

Modelação da dispersão longitudinal em sistemas fluviais. Casos de estudo

António Sampaio Duarte¹, José Luís Pinho², José Pereira Vieira³

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil
Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal*

Rui A. Rocha Boaventura⁴

*Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Química
Faculdade de Engenharia, Rua Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal*

RESUMO

O estudo da hidrodinâmica e dispersão de descargas poluentes em sistemas fluviais assume particular relevância no estabelecimento de esquemas de gestão integrada da água em bacias hidrográficas, visando a protecção dos ecossistemas aquáticos e tendo em consideração os usos aí existentes.

O presente trabalho teve como objectivo a determinação de parâmetros capazes de traduzir as características dispersivas em trechos de dois sistemas fluviais distintos. Para esse efeito, foram realizadas campanhas de amostragem num trecho do Rio Mondego e numa albufeira internacional do Rio Douro, em que se recorreu à injeção de um marcador (rodamina WT). Os resultados obtidos serviram de base à calibração e validação de um modelo de advecção-difusão com capacidade para descrever a evolução da concentração de substâncias conservativas nesses meios hídricos.

Neste artigo apresenta-se a metodologia utilizada, os resultados experimentais obtidos numa das campanhas de amostragem, a atenuação dos picos de concentração em função dos tempos de percurso e a sua comparação com os resultados dos modelos matemáticos de simulação do fenómeno de dispersão longitudinal.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento dos parâmetros capazes de traduzir as características de transporte e dispersão de poluentes num trecho fluvial é indispensável para a previsão da evolução das respectivas concentrações a jusante.

A utilização de marcadores no estudo de sistemas hídricos reveste-se de grande importância pois permite obter dados para o desenvolvimento de modelos de qualidade da água, que, permitindo simular o comportamento desses sistemas em diferentes cenários, assumem-se como uma ferramenta preciosa de suporte à decisão dos gestores responsáveis pela saúde pública e pela preservação dos ecossistemas aquáticos. Em estudos relativamente

¹ Assistente (e-mail: aduarte@civil.uminho.pt)

² Professor Auxiliar (e-mail: jpinho@civil.uminho.pt)

³ Professor Catedrático (e-mail: jvieira@civil.uminho.pt)

⁴ Investigador Principal

aprofundados, o uso de marcadores deve permitir obter a informação necessária ao conhecimento dos tempos de passagem dos poluentes descarregados a montante, bem como das respectivas características dispersivas nesse meio hídrico.

A aplicação de modelos matemáticos na previsão e simulação de alterações das águas receptoras permite otimizar o número de campanhas de amostragem necessárias ao estudo do comportamento dispersivo de um meio hídrico, revelando-se uma ferramenta atractiva pela minimização de custos (Vieira *et al.*, 1998)

O presente trabalho teve como objectivo a determinação das condições de escoamento e dispersão em sistemas fluviais, tendo como objectos:

- o trecho do Rio Mondego, entre as Caldas da Felgueira e a albufeira da barragem da Aguieira. O interesse deste estudo resulta da escorrência natural de águas provenientes das minas de urânio da Urgeiriça para a ribeira das Caldas (ou da Pantanha), que desagua no Rio Mondego cerca de 500 m a jusante da ponte das Caldas da Felgueira, face à presença duma captação de água a jusante;
- o trecho internacional do Rio Douro localizado entre a barragem de Castro (Espanha) e a barragem de Miranda do Douro (Portugal), com interesse, por exemplo, para o planeamento de uma rede de vigilância da qualidade da água do Rio Douro.

A selecção criteriosa de modelos matemáticos a aplicar na gestão de bacias hidrográficas, aliada ao conhecimento dos parâmetros capazes de traduzir as características dispersivas dos sistemas fluviais, ao reduzir a incerteza associada às suas previsões, tornará mais fiável a definição de tempos de intervenção e de sistemas de alerta inerentes à protecção dos meios hídricos e da saúde das populações por eles abastecidas (Duarte *et al.*, 1999).

2. METODOLOGIA

2.1 Trabalho experimental

Atendendo à influência das condições hidrodinâmicas nas características dispersivas duma massa hídrica, foram realizadas várias campanhas de amostragem em cada um dos sistemas fluviais, cuja síntese da informação mais relevante se apresenta na Tabela 1.

