



FACTORES DETERMINANTES NA AVALIAÇÃO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA EM ESTUÁRIOS E SUA INFLUÊNCIA EM PROCESSOS DE EUTROFIZAÇÃO

António A. L. Sampaio Duarte⁽¹⁾

Licenciatura em Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Assistente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Braga. Doutorando em Engenharia Civil da Universidade do Minho, Braga.

José M. Pereira Vieira

Licenciatura em Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. MSc. Em Engenharia Sanitária pelo IHE-Delft (Holanda). Doutoramento em Engenharia Civil pela Universidade do Minho. Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Braga.

Endereço⁽¹⁾: Dept.º de Engenharia Civil, Campus de Gualtar, Universidade do Minho, 4710-057 Braga, Portugal - Tel: (351) 253 604723 - e-mail: aduarte@civil.uminho.pt

RESUMO

Os estuários são sistemas hídricos que desde sempre favoreceram o desenvolvimento de aglomerados urbanos importantes, por propiciarem actividades com grande impacto sócio-económico, nomeadamente a portuária, a piscatória e as de lazer, aliadas às suas características hidrodinâmicas, resultantes da confluência de águas fluviais e marinhas, favoráveis à retenção de nutrientes e à recepção das águas residuais, face à sua capacidade de diluição e transporte para mares ou oceanos. Esta acumulação de nutrientes sustenta uma actividade biológica intensa transformando as zonas estuarinas em autênticos viveiros de peixes e crustáceos, de importância vital na economia das comunidades ribeirinhas.

A eutrofização dos sistemas hídricos inicia-se com o incremento de nutrientes nesse meio, resultando, da sua presença excessiva, a substituição e/ou proliferação de algumas espécies de plantas aquáticas até níveis que podem comprometer a utilização dessas águas para os seus diferentes usos. Este fenómeno é muito sensível aos efeitos antropogénicos (descargas de esgotos domésticos e indústrias, práticas agrícolas poluentes) e em meios eutróficos, além de provocar uma elevada cor, turvação e redução quer da concentração de oxigénio dissolvido quer de biodiversidade, proporciona o aparecimento de microrganismos e macroalgas libertadores de toxinas comprometendo a utilização dessas águas para consumo humano e o funcionamento das Estações de Tratamento de Água (ETA's).

Tendo-se constatado, através da análise dos dados recolhidos na última década no estuário do rio Mondego, que as condições hidrodinâmicas influenciam decisivamente a ocorrência de episódios de proliferação intensa de macroalgas infestantes nesse sistema, entendeu-se que o tempo de residência no estuário poderá constituir um parâmetro-chave para caracterizar a vulnerabilidade deste sistema à eutrofização.

Neste trabalho referem-se os procedimentos relativos à modelação hidrodinâmica (2D-H) deste sistema, e procura-se evidenciar que a adopção de um tempo de residência único para os estuários constitui uma simplificação grosseira, ao negligenciar a sua variabilidade espaço-temporal, originada pela variação dos caudais fluviais, das características da maré, das cinéticas associadas a substâncias não-conservativas e à especificidade de cada descarga (local, carga poluente, duração e período do ciclo de maré em que ela ocorre). Apresentam-se alguns dos resultados da análise de sensibilidade da variação do tempo de residência com esses factores, visando a identificação dos mais relevantes, de modo a contribuir, no futuro, para uma selecção das práticas mais adequadas à gestão integrada deste ecossistema estuarino.

PALAVRAS-CHAVE: gestão de sistemas estuarinos; controlo de fontes de poluição, modelação matemática; tempos de residência; eutrofização; estuário do Rio Mondego.



INTRODUÇÃO

A eutrofização dos sistemas estuarinos tem sido agravada pela actividade antropogénica geradora de descargas excessivas de nutrientes nestes meios receptores, devidas quer à expansão dos aglomerados urbanos ribeirinhos, quer à intensificação das actividades agrícola e aquícola. A importância deste património natural, bem como a multiplicidade deles dependentes, justifica e exige a necessidade de um estudo aprofundado tendo como objectivo o desenvolvimento de instrumentos de gestão que permitam assegurar os padrões de qualidade da água adequados à conservação destes ecossistemas.

