

MODELAÇÃO DA HIDRODINÂMICA E DA DISPERSÃO LONGITUDINAL NO RIO MONDEGO

HYDRODYNAMICS AND LONGITUDINAL DISPERSION MODELLING IN THE RIVER MONDEGO

António A L. Sampaio Duarte ¹
Engenheiro Civil, Assistente

José L. Silva Pinho ¹
Engenheiro Civil, Assistente

Rui A. Rocha Boaventura ²
Engenheiro Químico, Investigador Principal

José M. Pereira Vieira ¹
Engenheiro Civil, Professor Catedrático

RESUMO

A selecção criteriosa de modelos matemáticos, a aplicar numa bacia específica, pode mitigar a incerteza na previsão de tempos de intervenção, aumentando a eficiência dos sistemas de protecção desses ecossistemas aquáticos. O presente trabalho teve como objectivos a determinação de parâmetros capazes de traduzir as características de dispersão num trecho do rio Mondego e a avaliação do desempenho de diferentes técnicas e métodos numéricos aplicados na modelação das características dispersivas deste rio. Para esse efeito realizaram-se três campanhas de amostragem, recorrendo-se à injeção de um marcador (rodamina WT), monitorizando-se a evolução da sua concentração em secções pré-definidas no trecho entre Caldas da Felgueira e a albufeira da barragem da Aguieira. Os resultados experimentais serviram de base à calibração de diferentes modelos de simulação e à validação do modelo com melhor ajuste aos dados experimentais (Duflow). Neste trecho obtiveram-se coeficientes de dispersão médios de $35 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ e $60 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, para caudais de $40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $140 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente. A percentagem de massa de rodamina recuperada nas várias estações variou entre 55 e 65%.

ABSTRACT

Judicious selection of mathematical models for application in a specific river basin management can mitigate prediction uncertainty. Therefore, intervention times will be established with better reliability and alarm systems could efficiently protect the aquatic ecosystems. Parameters estimation for the *in situ* dispersion river water behaviour characterisation and performance evaluation of different numerical techniques when applied to river water dispersion modelling were the main purposes of this research work. A monitoring program was carried out using tracer injection (rhodamine WT) to assess the environmental impact of Urgeiriça mining waters in a Mondego river reach, between Caldas da Felgueira and Aguieira reservoir. This paper describes the methodology used in the tracer experiments, the results of different simulation models and the performance of two different numerical methods. For flow discharge values of $40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ and $140 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, longitudinal dispersion coefficients average values are $35 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ and $60 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. The recovered rhodamine mass ranges from 55 to 65% of the total injected mass, at all sampling sites.

Palavras-chave: dispersão longitudinal, impacto ambiental, modelação matemática, qualidade da água, rodamina WT, rio Mondego.

¹ - Dep. de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga

² - Dep. de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

1. INTRODUÇÃO

O estudo da hidrodinâmica e dispersão de descargas poluentes em sistemas fluviais assume particular relevância na gestão integrada da água numa bacia hidrográfica, tendo em consideração os usos aí existentes.

O presente trabalho teve como objectivo a determinação das condições de escoamento e dispersão num trecho do rio Mondego, entre Caldas da Felgueira e a albufeira da barragem da Aguieira. O interesse do estudo resulta do impacto da escorrência de águas provenientes das minas de urânio da Urgeiriça para a ribeira das Caldas (ou da Pantanha), na qualidade da água do rio Mondego, nomeadamente na captação de água para abastecimento a Carregal do Sal, situada em Seara, cerca de 13 km a jusante da ponte das Caldas da Felgueira (Figura 1).

Atendendo à influência das condições hidrodinâmicas nas características dispersivas do meio hídrico, foram realizadas três campanhas de amostragem, correspondentes a caudais de cheia ($100-144 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), de estiagem ($0,65-0,75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e intermédios ($28-40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Esta última campanha serviu de base à calibração de modelos matemáticos unidimensionais, baseados no método das diferenças finitas, mas com diferentes técnicas numéricas de discretização da equação de transporte. O modelo com melhor ajuste aos dados experimentais foi então validado para a série de dados obtida em condições de cheia.

O conhecimento dos parâmetros capazes de traduzir as características de transporte e dispersão de poluentes neste trecho é indispensável para a previsão da evolução das respectivas concentrações a jusante. Neste contexto, a modelação matemática constitui uma ferramenta útil na definição de sistemas de alerta e na protecção eficaz dos vários utilizadores deste sistema fluvial.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Mondego localiza-se na região centro de Portugal, apresenta uma orientação nordeste/sudoeste e drena uma área com cerca de 6670 km^2 . Confronta a norte com a bacia do rio Vouga, a sul com as bacias dos rios Tejo e Lis e a leste com a bacia do rio Douro.

