

# ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DISPERSIVAS DUMA ALBUFEIRA DO RIO DOURO INTERNACIONAL

**António A. L. Sampaio Duarte** <sup>(1)</sup>

Licenciado em Engenheiro Civil pela Universidade do Porto (UP).  
Assistente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (UM). Doutorando em Engenharia Civil na UM.

**José L. Silva Pinho**

Assistente do Departamento de Engenharia Civil da UM.

**José M. Pereira Vieira**

Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da UM.

**Rui A. Rocha Boaventura**

Investigador Principal do Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia da Universidade da Porto (FEUP).

**Endereço**<sup>(1)</sup>: Departamento de Engenharia Civil - Campus de Gualtar – Universidade do Minho – 4710-057 Braga – Portugal – Tel: (351)253604723 – Fax: (351)253604721 – e-mail: *aduarte@ci.uminho.pt*

## RESUMO

O estudo da hidrodinâmica e dispersão de descargas poluentes em sistemas fluviais assume particular relevo na definição de esquemas de gestão integrada das bacias hidrográficas, nomeadamente quanto à protecção da qualidade da água nas origens.

O presente trabalho teve como objectivo a determinação de parâmetros característicos de dispersão na albufeira de Miranda do Douro. Para esse efeito foram realizadas campanhas de amostragem para diferentes regimes hidrodinâmicos, em que se recorreu à injeção de um traçador (rodamina WT), monitorizando-se a evolução da sua concentração ao longo do trecho em estudo. Os resultados experimentais serviram de base à calibração e à validação de um modelo de advecção-difusão capaz de descrever a dispersão de substâncias conservativas.

Neste artigo apresenta-se a metodologia do estudo, 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 utilizados na descrição do fenómeno de dispersão longitudinal.

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. Deste modo, a modelação matemática constitui uma ferramenta útil na definição de sistemas de alerta e de protecção do sistema fluvial.

**PALAVRAS-CHAVE:** dispersão, rodamina WT, modelação matemática, qualidade da água, gestão de recursos hídricos.

---

## **INTRODUÇÃO**

O presente estudo integrou-se num projecto mais abrangente que tinha por objectivo o planeamento de uma rede de vigilância da qualidade da água do rio Douro, face à proximidade do local, então previsto, para a implantação da Central Nuclear de Sayago, a construir pelas autoridades espanholas.

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 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.

Este trabalho teve como objectivo a determinação das condições de escoamento e dispersão num trecho internacional do rio Douro localizado entre a barragem de Castro (Espanha) e a barragem de Miranda do Douro (Portugal).

Atendendo à influência das condições hidrodinâmicas nas características dispersivas do meio hídrico, foram realizadas sete campanhas de amostragem em três anos consecutivos (entre 1985 e 1987), abrangendo uma gama de caudais médios entre 170 e 457 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.

