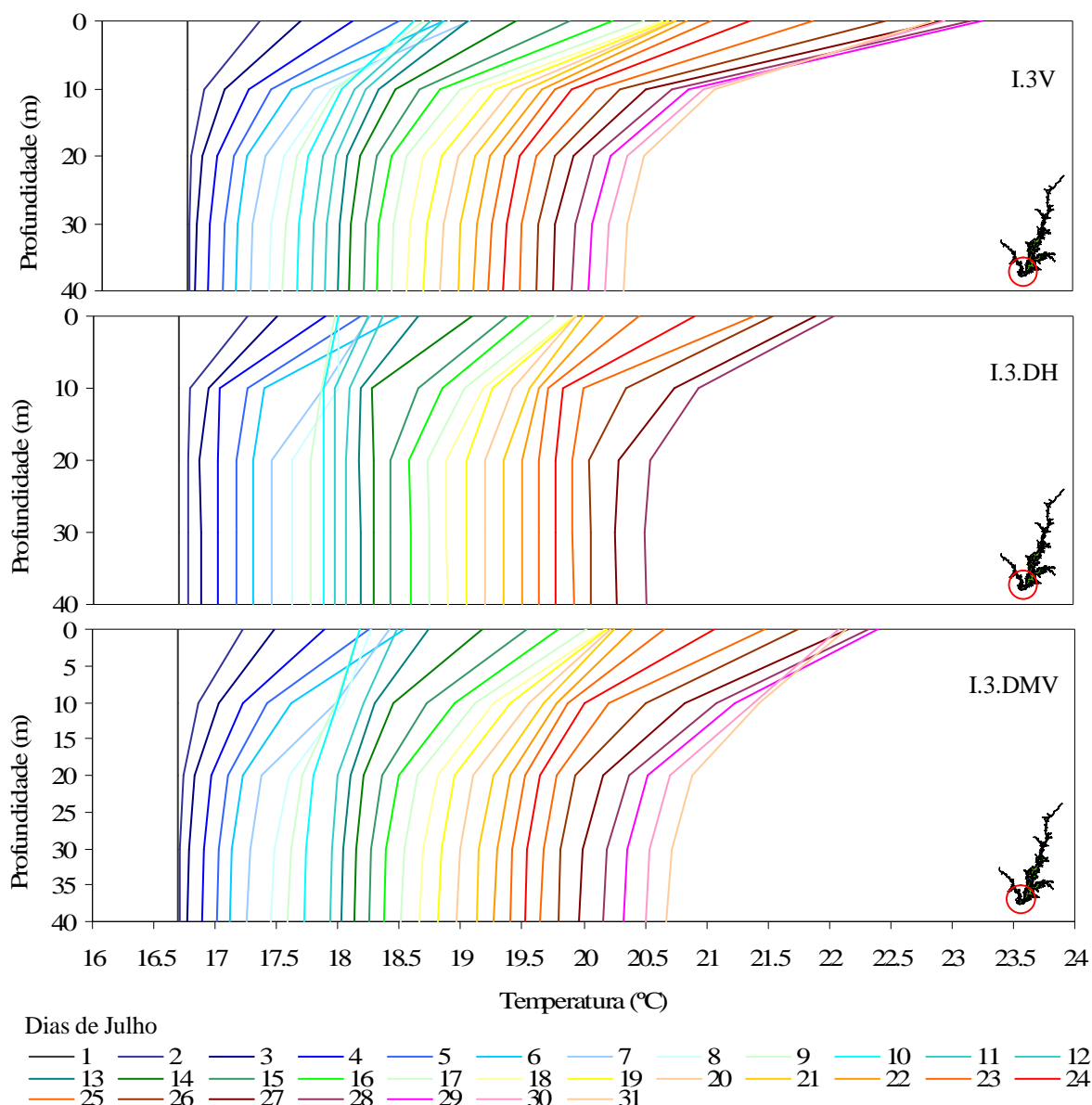


Figura 4.19 – Simulações I.3.V, I.3.DH e I.3.DMV, (cf. - 3.4.1) com 5 camadas verticais. Perfis verticais de temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Montante” (cf. – 3.3).

As diferenças entre os resultados das diferentes simulações, relativos à circulação residual (Figura 4.20) são coerentes com as diferenças relativas à temperatura. Para todas as simulações verifica-se que a circulação na segunda camada tem sentido oposto e menor intensidade que a camada superficial.

Na simulação I.3.V, onde não se faz sentir a pressão do vento, a circulação de maior intensidade na albufeira é feita no sentido oposto ao da simulação I.3. e à direcção predominante do vento. Isto é, verifica-se um fluxo de NE para SW, em vez de ser de NW para SE. Também as correntes na

simulação com a difusividade horizontal a zero apresentam diferenças relativamente à simulação I.3. Neste caso, a anulação da difusividade horizontal possibilita a existência de mais vórtices, dado haver menos dissipação da turbulência resultante dos gradientes de velocidade horizontais. Mais uma vez se verifica a pequena influência da difusividade máxima vertical, pois da comparação da Figura 4.17 com a Figura 4.20 (correspondente à simulação I.3.DMV) não sobressaem diferenças significativas.

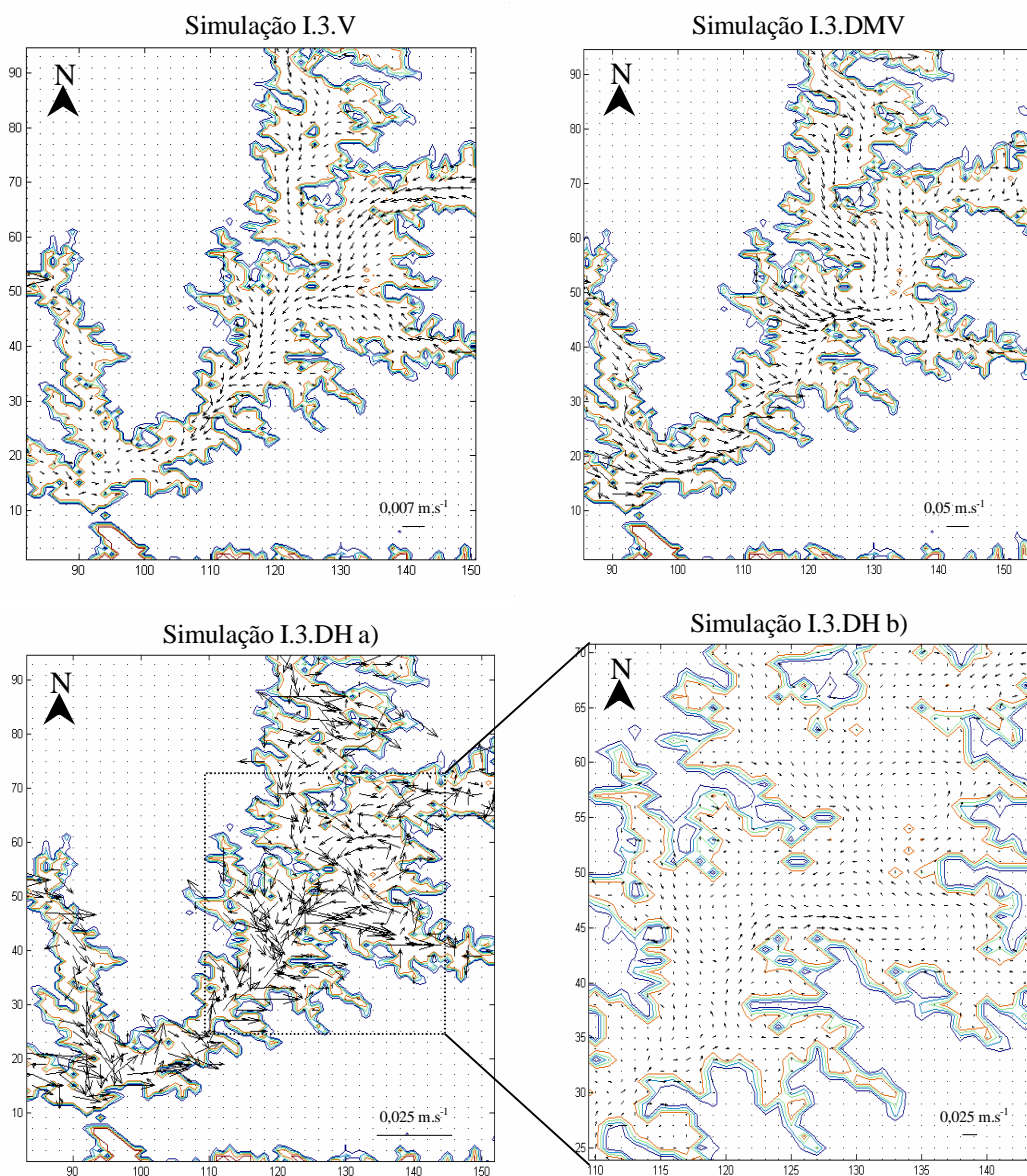


Figura 4.20 – Simulações I.3.V, I.3.DH e I.3.DMV (cf. - 3.4.1) com 7 camadas verticais. Campos de velocidades médias das correntes, na confluência do rio Alcarrache. A imagem b) corresponde a um excerto da imagem a). A imagem b) tem o dobro da resolução. Os contornos da albufeira são delimitados pelas profundidades dentro das respectivas camadas.

Considerando que nas simulações com o objecto hidrodinâmico, o gradiente vertical de temperatura resultante foi inferior ao real (média para a albufeira $0,31\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ equivalente a uma diferença média de $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre a superfície e o fundo), a mistura vertical parece estar sobre estimada. A referida mistura é função da velocidade do vento à superfície e da turbulência vertical. A acção da primeira depende do coeficiente de tensão de corte do vento (coeficiente de pressão do vento) que pode variar entre 0,0005 e 0,0025 (cf. – 3.1). A turbulência vertical depende da respectiva difusividade majorada por um valor empírico. Em função ao exposto, optou-se por reduzir o coeficiente de tensão de corte do vento de 0,001 (cf. – 3.4.1) para 0,0005, a difusividade horizontal foi reduzida a metade (de 20 para 10) e a difusividade vertical máxima de $0,005\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ para $0,001\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$.

4.2. Série II – Processos físicos, químicos e biológicos

4.2.1. Simulação II.1.

Com esta simulação reforçou-se os padrões dos resultados para a morfologia com 7 camadas, ao serem repetidas as condições da simulação I.1. Com efeito, os resultados são muito semelhantes. Estando apenas a considerar os processos termodinâmicos, existe um aumento da temperatura da água à superfície. Porém, abaixo dos 20 m de profundidade mantém-se a temperatura inicial de $16,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 4.21).

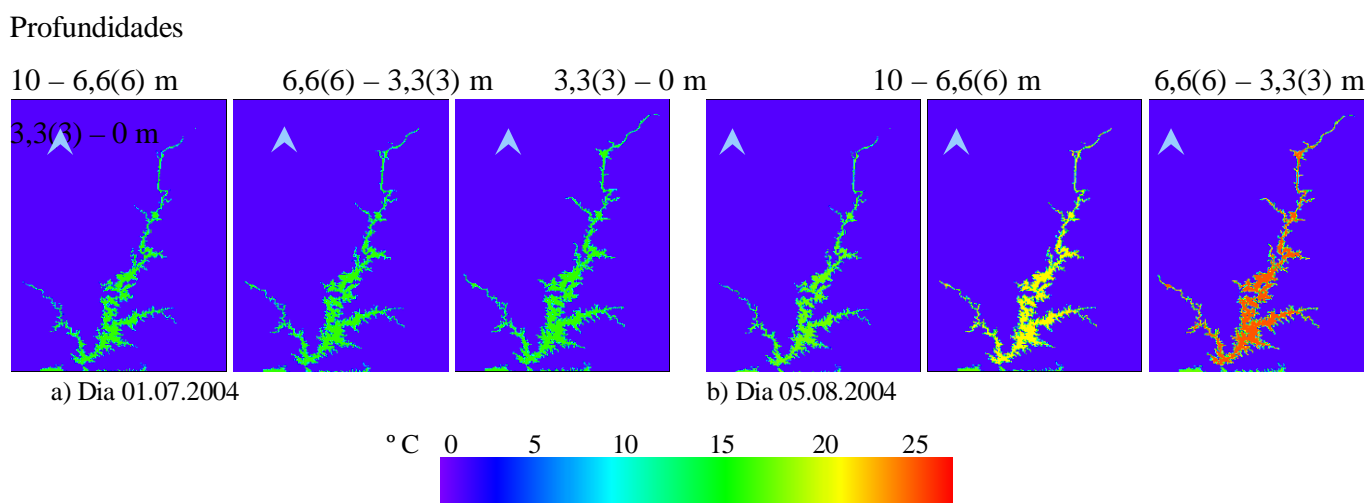


Figura 4.21 – Simulação II.1. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Distribuição espacial da temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$) simulada para as 3 camadas superficiais.

Os resultados simulados para a temperatura da água à superfície para as células correspondentes às estações de Albufeira de Alqueva – Montante e Albufeira de Alqueva – Mourão (cf. – 3.3), apresentados na Figura 4.22, demonstram que o modelo consegue reproduzir, com uma boa aproximação, as oscilações da temperatura na albufeira, tanto ao longo do período diurno como mensal. A convergência entre os dados observados e os simulados é mais notória do que para a simulação I.1. com 7 camadas verticais em Albufeira de Alqueva – Montante (cf. – 3.3).

