

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.

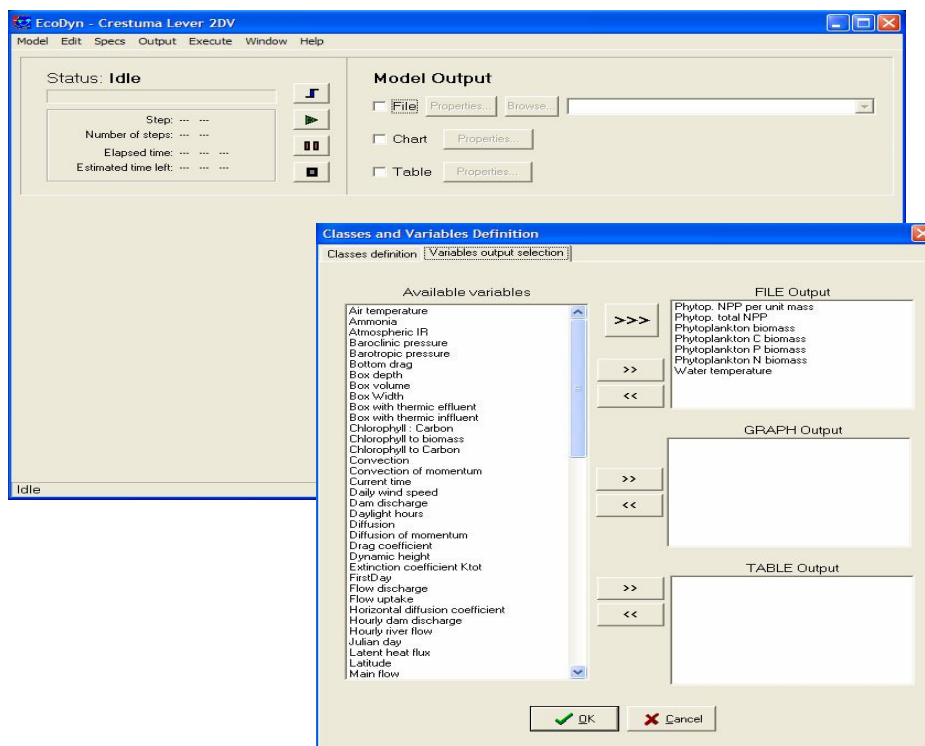


Figura 3.1 – Visualização do interface principal do modelo sobreposta com a janela de selecção de variáveis.

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 Noesis, 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.

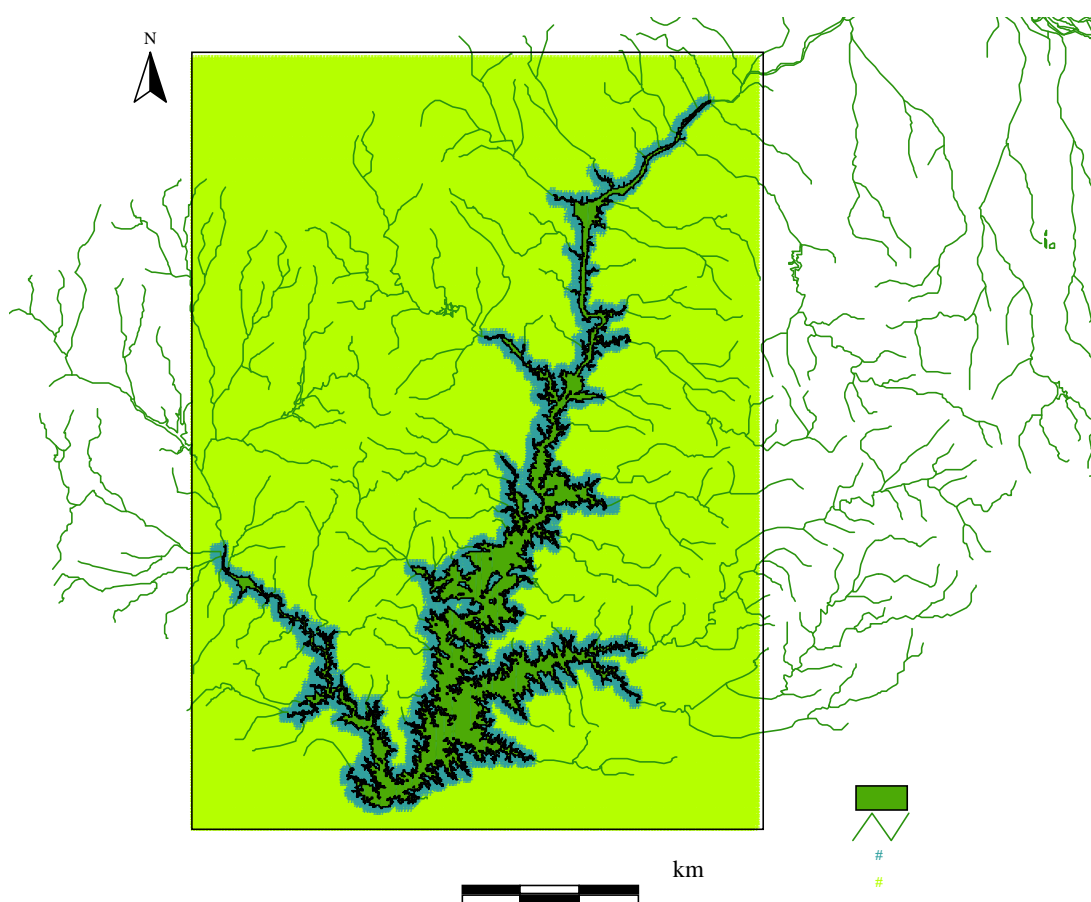


Figura 3.2 – Identificação do domínio e sub-domínio.

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).