O incremento progressivo destas descargas teve consequências gravosas na ecologia dos estuários, ao propiciar a eutrofização dessas massas hídricas, que tem como consequência a proliferação de microalgas (causadoras de cor e turvação e eventual colmatação dos filtros das ETA's) e/ou a alteração da estrutura macroalgal (afectando a comunidade heterotrófica) (Pardal, 1998). Esta ocorrência provoca uma redução substancial das concentrações de oxigénio dissolvido, conduzindo a situações de anaerobiose, que, em situações extremas, levam à ocorrência de ambientes anóxicos, com produção de sulfídrico, e ao desenvolvimento cianobactérias, que, ao libertarem substâncias de elevada toxicidade, colocam em risco a biodiversidade do ecossistema e a utilização desse meio hídrico como origem de abastecimento de água para consumo humano.

Face à especificidade de cada sistema estuarino e à necessidade de obter informação sobre os mecanismos que desencadeiam a ocorrência de “blooms” algais e que regulam a sua abundância, foram desenvolvidas várias campanhas de amostragem no estuário do rio Mondego, que permitiram um conhecimento mais sustentado de alguns factores determinantes do processo de eutrofização do braço sul deste estuário, nomeadamente, a precipitação, os gradientes de salinidade e as condições hidrodinâmicas. Tratando-se de um sistema pouco profundo, a sua hidrodinâmica é fortemente influenciada pelo escoamento fluvial (rios Mondego e Pranto), pela batimetria e pelas acções da maré e do vento, determinando condições de mistura e transporte que afectam decisivamente as interacções associadas aos processos biogeoquímicos.

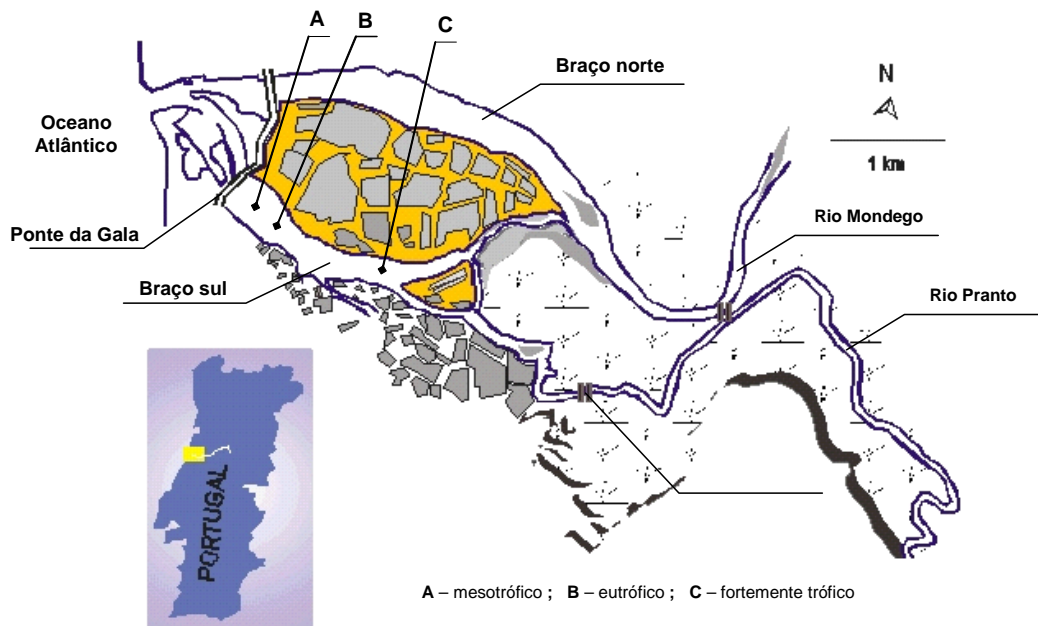
Este estudo tem como objectivo contribuir para a avaliação da influência da hidrodinâmica estuarina no controlo da proliferação de macroalgas infestantes, sendo para isso necessário recorrer à modelação matemática do sistema (1D e 2D-H) de modo a estimar tempos de residência, reconhecidos como um indicador fundamental da hidrodinâmica estuarina e que poderá revelar-se como um parâmetro-chave na avaliação da respectiva vulnerabilidade à eutrofização (Vieira *et al.*, 1998). Neste trabalho procurou-se evidenciar importância dos tempos de residência de substâncias no interior do sistema, analisando a sua variabilidade espaço-temporal em função de factores como o caudal fluvial e a especificidade de cada descarga (local, carga poluente, duração e período do ciclo de maré em que ela ocorre), prevendo-se, em trabalhos futuros, a análise de outros factores. Estes conhecimentos, associados à modelação matemática para simulação de cenários, poderão desempenhar um papel importante na gestão integrada de ambientes estuarinos quando enquadrados em sistemas de suporte à decisão (Vieira e Lijklema, 1989).