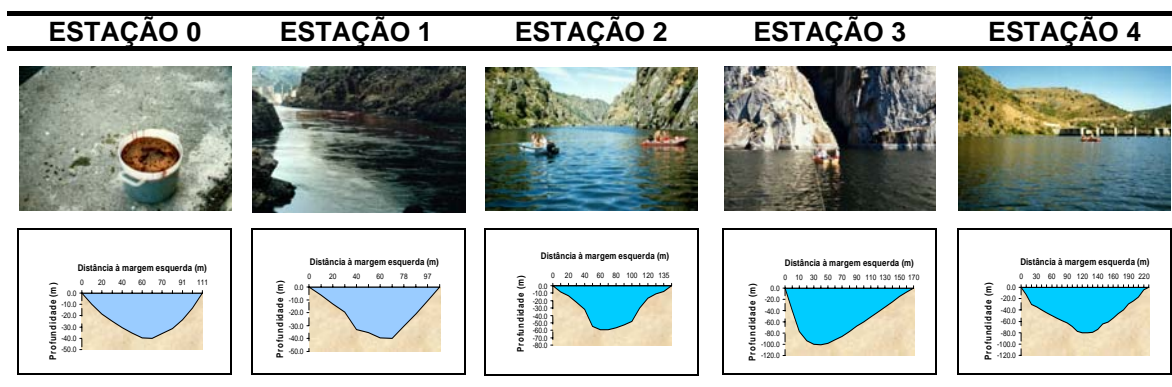
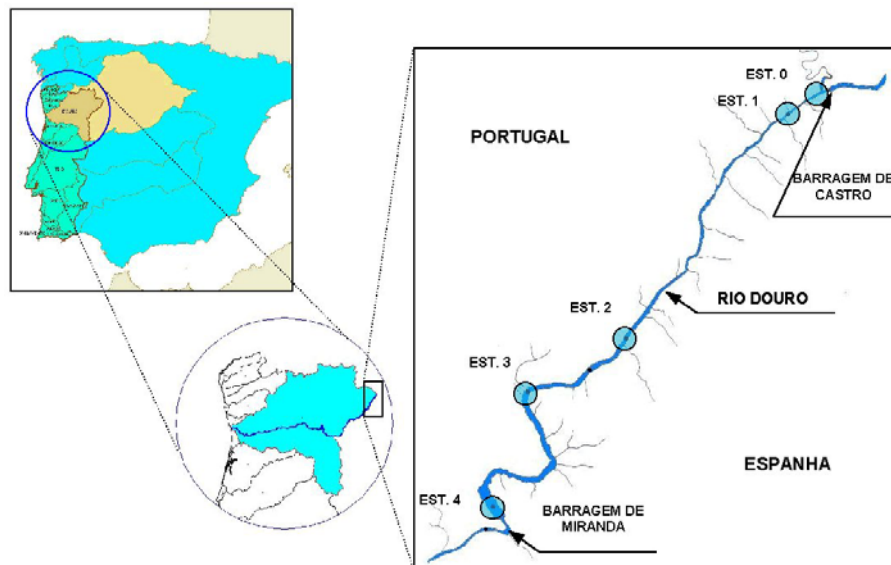
Apesar de os dados recolhidos permitirem uma avaliação tridimensional da dispersão de substâncias conservativas, neste trabalho apresentam-se apenas os dados referentes à dispersão longitudinal e transversal, não se referindo resultados relativos à percentagem de massa de rodamina recuperada. A análise das características dispersivas deste sistema através dum modelo 2-DV será objecto dum desenvolvimento futuro.

## **CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO EM ESTUDO**

O trecho do rio Douro internacional em estudo abrange a 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 orientação predominantemente nordeste/sudoeste e uma extensão de aproximadamente 13,5 km, ao longo do qual foram seleccionadas quatro secções de amostragem (Figura 1).

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 1: 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.

## METODOLOGIA

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 obtenção das concentrações foi utilizado um fluorómetro “Turner Designs”, tendo-se recolhido amostras “brancas” para determinação da fluorescência natural do rio.

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 Tabela 1 apresenta-se uma síntese da informação sobre as injeções de rodamina efectuadas no decurso das sete campanhas de amostragem efectuadas neste estudo.