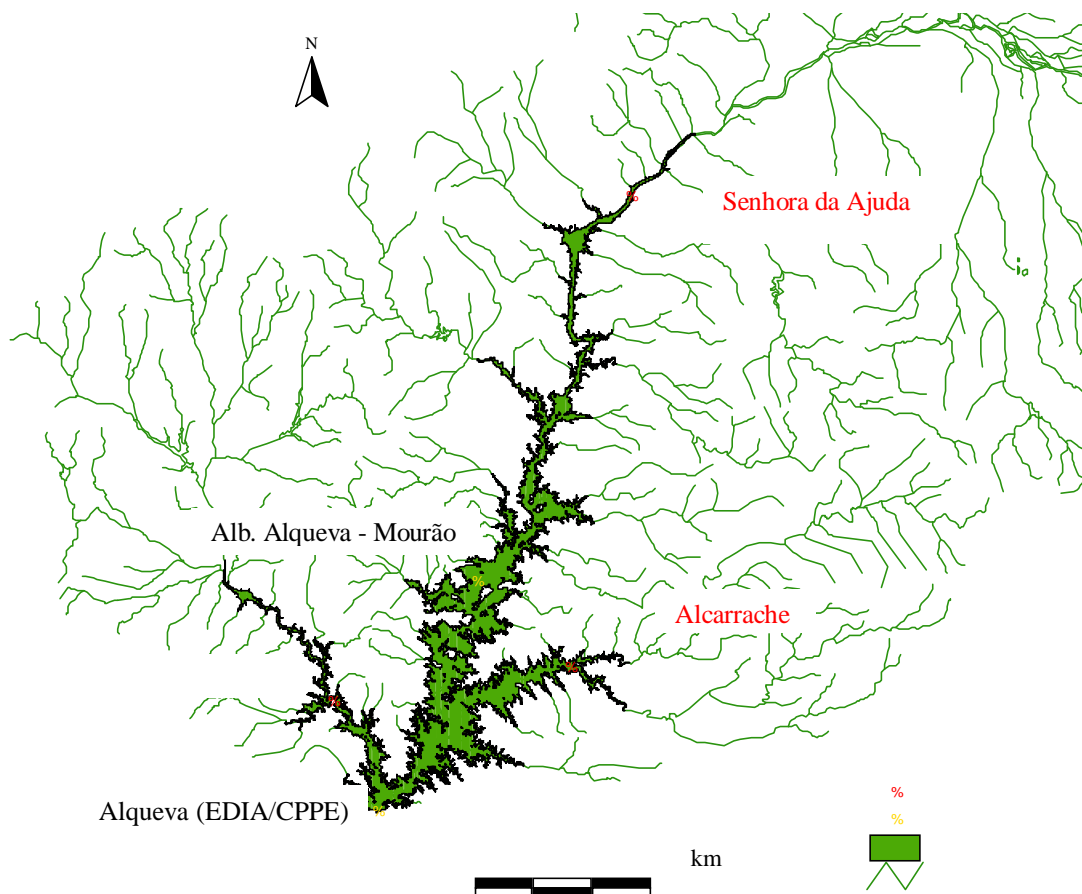


Figura 3.3 – Localização das estações meteorológicas automáticas SNIRH seleccionadas e dos locais de amostragem da EDIA.

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).

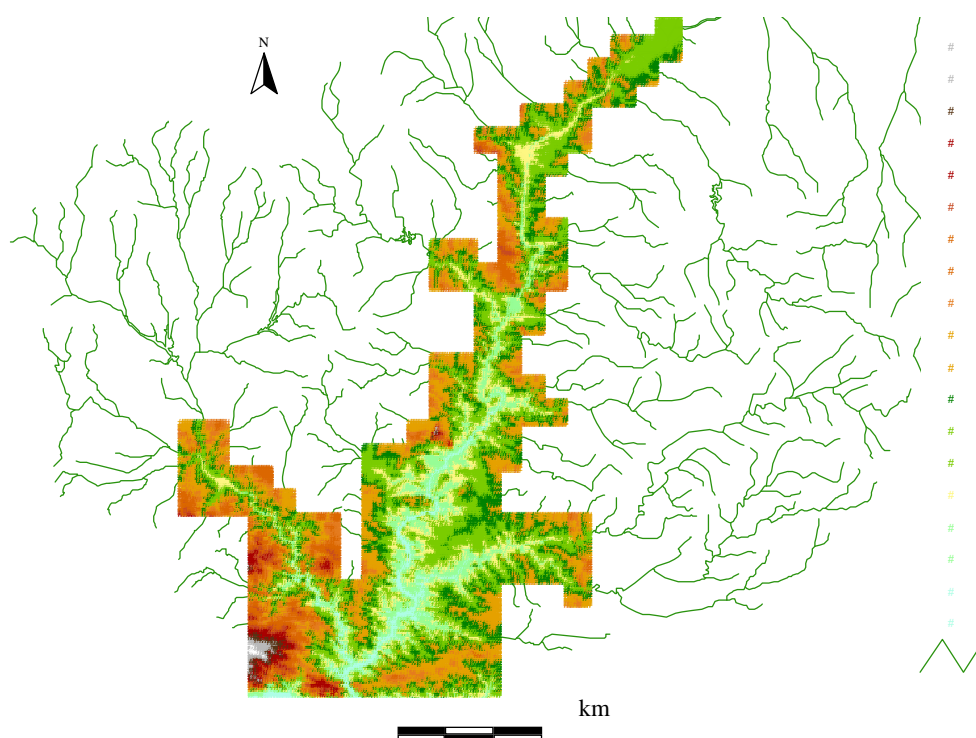


Figura 3.4 – Dados de batimetria para uma resolução de 200 m por 200 m. Profundidades com valor positivo e altitudes com valor negativo relativo ao NPA, cota 152 m.

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.