ÁREA DE ESTUDO

O rio Mondego drena uma bacia hidrográfica com uma área de cerca de 6670 km² e uma precipitação média anual entre 1000 e 1200 mm. O estuário deste rio situa-se no litoral centro de Portugal, imediatamente a sul da cidade da Figueira da Foz, sendo constituído por dois braços (norte e sul), separados pela ilha da Murraceira, com características hidrológicas muito distintas e que se reúnem a cerca de 1 km da barra (Figura 1). Este estuário está sujeito a um grande *stress* ambiental devido à descarga de efluentes domésticos e industriais não tratados e à actividade intensiva de orizicultura e aquíicultura, favorecendo a eutrofização progressiva do braço sul, que ao gerar condições de anoxia nos sedimentos, induz uma alteração da estrutura das camadas bênticas e da própria cadeia trófica (Pardal, 1998).

O braço norte é mais profundo (4 a 8 metros *versus* 2 a 3 m, em preia-mar) e recebe o caudal fluvial do rio Mondego, já que o assoreamento ocorrido na secção montante do braço sul apenas recebe o escoamento fluvial do rio Pranto, que é controlado por comportas destinadas a assegurar as quantidades de água necessárias à orizicultura e a impedir a intrusão de água salina durante a preia-mar. Comportando-se como uma lagoa costeira, o braço sul apresenta uma grande homogeneidade da coluna de água ao longo do ciclo de maré.

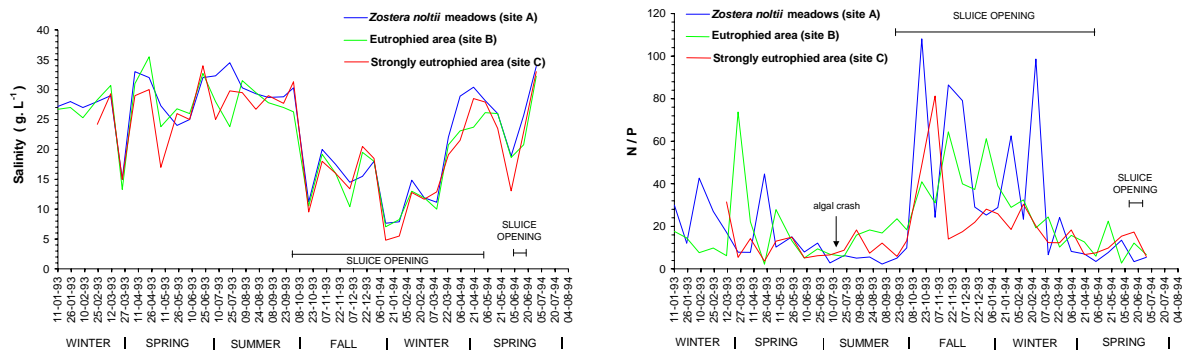
Figura 1: Estuário do rio Mondego: localização, pontos de amostragem (A, B, C), vista aérea e estado trófico do braço sul



MATERIAIS E MÉTODOS

Desde 1993 tem vindo a ser efectuada campanhas de amostragem quer a nível dos sedimentos nos pontos de amostragem A, B e C assinalados na Figura 1, quer a nível da coluna de água em três locais de amostragem: Ponte da Gala, Esteiro de Lavos e foz do rio Pranto. Além disso, foram registados vários eventos associados à abertura da comporta do rio Pranto e aos perfis de velocidades na Ponte da Gala. A selecção dos pontos A, B e C foi determinada pela observação, na última década, dum gradiente de eutrofização do braço sul do estuário, associado à substituição macrófitas (*Zostera noltii*) por macroalgas verdes (*Enteromorpha* spp. e *Ulva* spp.), presumivelmente devido à persistência de nutrientes na coluna de água e ao assoreamento entretanto ocorrido na sua secção de montante (Pardal, 1998). O facto de as exuberâncias (*blooms*) algais não terem ocorrido em anos de elevada pluviosidade, a que correspondem elevados caudais fluviais e baixas salinidades, veio acentuar a necessidade do estudo da influência da hidrodinâmica, nomeadamente os tempos de residência de nutrientes limitantes e da velocidade de arrastamento das macroalgas, nestas ocorrências e no processo de eutrofização em geral. Na Figura 2 apresenta-se um registo dos dados de campo obtidos entre Janeiro de 1993 e Agosto de 1994 para duas das variáveis (salinidade e rácio N:P) relacionadas com o crescimento algal.