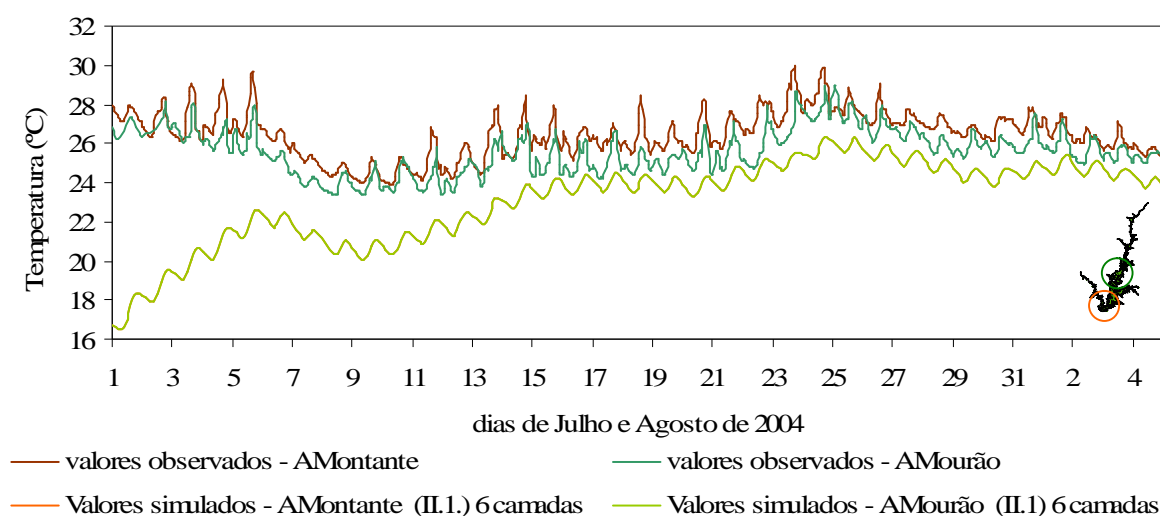


Figura 4.22 – Simulação II.1. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores observados e simulados pelo modelo para a temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva – Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).

Verifica-se na Figura 4.23, tal como na simulação I.1, uma estratificação térmica típica de lagos em regiões temperadas. Mesmo quando os perfis de temperatura apresentados não são realistas para as camadas abaixo dos 10 m de profundidade. É possível identificar a formação de uma termoclina entre os 3,3(3) e os 6,6(6) m. Com o aumento do tempo de simulação verifica-se que a temperatura da segunda camada aumenta. Ao ser menor o gradiente térmico até aos 10 m de profundidade, os valores simulados aproximam-se mais dos valores reais.

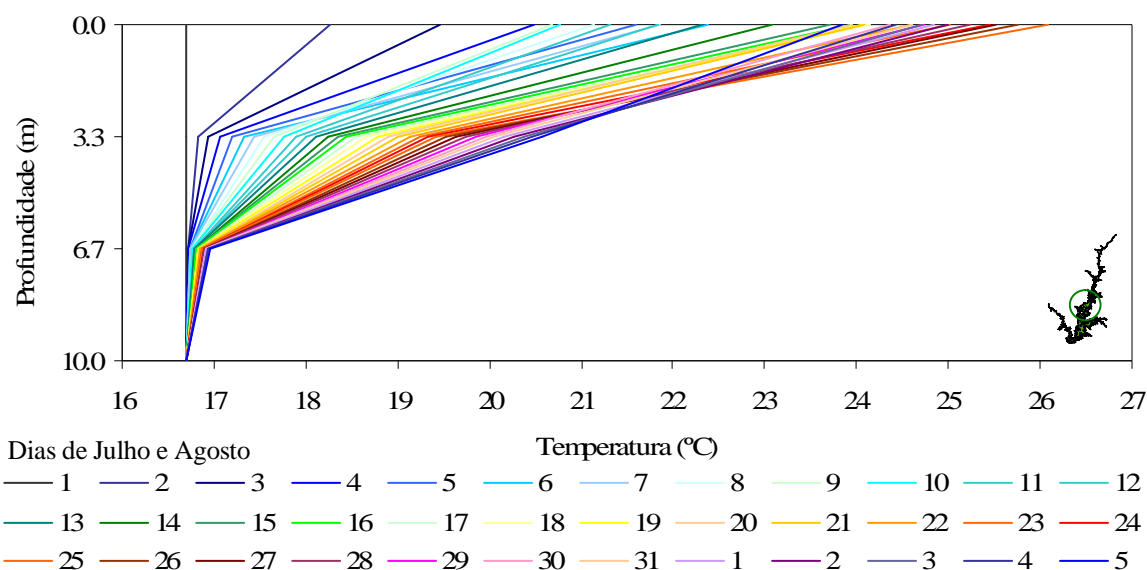


Figura 4.23 – Simulação II.1. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Perfis verticais de temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (cf. – 3.3).

4.2.2. Simulação II.2.

Nesta simulação foram utilizados os objectos da termodinâmica, da hidrodinâmica e da biogeoquímica (cf. – 3.1). Porém os parâmetros do objecto das substâncias dissolvidas contêm os coeficientes de conversão a zero, isto é as reacções químicas (nitrificação e desnitrificação), não são efectuadas. Sendo as variáveis conservativas, estas são alteradas unicamente por processos físicos.

Na simulação II.2. são reforçados os padrões dos resultados obtidos para as condições hidrodinâmicas das simulações I.3, em que, em termos gerais, os resultados são idênticos. A temperatura da água é mais elevada em baixios, linhas de cabeceiras e numa faixa ao longo da margem esquerda da albufeira (Figura 4.24). O aquecimento longitudinal e transversal diferenciado está associado à “acumulação” de água quente na margem esquerda e a ascensão de água mais fria ao longo da margem direita por acção da hidrodinâmica da albufeira (Figura 4.25). Nas camadas até os 10 m de profundidade o fluxo apresenta-se com alguma expressão. Nas camadas inferiores não existe um padrão de correntes. No entanto, quando se atingem profundidades coincidentes com o antigo leito do Guadiana parece haver um pequeno fluxo no sentido de jusante.

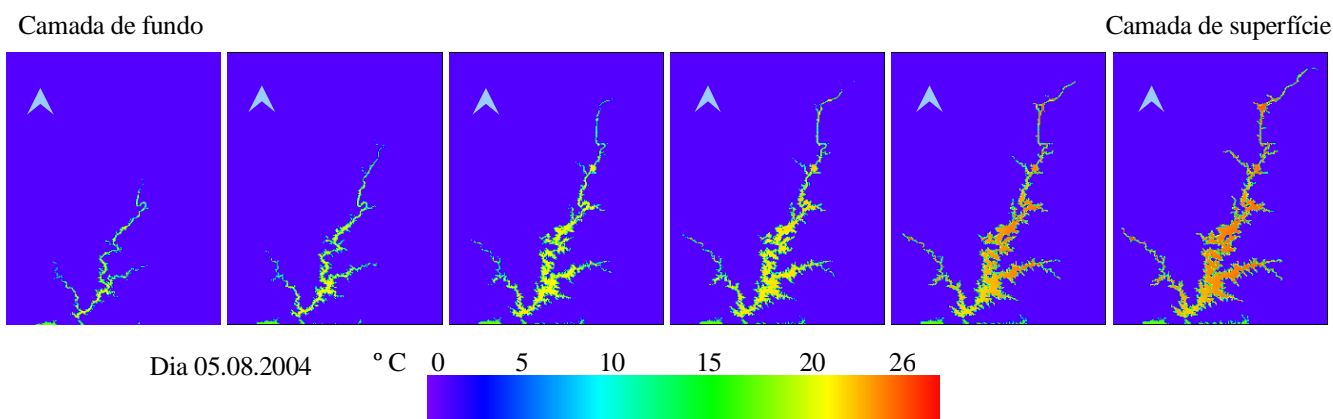


Figura 4.24 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais, para o dia 5 de Agosto de 2008. Distribuição espacial da temperatura da água simulada (°C).

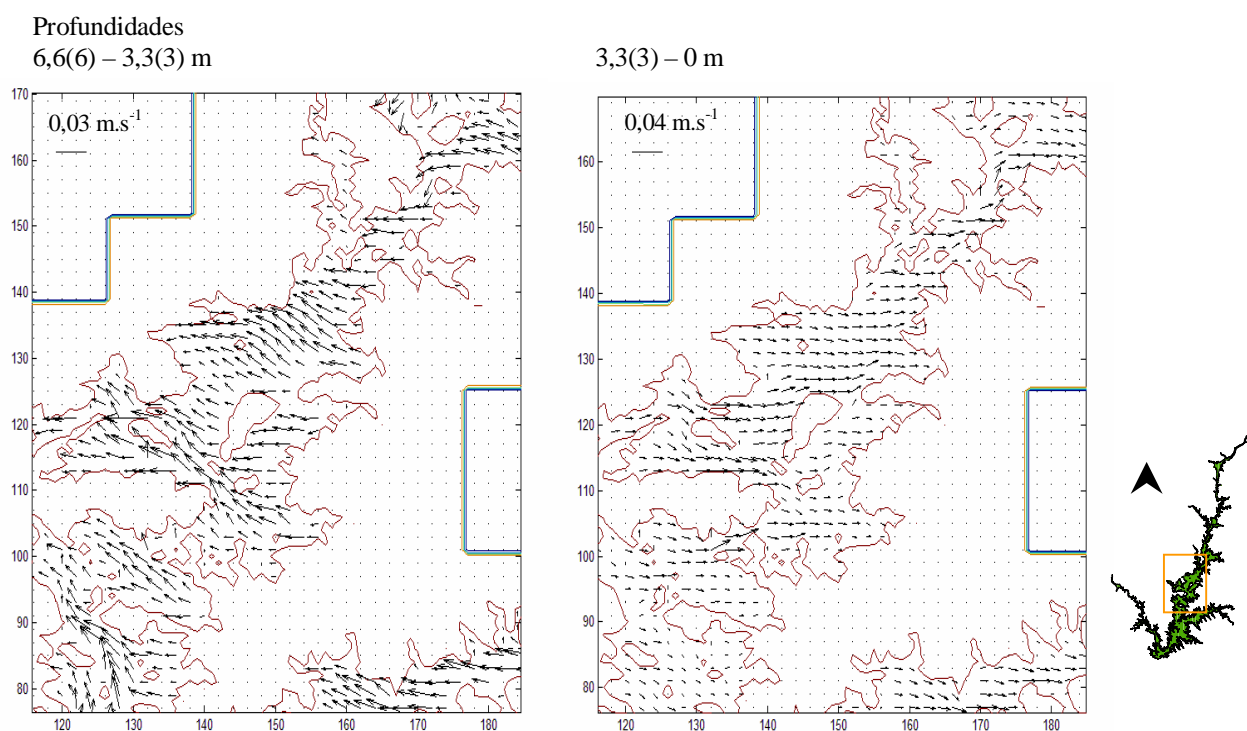


Figura 4.25 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Campos de velocidades médias das correntes das 2 primeiras camadas, na confluência das ribeiras do Álamo e da Pêga (cf. – Figura 2.4). Os contornos da albufeira são delimitados pelas profundidades à superfície.

A Figura 4.26 apresenta os resultados simulados da temperatura da água à superfície para a célula correspondente à estação de Albufeira de Alqueva – Mourão (cf. – 3.3). A estratificação térmica e, consequentemente, a temperatura à superfície são reduzidas pela mistura vertical da água em

resultado do hidrodinâmismo simulado. A comparação das Figura 4.23 e Figura 4.27 comprova essa mesma mistura por aquecimento das camadas mais profundas.

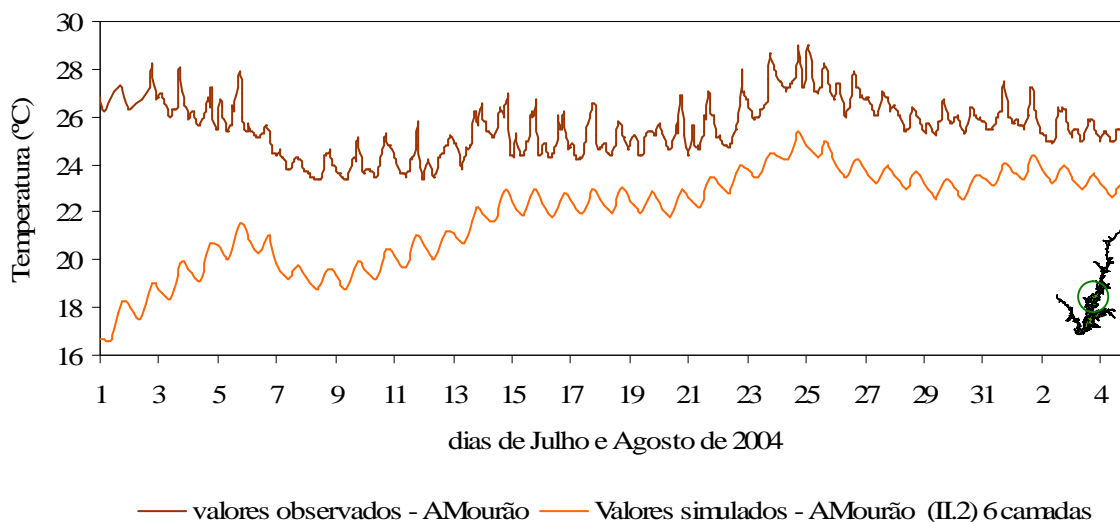


Figura 4.26 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores observados e simulados pelo modelo para a temperatura da água (°C) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).

Observando a Figura 4.27, verifica-se um gradiente vertical da temperatura simulada com definição da termoclina entre os 3,3(3) e os 6,6(6) m de profundidade. Abaixo dos 6,6(6) m o decréscimo nos valores da temperatura da água mantém-se praticamente constante (com uma diferença de apenas 2,4 °C), parecendo indicar da existência de alguma mistura da água abaixo da termoclina.