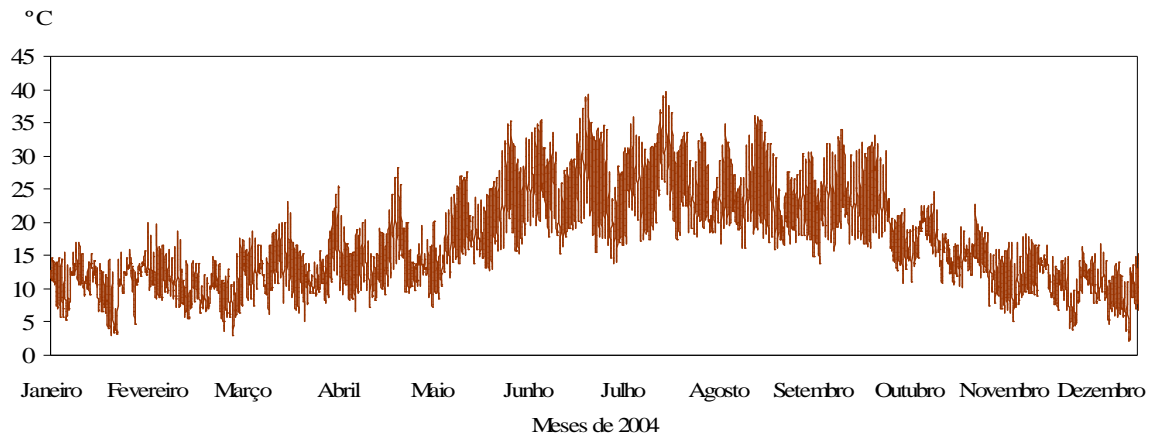


Figura 3.5 – Valores horários da temperatura do ar para o ano de 2004 (°C).

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.

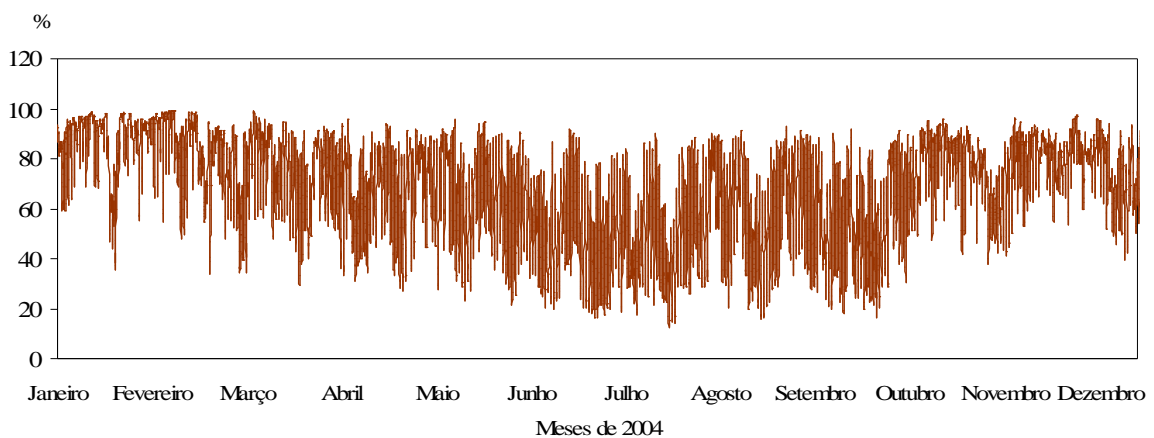


Figura 3.6 - Valores horários de humidade relativa do ar para o ano de 2004 (%).

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.

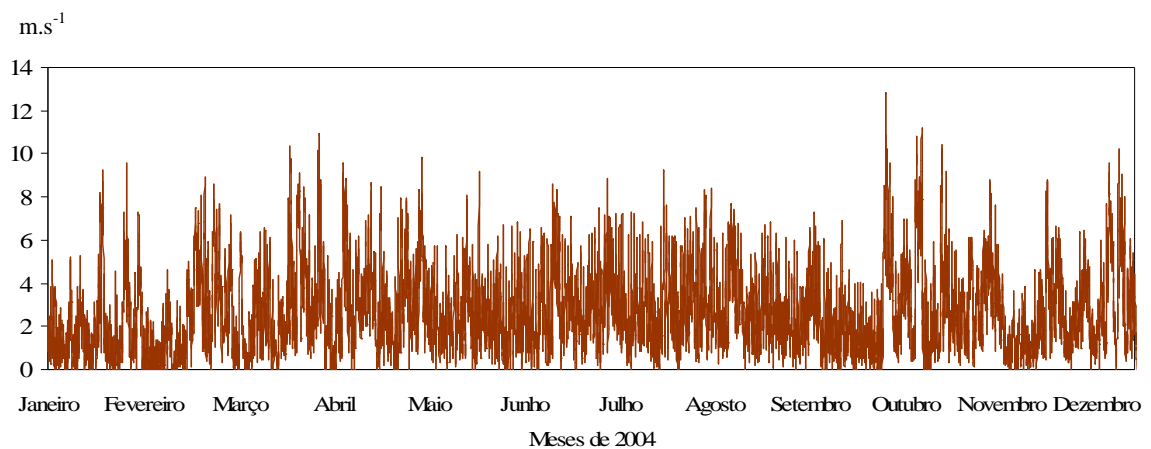


Figura 3.7 - Valores horários da velocidade do vento para o ano de 2004 ($m.s^{-1}$).