Tabela 1-Campanhas de amostragem no Rio Mondego e no Rio Douro

Injecção	Data	Hora	Local	Caudal (m ³ /s)	Massa Rodamina (g)	Ano	Campanha	Data	Hora	Caudal (m ³ /s)	Cota Albufeira (m)	Massa Rodamina (kg)	
1	89-12-09	8:20	Estação 0	140	100	1985	1 ^a	85-05-07/09	9:00	400	-	11.5 ^(*)	
2	89-12-09	15:40	Estação 3	144	200		2 ^a	85-09-24/26	8:00	170	-	5	
3	89-12-10	8:00	Estação 0	100	200		1986	1 ^a	86-10-01/03	7:30	254	524	5
4	89-12-10	8:30	Estação 5	110	400			2 ^a	86-10-29/31	8:00	265	526	5
1	90-06-15	7:32	Estação 0	0.74	400	1987	1 ^a	87-04-08/10	10:00	457	525 - 522	5	
2	90-06-15	8:30	Estação 3	0.74	200		2 ^a	87-07-22/24	6:35	100 (?)	527 - 526	5	
1	89-11-09	7:40	Estação 0	40	400	3 ^a	87-11-18/20	7:30	352	525 - 524	5		
2	89-11-10	8:00	Estação 3	29	400								

Das três campanhas realizadas no Rio Mondego, correspondentes a caudais de cheia, de estiagem e frequentes, utilizou-se esta última para a calibração do modelo matemático e a primeira para a validação do modelo. Na albufeira de Miranda do Douro efectuaram-se sete campanhas, durante três anos consecutivos, abrangendo uma gama de caudais médios entre 170 e 457 m³s⁻¹.

O corante utilizado como marcador foi a rodamina WT, numa solução a 20%, sendo as respectivas concentrações medidas com um fluorómetro, tendo-se recolhido amostras *brancas* para determinação da fluorescência natural nos trechos desses rios.

Os locais de amostragem foram seleccionados atendendo aos objectivos do estudo, à sua acessibilidade, às características físicas do curso de água e aos meios logísticos e recursos humanos disponíveis (Duarte, 1997).

Na Figura 1 apresenta-se, como exemplo, uma sequência fotográfica que ilustra a evolução da dispersão da nuvem de rodamina, imediatamente após a sua injeção (Rio Mondego, Novembro de 1990).



Figura 2-Evolução da dispersão da nuvem de rodamina WT

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

No caso de estudo da albufeira do Rio Douro, procedeu-se, em algumas campanhas, à monitorização da dispersão transversal e em profundidade.

2.2 Breve descrição do modelo matemático

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.

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 do modelo DUFLOW relativa à qualidade é baseada na equação (1) de transporte, expressa na forma unidimensional (1), que traduz a concentração de uma substância num sistema em função do tempo e do espaço (na direcção do escoamento) e permite a quantificação dum termo designado por *produção*, que inclui todos os processos físicos, químicos e biológicos a que esse constituinte está sujeito.

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} = -\frac{\partial(QC)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(AD \frac{\partial C}{\partial x}\right) + P \quad (1)$$

onde:

C	concentração do constituinte;	$[M L^{-3}]$
Q	caudal;	$[L^3 T^{-1}]$
A	área da secção transversal;	$[L^2]$
D	coeficiente de dispersão;	$[L^2 T^{-1}]$
x	coordenada na direcção do escoamento;	$[L]$
t	tempo;	$[T]$
P	produção de constituinte por unidade de comprimento.	$[M L^{-1} T^{-1}]$

3. CASOS DE ESTUDO

3.1 Rio Mondego

3.1.1 Caracterização do trecho

A bacia hidrográfica do Rio Mondego localiza-se na região centro de Portugal e drena uma área com cerca de 6670 km^2 . O trecho estudado tem uma extensão de 24 km e localiza-se na sua parte central, conforme de ilustra na Figura 2.

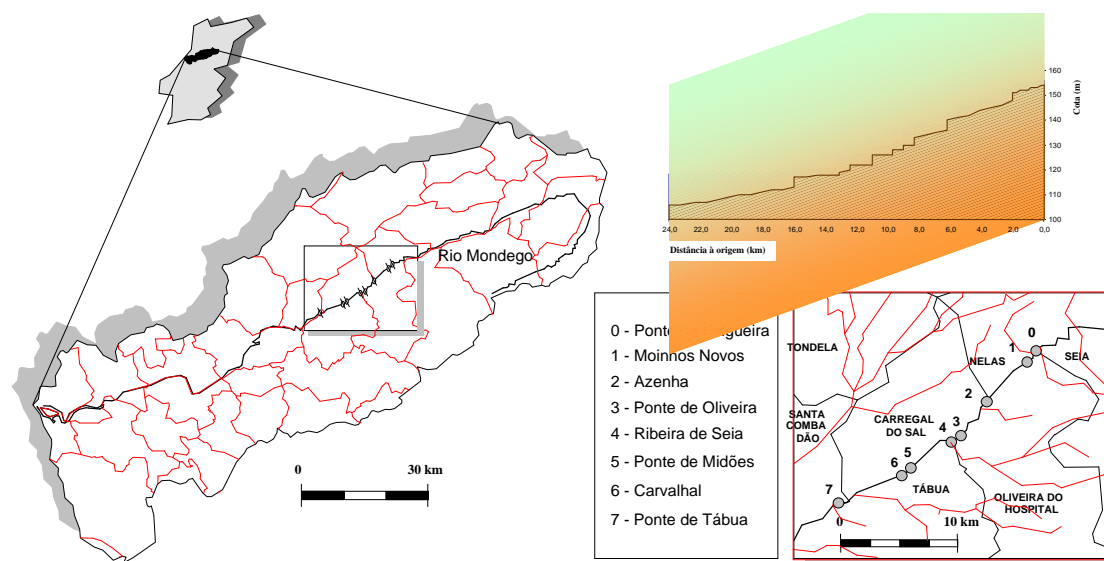


Figura 2-Bacia hidrográfica do Rio Mondego, trecho estudado e seu perfil longitudinal

Definiram-se sete estações de amostragem, sendo a estação 0 o local de injeção mais a montante, na ponte das Caldas da Felgueira, onde as condições de mistura são favoráveis a uma rápida homogeneização transversal das concentrações. A inclinação média do talvegue é de cerca de 0,9 ‰.