**Tabela 1: Síntese da informação referente às injeções de rodamina**

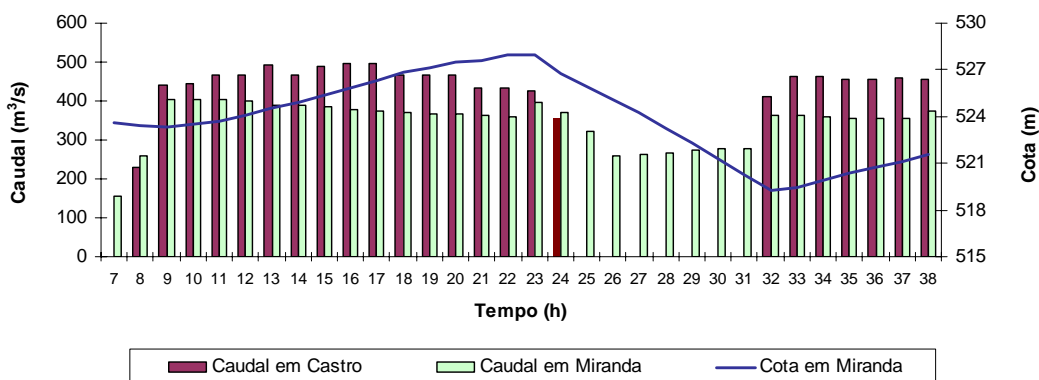
Ano	Campanha	Data	Hora	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Cota Albufeira (m)	Massa Rodamina (kg)	Amostragem		
							L	P	T
1985	1 <sup>a</sup>	85-05-07/09	9:00	400	-	11.5 a)	1-4	-	-
	2 <sup>a</sup>	85-09-24/26	8:00	170	-	5	1-4	-	-
1986	1 <sup>a</sup>	86-10-01/03	7:30	254	524	5	1-4	-	-
	2 <sup>a</sup>	86-10-29/31	8:00	265	526	5	1-4	2-4	3, 4
1987	1 <sup>a</sup>	87-04-08/10	10:00	457	525 - 522	5	1-4	3	2, 3
	2 <sup>a</sup>	87-07-22/24	6:35	100 (?)	527 - 526	5	1-4	2	1, 2
	3 <sup>a</sup>	87-11-18/20	7:30	352	525 - 524	5	1-4	3	1-3

Nota : L = longitudinal ; P = em profundidade ; T = transversal .

a) - Rodamina B

A frequência de amostragem em cada estação foi estabelecida em função do tempo de passagem previsto para a nuvem de corante: 1 a 2 minutos na primeira estação e 15 a 30 minutos nas estações mais afastadas.

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. As condições de fronteira consideradas na calibração do modelo estão representadas graficamente na Figura 2.

**Figura 2: Síntese da informação referente aos caudais turbinados e cota da albufeira**

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 secções de amostragem**

Estação de Amostragem	Distância ao local da injeção (m)
1	575
2	6 700
3	9 100
4	12 270

A primeira campanha de 1987 serviu de base à calibração do modelo matemático e a última foi utilizada para efectuar a validação do modelo.

## MODELAÇÃO MATEMÁTICA

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 do modelo DUFLOW relativa à qualidade é baseada na equação de transporte, expressa na forma unidimensional que traduz a concentração de uma substância num sistema em função do tempo e do espaço (na direcção do escoamento).

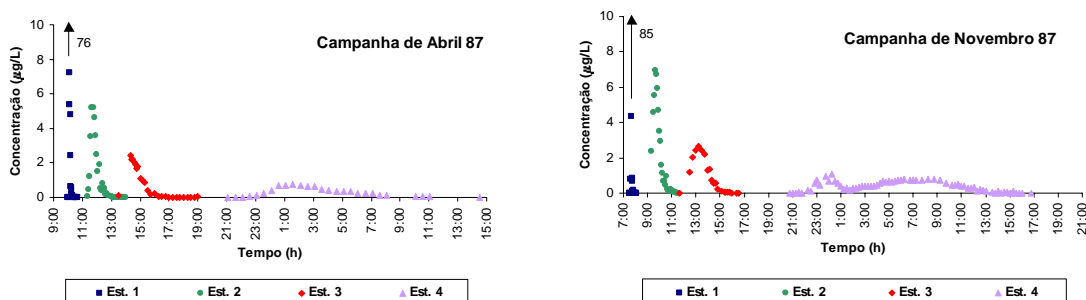
A descrição dos processos pode ser alterada pelo modelador, possibilitando a formulação de diferentes cinéticas para os processos determinantes da qualidade da água, permitindo ao utilizador definir as variáveis de estado a considerar e as relações entre elas (Vieira *et al.*, 1998). Neste estudo considerou-se a rodamina como uma substância conservativa.