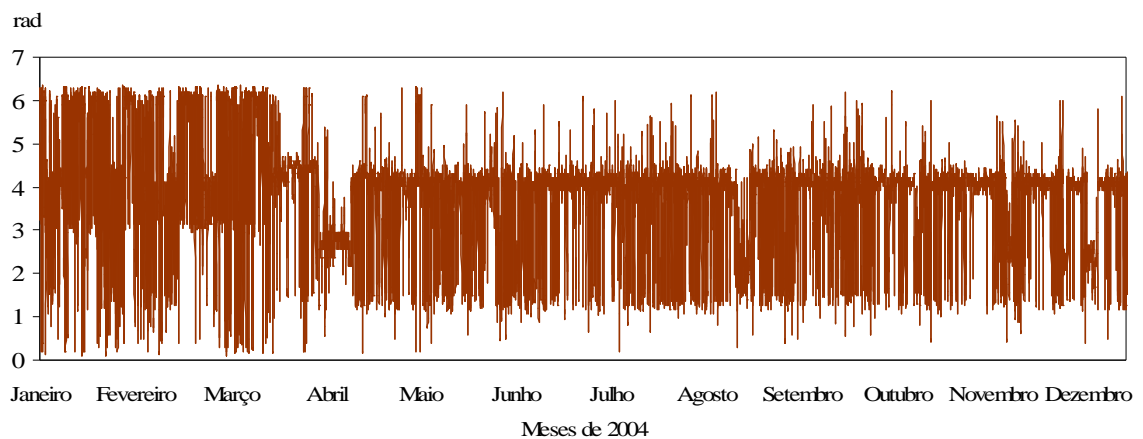


Figura 3.8 - Valores horários da direcção do vento para o ano de 2004 (rad).

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).

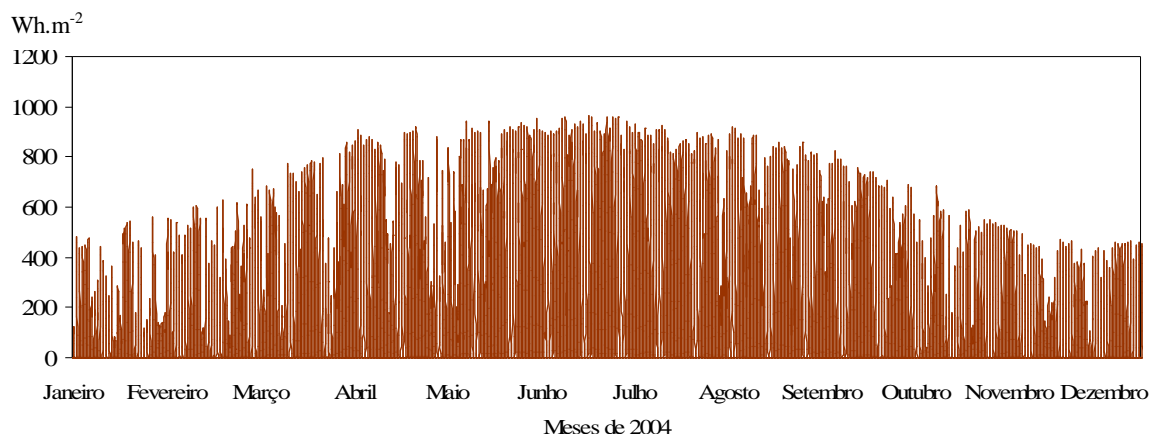


Figura 3.9 – Valores horários da radiação solar para o ano de 2004 (W.h.m⁻²).

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.

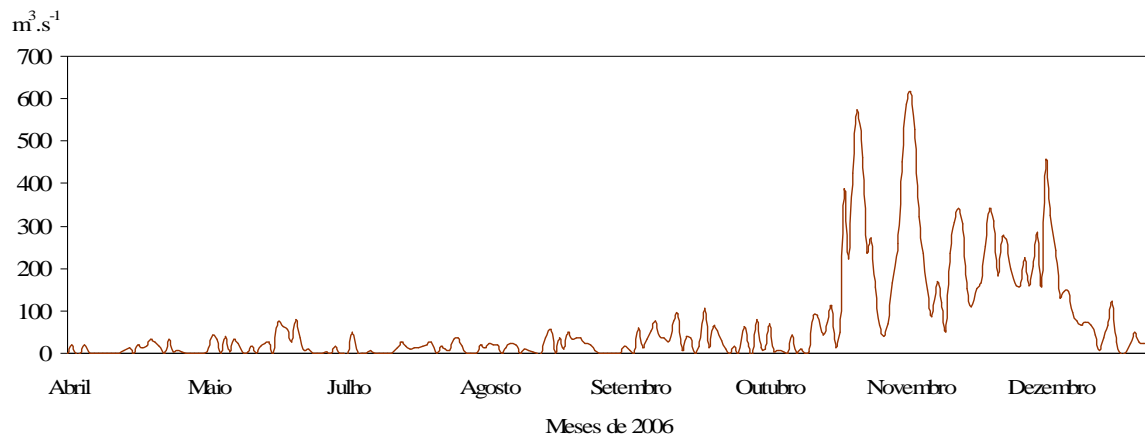


Figura 3.10 - Valores médios diários de caudal afluente para parte do ano de 2006 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