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.

As velocidades médias nos vários sub-trechos foram calculadas com base nos tempos de residência médios e nas distâncias entre estações e validadas através do levantamento de secções transversais (Figura 3).

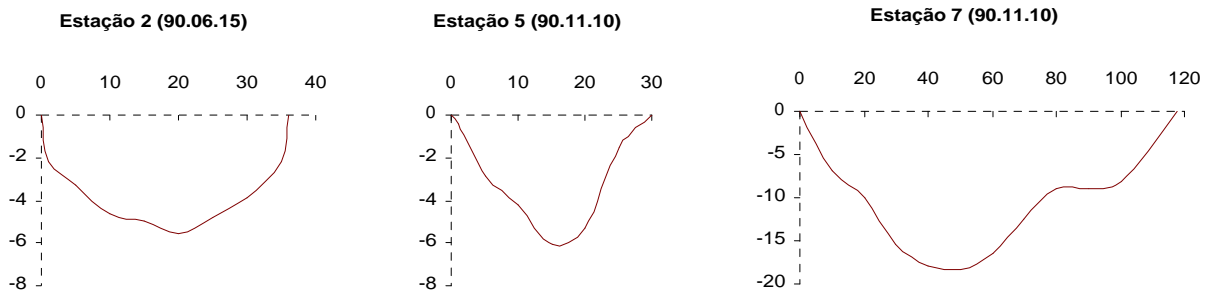


Figura 3-Secções transversais do Rio Mondego (pontos de amostragem 2, 5 e 7)

3.1.2 Calibração e validação do modelo

A calibração do modelo foi efectuada de modo a verificar-se o ajuste dos valores da concentração calculados aos valores experimentais obtidos na campanha de Novembro de 1990 (Figura 4), sendo determinantes os coeficientes de dispersão e as leis de vazão adoptados.

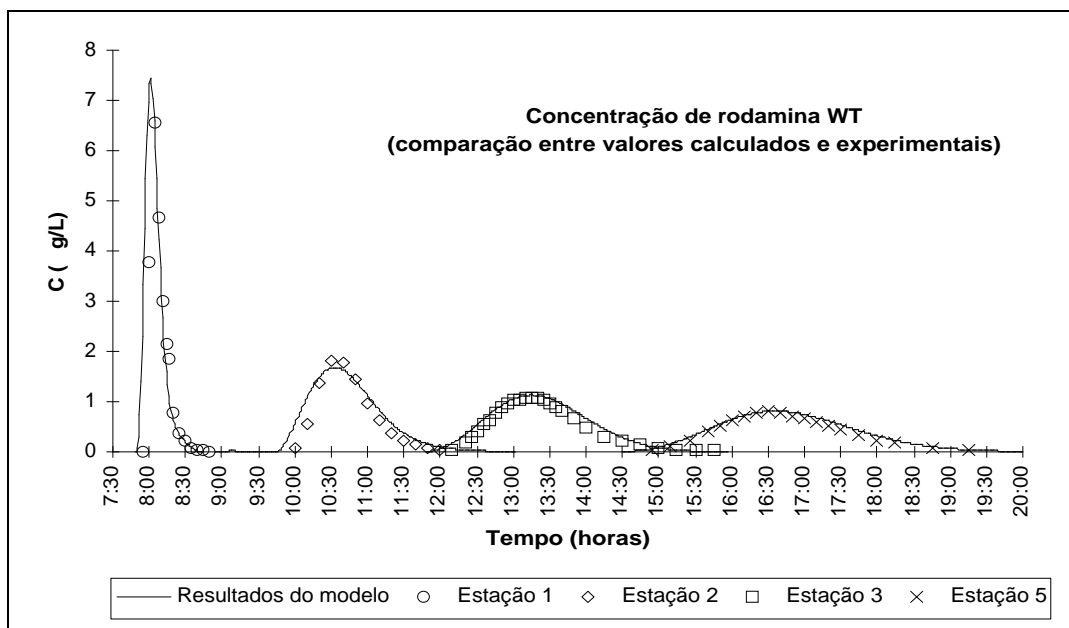


Figura 4-Calibração do modelo (Rio Mondego)

Procedeu-se à validação do modelo para outra série de dados (campanha de Dezembro de 1989) obtida em condições hidrodinâmicas e massa injectada de corante completamente distintas, tendo-se obtido o resultado apresentado na Figura 5. Neste caso, a variação das características hidrodinâmicas do rio implicou uma alteração dos coeficientes de dispersão longitudinal adoptados na calibração.