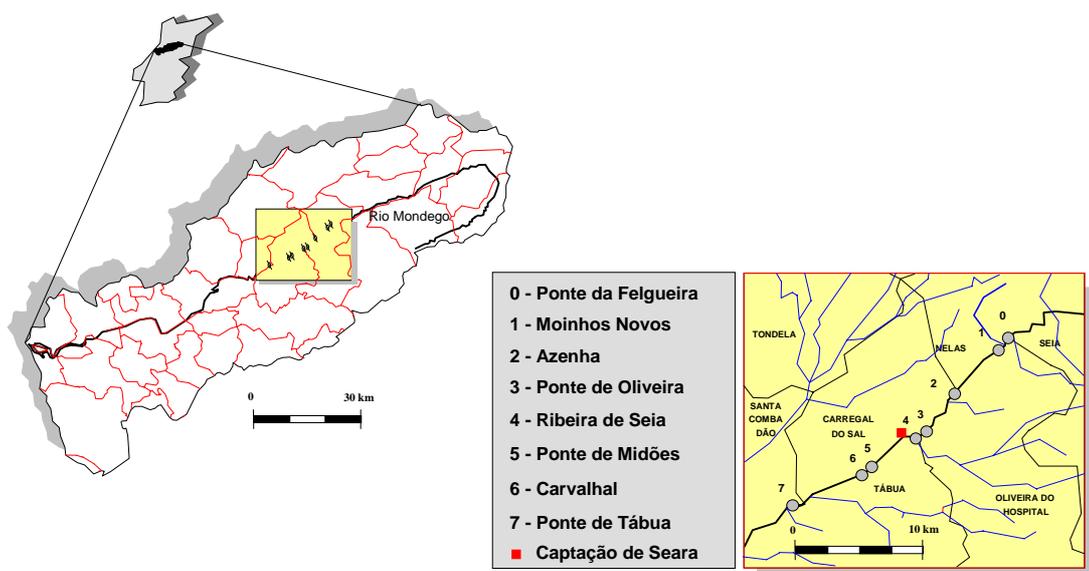


Figura 1 - Bacia hidrográfica do rio Mondego e localização do trecho modelado

O trecho estudado tem uma extensão de 24 km, localizando-se na parte central desta bacia hidrográfica, onde a precipitação média anual varia entre 1000 e 1200 mm. Apresenta como principais afluentes, além da citada ribeira das Caldas (margem direita), o rio Seia e a ribeira da Fragosa (margem esquerda). Confronta com os concelhos de Nelas, Carregal do Sal, Santa Comba Dão (norte), Seia, Oliveira do Hospital e Tábua (sul). A inclinação média do talvegue é de aproximadamente 0,9 ‰.

Na monitorização efectuada foram definidas sete estações de amostragem, sendo a estação 0 o local de injeção de corante mais a montante, na ponte das Caldas da Felgueira, onde se localiza o único posto hidrométrico existente no trecho estudado. Mais a jusante, na barragem da Aguieira, existe outro posto hidrométrico, que registou as cotas da água na albufeira durante as campanhas.

3. METODOLOGIA ADOPTADA

O tempo de residência médio e o coeficiente de dispersão longitudinal entre pontos de amostragem foram determinados através das curvas de resposta à injeção de um corante em secções pré-definidas (Hubbard et al., 1982), em que as condições de mistura fossem favoráveis a uma rápida homogeneização das concentrações nas secções transversais.

O corante utilizado como marcador foi a *rodamina WT*, numa solução a 20%, recomendado pelas suas características: não tóxico, não reactivo, solúvel e detectável em concentrações muito baixas. Para medição das concentrações foi utilizado um fluorómetro “Turner Designs”, tendo-se recolhido amostras “brancas” para determinação da fluorescência natural do rio.

As estações de amostragem foram seleccionadas atendendo aos objectivos do estudo, à acessibilidade dos locais (pontes), às características físicas do curso de água (geometria, presença de afluentes, condições de mistura), à existência de estruturas de retenção (açudes e barragens) e aos meios logísticos e recursos humanos disponíveis (Duarte, 1997).

Na Tabela 1 encontra-se uma síntese da informação referente às várias injeções de rodamina efectuadas no decurso das três campanhas de amostragem executadas no âmbito deste estudo.

Tabela 1 – Síntese da informação referente às injeções de rodamina WT

Injecção	Data	Hora	Local	Caudal (m ³ /s)	Massa Rodamina (g)
1	89-12-09	8:20	Estação 0	140	100
2	89-12-09	15:40	Estação 3	144	200
3	89-12-10	8:00	Estação 0	100	200
4	89-12-10	8:30	Estação 5	110	400
1	90-06-15	7:32	Estação 0	0.74	400
2	90-06-15	8:30	Estação 3	0.74	200
1	90-11-09	7:40	Estação 0	40	400
2	89-11-10	8:00	Estação 3	29	400

Na Figura 2 apresenta-se uma sequência fotográfica com a evolução da dispersão da nuvem de rodamina referente à 1ª injeção da campanha realizada em Novembro de 1990.

A frequência de amostragem em cada estação foi estabelecida em função do tempo de passagem previsto para a nuvem de corante: 3 a 5 minutos nas estações mais próximas do local de injeção e 10 a 30 minutos nas estações mais afastadas.



Figura 2 –Evolução da dispersão da nuvem de rodamina, após injeção na Estação 0

Face à inexistência de dados batimétricos actualizados, procedeu-se ao levantamento expedito das secções transversais nas estações de amostragem 2, 5 e 7, de modo a validar os resultados obtidos para as velocidades médias (Figura 3). Estes dados foram utilizados na modelação para se definirem as características geométricas médias das secções nos vários sub-trechos.

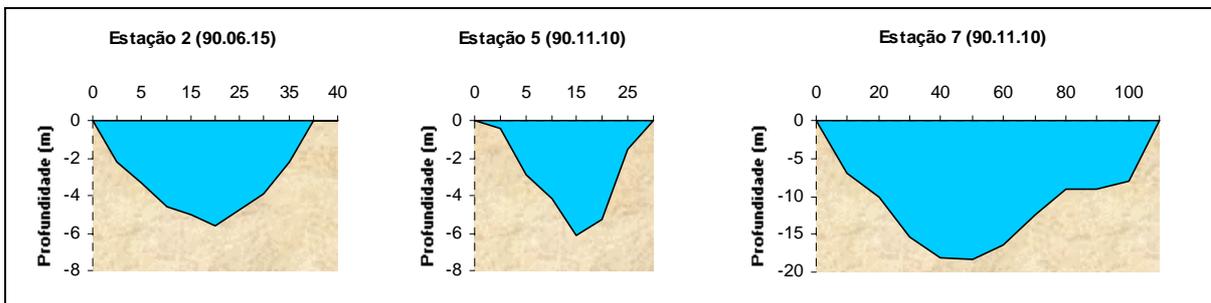


Figura 3 – Secções transversais do rio Mondego (estações de amostragem 2, 5 e 7)

Os caudais considerados nos cálculos resultaram da informação proveniente dos registos no posto hidrométrico de Nelas, representados graficamente na Figura 4.