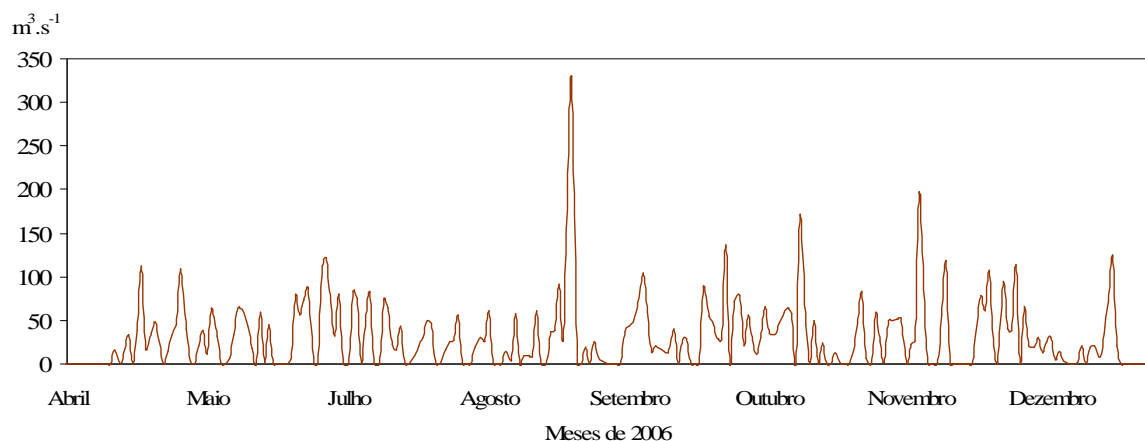


Figura 3.11 - Valores médios diários de caudal efluente para parte do ano de 2006 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

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).

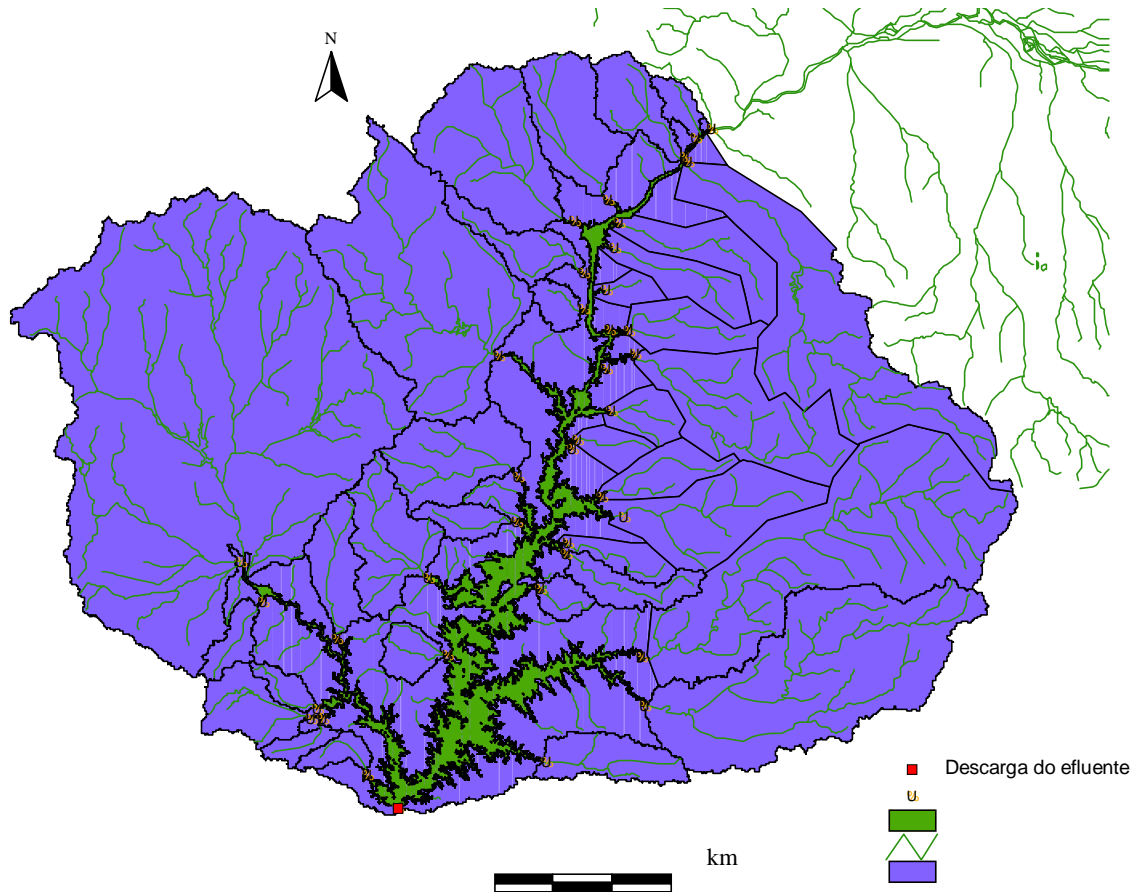


Figura 3.12 – Localização dos pontos de descarga do efluente e dos afluentes no modelo da albufeira de Alqueva.

3.2.3. Dados de qualidade da água

Os dados de qualidade estão divididos em quatro ficheiros de parâmetros forçadores:

- temperatura da água;
- nutrientes: azoto amoniacal ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitratos ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), nitritos ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) e fosfatos ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$);
- fitoplâncton: biomassa em unidades de carbono (C), azoto (N) e fósforo (P);
- matéria em suspensão: sólidos suspensos totais (SST), matéria orgânica particulada (POM), matéria detritica em unidades de carbono (C), azoto (N) e fósforo (P).

Os dados são introduzidos no modelo como séries temporais de valores diários, resultado de interpolação de dados mensais. Para os afluentes localizados a montante das estações de amostragem da EDIA (Figura 3.12), foram utilizados os valores correspondentes a essas mesmas estações, para

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).