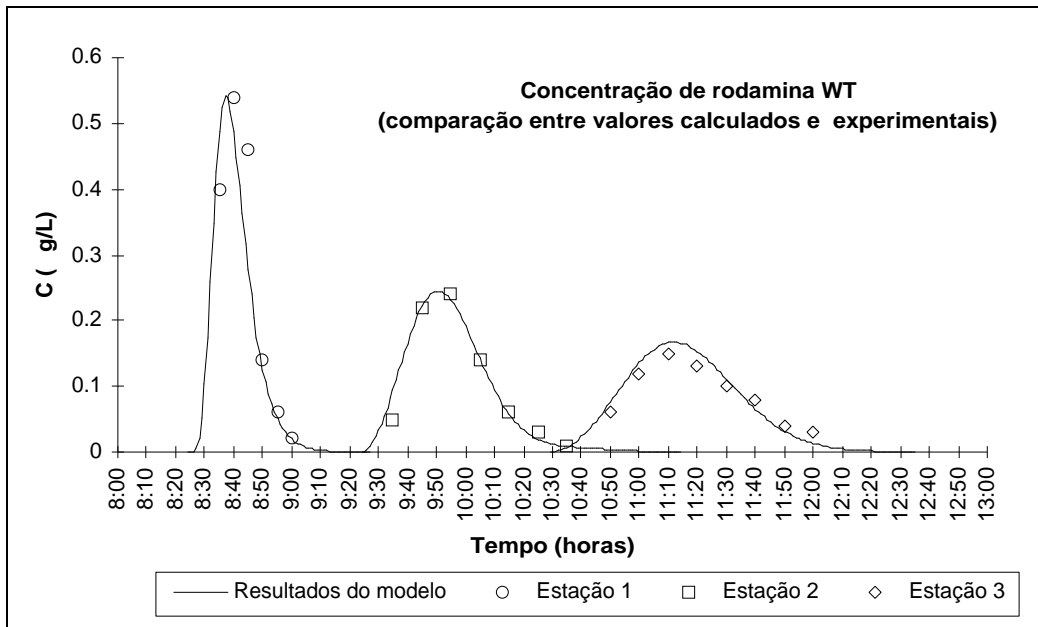


Figura 5-Validação do modelo (Rio Mondego)

3.1.3 Previsão das concentrações máximas e tempos de percurso

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 dada 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 corante 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. Para o trecho fluvial estudado obtiveram-se as equações apresentadas na Figura 6 (Duarte *et al.*, 2000).

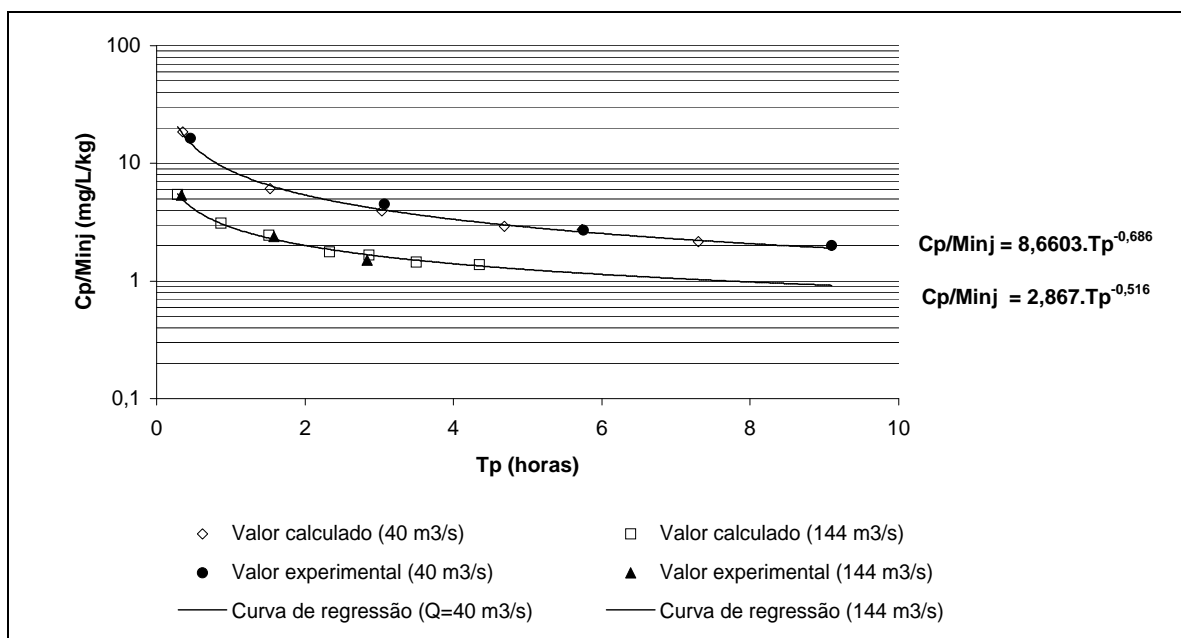


Figura 6 – Variação da concentração do pico com o tempo de percurso (Rio Mondego)