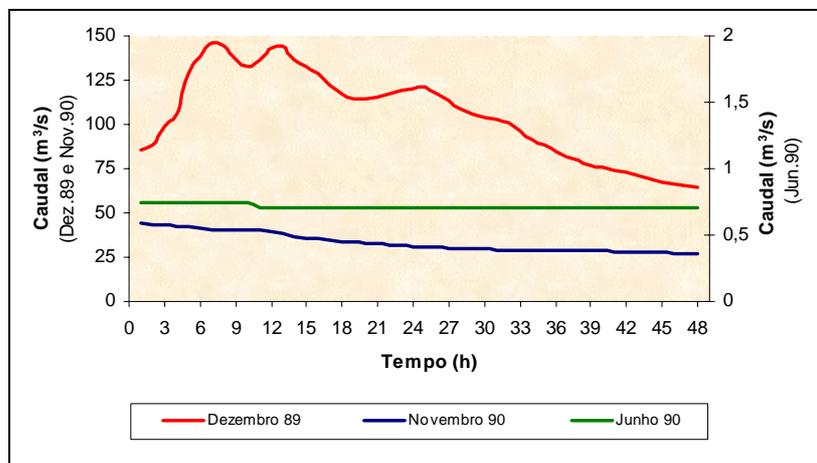


Figura 4 – Caudais horários registados no posto hidrométrico de Nelas

O regime hidrodinâmico deste trecho do rio Mondego é influenciado quer pela cota da água na albufeira da Aguieira, quer pelas cotas de coroamento das catorze estruturas de retenção (açudes) consideradas neste estudo, tendo resultado o perfil longitudinal que se apresenta na Figura 5. Não foram incluídos outros (quatro) existentes, pela sua proximidade a açudes com desnível topográfico mais significativo.

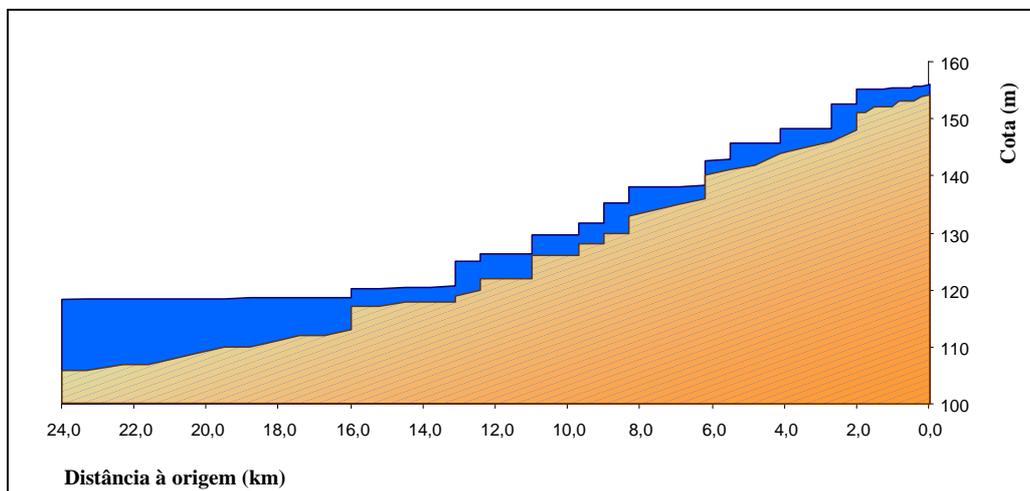


Figura 5 – Perfil longitudinal

As velocidades médias nos vários sub-trechos foram calculadas com base nos tempos de residência médios e nas distâncias entre estações (Tabela 2).

Tabela 2 – Distância entre locais de injeção e estações de amostragem

Estações de Amostragem	Distância aos locais de injeção		
	Estação 0	Estação 3	Estação 5
1	1.250	—	—
2	6.200	—	—
3	11.000	—	—
4	11.650	650	—
5	16.700	5.700	—
6	17.400	6.400	700
7	24.000	13.000	7.300

Os valores experimentais dos coeficientes de dispersão longitudinal e das velocidades médias foram calculados a partir das curvas-resposta (concentração/tempo) obtidas entre estações consecutivas, seguindo a metodologia indicada por Chapra (1997).

A massa de corante que atravessa cada uma das secções de amostragem permite avaliar a importância relativa dos processos físicos e bioquímicos que ocorrem ao longo do trecho, através da quantificação das perdas por precipitação, adsorção, retenção e assimilação.

4. MODELAÇÃO MATEMÁTICA

Os valores médios do caudal e a massa de rodamina WT injectada (quase instantaneamente) constituem as condições de fronteira de montante dos modelos. Sendo o escoamento neste trecho fluvial condicionado pela cota da água na albufeira da barragem da Aguieira, o seu valor constitui a condição fronteira de jusante.

4.1 Solução analítica

A concentração de uma substância num sistema, em função do tempo e do espaço (na direcção do escoamento), considerando a descarga duma substância conservativa à entrada do sistema ($x=0$), é traduzida pela equação de advecção-difusão na forma unidimensional (Eq. 1),

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

onde:

C	concentração do constituinte;	[ML ⁻³]
t	tempo;	[T]
U	velocidade média na secção transversal;	[LT ⁻¹]
x	coordenada na direcção do escoamento;	[L]
D	coeficiente de dispersão;	[L ² T ⁻¹]

A solução analítica desta equação foi determinada utilizando os valores experimentais da velocidade média e do coeficiente de dispersão longitudinal referentes a cada sub-trecho, tendo em vista a sua comparação com as soluções numéricas fornecidas pelos modelos matemáticos utilizados.

4.2 Modelo DUFLOW

O modelo DUFLOW (ICIM, 1992) foi desenvolvido com o objectivo de dar resposta a uma grande variedade de aplicações, atendendo às suas capacidades de modelar, em simultâneo, quantidade e qualidade da água. Podem ser introduzidos no sistema a modelar vários tipos de estruturas hidráulicas, tais como descarregadores, galerias, sifões e estações de bombagem

A componente hidrodinâmica do modelo baseia-se em equações diferenciais de derivadas parciais que traduzem a formulação matemática das leis de conservação de massa e de quantidade de movimento, na forma unidimensional, permitindo descrever o escoamento com superfície livre em regime variado. A componente relativa à qualidade é baseada numa forma mais geral da Eq. 1, pois permite a quantificação dum termo “produção” (P), que inclui todos os processos físicos, químicos e biológicos a que esse constituinte está sujeito. A descrição dos processos pode ser alterada pelo modelador, possibilitando a formulação de diferentes cinéticas para os processos determinantes da qualidade da água. Para resolução destas equações este modelo utiliza o método das diferenças finitas (MDF), sendo a discretização temporal e espacial efectuada através do esquema de Preissmann ou dos quatro pontos.