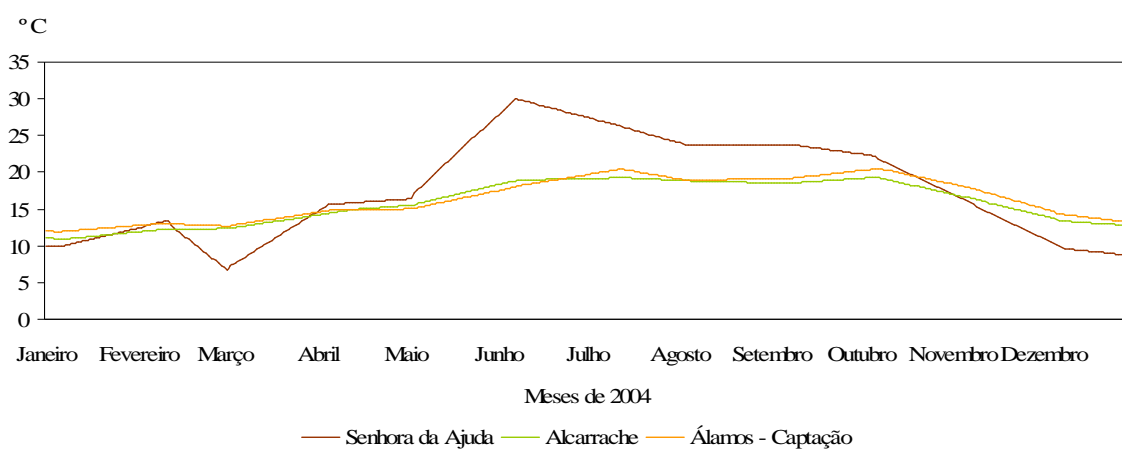


Figura 3.13 – Valores de temperatura da água observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 (°C).

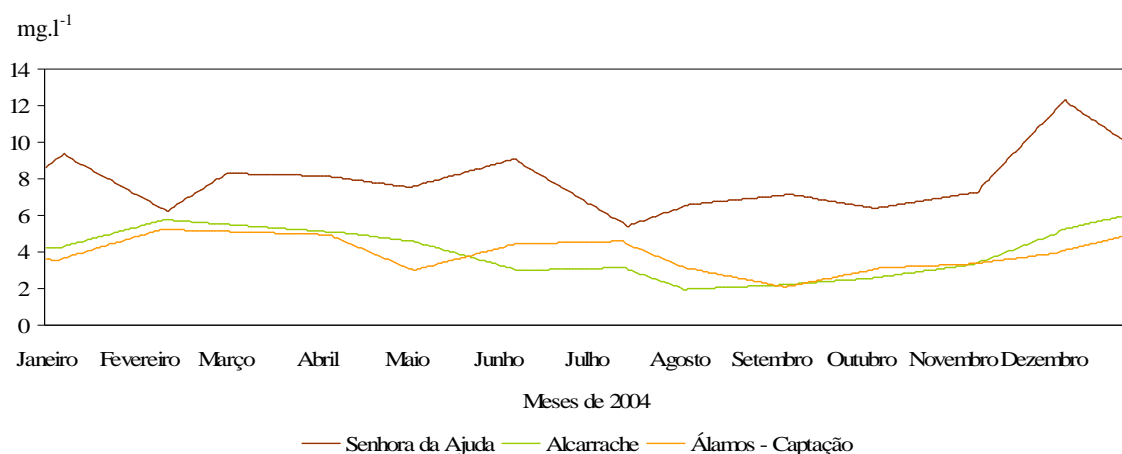


Figura 3.14 – Valores de oxigénio dissolvido observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 (mg.l⁻¹).

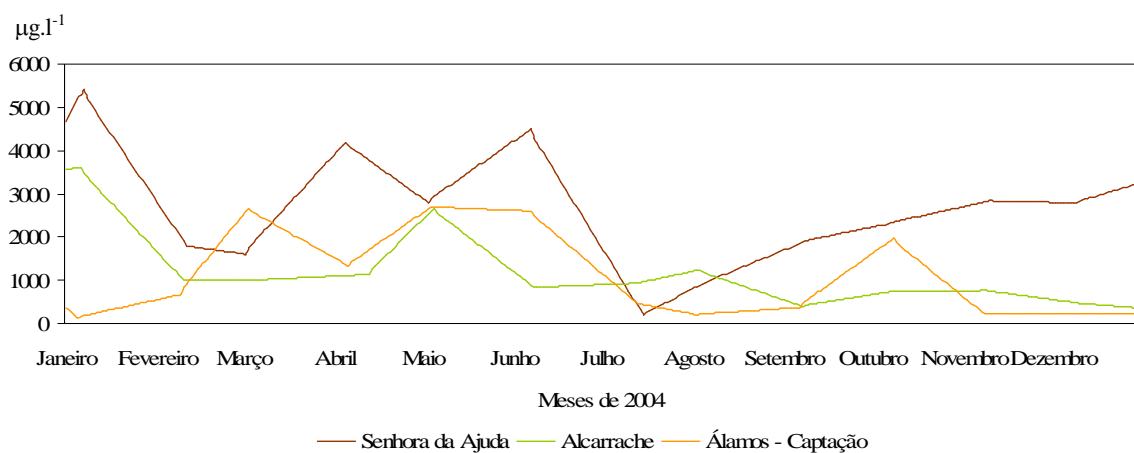


Figura 3.15 – Valores de nitratos observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 ($\mu\text{g.l}^{-1}$).

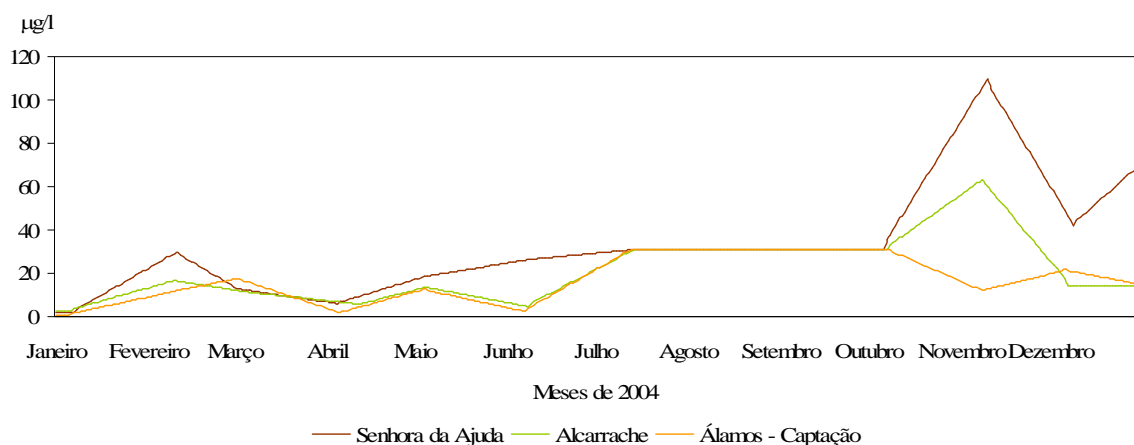


Figura 3.16 – Valores de nitritos observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 ($\mu\text{g.l}^{-1}$).