No sistema modelado, com uma extensão total de 13,5 km, foram considerados vinte e sete trechos aos quais correspondem vinte e oito nós. Esta discretização espacial teve em consideração a localização dos pontos de amostragem e das estruturas de retenção, bem como as características geométricas do rio.

Os valores médios do caudal restituído em Castro e a massa de rodamina WT injectada (quase instantaneamente) constituem as condições de fronteira de montante do modelo. A cota da água na albufeira da barragem de Miranda constitui a condição fronteira de jusante.

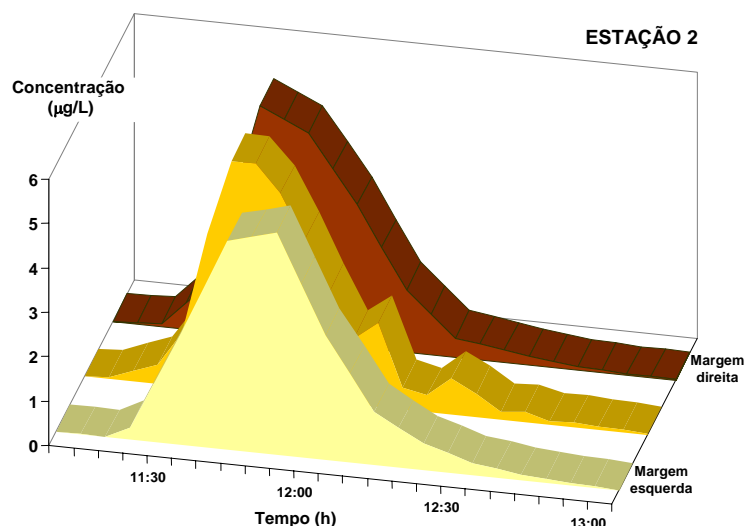
## RESULTADOS

Na Figura 3 são apresentados os valores da concentração de corante obtidos nas amostras recolhidas nas várias estações de amostragem, durante as campanhas de Abril e Novembro de 1987.



**Figura 3: Resultados experimentais das campanhas de 1987**

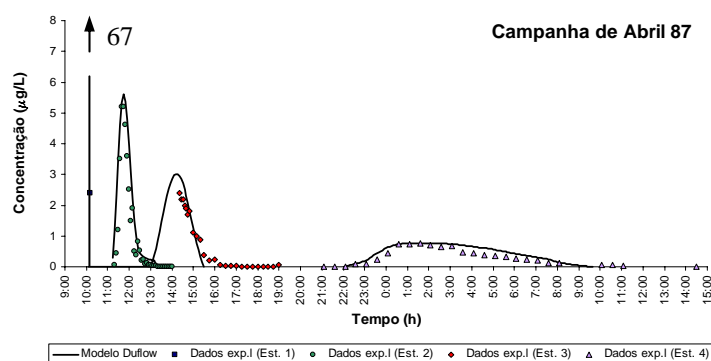
A variação transversal da concentração verificada em diferentes secções de amostragem permitiu concluir que as condições de mistura foram favoráveis a uma rápida homogeneização das concentrações nessa direcção (Figura 4), facto que já não se constatou em profundidade, onde foi observada uma estratificação diferente entre as diversas secções.