É possível ainda verificar que, apesar do modelo conseguir reproduzir uma estratificação térmica de Verão, típica de lagos em regiões temperadas, o ajuste entre os valores simulados e os observados não é completo. A maior divergência ocorre na temperatura da camada de fundo, pois nas camadas de fundo, o modelo é limitado pela inicialização com uma temperatura mais alta (16,7 °C) do que os valores reais registados no fundo (cerca de 13 °C). Segundo os dados observados a termoclina surge muito bem definida aos 8 m (Figura 4.27). Os valores de temperatura à superfície são menores que os observados e em profundidade são muito maiores, o que indica que a mistura vertical parece estar sobre estimada. As diferenças entre os perfis do dia 14 de Julho são maiores pois os resultados reportam à fase de aproximação às condições da simulação.

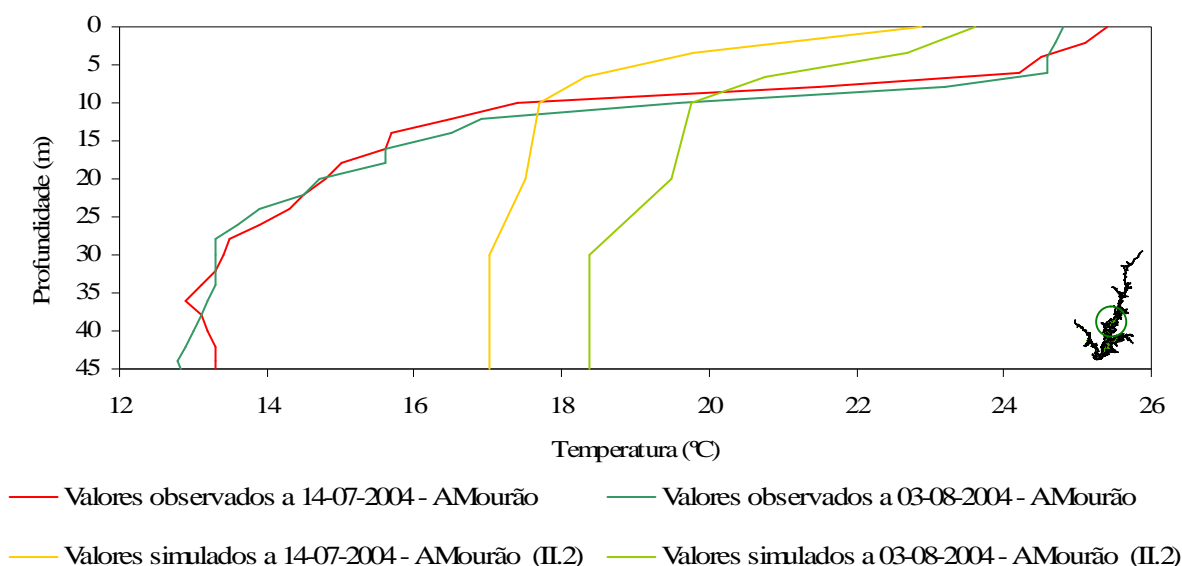


Figura 4.27 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de temperatura da água (°C) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).

Repare-se que entre os 28 e os 36 m de profundidade se observa uma inflexão na tendência decrescente da temperatura. Esta inflexão é, sem dúvida, devida à existência da corrente que se faz sentir ao longo do antigo leito do rio Guadiana.

O padrão da variação da concentração de oxigénio dissolvido relaciona-se inversamente com as variações da temperatura da água, apontando a diminuição da solubilidade do gás com o aumento da temperatura da água no Verão. Nos dados observados na Figura 4.28, na estação de Albufeira de Alqueva Mourão (cf. – 3.3), as oscilações diárias devem-se à combinação das reacções de fotossíntese e respiração. As amplitudes diárias num meio muito produtivo como a albufeira de Alqueva são elevadas. Os mínimos são registados de madrugada e os máximos a meio da tarde. Um outro consumo de oxigénio na coluna de água está associado à nitrificação.

Face à condição de conservação das reacções químicas e sem interferência do fitoplâncton, a série temporal dos dados simulados tende para os valores observados, sem que porém sejam esperadas e identificadas as variações diárias.

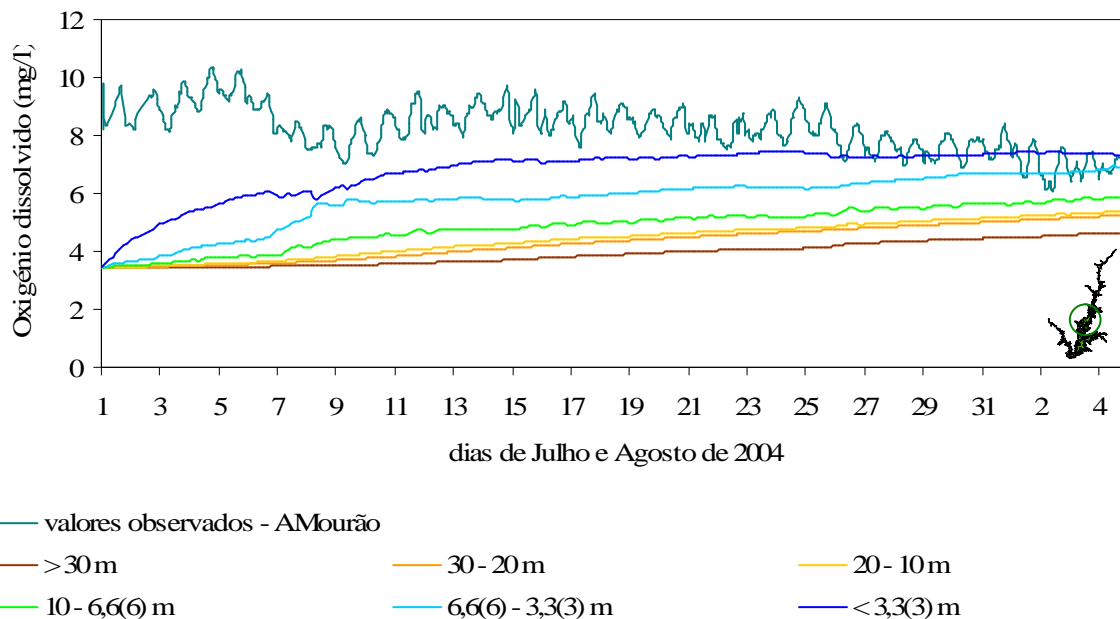


Figura 4.28 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores observados e simulados pelo modelo para o oxigénio dissolvido ($\text{mg O}_2\cdot\text{l}^{-1}$) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).

O gradiente vertical observado do oxigénio dissolvido ao longo da coluna de água é mais pronunciado que o perfil para a temperatura da água (Figura 4.29). A termoclina surge muito bem definida aos 8 m, o que corrobora com o perfil de temperatura já referido.

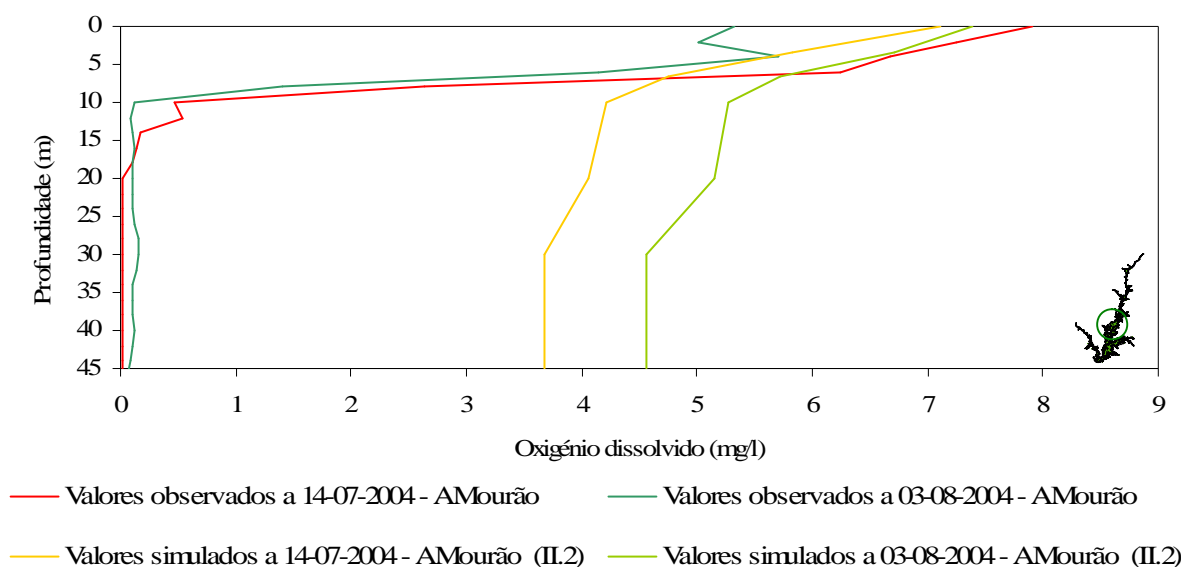


Figura 4.29 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de oxigénio dissolvido ($\text{mg O}_2\cdot\text{l}^{-1}$) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).

Também os valores de oxigénio dissolvido confirmam a existência de alguma mistura da água abaixo da termoclina. A variação de densidade da água imposta pela diferença de temperatura entre o epilímnion e o hipolímnion, impede a mistura da água bem como a difusão de oxigénio entre a superfície e o fundo.

Os valores observados de azoto amoniacal (Figura 4.30) surgem com elevados teores principalmente nas situações de fundo em Albufeira de Alqueva – Mourão (cf. – 3.3). A carência de oxigénio em profundidade promove a redução dos compostos químicos, encontrando-se o azoto preferencialmente sob a forma amoniacal reduzida. Nas situações de superfície os valores são baixos e inferiores aos limites de detecção (L.D.).

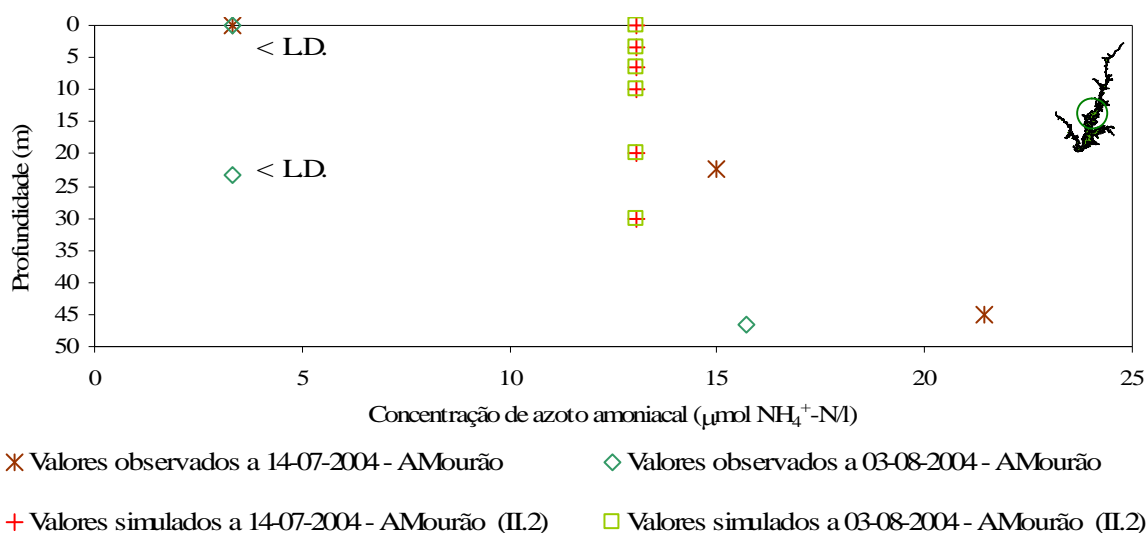


Figura 4.30 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de azoto amoniacal ($\mu\text{mol NH}_4^+ - \text{N.l}^{-1}$) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).

Na albufeira de Alqueva grande parte do azoto total encontra-se sob a forma de nitratos, já que os nitritos e o azoto amoniacal assumem pouca expressividade. Na superfície, em contacto com águas mais oxigenadas, a concentração de nitratos observados tende a diminuir (Figura 4.31).

Os nitritos constituem uma forma intermédia pouco estável entre nitratos (forma oxidada) e azoto amoniacal (forma reduzida), razão pela qual surgem em concentrações muito reduzidas nos ecossistemas. Os valores de nitritos observados encontram-se dentro da gama inferior ao limite de quantificação (L.Q.). O valor pouco sensível do L.Q. apenas permite analisar os resultados de modo

comparativo a esse valor ($2,156 \mu\text{mol NO}_2^- - \text{N.l}^{-1}$). Os valores simulados apresentam somente uma pequena diferença para o valor do L.Q. de cerca de $9,1 \times 10^{-5} \mu\text{mol NO}_2^- - \text{N.l}^{-1}$ (Figura 4.32).

A variação da concentração dos fosfatos observados apresenta um gradiente crescente com a profundidade (Figura 4.33). Em Albufeira de Alqueva – Mourão (cf. – 3.3) apresentam-se concentrações muito baixas à superfície e inferiores ao L.D..

No entanto, como esperado, para os nutrientes em estudo para ambos os dias (14-07-2004 e 03-08-2004), os perfis verticais simulados apresentam valores constantes e muito idênticos aos valores iniciais aplicados ao modelo. As alterações nos nutrientes apenas por processos físicos são muito pequenas. O nitrato é aquele que apresenta maior amplitude de valores, registando a maior diferença à superfície com um valor aproximado de $0,02 \mu\text{mol NO}_3^- - \text{N.l}^{-1}$ (Figura 4.31).

Dentro do período da simulação, a entrada e saída de nutrientes, não altera a concentração destes. A importância relativa dos afluentes não é significativa para influenciar a qualidade da água.