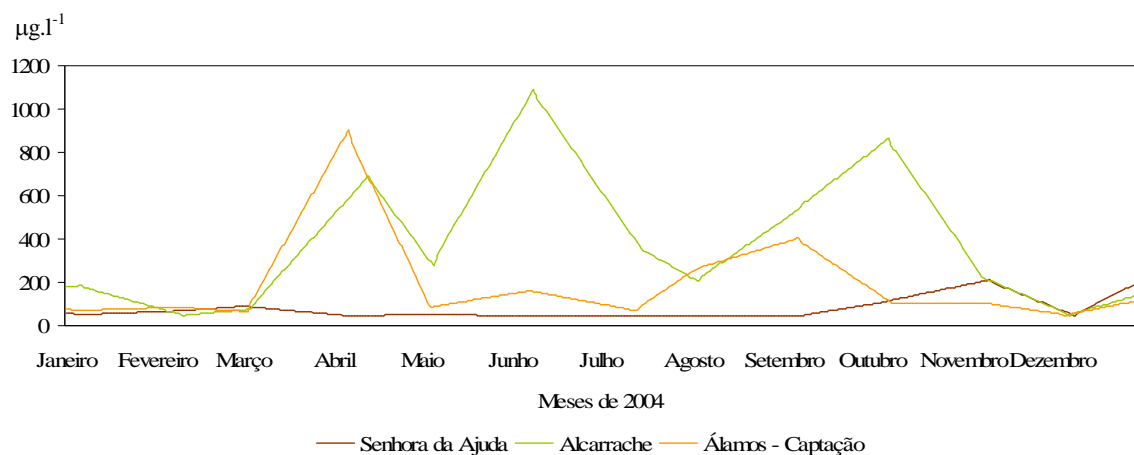


Figura 3.17 – Valores de azoto amoniacal observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 ($\mu\text{g.l}^{-1}$).

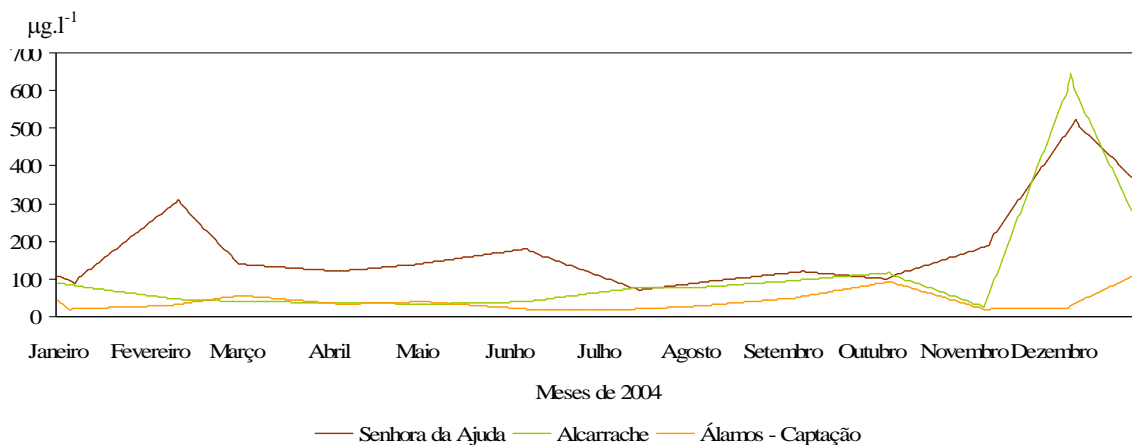


Figura 3.18 – Valores dos fosfatos observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 ($\mu\text{g.l}^{-1}$).

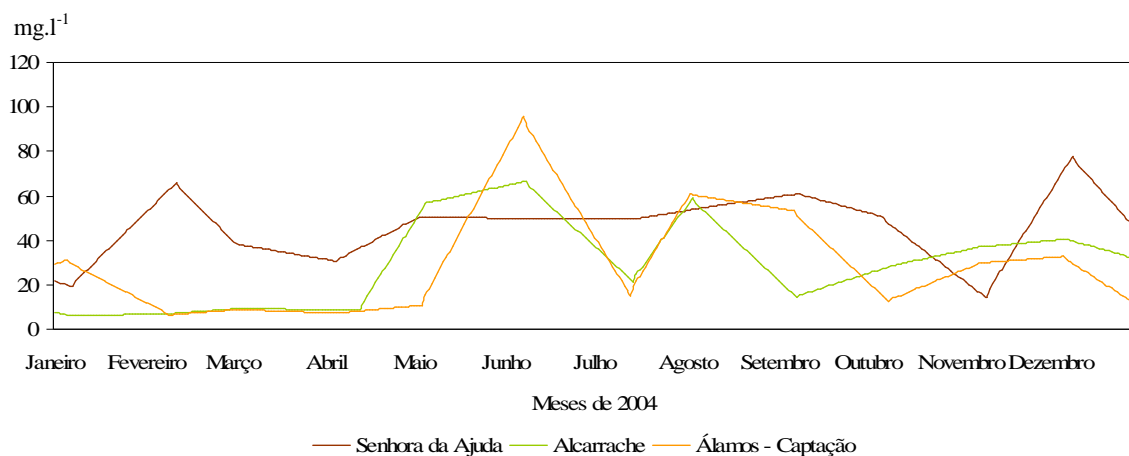


Figura 3.19 – Valores de sólidos suspensos totais observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 (mg.l^{-1}).