Nesta aplicação concreta, o esquema conceptual é constituído por cinquenta e oito nós, quarenta e três trechos e catorze açudes. Esta segmentação teve em consideração a localização dos pontos de amostragem e das estruturas de retenção, bem como as características geométricas do rio e a cinética do processo, tendo esta determinado uma redução do comprimento dos trechos iniciais consentânea com o intervalo de amostragem adoptado em cada estação (Vieira et al., 1998).

Considerou-se a rodamina como uma substância conservativa, pelo facto de os dados experimentais revelarem que, após a primeira estação, a massa de corante recuperada permanece praticamente constante, ou seja, que nesses trechos as perdas de corante por adsorção, precipitação, retenção e outros processos físico-químicos são desprezáveis. Daí que, na modelação, se tenha considerado a injeção duma *massa útil*, correspondente à percentagem média de massa de rodamina recuperada nas várias estações de amostragem.

4.3 Modelo ADZ (Aggregated Dead Zones)

O modelo ADZ (Lees and Camacho, 1998) é uma técnica recente de modelação dos escoamentos com dispersão, simulando os tempos de percurso da nuvem de determinada substância e a evolução das respectivas concentrações. A simulação do transporte e dispersão duma substância conservativa num trecho fluvial pode ser efectuada através dum método simples (ADZTOOL), que utiliza os dados (concentração/tempo) observados em duas estações consecutivas para estimar parâmetros característicos do fenómeno de dispersão longitudinal (Wallis et al., 1989).

Esta metodologia determinística apresenta algumas limitações: não inclui qualquer tipo de optimização; a discretização temporal das equações diferenciais que traduzem o fenómeno (de primeira ordem) conduz apenas a uma solução aproximada; a estimação de parâmetros – tempo de chegada (τ_i), localização do centróide (t_i), tempo médio de percurso (\bar{t}_i), atraso (τ_i) e o tempo de residência – é feita apenas com base nos dados experimentais fornecidos (sujeitos a vários tipos de erros), já que este método não tem nenhum modelo hidrodinâmica associado.

Depois de estimar esses parâmetros, o modelo ADZ permite, prever as concentrações duma substância conservativa através da equação

$$C_k = -a C_{k-1} + b_0 C_{0, k-\delta} \quad (2)$$

onde,

C_k	concentração a jusante no instante (k)	[ML ⁻³]
C_{k-1}	concentração a jusante no instante anterior (k-1)	[ML ⁻³]
$C_{0, k-\delta}$	concentração a montante no instante (k- δ)	[ML ⁻³]
δ	tempo de atraso devido à advecção	[T]
a, b_0	coeficientes da função de transferência (discretização de 1ª ordem): $a = -\exp(-\Delta t/T)$ e $b_0 = 1+a$.	

4.4 Modelo ConvDiffFEM

Este modelo permite a resolução das equações diferenciais que regem os fenómenos de convecção-difusão, definidas as condições iniciais e de fronteira associadas, tendo sido desenvolvido no sistema DIFFPACK resultante duma técnica de programação orientada por objectivos (Langtanden, 1995). A principal aplicação deste programa é a de fornecer uma solução rápida para os problemas de dispersão baseada no método dos elementos finitos (MEF), supondo o caudal e a secção molhada constantes.

As condições fronteira podem ser de três tipos: condições essenciais (a concentração C é conhecida); condições de Neumann; e condições de Robin. A discretização espacial é efectuada através duma formulação fraca do problema. A discretização temporal baseia-se no designado “esquema-teta”, em que o valor da variável da equação $d\psi/dt=g$, no instante r , pode ser obtido de forma aproximada através da seguinte expressão,

$$\frac{\psi^r - \psi^{r-1}}{\Delta t} = \theta g^r + (1-\theta)g^{r-1} \quad (3)$$

5. RESULTADOS

5.1 Resultados experimentais

Os valores da concentração de rodamina WT obtidos nas amostras recolhidas nas várias estações de amostragem, para as campanhas de Dezembro de 1989 e de Novembro de 1990, estão representados graficamente nas Figuras 6 e 7.