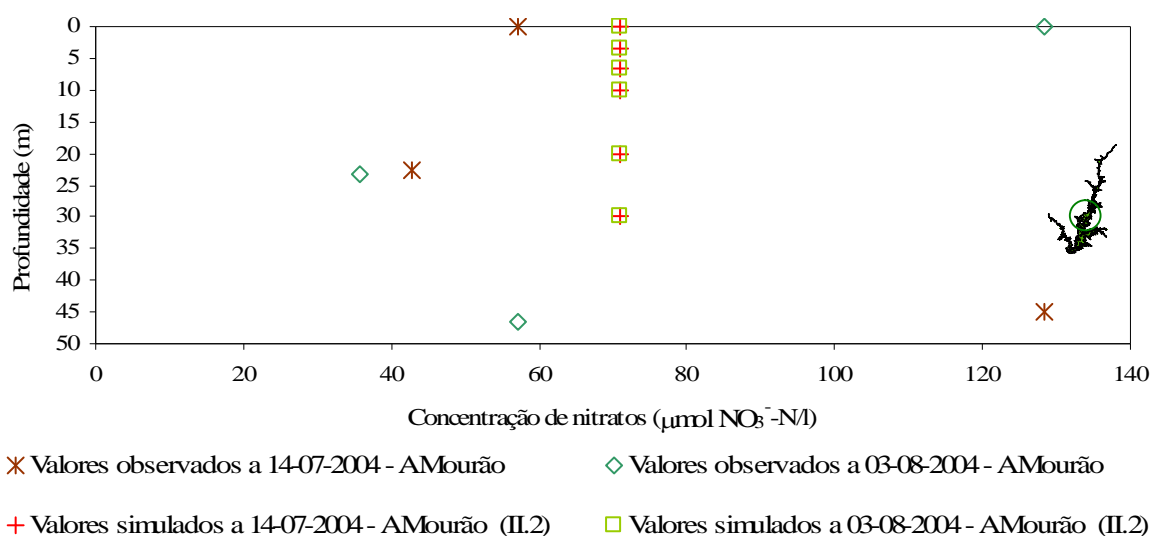


Figura 4.31 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de nitratos ($\mu\text{mol NO}_3^- - \text{N.l}^{-1}$) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).

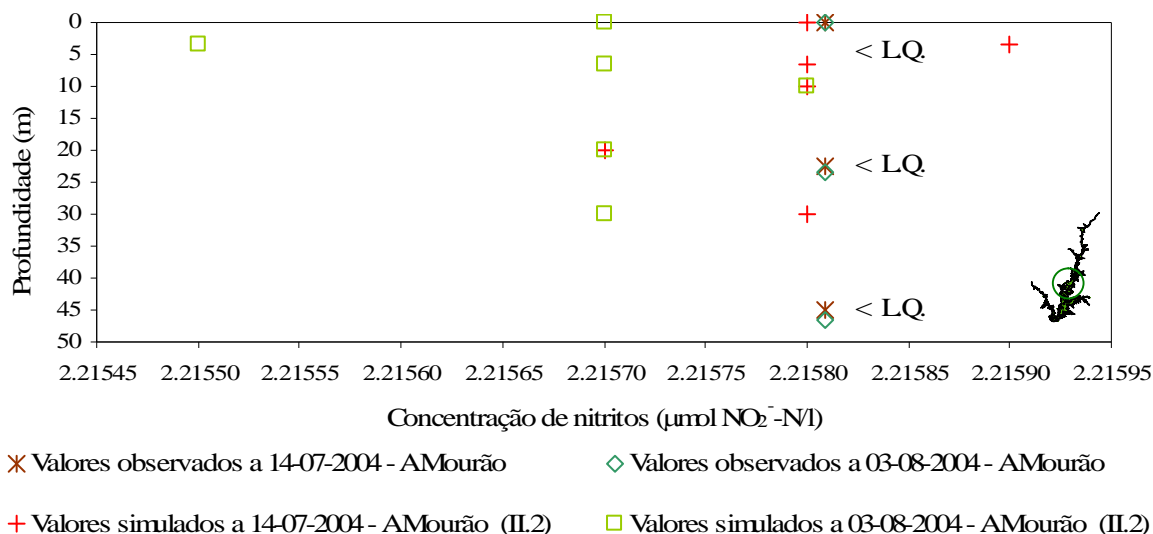


Figura 4.32 – Simulação II.2. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de nitritos ($\mu\text{mol NO}_2^- - \text{N.l}^{-1}$) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).

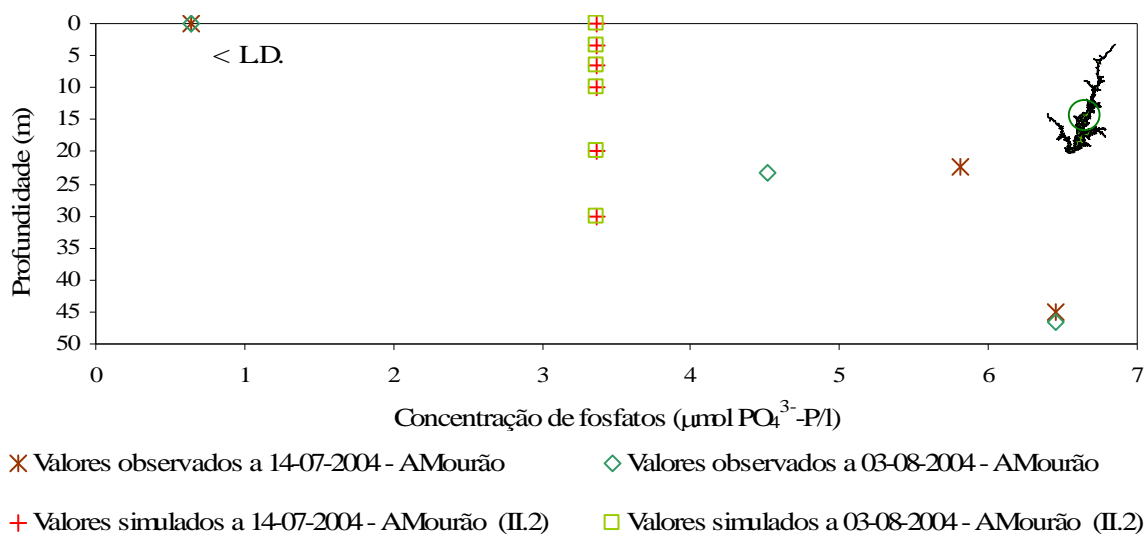


Figura 4.33 – Simulação II.2. (cf. - 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de fosfatos ($\mu\text{mol PO}_4^{3-} - \text{P.l}^{-1}$) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).

4.2.3. Simulação II.3.

Na simulação II.3. foram usados os mesmos objectos e funções forçadoras que em II.2, excepto que os nutrientes são sujeitos aos seus próprios ciclos biogeoquímicos. A oxigenação da água é influenciada pela hidrodinâmica, mas a variação dos teores de oxigénio dissolvido observada na

Figura 4.34, indica que as reacções químicas (nitrificação e desnitrificação) condicionam fortemente este parâmetro. Comparando a simulação II.2. e a simulação II.3. a diferença entre os valores observados e simulados é muito maior para esta segunda simulação, o que demonstra que o modelo sub-estima os valores de oxigénio dissolvido. Esta sub-estimação prende-se com a ausência de fitoplâncton. Os valores de oxigénio dissolvido diminuem de modo significativo a partir dos 10 m (profundidade aproximada da termoclina), devido à ausência de trocas difusivas com a atmosfera.

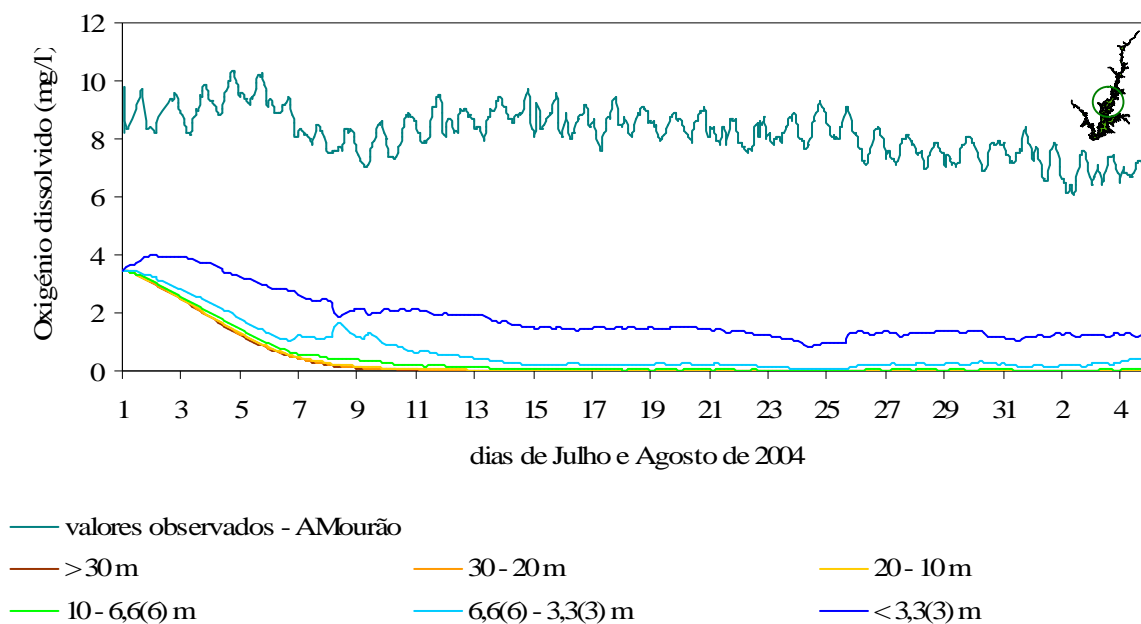


Figura 4.34 – Simulação II.3. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores observados e simulados pelo modelo para o oxigénio dissolvido ($\text{mg O}_2 \cdot \text{l}^{-1}$) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).

Os perfis verticais de oxigénio dissolvido previstos pelo modelo ao longo do tempo, mostram a formação de uma oxiclina que se aproxima dos dados reais excepto à superfície. (Figura 4.35). A contribuição relativa dos afluentes é mais visível a nível local, no que respeita ao oxigénio dissolvido, do que na Simulação II.2. (Figura 4.36). Este fenómeno apenas é visível devido às menores concentrações de oxigénio previstas na presente simulação, como resultado da nitrificação.

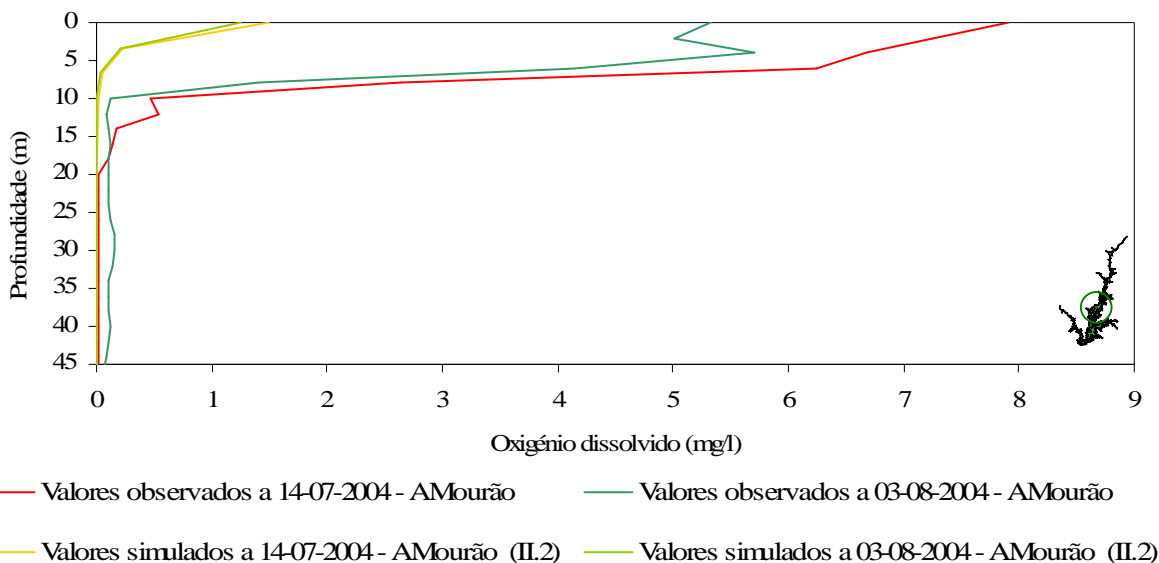
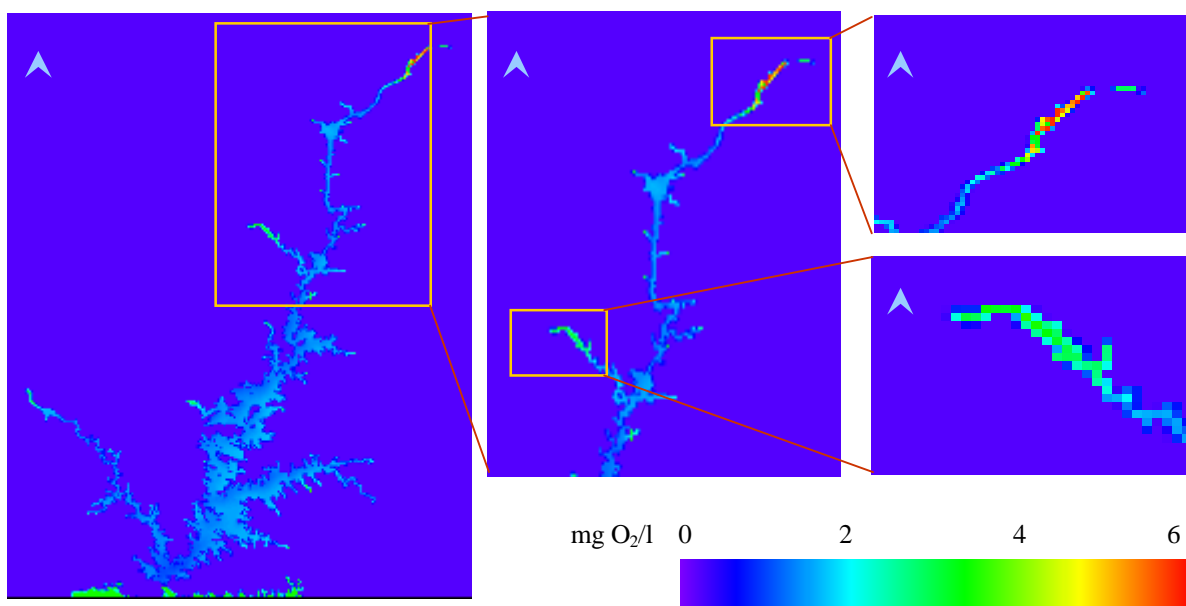


Figura 4.35 – Simulação II.3. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de oxigénio dissolvido ($\text{mg O}_2\text{l}^{-1}$) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).