3.2 Rio Douro (albufeira de Miranda do Douro)

3.2.1 Caracterização do trecho

O trecho internacional do Rio Douro estudado corresponde à albufeira formada pela barragem de Miranda do Douro (Portugal), tendo como limite, a montante, a barragem de Castro (Espanha). Trata-se de um trecho com uma extensão de aproximadamente 13,5 km, ao longo do qual foram seleccionadas quatro secções de amostragem, assinaladas e ilustradas na Figura 7.

O lançamento do corante foi efectuado em plena zona de restituição da barragem de Castro, na estação 0, de modo a favorecer as condições de mistura.

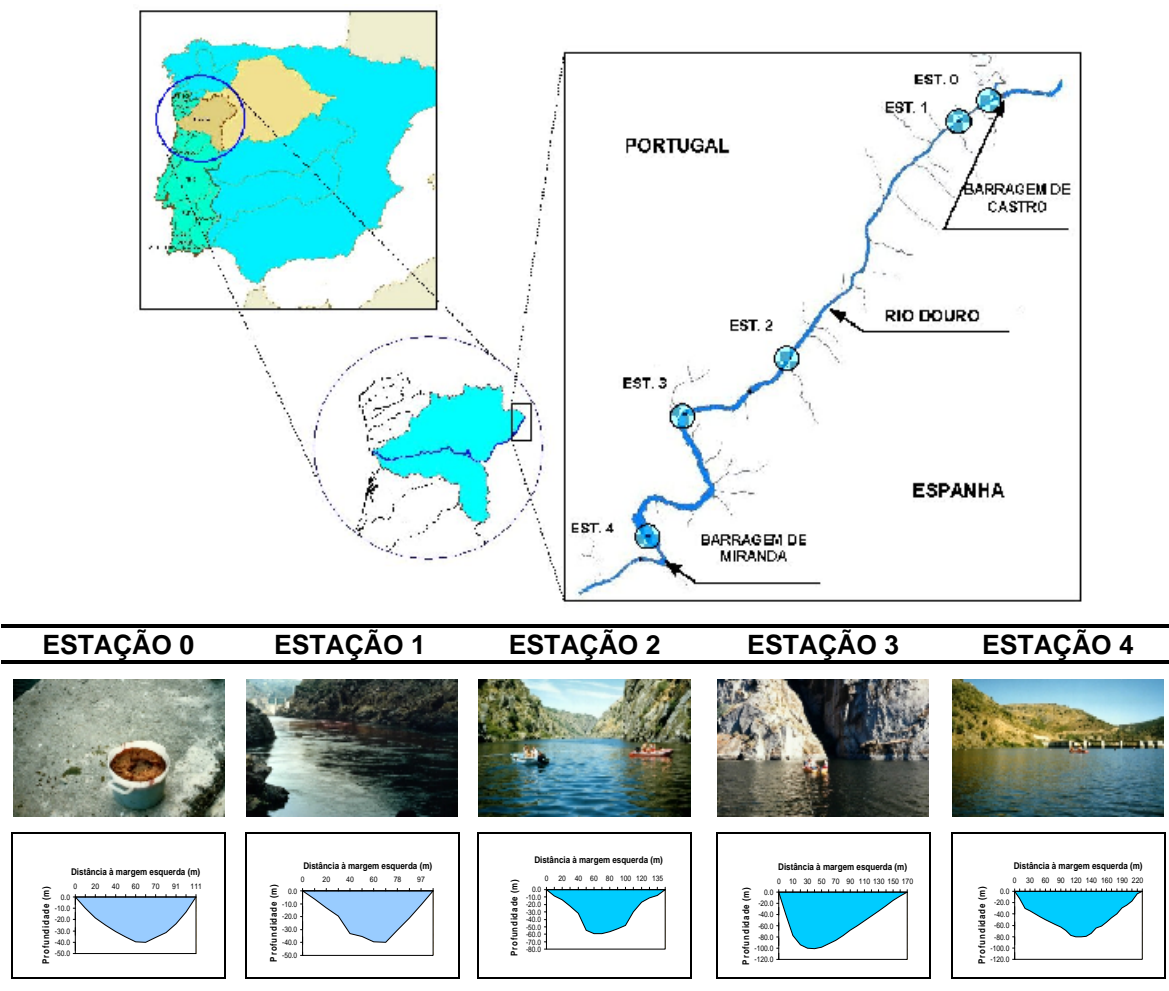


Figura 7-Bacia hidrográfica do Rio Douro e secções de amostragem

A batimetria das secções transversais dos pontos de amostragem bem como o registo das cotas da albufeira e dos caudais turbinados foram obtidos a partir da informação disponibilizada pelas entidades gestoras dos respectivos aproveitamentos hidroeléctricos.