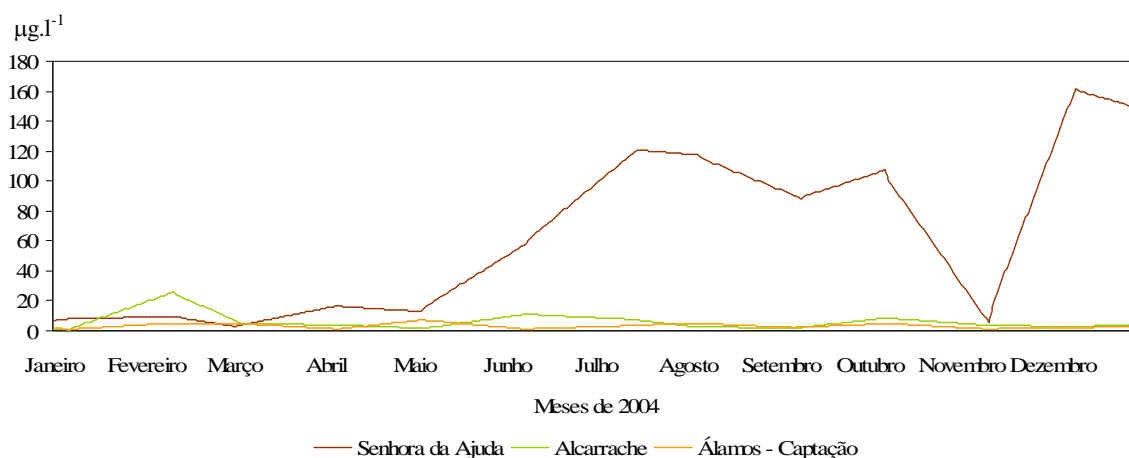


Figura 3.20 – Valores de clorofila *a* observados nos 3 locais de amostragem (cf. – Figura 3.3) ao longo do ano de 2004 ($\mu\text{g.l}^{-1}$).

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

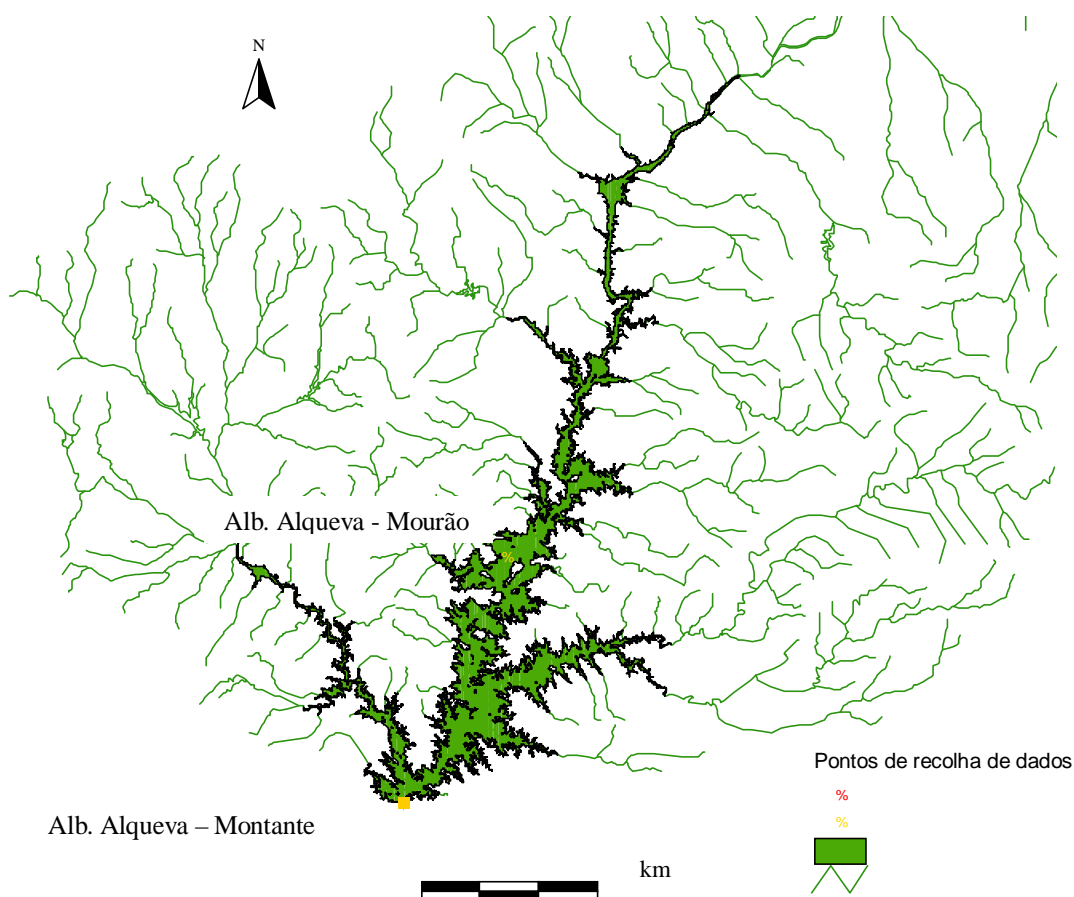


Figura 3.21 – Localização das estações meteorológicas automáticas SNIRH seleccionadas e dos locais de amostragem da EDIA.

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 homogéneos 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.