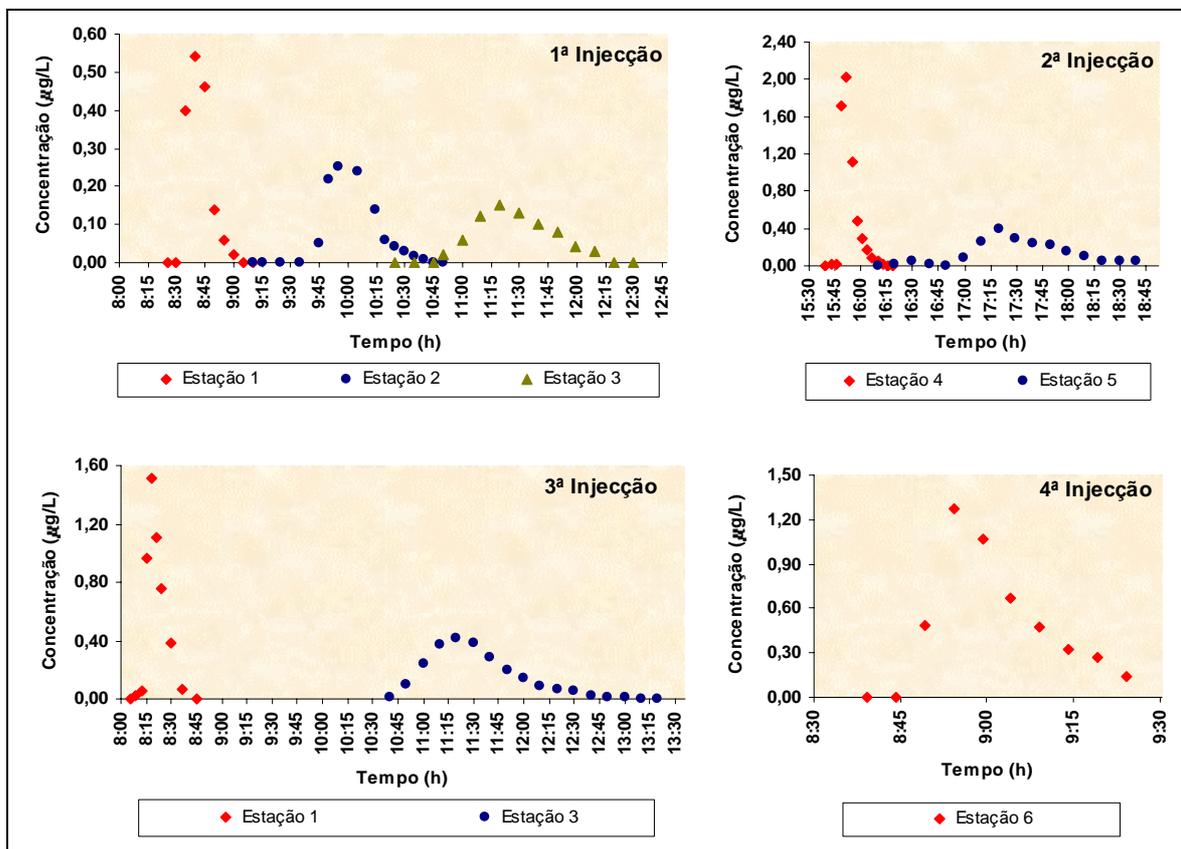


Figura 6 – Resultados experimentais obtidos na 1ª campanha de amostragem

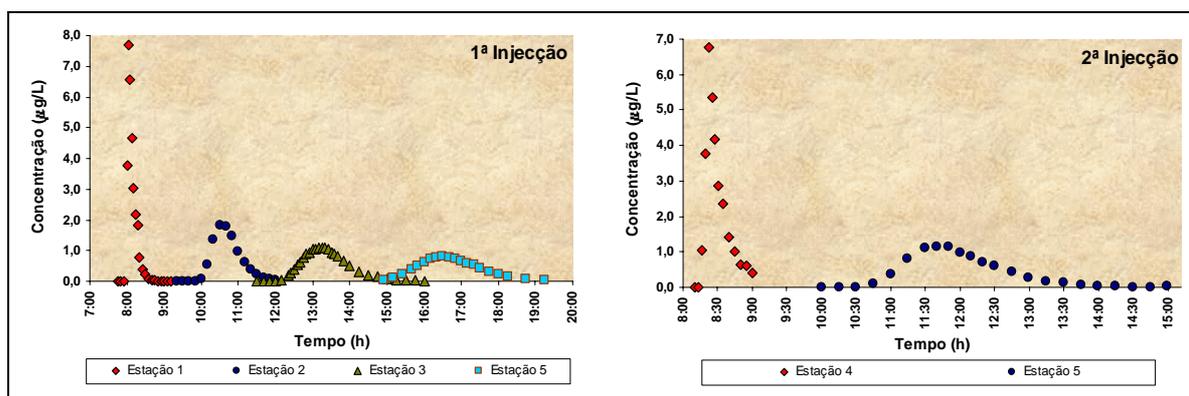


Figura 7 – Resultados experimentais obtidos na 3ª campanha de amostragem

A partir destas curvas foi possível determinar alguns parâmetros fundamentais na avaliação das características dispersivas do sistema fluvial em estudo. Apresenta-se mais tarde (Tabela 3) os coeficientes de dispersão longitudinal calculados através da aplicação da solução analítica da equação de transporte, correspondente a uma distribuição *normal* das concentrações (Thomann e Mueller, 1987).

5.2 Calibração dos modelos baseados no método das diferenças finitas

Os modelos DUFLOW and ADZTOOL foram calibrados para a série de dados referentes à 1ª injeção da 3ª campanha de amostragem por corresponder a uma gama de caudais frequentes neste trecho do rio Mondego e ao trecho monitorizado mais extenso após uma mesma injeção. No caso do modelo DUFLOW, houve necessidade de calibrar a sua componente hidrodinâmica ajustando as leis de vazão dos vários açudes, os valores da rugosidade de cada trecho, os coeficientes de dispersão longitudinal e adoptando áreas das secções transversais compatíveis com os levantamentos efectuados durante as campanhas. Dado que o escoamento é controlado pelo conjunto das várias estruturas de retenção existentes, as leis de vazão adoptadas influenciam significativamente o regime hidráulico, ao contrário dos valores considerados para a rugosidade dos vários trechos (Vieira et al., 1997). Os resultados obtidos foram ainda comparados com os resultantes da referida aplicação da solução analítica, como se mostra na Figura 8.