Dia 05.08.2004

Figura 4.36 – Simulação II.3. (cf. - 3.4.1) com 6 camadas verticais à superfície. Distribuição espacial da concentração de oxigénio dissolvido ($\text{mg O}_2\text{l}^{-1}$). Destaque para a camada de superfície na descarga de montante (início do regolfo da albufeira) e para a ribeira de Lucefecit.

O azoto amoniacal simulado (Figura 4.37) surge com elevados teores principalmente abaixo dos 20 m, pois a carência de oxigénio em profundidade promove a desnitrificação. Junto à superfície

apresenta valores mais baixos, pois os níveis mais elevados de oxigénio dissolvido promovem a nitrificação. Os valores observados são muito inferiores aos simulados, com maior incidência à superfície, pois estando o oxigénio dissolvido sub-estimado, também a concentração de azoto amoniacal apresenta valores simulados superiores aos observados.

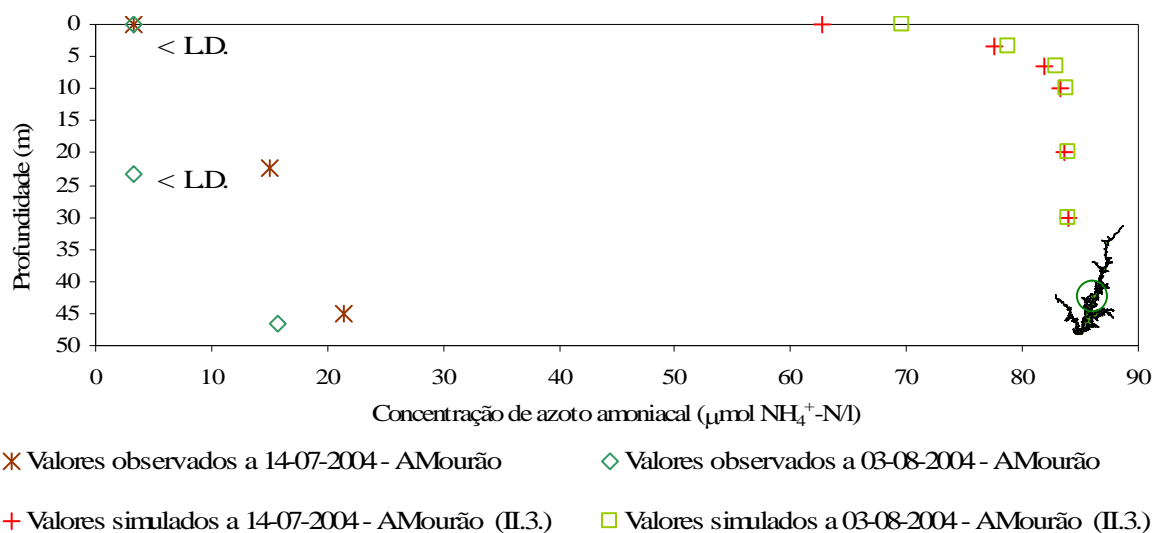
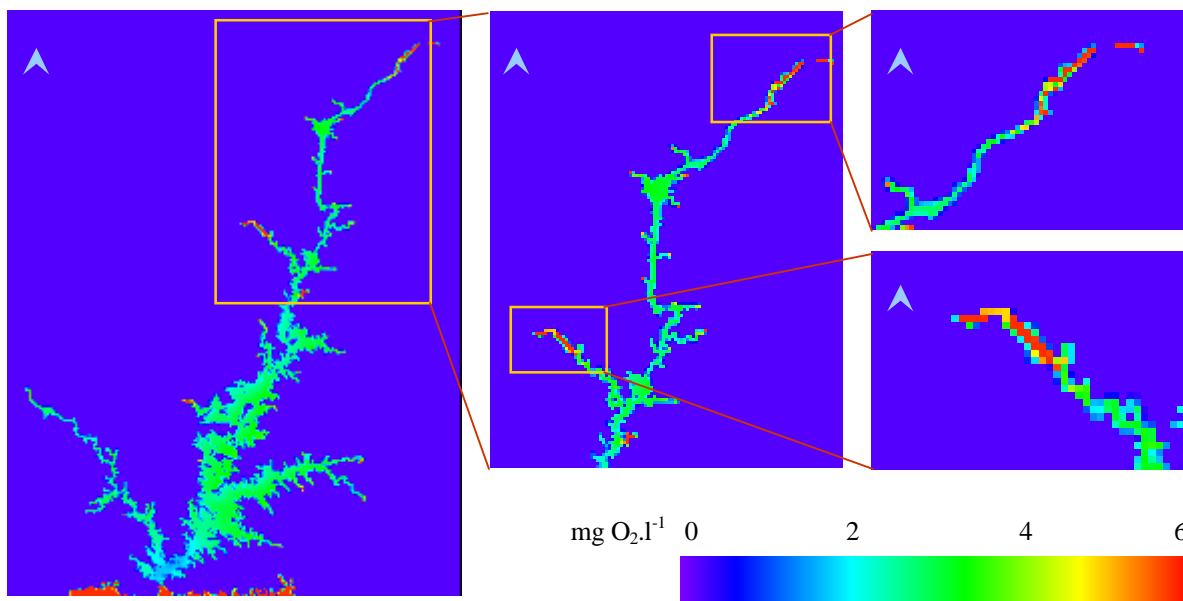


Figura 4.37 – Simulação II.3. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de azoto amoniacal ($\mu\text{mol NH}_4^+ - \text{N.l}^{-1}$) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).

A variabilidade horizontal e vertical da concentração de nitrato está associada aos teores de oxigénio dissolvido e de azoto amoniacal. À semelhança do que se passa com a distribuição espacial de oxigénio dissolvido, verifica-se que há introdução de nitratos (Figura 4.38) pela bacia de drenagem. Também neste caso, o seu carácter é local e sem que a quantidade descarregada tenha uma influência significativa na concentração de nitratos na albufeira.

O gradiente vertical dos nitratos simulados é inversamente proporcional à variação vertical do azoto amoniacal (Figura 4.39). A concentração de nitratos decresce com a profundidade devido à baixa concentração de oxigénio dissolvido e conseqüente conversão de nitratos em azoto amoniacal (a partir dos 10 m de profundidade) pela desnitrificação. À superfície, como existe mais oxigenação, os valores de nitrato são mais elevados, devido à nitrificação. Os valores de nitrato observados são muito superiores aos valores simulados, devido à ausência do consumo pelo fitoplâncton.



Dia 05.08.2004

Figura 4.38 – Simulação II.3. (cf. - 3.4.1) com 6 camadas verticais à superfície. Distribuição espacial da concentração de nitratos ($\mu\text{mol NO}_3^- - \text{N.l}^{-1}$). Destaque para a camada de superfície na descarga de montante (início do regolfo da albufeira) e para a ribeira de Luçefecit.

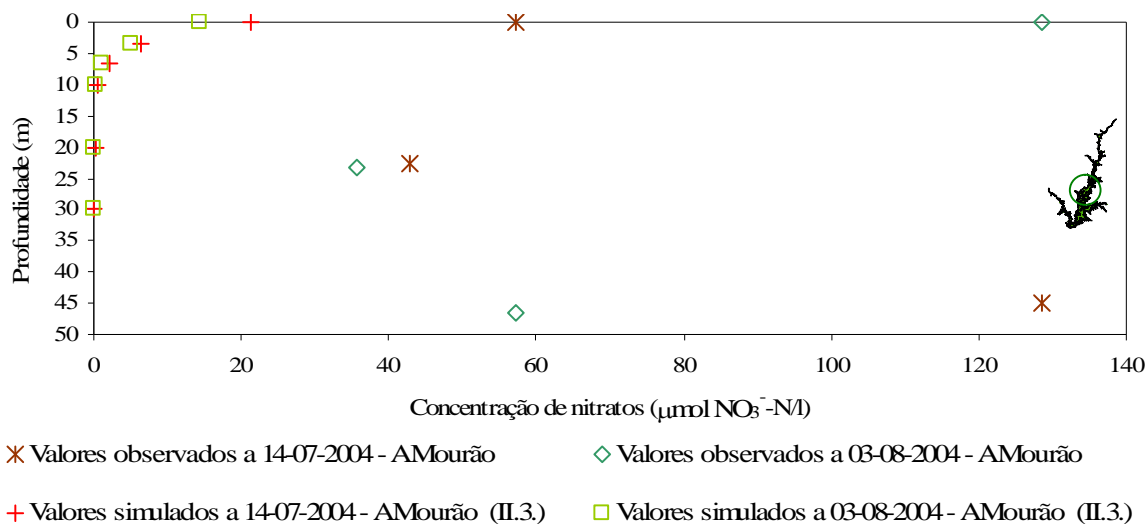


Figura 4.39 – Simulação II.3. (cf. - 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de nitratos ($\mu\text{mol NO}_3^- - \text{N.l}^{-1}$) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. - 3.3).

A gama de variação da concentração de nitritos simulados é muito pequena (Figura 4.40). Dentro das restrições dos limites de quantificação já referidas, os valores simulados encontram-se abaixo do L.Q. para os nitritos, apresentando uma boa aproximação entre os valores observados e previstos. A

excepção verifica-se para a profundidade entre os 3,3(3) e os 6,6(6) m com um desvio de 0,0001 $\mu\text{mol NO}_2^- \cdot \text{N.l}^{-1}$, sem qualquer expressividade.

A concentração de fosfatos continua a ser tratada como conservativa na presente simulação, dado não terem sido incluídos os processos de adsorção/desorção pelos sedimentos, nem a mineralização da matéria orgânica em suspensão. O ajuste dos valores simulados aos valores reais depende também do consumo fitoplanctónico, não incluído nesta simulação. Os teores de fósforo observados à superfície apresentam concentrações muito baixas, o que não implica reduzida importância, mas sim a indicação do elevado consumo de fósforo pelos produtores primários. As bactérias também são fortes competidores por este nutriente, bem como as plantas aquáticas e vários microrganismos. Os padrões de variação com concentrações mais elevadas nas situações de meio e fundo na albufeira apontam para uma acumulação deste nutriente em profundidade.

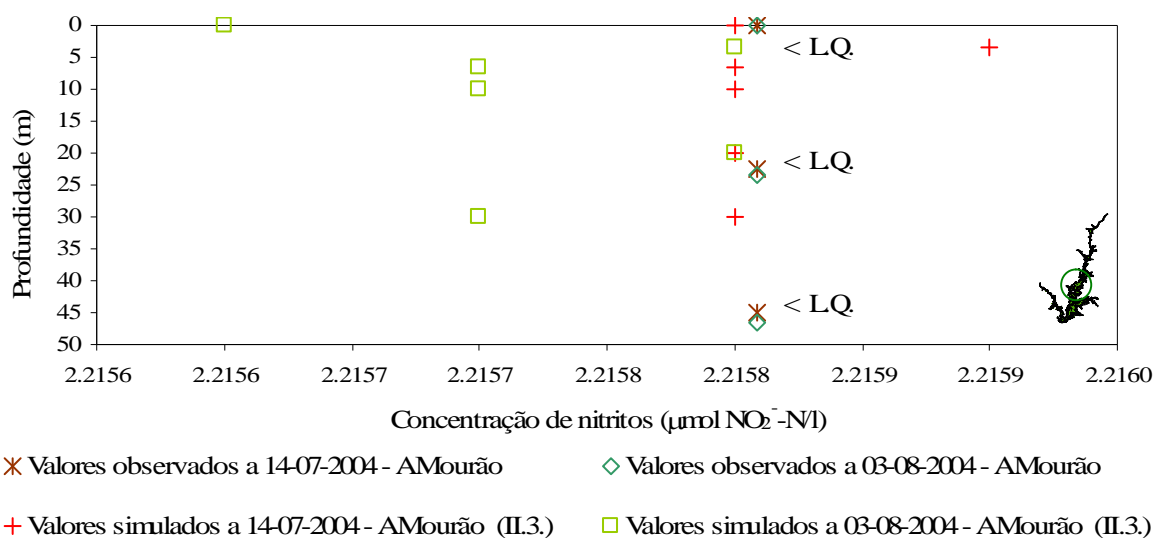


Figura 4.40 – Simulação II.3. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de nitritos ($\mu\text{mol NO}_2^- \cdot \text{N.l}^{-1}$) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).

Os teores de oxigénio dissolvido e as concentrações dos nutrientes são fortemente condicionados pelo fitoplâncton. As concentrações de oxigénio dissolvido não chegam para compensar a nitrificação que ocorre na albufeira.