O regime hidrodinâmico deste trecho do Rio Douro é determinado pelos caudais restituídos pela central de Castro, pelos caudais turbinados na central de Miranda do Douro e pela cota da água na albufeira de Miranda.

3.2.2 Calibração e validação do modelo

As condições de fronteira consideradas na modelação do regime hidrodinâmico e na calibração do modelo estão representadas graficamente na Figura 8.

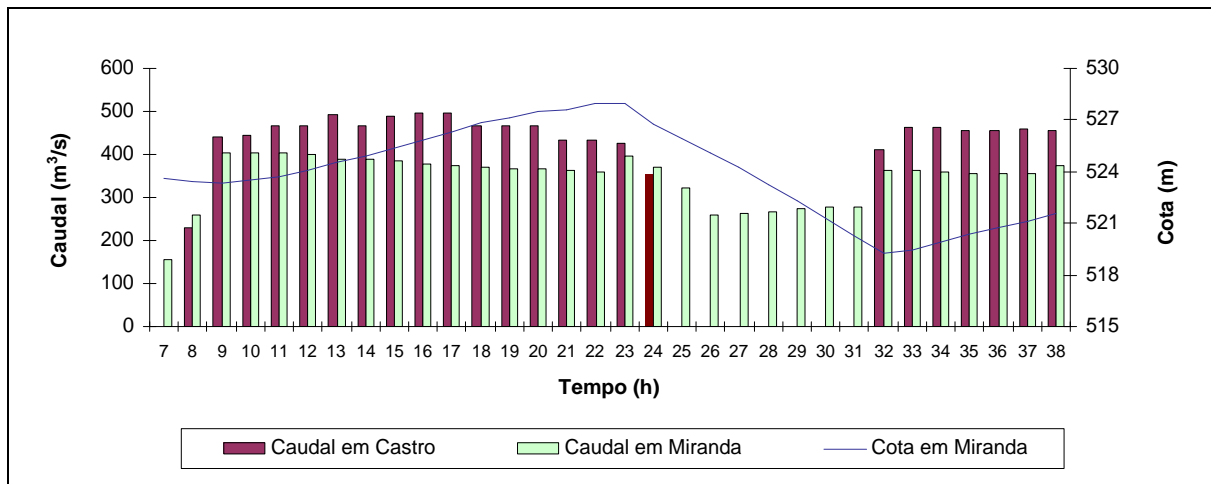


Figura 8-Caudais turbinados e cota da albufeira (Miranda do Douro)

A calibração do modelo foi efectuada de modo a verificar-se o ajuste dos resultados da simulação aos valores experimentais obtidos na campanha de Abril de 1987 (Figura 9), tendo sido determinantes os coeficientes de dispersão adoptados e as condições hidrodinâmicas resultantes das condições de fronteira adoptadas.

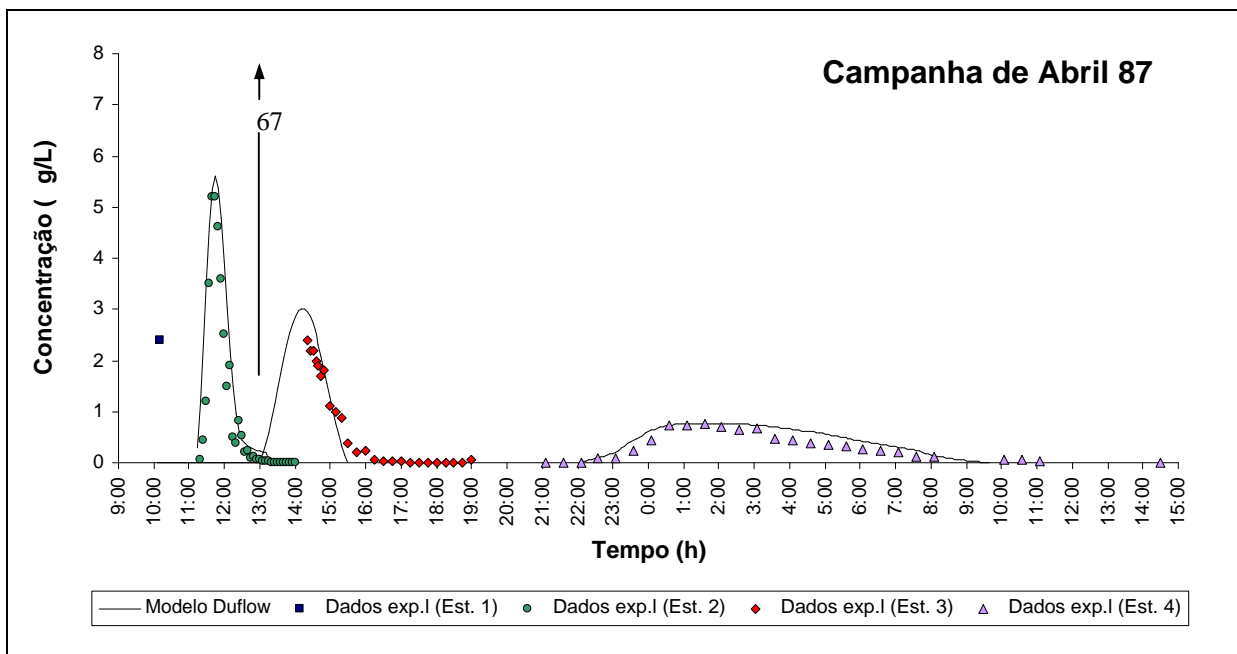


Figura 9-Calibração do modelo (Rio Douro)