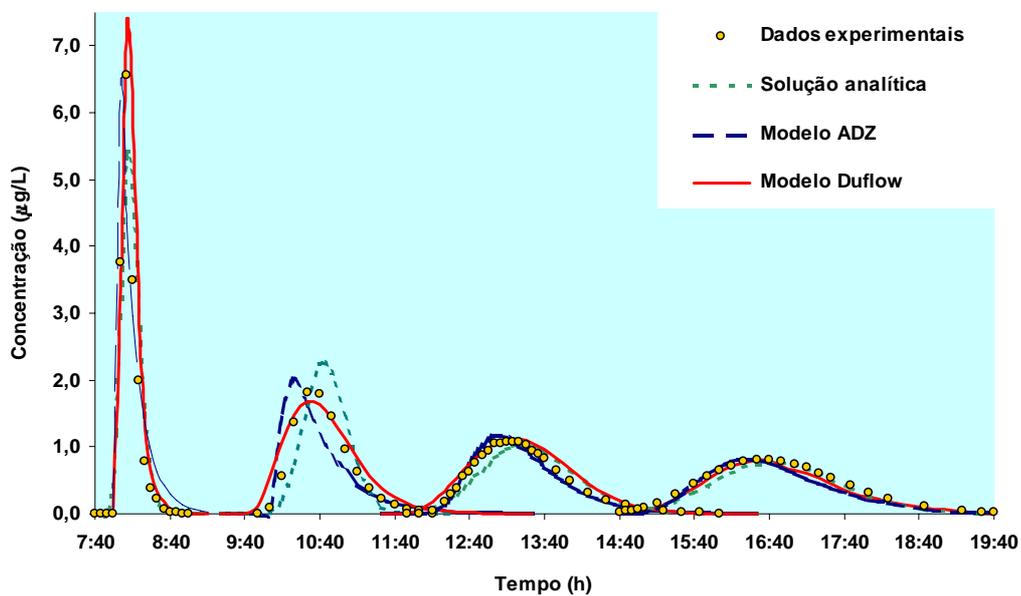


Figura 8 – Calibração dos modelos

Os modelos apresentam um bom ajuste com os dados observados, sendo perceptível o melhor desempenho do modelo DUFLOW. Esta constatação pode ser sustentada pelos valores do coeficiente de correlação (relativamente aos valores experimentais) calculados para os três modelos utilizados (Figura 9).

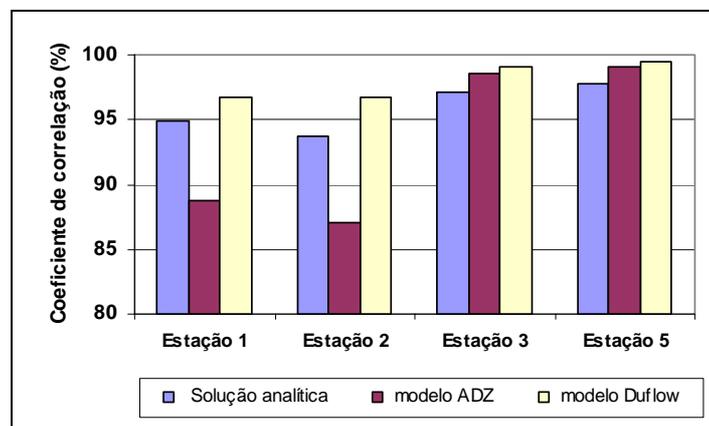


Figura 9 - Comparação do ajuste dos resultados dos modelos com os dados experimentais

5.3 Comparação de modelos baseados em diferentes métodos numéricos (MDF and MEF)

No sentido de avaliar o desempenho relativo de dois métodos numéricos distintos (MDF and MEF) aplicou-se o modelo DUFLOW e o modelo ConvDiffFEM a um sistema simplificado constituído por canal com a mesma extensão do trecho monitorizado e com propriedades geométricas e caudal constantes. Os resultados obtidos mostram uma boa aproximação dos dois métodos como se comprova pelos coeficientes de correlação calculados (Figura 10).

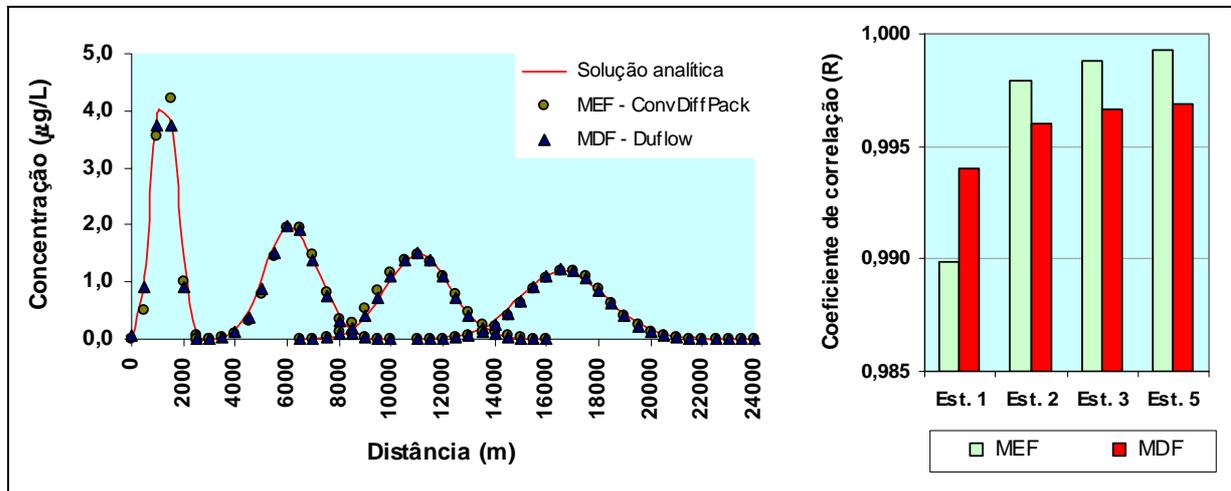


Figura 10 – Comparação dos modelos DUFLOW e ConvDiffFEM com a solução analítica

Face ao menor tempo de computação requerido pelo modelo Duflow e ao facto de resolver em simultâneo as equações relativas às suas duas componentes (hidrodinâmica e qualidade), a aplicação deste modelo revelou-se a mais adequada à resolução de problemas de transporte e dispersão longitudinal neste sistema fluvial.

5.4 Validação do modelo DUFLOW

O modelo DUFLOW foi validado para outra série de dados experimentais, obtida em condições hidrodinâmicas e massa injectada de corante completamente distintas (1ª injeção da campanha de Dezembro-89), tendo-se verificado um bom ajuste, como se pode constatar na Figura 11. Neste caso, a variação das características hidrodinâmicas do rio implicou a alteração dos coeficientes de dispersão longitudinal adoptados na calibração (Tabela 3).