Figura 2: Resultados da campanha de amostragem (salinidade e rácio N:P)

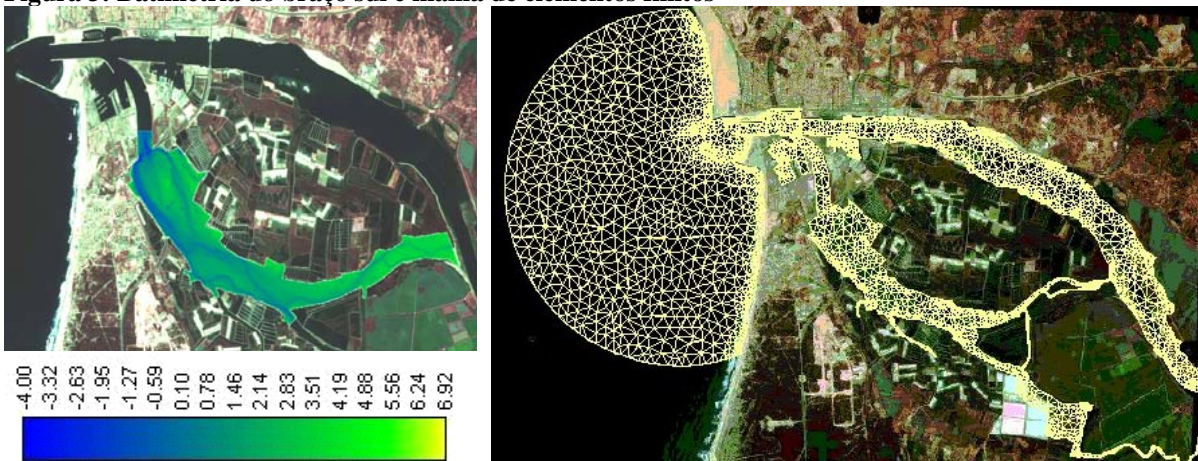


Os locais de amostragem da coluna de água foram seleccionados de modo a permitir caracterizar a hidrodinâmica estuarina, nomeadamente as variações de velocidade e a distorção (atraso e assimetria) em relação ao ciclo de maré, e obter dados de qualidade da água associados aos parâmetros hidráulicos.

Com base nestes dados procedeu-se à modelação matemática do estuário do rio Mondego, inicialmente apenas restrito ao braço sul e unidimensional (1D), baseada no modelo *Duflow*, com o objectivo de estimar o balanço de nutrientes (nitratos, nitritos e fosfatos), tendo-se constatado a existência de um elevado consumo de nitratos no interior do sistema (Duarte, 1997).

Posteriormente, face a influência do caudal fluvial do rio Mondego, em situações de cheia, na qualidade da água do braço sul através do prisma de maré, verificou-se ser necessário recorrer à modelação bidimensional (2D-H) da totalidade do estuário, aplicando os modelos RMA2 (US WES-HL, 1996), para estimar a altura e a velocidade média da água ao longo do ciclo de maré e RMA4, para avaliar a distribuição espácio-temporal da concentração de parâmetros de qualidade da água. Para esse efeito, procedeu-se à digitalização da batimetria e à definição de uma malha de elementos finitos (Figura 3).

Figura 3: Batimetria do braço sul e malha de elementos finitos



Na análise de sensibilidade à variação espacial do tempo de residência considerou-se uma substância conservativa e as acções da maré, do vento e baroclínicas invariáveis. Para cada ponto do sistema, considerou-se que o tempo de residência corresponde ao período de tempo em que a concentração da substância permanece superior ao seu valor inicial (Duarte *et al.*, 2001)

Os cenários simulados nesta na primeira fase do estudo estão sistematizados na Tabela 1, apresentando-se neste trabalho os resultados correspondentes aos cenários C1, C2, C5 e C10. A maré seleccionada apresenta alturas de água entre 0,7 m (baixa-mar) e 3,3 m (preia-mar), correspondendo a um prisma de maré no braço sul estimado em $2,6 \times 10^6 \text{ m}^3$.