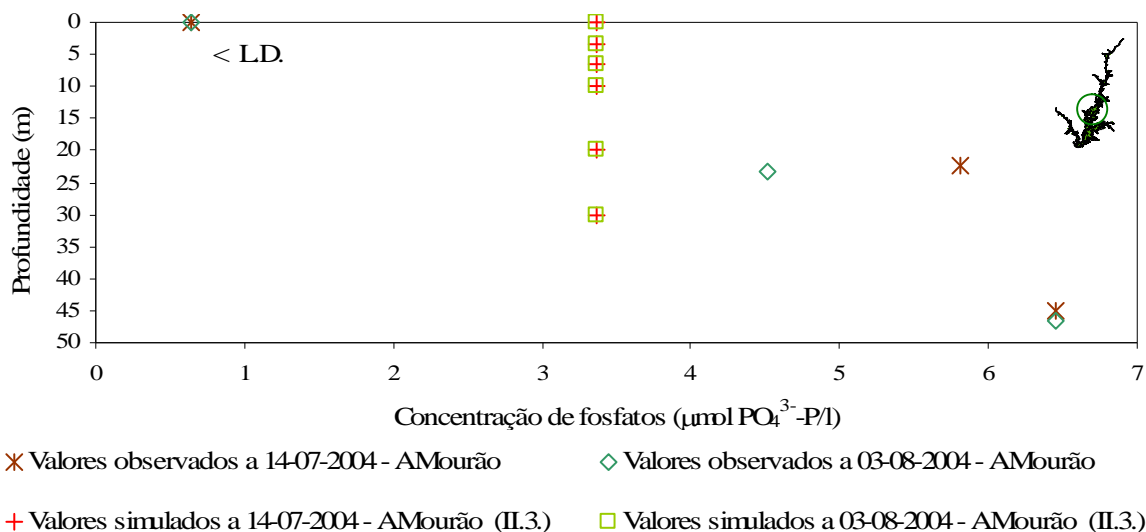


Figura 4.41 – Simulação II.3. (cf. - 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de fosfatos ($\mu\text{mol PO}_4^{3-} - \text{P.l}^{-1}$) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. - 3.3).

4.2.4. Simulações II.4., II.4.Pmax e II.4.Iopt

Os valores da concentração de oxigénio dissolvido simulados (Figura 4.42) apresentam uma melhor aproximação à realidade comparativamente com a simulação II.3. No entanto, os valores da camada de fundo são muito baixos por comparação com os valores observados. À superfície o valor não é tão baixo devido às trocas com a atmosfera e à fotossíntese fitoplanctónica.

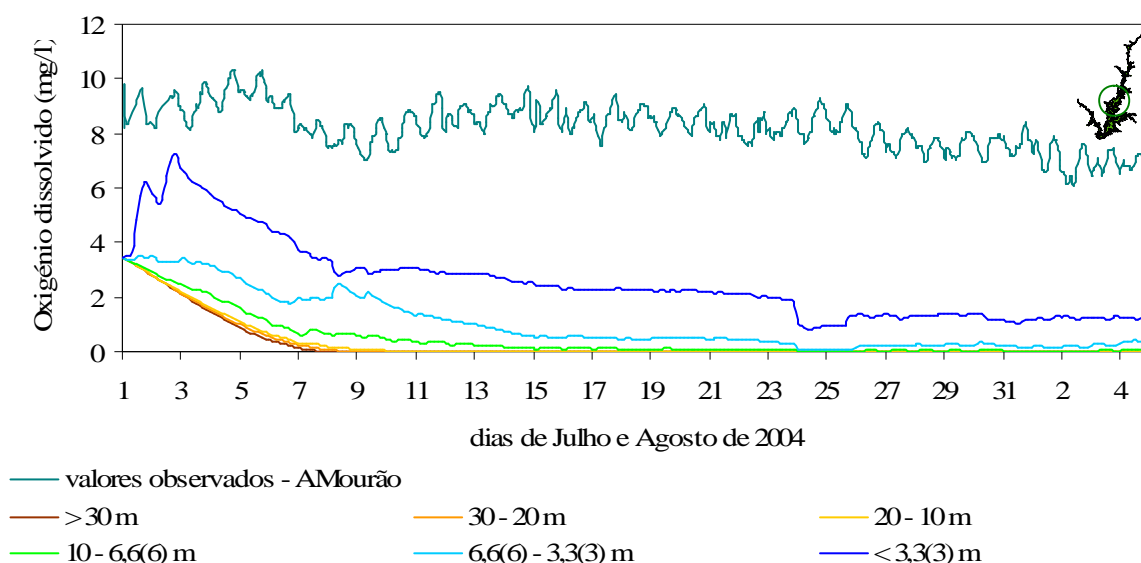
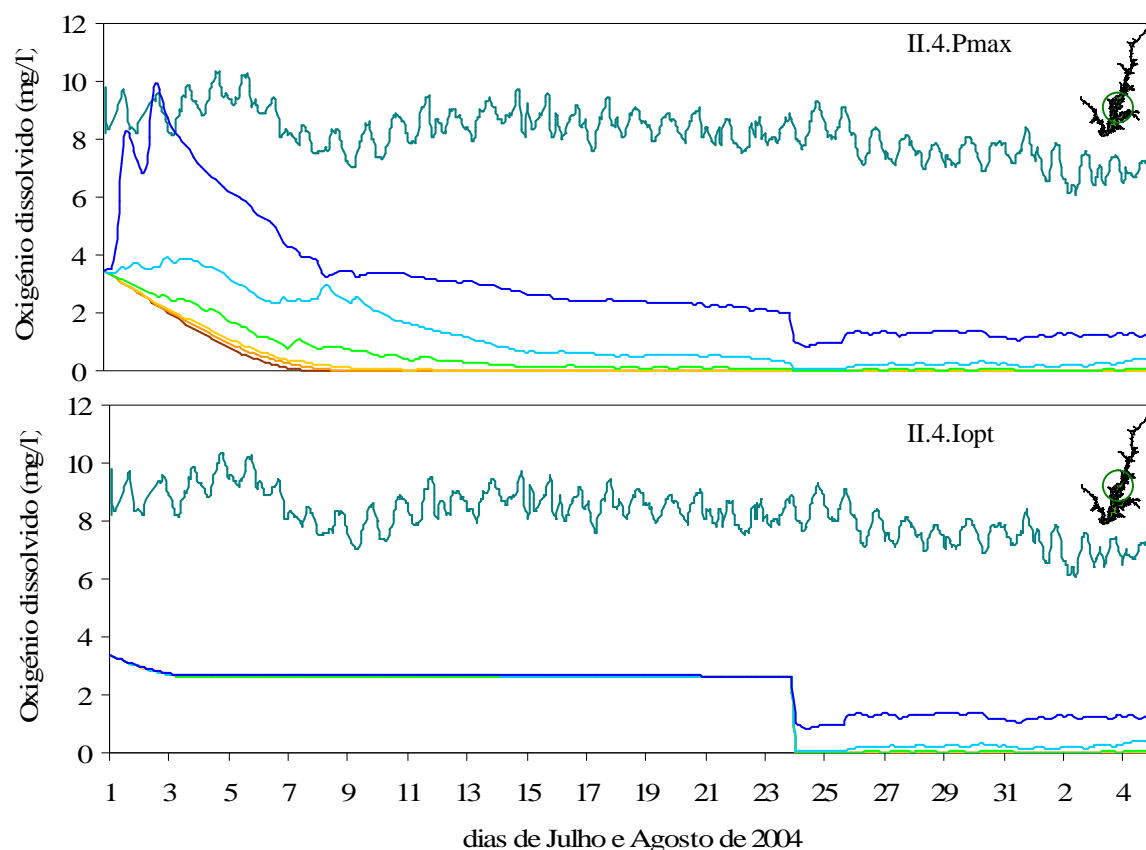


Figura 4.42 – Simulação II.4. (cf. - 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores observados e simulados pelo modelo para o oxigénio dissolvido ($\text{mg O}_2.\text{l}^{-1}$) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. - 3.3).

Ao alterar a taxa máxima de produção de $0,05 \text{ h}^{-1}$ para $0,1 \text{ h}^{-1}$ (Figura 4.43), obteve-se a melhor aproximação das três simulações, chegando-se a atingir valores observados à superfície muito próximos dos esperados. No entanto, pouco depois, a concentração de oxigénio dissolvido decresceu abruptamente. Este facto explica-se pela diminuição da concentração de fitoplâncton ao longo do tempo, prevista pelo modelo e resultante do mesmo não estar ainda devidamente calibrado.



— valores observados - AMourão
 — >30 m — 30- 20 m — 20- 10 m
 — 10- 6,6(6) m — 6,6(6) - 3,3(3) m — <3,3(3) m

Figura 4.43 – Simulações II.4.Pmax e II.4.Iopt (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação entre a variação temporal dos valores observados e simulados pelo modelo para o oxigénio dissolvido ($\text{mg O}_2\text{.l}^{-1}$) à superfície em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).

Continuam a verificar-se os padrões relativos à nitrificação superficial e desnitrificação de fundo. Podemos observar valores muito baixos de amónia à superfície, uma vez que é no fundo que as condições redutoras potenciam esta forma de azoto. O perfil de concentração de azoto amoniacal baixou, relativamente a II.3, mas são o suficiente para atingir os valores observados (Figura 4.44).

Tal como na simulação II.3, também agora se pode afirmar que a concentração de azoto amoniacal depende das concentrações correctas de oxigénio dissolvido e fitoplâncton. Não se verificam alterações apreciáveis nas concentrações de nitratos quando se comparam os resultados com os das simulações II.3 e II.4.

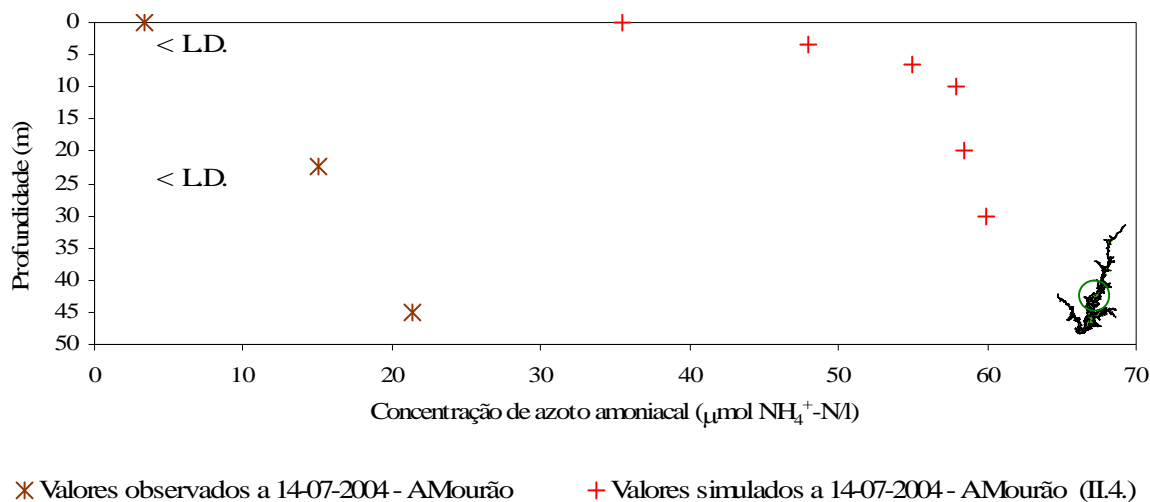


Figura 4.44 – Simulação II.4. (cf. – 3.4.1) com 6 camadas verticais. Comparação dos perfis verticais de azoto amoniacal ($\mu\text{mol NH}_4^+ - \text{N.l}^{-1}$) em “Albufeira de Alqueva-Mourão” (AMourão) (cf. – 3.3).

Os valores de nitritos permanecem abaixo do limite de quantificação. Como este aparenta não ser adequado à ordem de grandeza expectável para este nutriente, não é possível calibrar o valor da concentração de nitritos à superfície.

Os fosfatos apresentam um comportamento igual para toda a coluna de água, agindo como se estivessem em situação conservativa. Os valores obtidos nestas simulações são mais baixos do que os valores obtidos para a simulação II.3, devido ao consumo pelo fitoplâncton.

Do mesmo modo os teores de oxigénio dissolvido e as concentrações dos nutrientes são fundamentalmente condicionados pelos processos associados ao fitoplancton, o que indica que a dinâmica decorre essencialmente dos processos internos.

4.3. Comparação dos principais resultados dos trabalhos de modelação na albufeira de Alqueva

Os trabalhos de modelação realizados até ao presente sobre a albufeira de Alqueva foram implementados no modelo CE-QUAL-W2 (cf. - 2.4.1). Este modelo bidimensional resolvido na vertical permite representar longitudinalmente e na vertical os processos hidrodinâmicos e biogeoquímicos, desprezando uma das dimensões horizontais.

Analisando os trabalhos de modelação efectuados na albufeira de Alqueva sobressaem quatro pontos fundamentais: (i) em todos foi implementado e calibrado o modelo; (ii) a albufeira foi classificada como um sistema eutrófico; (iii) a correcta calibração do oxigénio dissolvido depende dos ciclos biogeoquímicos e do fitoplâncton; e (iv) não existem dados para a correcta ponderação dos caudais afluentes (Diogo et al., 2003; Trindade et al., 2004).

Em Diogo et al. (2003) foi simulada a qualidade da água tendo sido incluídos apenas as variáveis temperatura e oxigénio dissolvido. Os resultados do modelo apresentaram diferenças importantes face aos valores observados, sobretudo junto ao fundo da albufeira. Diogo et al. (2003) aponta como justificação para estas diferenças, a não inclusão de outros parâmetros da qualidade da água, como por exemplo os parâmetros relativos aos ciclos do fósforo e do azoto, o fitoplâncton e a carência bioquímica em oxigénio.