**Figura 4: Variação transversal da concentração na estação 2**

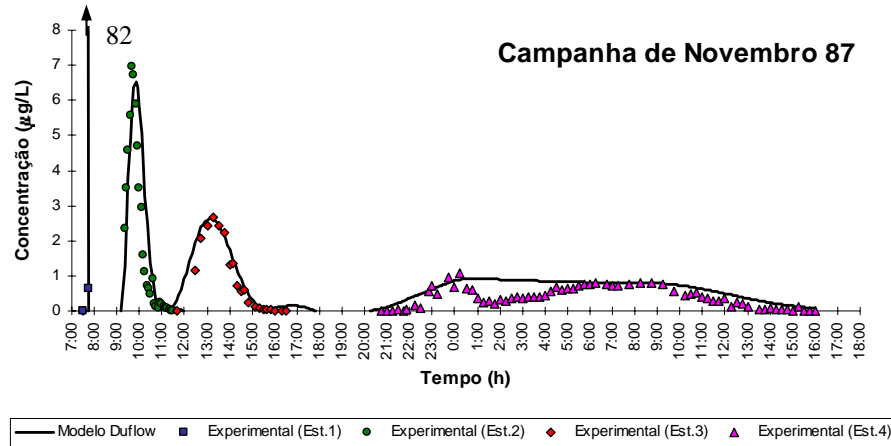
A partir dos valores da concentração obtidos foi possível determinar alguns parâmetros fundamentais na avaliação das características dispersivas do sistema fluvial em estudo. Os valores dos coeficientes de dispersão calculados através da aplicação da solução analítica da equação de transporte, correspondente a uma distribuição normal das concentrações (Chapra, 1997), foram adoptados na modelação como valores iniciais e ajustados durante os processos de calibração e validação. A comparação dos tempos de percurso, relativos à passagem dos picos nas várias secções, obtidos experimentalmente e através do modelo, será efectuada, no final deste ponto, na síntese de resultados.

A calibração do modelo foi efectuada ajustando os valores da rugosidade de cada trecho, os coeficientes de dispersão longitudinal e adoptando áreas das secções transversais compatíveis com a informação disponibilizada. No ajuste dos valores da concentração calculados aos experimentais (Figura 5), foram determinantes os coeficientes de dispersão adoptados e as condições hidrodinâmicas resultantes das condições de fronteira adoptadas.



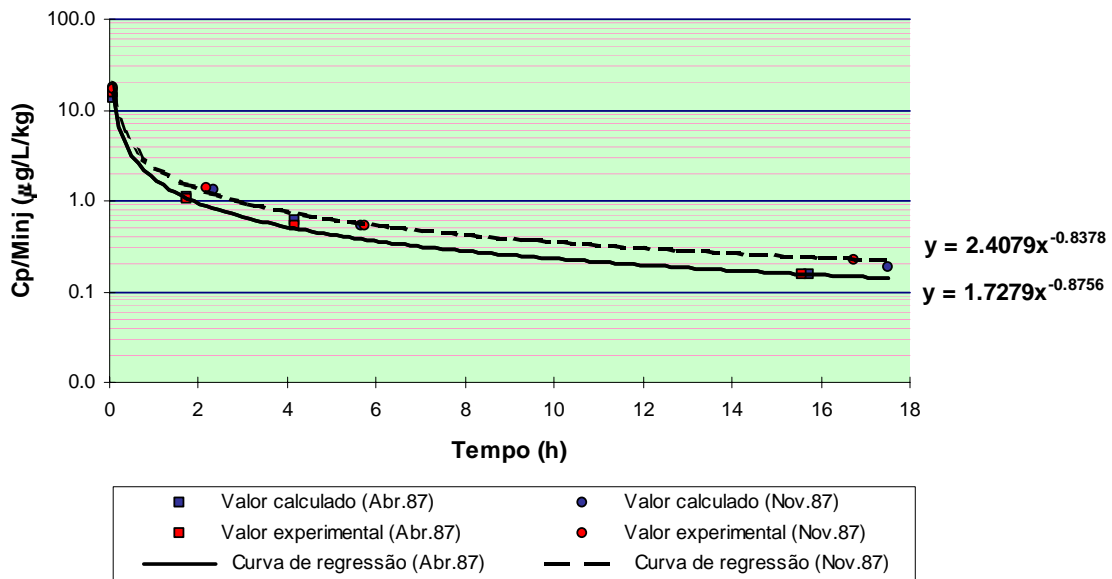
**Figura 5: Calibração do modelo**

Procedeu-se à validação do modelo para outra série de dados (campanha de Novembro de 1987) obtidos para um regime hidrodinâmico distinto, conseguindo-se o ajuste representado na Figura 6. Neste caso, a variação das características hidrodinâmicas na albufeira implicou uma alteração dos coeficientes de dispersão longitudinal adoptados na calibração, para cada trecho.