Procedeu-se à validação do modelo para outra série de dados (campanha de Novembro de 1987) obtida para um regime hidrodinâmico distinto, conseguindo-se o ajuste apresentado na Figura 10.

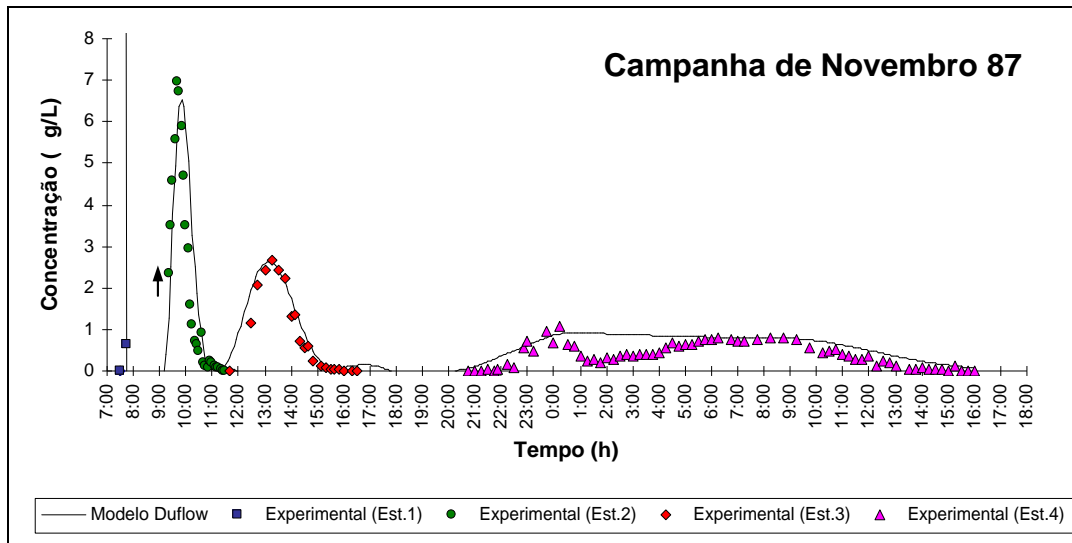


Figura 10-Validação do modelo (Rio Douro)

3.2.3 Previsão das concentrações máximas e tempos de percurso

A concentração do pico (C_p), dividida pela massa total de rodamina injectada, varia igualmente na razão inversa de uma potência do respectivo tempo de passagem (Figura 11), mas, neste caso, os valores do expoente, obtidos com base nos resultados do modelo, apresentam uma pequena variação (mesmo correspondendo a caudais médios escoados distintos) e são bastante superiores aos obtidos no caso do trecho fluvial do Rio Mondego.

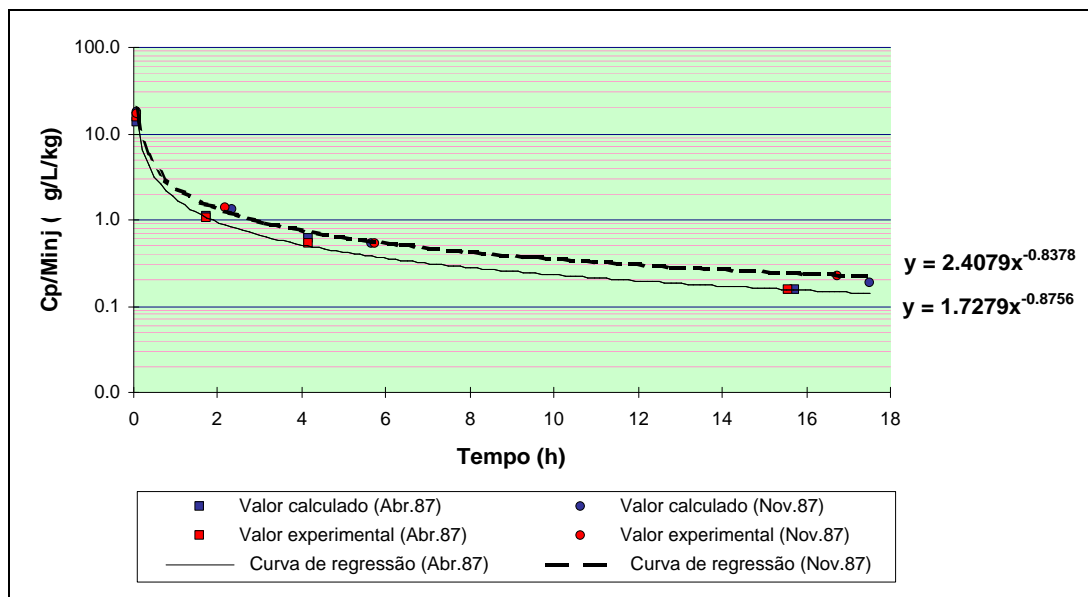


Figura 12-Variação da concentração do pico com o tempo de passagem (Rio Douro)