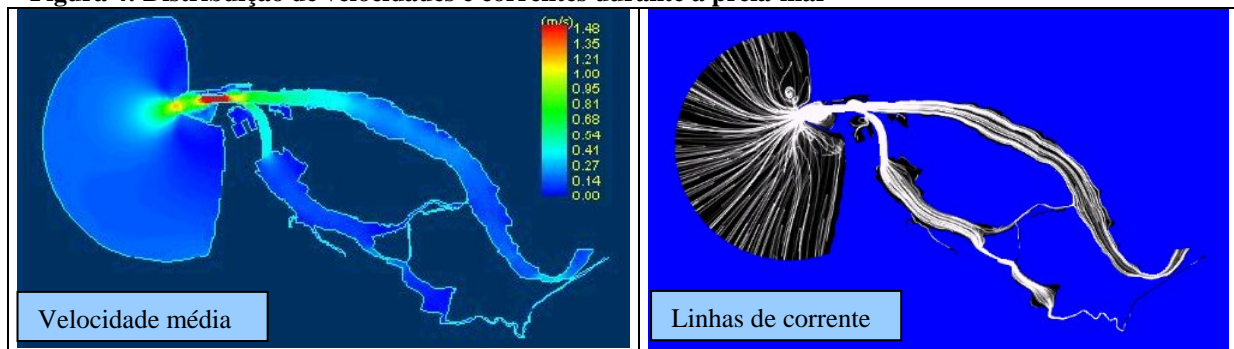
Tabela 1: Cenários simulados

Caudal do rio Pranto (m ³ /s)	5				15			
Massa da substância (kg)	1800		3600		1800		3600	
Instante da descarga (h)	6	9	6	9	6	9	6	9
Duração da descarga (h)								
1	C1	C2	C6	C7	C11	C12	C16	C17
3	C3	C4	C8	C9	C13	C14	C18	C19
6	C5		C10		C15		C20	

RESULTADOS

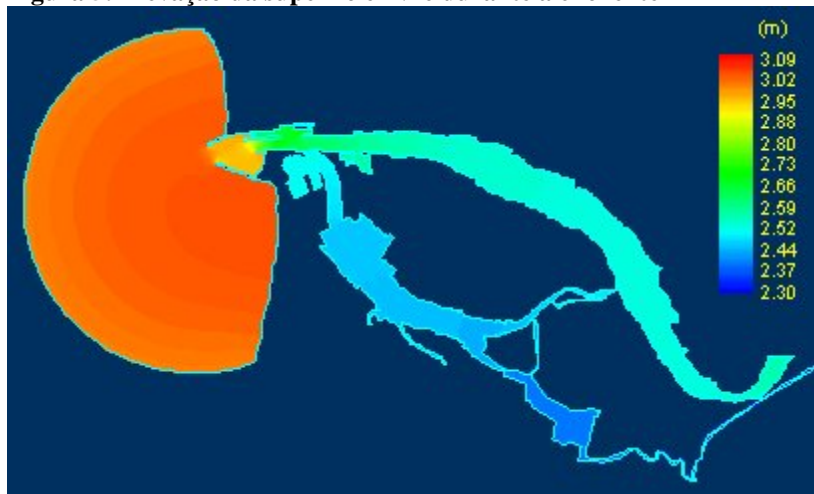
Nas Figura4 apresentam-se alguns resultados da modelação hidrodinâmica que foram calibrados com os dados obtidos nas campanhas de amostragem e que são utilizados posteriormente no modelo de qualidade da água.

Figura 4: Distribuição de velocidades e correntes durante a preia-mar



A Figura 5 ilustra uma situação durante a enchente, que demonstra claramente o atraso na elevação da superfície livre do escoamento no braço sul, relativamente ao do braço norte, devido à sua configuração geométrica e batimetria.