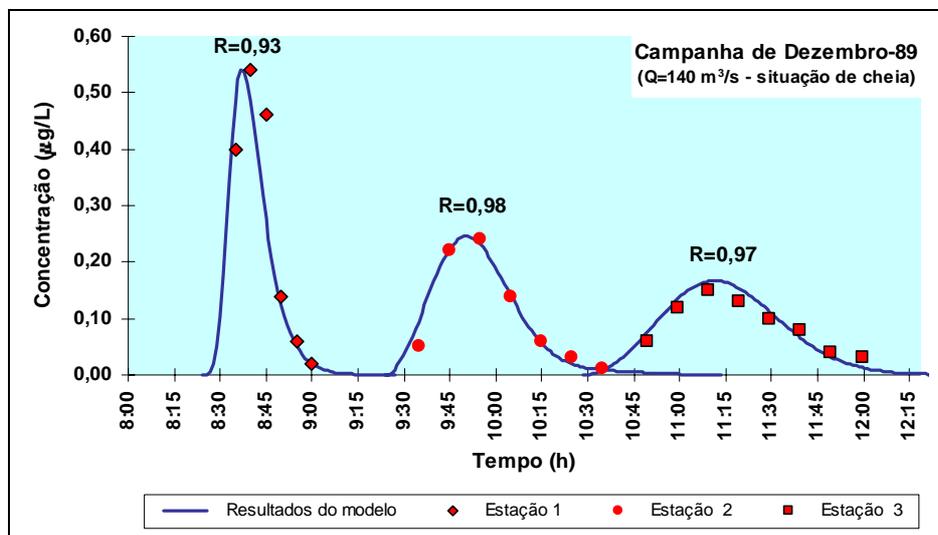


Figura 11 – Validação do modelo Duflow

5.5 Discussão de resultados

Dos resultados experimentais deste estudo constata-se que até à primeira estação há uma *perda* de cerca de 40% da massa de rodamina injectada, que poderá ser explicada por fenómenos físico-químicos de adsorção, precipitação e retenção, aliada à irregularidade do canal. O facto de a massa *útil* recuperada nas estações a jusante se manter praticamente constante (Tabela 3), pode ser explicada pela não reactividade do corante e pelo facto de as perdas serem função da respectiva concentração, a qual, naquele trecho inicial, é muito superior às dos restantes trechos.

As características de dispersão de um rio podem ser avaliadas (Hubbard et al., 1982) de um modo prático através da diminuição da concentração do pico em função do deslocamento da nuvem de corante e do respectivo tempo de passagem numa determinada secção a jusante da injeção. Verifica-se que após a mistura inicial do corante com a água do rio, a concentração do pico (C_p), dividida pela massa total de rodamina injectada, varia na razão inversa de uma potência do respectivo tempo de passagem, em que o expoente é uma constante que depende das características do rio (Figura 12).

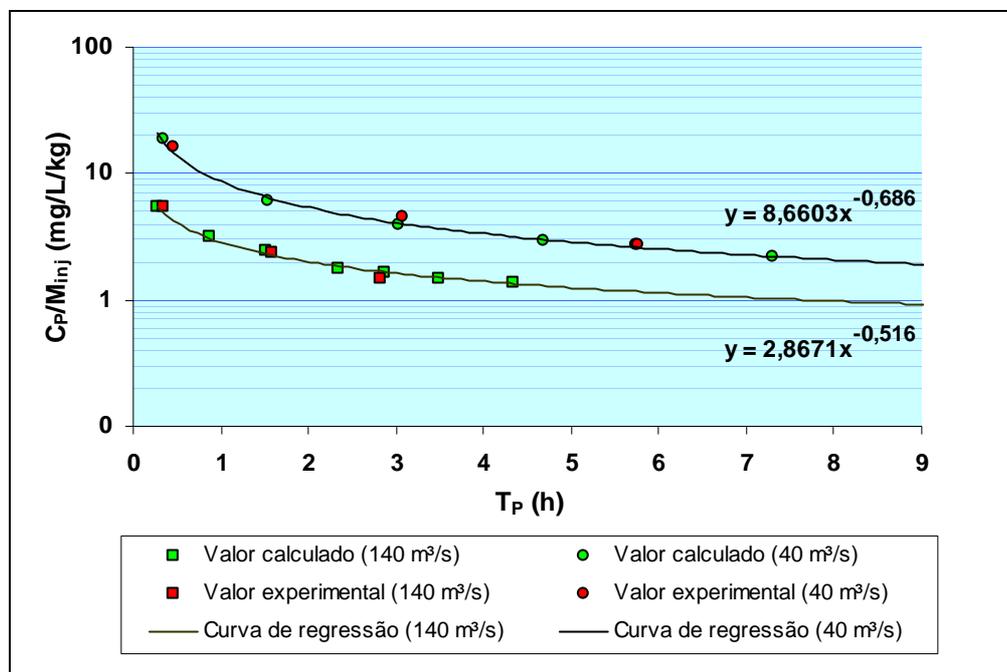


Figura 12 –Concentração do pico de corante em função do respectivo tempo de passagem.

Os valores deste expoente obtidos com base nos resultados do modelo (0,52 e 0,69) situam-se na gama de valores indicados em estudos semelhantes (Nordin e Sabol, 1974).

No caso de substâncias não conservativas as concentrações dos picos serão inferiores às que se podem obter a partir das curvas de regressão estabelecidas para as duas situações de caudal analisadas. Ou seja, as previsões de concentração efectuadas com base neste estudo correspondem ao cenário mais gravoso em termos de qualidade da água.

Da análise comparativa entre os resultados dos modelos e os calculados a partir dos valores observados nas campanhas (Tabela 3), verifica-se uma ligeira variação nos coeficientes de dispersão longitudinal, pelo que se procedeu a uma análise de sensibilidade do modelo a este parâmetro. Constatou-se que variações da ordem de grandeza das diferenças observadas, não originam alterações significativas nos valores da concentração e dos respectivos tempos de passagem. Assim, pode-se estabelecer para este trecho coeficientes de dispersão longitudinal médios de 35 e 60 m²/s para gamas de caudais de 40 e 140 m³/s, respectivamente.