Da análise comparativa entre os resultados do modelo e os calculados a partir dos valores observados nas campanhas, verifica-se, nos dois sistemas fluviais, uma ligeira variação nos coeficientes de dispersão longitudinal (Tabela 2), 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.

Tabela 2-Síntese de resultados (Rio Mondego e Rio Douro)

TRECHO	TEMPO DE PERCURSO (h)				COEFICIENTE DE DISPERSÃO (m ² .s ⁻¹)	
	NOVEMBRO 90		DEZEMBRO 89		NOVEMBRO 90	
	EXPERIMENTAL	DUFLOW	EXPERIMENTAL	DUFLOW	EXPERIMENTAL	DUFLOW
Est. 1 - Est. 2	2:37	2:31	1:14	1:14	14	10
Est. 2 - Est. 3	2:41	2:39	1:24	1:24	51	45
Est. 3 - Est. 5	3:21	3:28	---	---	37	35
Est. 1 - Est. 3	5:18	5:10	2:38	2:38	34	---

TRECHO	TEMPO DE PERCURSO (h)				COEFICIENTE DE DISPERSÃO (m ² .s ⁻¹)	
	ABRIL 87		NOVEMBRO 87		DUFLOW	
	EXPERIMENTAL	DUFLOW	EXPERIMENTAL	DUFLOW	ABRIL 87	NOVEMBRO 87
Est. 0 - Est. 1	0:05	0:05	0:06	0:05	50	45
Est. 1 - Est. 2	1:45	1:45	2:10	2:20	30	20
Est. 2 - Est. 3	4:10	4:20	5:45	5:40	5	20
Est. 3 - Est. 4	15:35	15:45	16:45	17:30	2	2

4. CONCLUSÕES

A aplicação de modelos matemáticos unidimensionais ao estudo da dispersão longitudinal quer em rios quer em albufeiras, revelou-se satisfatória, dado traduzir de uma forma bastante aproximada a evolução real da concentração de uma substância conservativa em diferentes situações de regime hidrodinâmico. Por esse facto, estes modelos constituem uma importante ferramenta na definição de sistemas de alerta e como suporte à decisão na gestão integrada destas bacias hidrográficas.

O investimento num conhecimento mais detalhado das características geométricas dos sistemas fluviais será certamente compensado pelo benefício económico resultante da redução do número de campanhas de amostragem necessário para a caracterização do comportamento dispersivo desses sistemas e pela vantagem duma definição mais racional dos locais de monitorização dos recursos hídricos.

Este estudo permitiu estabelecer coeficientes de dispersão longitudinal em sistemas fluviais muito distintos, que são indispensáveis para a quantificação dos impactos a jusante, por forma a mitigar os efeitos negativos da ocorrência de descargas poluentes acidentais.

REFERÊNCIAS

Chapra, S.C., Surface Water Quality Modeling, McGraw-Hill, NY (USA), 186189 (1997).

Duarte A.A.L.S., Monitorização da Qualidade da Água no Controlo da Poluição de Sistemas Fluviais, *Trabalho de Síntese das Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica*, Universidade do Minho, Braga, (1997).

Duarte A.L.S., Pinho J.L.S., Boaventura, R.A.R., Vieira J.M.P., Modelação da Hidrodinâmica e da Dispersão Longitudinal no Rio Mondego, *Recursos Hídricos*, **20** (1), 93-102, (2000).

Duarte, A.L.S., Pinho J.L.S., Vieira, J.M.P., Boaventura, R.A.R., Comparison of Numerical Techniques Solving Longitudinal Dispersion Problems in the River Mondego, *VII EPMESC*, Ed. João Bento *et al.*, Elsevier Science, vol. 2, 1197-1206 (1999).

ICIM, Duflow, A Micro-Computer Package for the Simulation of Unsteady Flow and Water Quality Processes in One-Dimensional Channel Systems, Bureau ICIM, Rijswijk, (1992).

Hubbard, F., Kilpatrick, A., Martens, A., Wilson, F., Measurement of Time of Travel and Dispersion in Streams by Dye Tracing, *Geological Survey, U.S.D.I.*, Washington, (1982).

Vieira, J.M.P., Pinho J.L.S., Duarte, A.A.L.S., Eutrophication Vulnerability Analysis: a Case Study, *Water Science and Technology*, **37 (3)**, 121-128, (1998).

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.