Trindade et al. (2004) apresenta um trabalho mais complexo, resultando da continuação do trabalho desenvolvido no âmbito da elaboração do Plano de Ordenamento das Albufeiras de Alqueva e Pedrógão (POA-AP). Nele foram simulados a temperatura, o oxigénio dissolvido, a matéria orgânica, os nutrientes azotados (azoto amoniacal, nitratos e nitritos) e os fosfatos, assim como a biomassa algal.

Os resultados obtidos classificam a albufeira como monomíctica quente, com base na periodicidade anual da mistura vertical. Os teores de oxigénio dissolvido, de matéria orgânica e de nutrientes são fortemente condicionados pelo desenvolvimento da biomassa. Os processos de eutrofização devem-se essencialmente à dinâmica interna, sendo as descargas pontuais de efluentes domésticos de reduzido impacte. Houve dificuldade na calibração do modelo relativamente à concentração de

nitritos e fosfatos devido aos valores elevados dos limites de detecção dos métodos utilizados na sua determinação. Para que a reprodução dos dados simulados apresentasse uma aproximação maior, verificou-se a necessidade de quantificar os caudais laterais afluentes com maior precisão.

O trabalho de modelação descrito em Diogo et al. (2005), já reproduz bastante bem a hidrodinâmica e os processos que controlam a qualidade da água na albufeira. Apesar dos esforços de quantificar a influência das diferentes fontes poluidoras existentes na bacia da albufeira de Alqueva em território português e espanhol, a estimativa generalista de cargas efectuada demonstrou estar algo distante da realidade. Não obstante, os resultados apontam para uma maior carga gerada em Espanha. De acordo com o mesmo autor, mesmo que fossem removidas todas as cargas nacionais, a melhoria não era suficiente para atingir os objectivos de qualidade pretendidos, para os diferentes usos a que se destina a água desta albufeira.

5. Conclusões

A DQA estabelece metas com vista a uma melhoria da protecção dos recursos hídricos da Comunidade. A promoção do uso sustentável da água é associada à protecção dos ecossistemas aquáticos e terrestres e a salvaguarda das futuras utilizações da água.

A criação do maior lago artificial da península Ibérica, acarreta consequências ambientais ao nível da redução das afluências à albufeira, dos aquíferos, da degradação dos solos, da retenção de sedimentos, e sobre a salinidade do estuário do Guadiana. A modelação matemática pode ser uma ferramenta útil de apoio à decisão na gestão dos potenciais problemas de qualidade da água de uma albufeira permitindo avaliar diferentes cenários de gestão, integrando o conhecimento existente sobre o ecossistema. Um dos grandes desafios do projecto global iniciado na albufeira de Alqueva é a conservação da qualidade da sua água, dentro de limites adequados aos usos pretendidos e à conservação do bom estado ecológico do meio aquático, tendo em conta a importância dos valores naturais da região do Alentejo.

A implementação, análise e verificação dos modelos devem ser encarados como um conjunto de processos encadeados. Não se deve esperar que um modelo funcione como esperado logo à primeira tentativa, sendo necessário analisar a sua lógica interna, a sua estabilidade e consistência de resultados. Este trabalho teve como um dos seus objectivos a implementação de um modelo tridimensional - EcoDynamo - para a albufeira de Alqueva. Para além da implementação, procurou-se avançar um pouco com os processos de calibração do modelo e fazer uma primeira avaliação da contribuição relativa dos caudais fluviais e do vento nos processos de mistura/estratificação vertical da água. Procurou-se ainda avaliar a importância relativa das descargas fluviais e dos processos físicos, químicos e biogeoquímicos na qualidade da água da albufeira de Alqueva. O trabalho realizado não constitui ainda um modelo pronto a ser utilizado como uma ferramenta de gestão, pois é necessário prosseguir com a calibração e a validação do modelo mas, apesar disso, permitiu definir a configuração adequada do modelo e tirar algumas conclusões sobre a dinâmica do ecossistema estudado.

Em função dos resultados das diversas simulações realizadas para o mês de Julho, pode-se concluir que as descargas de água a partir dos afluentes têm uma influência muito reduzida na hidrodinâmica – principalmente influenciada pelo vento – e na qualidade da água – principalmente influenciada pela biogeoquímica da albufeira. Os teores de oxigénio dissolvido e as concentrações dos nutrientes são fundamentalmente condicionados pelos processos associados aos ciclos biogeoquímicos e à influência do fitoplâncton. A simulação em que se incluiu o fitoplâncton apresentou resultados que não se ajustam aos valores reais. Esta sub-estimação deveu-se ao facto de o modelo não estar ainda devidamente calibrado para simular os processos biológicos. Como medida de minimização das condições de anoxia previstas e observadas junto ao fundo, podem ser implementados na albufeira sistemas de arejamentos da coluna de água, com especial incidência nas áreas de maior profundidade.

Os trabalhos de modelação realizados até ao presente sobre a albufeira de Alqueva foram baseados em modelos bidimensionais resolvidos na vertical. Este tipo de modelos permite representar os processos hidrodinâmicos e biogeoquímicos em função de uma distância horizontal (normalmente, ao longo do vale onde se situa a albufeira) e em função da profundidade, desprezando uma das dimensões horizontais. Esta simplificação permite reduzir os custos computacionais do modelo mas torna difícil simulações realistas, sobretudo nas situações em que a circulação hidrodinâmica depende menos dos caudais afluentes e mais da velocidade e direcção do vento, como é o caso das albufeiras localizadas em zonas de clima mediterrânico. Um modelo tridimensional, como o implementado no presente estudo, permite simular a circulação induzida pelo vento a partir de qualquer direcção, o que assume particular importância em Alqueva, onde os rios pouco determinam o hidrodinamismo no Verão, devido aos reduzidos caudais.

Em função dos resultados do trabalho desenvolvido é possível definir um conjunto de prioridades relativas ao aperfeiçoamento do modelo: (i) A inclusão da biogeoquímica dos sedimentos e respectivas interações com a massa de água; (ii) A compilação de uma versão do modelo para funcionar em multi-processamento e assim reduzir o elevado tempo de cálculo do modelo, permitindo correr simulações para períodos de um ano, ou mesmo de vários anos; (iii) A utilização de uma malha espacial de passo variável, de modo a aumentar a resolução do modelo nos canais mais estreitos; (iv) A implementação de um modelo de bacia, como o SWAT (Neitsch et al., 2002),

que permita simular as descargas na albufeira, utilizadas para forçar o presente modelo e simular assim, os impactes de diferentes usos do solo na qualidade química da água da albufeira. Dado que a resolução vertical é um factor decisivo na correcta representação da estratificação, julga-se pertinente o aumento da resolução até aos 15 m de profundidade. Para que seja mantida a morfologia com 6 camadas verticais, propõe-se que seja elaborada uma nova morfologia com as seguintes características: primeira camada dos 0 aos 3,3(3) m; segunda dos 3,3(3) aos 6,6(6) m; terceira dos 6,6(6) aos 10 m; quarta dos 10 aos 15 m; quinta dos 15 aos 30 m e a última camada incluiria as profundidades superiores a 30 m.

6. Referências Bibliográficas

- Antunes, I., 1998. *Modelação da Qualidade da Água no Estuário do Tejo. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Ecologia, Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 93 pp.
- Araújo, S., Saito, C., Almeida, P., *Modelos de Simulação Baseados em Raciocínio Qualitativo para Avaliação da Qualidade da Água em Bacias Hidrográficas* [em linha]. Universidade de Brasília, Instituto de Ciências Biológicas, Departamento de Ecologia, tese para a obtenção do grau de Doutor em Ecologia, [2005], [Consult. Outubro 2006]. Disponível na WWW: <URL:http://www.unb.br/ib/ecl/docentes/saito/tese_dout_symone_c_s_araujo.pdf>
- Azevedo, B., 2004. *Análise e Verificação de um Modelo Ecológico para a Albufeira de Crestuma-Lever*, Trabalho de fim de curso para a obtenção do grau de Licenciado em Engenharia do Ambiente, Universidade Fernando Pessoa.
- Bergkamp, G.; McCartney, M.; Dugan, P.; Mcneely, J.; Acreman, M., *Dams, Ecosystem Functions and Environmental Restoration* [em linha]. Thematic Reviews World Commission on Dams – WCD, Cape Town, [2000], [Consult. Abril 2005]. Disponível na WWW: <URL:<http://www.dams.org/>>.
- Brandão C.; Rodrigues R., 2000. *Hydrological Simulation of the International Catchment of Guadiana River: Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology*, Oceans and Atmosphere, Volume 25, Number 3, pp. 329-339(11), Elsevier Science.
- Centro de Estudos da Avifauna Ibérica - CEAI - Organização Não Governamental de Ambiente, *Parecer Relativo à Revisão do Plano de Ordenamento das Albufeiras de Alqueva e Pedrógão (POAAP)* [em linha]. [2006], [Consult. Julho 2006]. Disponível na WWW: <URL:http://www.ceai.pt/images/stories/pdfs/GIA/parecer_poaap.pdf>.
- Chapelle A., 1995. A preliminary model of nutrient cycling in sediments of a Mediterranean lagoon. *Ecological Modelling* 80, 131-147.
- Chapelle, A., Lazure, P. & P. Souchu, 2000. Modélisation numérique des crises anoxiques (malaigues) dans la lagune de Thau (France). *Oceanological Acta*, 24 : 87-97.
- Cole, T., Buchak, E., 1995. “*CE-QUAL-W2: A Two-dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 2.0*”, User Manual - Draft version. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.

- Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Alentejo (CCDR-A), *Anuário da Qualidade da água no Alentejo* [em linha]. [Consult. Novembro 2006]. Disponível na WWW: <URL: <http://www.ccdr-a.gov.pt/default.asp?eixo=3&id=5>>
- Comissão de Coordenação Regional do Alentejo (CCR-A), eds, *Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo (ERHSA)*, Évora, 2001.
- Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens (CNPGB), *Barragens de Portugal* [em linha]. Lisboa, [Consult. Agosto 2007]. Disponível na WWW:
<URL: http://cnpgb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/index.htm>
- Convenção de Albufeira, 1998. *Convenção Sobre Cooperação Para a Protecção e o Aproveitamento Sustentável das Águas das Bacias Hidrográficas Luso-Espanholas – Comprovação do regime de caudais do protocolo adicional*, Albufeira a 30 de Novembro de 1998, Resolução da Assembleia da República n.º 66/99, de 17 de Agosto, Diário da República n.º 191 Série I Parte A.
- Crouzet, P., Leonard, J., Nixon, S., Rees, Y., Parr, W., Laffon, L., Bøgestrand, J., Kristensen, P., Lallana, C., Izzo, G., Bokn, T., Bak, J., eds., 1999. *Nutrients in European Ecosystems*, pp 1-155. European Environment Agency, Copenhagen.
- Cruz, M. e Braz, R., 2000. *A eutrofização dos sistemas aquáticos*, [em linha]. [Consult. Abril 2005]. Disponível na WWW:
<URL:<http://www.naturlink.pt/canais/Artigo.asp?iArtigo=2195&iLingua=1>>
- Diogo, P., Coelho, P., Almeida, M., Mateus, N., Rodrigues, A., 2005. *O Modelo Ce-Qual-W2 como Ferramenta de Gestão da Bacia Hidrográfica de Alqueva*, 7º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos Países de Língua Oficial Portuguesa, Évora, Cabo Verde.
- Diogo, P., Coelho, P., Almeida, M., Serrazina, N., Rodrigues, A., 2003. *Simulação da qualidade da água durante o enchimento da albufeira de Alqueva*, 6º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos Países de Língua Oficial Portuguesa, Cidade da Praia, Cabo Verde.
- Diogo, P., Rodrigues, A., 1997. *Aplicação do Modelo CE-QUAL-W2 na Simulação da Qualidade da Água da Futura Albufeira de Alqueva*, Simpósio sobre Aproveitamentos Hidroeléctricos, APRH, Lisboa.
- Duarte, P., Azevedo, B., Ribeiro, C., Pereira, A., Falcão, M., Serpa, D., Bandeira, R., Reia, J., 2007. *Management oriented mathematical modelling of Ria Formosa (South Portugal)*. Transitional Waters Monographs, v. 1, pp. 13-51.
-

- Duarte, P., Ferreira, J., *Dynamic modelling of photosynthesis in marine and estuarine ecosystems, Environmental Modelling and Assessment* [em linha]. 2: pp 83-93, [1996], [Consult. Julho 2008]. Disponível na WWW:
<URL: <http://www2.ufp.pt/~pduarte/publica/prodyn/prodyn.html>>
- Dyke, P., 2001. *Coastal and Shelf sea modelling*. Kluwer.
- Edwards, 1973 A.P. Edwards, *Isotopic tracer techniques for identification of sources of nitrate pollution*, *Journal of Environmental Quality* 2 (1973), pp. 382–387.
- Empresa de Desenvolvimento e Infra-Estruturas do Alqueva (EDIA), 2003a), *Estudo da Situação das Fontes de Poluição Industrial na Bacia Hidrográfica da Barragem de Pedrógão*, Lisboa.
- Empresa de Desenvolvimento e Infra-Estruturas do Alqueva (EDIA), 2003b), *Estudo da Situação das Fontes de Poluição Urbana na Bacia Hidrográfica da Barragem de Pedrógão*, Lisboa.
- Empresa de Desenvolvimento e Infra-Estruturas do Alqueva (EDIA), *Estudo de Avaliação do Impacte Socio-económico da Componente Hidroagrícola do Alqueva – Relatório Final* [em linha]. [2004]. [Consult. Outubro 2006]. Disponível na WWW:
<URL:http://www.edia.pt/ngt_server/attachfileu.jsp?look_parentBoui=2246205&att_display=n&att_download=y>
- European Commission, 2000. *Directive 2000/60/CE of the European Parliament and of the Council of 23 October 2003 establishing a framework for Community action in the field of water policy*. Official Journal of the European Communities L327, 1 (22.12.2000)
- Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa - FCT/UNL, 1997. *Aproveitamento de Fins Múltiplos de Alqueva, Estudos de Qualidade da Água, Aplicação de um Modelo Bidimensional*.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations: Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. 1998. [Consult. Março 2008]. Disponível na WWW:
< <http://www.fao.org/docrep/x0490E/x0490e00.htm>>
- Friedl, G., *Changing Nutrients Ratios* [em linha]. 15 de Julho de 2002 [Consult. Abril 2005]. Disponível na WWW:
<URL:http://www.eawag.ch/research_e/apec/irongate/writings/nutrientratio.htm>
-