Figura 5: Elevação da superfície livre durante a enchente



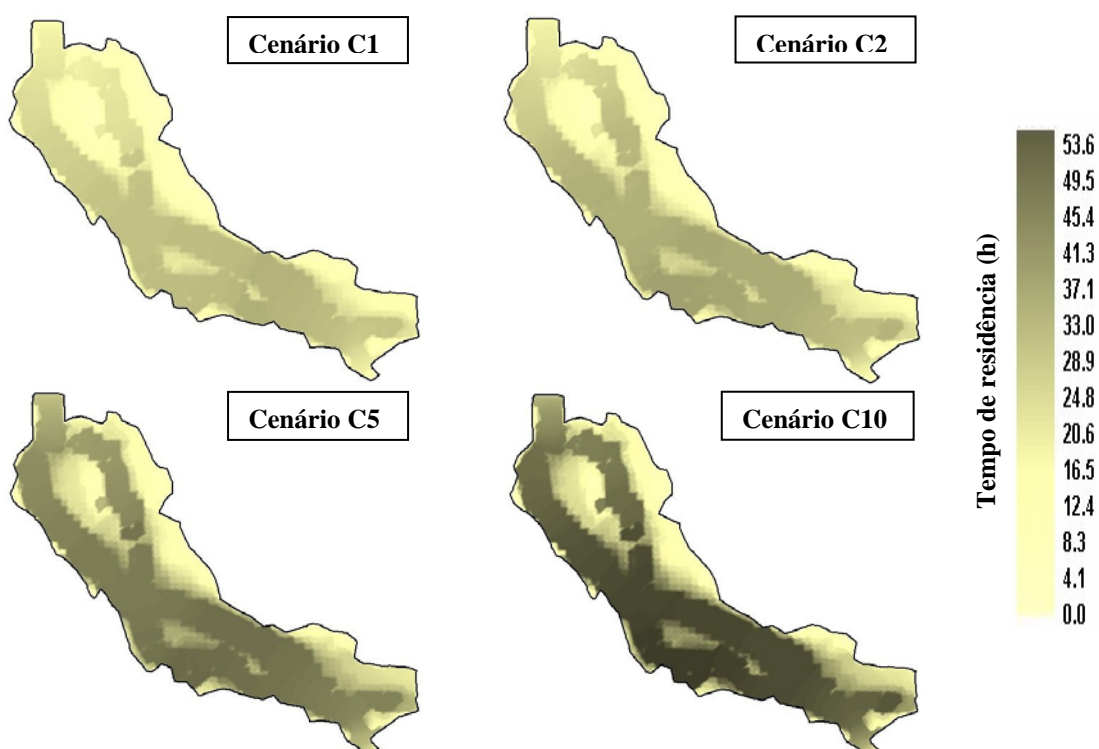
Os dados obtidos nas campanhas de amostragem têm sido analisados em trabalhos anteriores (Martins *et al.*, 2001) no sentido de avaliar o efeito da hidrodinâmica estuarina nos valores das principais variáveis bioquímicas, tendo-se então chegado às seguintes conclusões:

- o caudal fluvial do rio Pranto depende da precipitação e da abertura das comportas, a qual depende fundamentalmente da quantidade de água requerida para a orizicultura, facto que determina um desfasamento temporal desses eventos;

- verifica-se uma correspondência directa entre os valores máximos da velocidade e as marés de maior amplitude. Esses valores são mais elevados quando ocorre a abertura das comportas, aumentando a turvação na coluna de água devido ao incremento da ressuspensão de sedimentos;
- a salinidade varia na razão inversa dos caudais fluviais, permanecendo elevada (> 20 ‰) para caudais frequentes, mas atingindo valores quase nulos para caudais de cheia semelhantes aos ocorridos em Janeiro de 2001;
- a *Enteromorpha* spp. representa mais de 85% da totalidade das macroalgas verdes e apresenta importantes variações anuais. O seu crescimento depende das afluições de água doce ao sistema durante o primeiro trimestre do ano, aumentando substancialmente para valores da salinidade entre 17-22‰ (Martins *et al.*, 1999);
- as concentrações de nitritos e nitratos aumentam durante o Outono e o Inverno, estando fortemente correlacionadas com os caudais fluviais e não com a precipitação.
- as concentrações mais elevadas de ortofosfatos na coluna de água ocorrem nos meses de Verão, pelo facto do aumento da temperatura favorecer a libertação do fósforo acumulado nos sedimentos;
- a produção primária nem sempre é limitada pelo fósforo, como seria expectável face à ocorrência de elevados valores do rácio N:P, dado que a assimilação de nutrientes pelas macroalgas depende do gradiente entre a concentração desses nutrientes nas suas células e na coluna de água;
- no que se refere ao transporte de nutrientes, a fracção dissolvida é a mais representativa, seguindo-se a fracção em suspensão, já que a flutuação de macroalgas só é significativa durante a ocorrência (sazonal) de *blooms* algais;
- o aumento da velocidade da corrente diminui a capacidade de fixação da *Enteromorpha* spp. às conchas presentes nos sedimentos, podendo mesmo arrastar as suas folhas quando estas atingem um porte excessivo (Lowthion *et al.*, 1985);