**Figura 6: Validação do modelo**

As características de dispersão de um rio podem ser avaliadas 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 (Hubbard *et al.*, 1982). No caso de substâncias não conservativas as concentrações dos picos serão inferiores às que se podem obter a partir das curvas de regressão estabelecidas na Figura 7 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.



**Figura 7: Relação entre a concentração e o tempo de percurso dos picos**

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. Os valores deste expoente obtidos com base nos resultados do modelo (0,84 e 0,86) apresentam uma pequena variação porque correspondem a injeções duma mesma massa de corante e a condições hidrodinâmicas características duma mesma albufeira, ainda que correspondentes a caudais médios escoados distintos. Estes valores do expoente são no entanto bastante superiores aos obtidos em estudos semelhantes realizados em rios (Duarte *et al.*, 1999a).

Da análise comparativa entre os resultados do modelo 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, tendo-se constatado, à semelhança de outros casos (Duarte *et al.*, 1999b),

que variações da ordem de grandeza das diferenças observadas, não originam alterações significativas nos valores da concentração e dos respectivos tempos de passagem.

**Tabela 3: Síntese e comparação de resultados**

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

## CONCLUSÕES

A aplicação de modelos matemáticos unidimensionais ao estudo da dispersão longitudinal nesta albufeira 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.

Se em termos transversais se constatarem condições de mistura muito rápida, a disparidade da estratificação vertical das concentrações verificada ao longo desta albufeira aponta para a necessidade de prosseguimento deste estudo através da aplicação de modelos 2D-V de qualidade da água.

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 conhecimento mais detalhado das características geométricas do sistema.

Este estudo permitiu estabelecer coeficientes de dispersão longitudinal numa albufeira do rio Douro indispensáveis para a quantificação dos impactos a jusante, por forma a mitigar os eventuais efeitos negativos da ocorrência de descargas poluentes acidentais.



Pela capacidade demonstrada em prever, com suficiente acuidade, o amortecimento e o atraso das concentrações originadas por essas descargas, o modelo desenvolvido poderá ser uma ferramenta útil a incorporar num sistema de suporte à decisão para a gestão integrada desta bacia hidrográfica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CHAPRA, S.C., Surface Water Quality Modeling, McGraw-Hill, New York (EUA), p. 186-189, 1997.
  2. DUARTE A.A.L.S., 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, 1997.
  3. EPA/600/3-85/040, Rates, Constants and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modelling, 1985.
  4. HUBBARD, E.F., KILPATRICK, F.A., MARTENS, C.A., WILSON, J.F., Measurement of Time of Travel and Dispersion in Streams by Dye Tracing, Geological Survey, U.S. Department of the Interior, Whashington, 1982.
  5. ICIM, DUFLOW - A Micro-Computer Package for the Simulation of Unsteady Flow and Water Quality Processes in One-Dimensional Channel Systems, Bureau ICIM, Rijswijk, The Netherlands., 1992.
  6. DUARTE A.A.L.S., PINHO J.L.S., BOAVENTURA, R.A.R., VIEIRA J.M.P., Aplicação de Modelos Matemáticos ao Estudo da Dispersão Longitudinal do Rio Mondego, **Actas do IV SILUSBA** (CD-Rom), APRH, Coimbra, Portugal, 1999a.
  7. DUARTE, A.A.L.S., PINHO J.L.S., VIEIRA, J.M.P., BOAVENTURA, R.A.R., Comparision of Numerical Techniques solving longitudinal dispersion problems in the river Mondego, **VII EPMESC**, Ed. João Bento et al. , Elsevier Science, vol. 2, p. 1197-1206, 1999b.
  8. VIEIRA, J.M.P., PINHO J.L.S., DUARTE, A.A.L.S., Eutrophication Vulnerability Analysis: a Case Study, **Water Science and Technology**, vol. 37, n.º 3, p. 121-128, 1998.
-