- Friedl, G., Wuest, A., 2002. *Disrupting Biogeochemical Cycles – Consequences of Damming*. Aquatic Sciences, 64, pp. 55-65.
- Ghisolfi, R., Garcia, C., 1995. *Efeitos do processo difusivo na estimativa de correntes superficiais pelo método MCC* [em linha]. Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil, 14-19 abril 1996, INPE, p. 761-768. [Consult. Junho 2008]. Disponível na WWW:
<<http://mar.te.dpi.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/02.01.15.16/doc/T82.pdf>>
- Gleick, P., 1996. *Water resources*. In *Encyclopedia of Climate and Weather*, ed. by S. H. Schneider, Oxford University Press, New York, vol. 2, pp.817-823.
- Gonçalves, A., 2005. *Análise Temporal e Espacial dos Parâmetros Físico-Químicos e Biológicos do Rio Guadiana e da Albufeira de Alqueva*, Universidade de Évora, Dissertação para a obtenção do Grau de licenciatura em Engenharia dos Recursos Hídricos.
- Haefner, J., 1996. *Modeling Biological Systems. Principles and Applications*, pp. 1-473, ITP - Chapman e Hall, New York.
- Hellerman, S., 1967. *An updated estimate of the wind stress on the world ocean*. Mon. Weather Rev. (95) 607:626.
- Huang, W., Foo, S., 2002. *Neural network modeling of salinity variation in Apalachicola River*, *Water Researc*, 36 (1), pp. 356–362.
- Instituto da Água (INAG), 1998a). *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Guadiana - Volume IV. Diagnóstico – Anexo Temático 1: Análise Biofísica - Parte 3. Caracterização Climática*. Ministério do Ambiente Portugal.
- Instituto da Água (INAG), 1998b). *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Guadiana - Volume IV. Diagnóstico – Anexo Temático 1: Análise Biofísica - Parte 4. Análise dos Solos*. Ministério do Ambiente Portugal.
- Instituto da Água (INAG), 1998c). *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Guadiana - Volume IV. Diagnóstico – Anexo Temático 5: Análise da Ocupação do Solo e Ordenamento do Território - Parte 1. Análise da Ocupação do Solo*. Ministério do Ambiente Portugal.
- Instituto da Água (INAG), 1999a). *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Guadiana - Volume III - Análise III.1 - Caracterização Geral da Bacia Hidrográfica – Ministério do Ambiente Portugal*.
- Instituto da Água (INAG), 1999b). *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Guadiana - Volume III -*
-

Análise – Parte 1 – Subsistema Hidrológico, Ministério do Ambiente Portugal.

Instituto da Água (INAG), 1999c). *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Guadiana - Volume IV. Diagnóstico – Anexo Temático 1: Análise Biofísica - Parte 1. Análise Geomorfológica*. Ministério do Ambiente Portugal.

Instituto da Água (INAG), 1999d). *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Guadiana - Volume IV. Diagnóstico – Anexo Temático 1: Análise Biofísica - Parte 2. Análise Geológica e Hidrogeológica*. Ministério do Ambiente Portugal.

Instituto da Água (INAG), 2000a). *Plano de Ordenamento das Albufeiras de Alqueva e Pedrógão (POAAP) Estudos de Base: Volume II – Caracterização das Albufeiras*, Lisboa.

Instituto da Água (INAG), 2000b). *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Guadiana - Volume IV. Diagnóstico – Anexo Temático 6: Utilizações e Necessidades de Água - Balanço de Necessidades / Disponibilidades*. Ministério do Ambiente Portugal.

Instituto da Água (INAG), 2004a). *Classificação dos Cursos de Água Superficiais de Acordo com as suas Características de Qualidade para Usos Múltiplos* [em linha]. Lisboa, actual. 2003 [Consult. Março 2004]. Disponível na WWW: <URL:http://snirh.inag.pt/snirh/dados_intese/qual_ag_anual/classificacao.html>

Instituto da Água (INAG), 2004b). *Critério de Eutrofização – Albufeiras e Lagoas* [em linha]. Lisboa, actual. 2004 [Consult. Março 2004]. Disponível na WWW:<URL:http://www.inag.pt/inag2004/port/r_externas/ue/ag_res_urb/aguas_res_urb_zonas.html>

Instituto da Água (INAG), 2006a). *Revisão do Plano de Ordenamento das Albufeiras de Alqueva e Pedrógão – Estudos de Base e Pré-proposta, 2.ª fase, vol. I*, Instituto da Água, Lisboa

Instituto da Água (INAG), 2006b). *Direito de resposta e de rectificação "Espanha está a fechar a torneira ao Guadiana"* [em linha]. Lisboa, actual. Setembro 2006 [Consult. Março 2008]. Disponível na WWW:
<URL:<https://mail.uevora.pt/pipermail/ambio/2006-September/005120.html>>

Instituto da Conservação da Natureza e Biodiversidade – ICNB, [em linha]. Lisboa, actual. Junho 2006 [Consult. Julho 2006]. Disponível na WWW: <URL:<http://www.icn.pt>>

Instituto do Ambiente (IA), *Atlas do Ambiente Digital*, [2003]. [Consult. Abril 2005]. Disponível na WWW: <URL:<http://-http://www.iambiente.pt/atlas/est/index.jsp>>

- Jørgensen, S., 1997. *Integration of Ecosystem Theories: A Pattern 2nd Ed.*, Dordrecht, Holanda, Kluwer Academic Publishers
- Knauss, J., 1997. *Introduction to Physical Oceanography*, Prentice Hall, NJ.
- Koelmans, A., van der Heijde, A., Knijff, L., Aalderink, R., 2001. *Integrated modelling of eutrophication and organic contaminant fate & effects in aquatic ecosystems*. Water Research, vol. 35 no. 15. p. 3517.
- Köppen, W., 1931. *Klimakarte der Erde. Grundriss der Klimakunde, 2nd Ed.*, Berlin and Leipzig.
- Köppen, W., Geiger, R., 1928. *Klimakarte der Erde, Wall-map 150 cm x 200 cm*. Verlag Justus Perthes, Gotha.
- Liu, W., Chen, H., Hsieh, W., Chang, C., 2006. *Linking watershed and eutrophication modelling for the Shihmen Reservoir*, Taiwan. Water Science & Technology. IWA. Vol 54 n° 11.
- Mccartney, M., Sullivan, C., Acreman, M., 2001. *Ecosystem Impacts of Large Dams - Background Paper Nr. 2*. IUCN.
- Merten, G., Minella, J., 2002. *Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura*. Revista Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável. Porto Alegre, vol.3, n.4, Out./Dez. pp. 33-38.
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA), *Informe sobre el estado hidrológico de las cuencas en España (período enero 2006-marzo 2006)* [em linha]. Março de 2006 [Consult. Outubro 2006]. Disponível na WWW: <URL:http://www.mma.es/portal/secciones/acm/aguas_content_zonas_asoc/ons/mapa_informe_ons/pdf/EstadoHidroEspaEne2006Mar2006.pdf>.
- Morais, M., 1995. *Organização Espacial e Temporal de um Rio Temporário Mediterrâneo (Rio Degebe, Bacia Hidrográfica do Guadiana)*, Évora, Universidade de Évora.
- Morris, G., Fan, J. 1998. *Reservoir Sedimentation Handbook*, McGraw Hill, NY
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Srinivasan, R., Williams, J., 2002. *Soil and Water Assessment Tool. User's Manual*. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service.
- Nilsson, C., Reidy, C., Dynesius, M., *Impact of Dams Around The World Surveyed* [em linha]. 15 de Abril de 2005 [Consult. Maio 2005]. Disponível na WWW: <URL:http://www.sweden.se/templates/cs/News___11592.aspx>.
-

- Odum, E., 1971. *Fundamentals of Ecology*, 3^a ed. Sandeurs, Philadelphia, Pa., (Trad. portuguesa Fundamentos de Ecologia, 5^a ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1997).
- Okubo, A., (1971). *Oceanic diffusion diagrams*. Deep- Sea Research. (18) 789:802.
- Oliveira, R., Silva, A., 2000. *Simulação da Qualidade da Água na Futura Albufeira de Alqueva*, in: Congresso da Água, 25 – 29 Setembro 2000, Culturgest – Lisboa, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa.
- Pereira, A., Duarte, P., *EcoDynamo: Ecological Dynamics Model Application. DITTY report* [em linha]. 2005. Disponível na WWW: <URL:<http://www.dittyproject.org/Reports.asp>>.
- Pereira, A., Duarte, P., Norro, A., 2006. *Different modelling tools of aquatic ecosystems: A proposal for a unified approach. Ecological Informatics. 1* [em linha]. pp. 407-421. Elsevier [Consult. Fevereiro 2008]. Disponível na WWW: <https://bdigital.ufp.pt/dspace/bitstream/10284/288/1/ECOINF_47.pdf>
- Pinho, J. 2001. *Aplicação de Modelação Matemática ao Estudo da Hidrodinâmica e da Qualidade da Água em Zonas Costeiras*, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Braga, Portugal.
- Poff, N., Hart, D., 2002. *How Dams Vary and Why it Matters for the Emerging Science of Dam Removal*. BioScience, 52, pp 659-668.
- Portela, L., 1996. *Modelação matemática de processos hidrodinâmicos e de qualidade da água no Estuário do Tejo*. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 240 pp.
- Portela, L., Neves, R., 1994. *Modelling temperature distribution in the shallow Tejo estuary*. In: Tsakiris & Santos. *Advances in Water Resources Technology and Management*. Balkema: Rotterdam, pp.457–463.
- Rocha, L., 2002. *O Assoreamento de Alqueva e as suas Consequências*, in: International Meeting on Dams: Impacts and Hazards; 14 – 15 Novembro 2002, pp. 64 – 71, Universidade de Évora, Évora.
- Rodrigues, A., Diogo, P., 1997. *Aplicação de um modelo bidimensional na simulação da qualidade da água da futura albufeira de Alqueva*, Simpósio sobre Aproveitamentos Hidroeléctricos, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa (Portugal), 19 a 21 de Junho.
-

- Rodrigues, A., Diogo, P., 2000, *A albufeira de Alqueva no rio Guadiana. Simulação da qualidade da água*, Proceedings da 2.^a Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica, Lagos, Portugal.
- Saraiva, S., 2005. *Modelação ecológica da ria de Aveiro: o papel das macroalgas*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Ecologia, Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 211 pp.
- Simpson, J., Dickey, T., 1981. *The relationship between downward irradiance and upper ocean structure*. Journal of Physical Oceanography. (11) 309:323.
- SISIDRO, 1996. *Aproveitamento Hidroeléctrico do Alqueva e Açude de Pedrógão*, Estudos de Qualidade da Água, Análise Complementar.
- Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), *Redes específicas* [em linha]. Lisboa, [Consult. Março 2008]. Disponível na WWW:
<URL:http://snirh.inag.pt/snirh/download/relatorios/net_Livro_REDES_especf_8.pdf>
- Steele, J., 1962. *Environmental control of photosynthesis in the sea*. Limnol. Oceanogr., 7: 137 – 150.
- Stewart, R., 2005, *Introduction to Physical Oceanography. Chapter 4 - Atmospheric Influences (4.5 - Wind Stress)* [em linha]. Department of Oceanography, Texas A & M University. Actualizado: 6 de Setembro de 2006 [Consult. Março 2008]. Disponível na WWW:
<http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/chapter04/chapter04_05.htm>
- Thorntwaite, C., 1948. *An approach towards a rational classification of climate*, Geographical Review, London, vol.38, pp.55-94.
- Trindade, I., 2005. *Modelação Matemática da Qualidade da Água em Albufeiras. Aplicação do Modelo CE-QUAL-W2 na Simulação do Enchimento da Albufeira de Alqueva*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 205 pp.
- Trindade, I., Oliveira, R., Monteiro, A., *Modelação da Qualidade da Água Durante o Enchimento da Albufeira de Alqueva* [em linha] IV Congresso Ibérico sobre Gestão e Planificação da Água, Tortosa, Dezembro 2004.[Consult. Julho 2006]. Disponível na WWW: <URL:http://alojamientos.us.es/ciberico/archivos_word/147b.>>
-

- Vörösmarty, C., Sharma, K., Fekete, B., Copeland, A., Holden, J., Marble, J., Lough, J., 1997. *The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world*. *Ambio* 26: 210 – 219.
- Vreugdenhil, C., 1989. *Computational hydraulics, an introduction*. Springer-Verlag. 183 pp.
- Wetzel, 1993. *Limnologia*, 2.^a edição. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 919 pp.
- World Commission on Dams (WCD), *Barragens e Desenvolvimento: Um Novo Modelo para Tomada de Decisões* [em linha]. Novembro de 2000 [Consult. Abril 2005]. Disponível na WWW: <URL:<http://www.dams.org/>>.
- Xavier, C. 2005. *Avaliação da influência do uso e ocupação do solo e de características geomorfológicas sobre a qualidade das águas de dois reservatórios da região metropolitana de Curitiba*. Dissertação de Mestrado em Solos no Curso de Pós Graduação em Ciências do Solo da Universidade Federal do Paraná – UFPR. pp. 167.
-