Tabela 3 – Síntese e comparação de resultados

CAMPANHA	TRECHO	VELOCIDADE MÉDIA (ms ⁻¹)			TEMPO DE PERCURSO (h)			COEFICIENTE DE DISPERSÃO (m ² s ⁻¹)			MASSA ÚTIL (%)
		EXPER.	ADZ	DUFLOW	EXPER.	ADZ	DUFLOW	EXPER.	ADZ	DUFLOW	
3^a (Nov.º 90)	E1 – E2	0.526	0.548	Var.	2:37	2:31	2:35	14	43	10	57
	E2 – E3	0.497	0.502	Var.	2:41	2:39	2:41	51	25	45	56
	E3 – E5	0.473	0.473	Var.	3:21	3:28	3:19	37	36	35	55
	E1 – E3	0.511	0.524	Var.	5:18	5:10	5:16	34	33	-	-
	E1 – E5	0.497	0.504	Var.	8:38	8:38	8:35	35	35	-	-
1^a (Dez.º 89)	E1 – E2	1.105	1.114	Var.	1:14	1:14	1:14	52	59	40	62
	E2 – E3	0.949	0.954	Var.	1:24	1:24	1:24	61	61	70	62
	E1 – E3	1.023	1.030	Var.	2:38	2:38	2:38	58	61	-	-

6. CONCLUSÕES

Pela capacidade demonstrada em prever, com suficiente acuidade, a evolução real da concentração de uma substância conservativa em diferentes situações de regime hidrodinâmico, em especial o amortecimento e o atraso verificados na concentração de eventuais descargas poluentes, os modelos matemáticos unidimensionais podem constituir uma importante ferramenta na definição de sistemas de alerta e como suporte à decisão na gestão integrada desta bacia hidrográfica.

A selecção dos modelos matemáticos a aplicar deverá atender ao objectivo do estudo e à natureza dos problemas em análise. A solução analítica revela-se adequada à previsão das concentrações máximas e do respectivo tempo de ocorrência, desde que se conheça, com suficiente confiança, o valor do coeficiente de dispersão longitudinal associado a um dado regime hidrodinâmico. A aplicação do modelo ADZ carece da disponibilidade de dados experimentais, para a estimação de parâmetros necessários à simulação de novos cenários. Quando se pretende uma descrição mais real da evolução espaço-temporal das concentrações, especialmente no que se refere ao tempo de chegada da nuvem, o modelo Duflow apresenta maiores capacidades pelo facto de incluir um módulo hidrodinâmico, que permite simular com alguma rigor o regime variado do sistema real. O recurso a modelos baseados noutros métodos numéricos, que requerem maior tempo de computação, não parece justificar-se neste tipo de problemas, face ao desempenho evidenciado por esse modelo.

Em estudos semelhantes, a quantidade de massa de corante a injectar deverá ser calculada tendo também em consideração a existência de uma *perda* inicial da ordem dos 40 %. Nestas condições, os resultados obtidos permitem prever que a concentração máxima de um poluente conservativo na captação de Seara seja de 2,2 e 1,5 mg/L/kg de poluente descarregado pela Ribeira da Pantanha, para caudais da ordem dos 40 e 140 m³/s, respectivamente.

Os benefícios económicos de uma redução do número de campanhas de amostragem para a caracterização do comportamento dispersivo de rios à custa da aplicação de modelos matemáticos passam por um maior investimento no levantamento das características batimétricas desses sistemas hídricos. No presente caso a fiabilidade das previsões deste modelo para outras situações hidrodinâmicas carece de um conhecimento mais detalhado das características geométricas do sistema.

Este estudo permitiu estabelecer coeficientes de dispersão longitudinal num trecho do Rio Mondego indispensáveis para a quantificação dos impactos a jusante, por forma a mitigar os eventuais efeitos negativos da ocorrência de descargas poluentes acidentais.

BIBLIOGRAFIA

- Chapra, S. C. (1997), *Surface Water Quality Modeling*, McGraw-Hill, New York (EUA), p. 186-189.
- Duarte A.A.L.S. (1997), *Monitorização da Qualidade da Água no Controlo da Poluição de Sistemas Fluviais*, Relatório de Aula Teórico-Prática para Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, Universidade do Minho, Braga, Portugal.
- EPA/600/3-85/040 (1985), *Rates, Constants and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modelling*.
- Hubbard, E.F., Kilpatrick, F.A., Martens, C.A., Wilson, J.F. (1982), "Measurement of Time of Travel and Dispersion in Streams by Dye Tracing", *Geological Survey*, U.S. Department of the Interior, Whashington (EUA)
- ICIM (1992), *DUFLOW - A micro-computer package for the simulation of unsteady flow and water quality processes in one-dimensional channel systems*, Bureau ICIM, Rijswijk, Holanda.
- Langstangen, H.P. (1995), *A Diffpack Module for Scalar Convection-Diffusion Equations*, SINTEF Applied Mathematics, University of Oslo, Oslo, Noruega.
- Lees, M., Camacho L. (1998), *ADZTOOLv1.0 – User Manual*, Imperial College of Science Technology and Medicine, London, UK.
- Nordin, C.F., Sabol, G. V. (1974), "Empirical data on longitudinal dispersion in rivers", USGS Waters Resources Investigations.
- Thomann, R., Mueller, J. (1987), *Principals of Surface Water Quality Modelling and Control*, Harper Collins Publishers, Inc., New York (EUA), p. 71-78.
- Vieira, J.M.P., Duarte, A.A.L.S., Pinho J.L.S. (1997), *Estudo Preliminar de Impacto Ambiental da Captação de Areias de Vilar na Qualidade da Água do Rio Cávado*, Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do Dep. de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Braga.
- Vieira, J.M.P, Pinho J.L.S., Duarte, A.A.L.S (1998), "Eutrophication Vulnerability Analysis: a Case Study", *Water Science and Technology*, **37**, n.º 3, p. 121-128.
- Vieira, J.M.P, Pinho J.L.S., Duarte, A.A.L.S (1996), "River Water Quality Management Using Mathematical Modelling", *Proceedings of Metropolitan Areas and Rivers*, Roma (Itália), Part 2, p. 258-270.
- Wallis, S.G., Guymer, I., Bilgi I. (1989), "A practical engineering approach to modelling longitudinal dispersion", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Part 2, **87**, p. 1-22.