Os valores dos tempos de residência obtidos, no braço sul do estuário, para os diferentes cenários simulados permitem estabelecer as zonas mais vulneráveis ao processo de eutrofização, admitindo que o enriquecimento em nutrientes pode ser traduzido pela maior permanência dessas substâncias nas zonas consideradas, por isso, mais sensíveis. Na Figura 6 apresentam-se os resultados da simulação de alguns cenários.

Figura 6: Variação espacial do tempo de residência





XI SILUBESA Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

A comparação dos resultados dos cenários C1 e C5 permite avaliar o efeito da duração da descarga na variação dos valores do tempo de residência. Por sua vez, a comparação dos cenários C1 e C2 ilustra a menor sensibilidade da variação dos tempos de residência ao instante do ciclo de maré em que se inicia a descarga (enchente ou vazante), mantendo-se constantes a massa e a duração dessa descarga, bem como o caudal fluvial no rio Pranto. O efeito da carga poluente nos tempos de residência pode ser visualizado através da comparação dos cenários C5 e C10.

Nestas condições, a duração das descargas afigura-se como um dos factores determinantes da variação dos tempos de residência. Com base nesta informação, a gestão da qualidade da água neste sistema, indicaria, como procedimento adequado, uma operação das comportas, se necessária, baseada em aberturas mais frequentes mas de menor duração.

CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

Face à especificidade de cada ecossistema estuarino, a identificação das variáveis que afectam a proliferação de biomassa algal e a quantificação da sua influência contribuem decisivamente para aprofundar os conhecimentos dos processos de eutrofização e para encontrar as soluções mais adequadas para ultrapassar este grave problema ambiental.

A modelação hidrodinâmica deste estuário confirmou a existência de um atraso significativo do início da enchente, no braço sul em relação ao braço norte;

No braço sul a duração da enchente vai diminuindo para montante, sendo sempre inferior à duração da vazante, devido à acção dos caudais fluviais e à sua baixa profundidade;

O caudal fluvial, a precipitação e a distribuição da salinidade, bem como a localização, a duração das e a carga poluente das descargas são factores determinantes quer do tempo de retenção de nutrientes no sistema quer do crescimento de biomassa algal, favorecendo ou contrariando a fixação de macroalgas infestantes.

Apesar do seu carácter preliminar, os resultados obtidos representam um passo importante na definição da escala temporal dos processos de eutrofização em sistemas estuarinos, já que os resultados da modelação da qualidade da água confirmaram o gradiente de eutrofização revelado pelas medições efectuadas no braço sul do estuário do rio Mondego, validando desse modo a metodologia aplicada.

Sendo o caudal fluvial do rio Pranto artificialmente controlado por comportas, os resultados obtidos neste estudo poderão dar um contributo importante na optimização dos procedimentos operacionais destas estruturas hidráulicas, de modo a mitigar o impacto negativo da descarga excessiva de nutrientes neste meio hídrico receptores e a promover uma gestão sustentada de ambientes estuarinos vulneráveis a fenómenos de eutrofização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Duarte A.A.L.S. (1997). *Modelos de Qualidade da Água em Estuários*. Trabalho de Síntese. Universidade do Minho, Braga, Portugal.
2. Duarte, A.A.L.S., Pinho J.L.S., Pardal M.A., Neto J.M., Vieira, J.M.P., Santos F.S. (2001). *Effect of Residence Times on River Mondego Estuary Eutrophication Vulnerability*. *Water Science and Technology*, **44** (2-3), 329-336.
3. Lowthion D., Soulsby P.G. e Houston M.C.M. (1985). *Investigation of an eutrophic tidal basin: Part. 1 – Factors affecting the distribution and biomass of macroalgae*. *Marine Environment Research.*, **15**, 263-284.
4. Martins I, Oliveira J.C., Flindt M.R. and Marques J.C. (1999). *The Effect of Salinity on the Growth of the Enteromorpha intestinalis (Clorophyta) in the Mondego Estuary*. *Acta Oecologica*, **20** (4), 259-265.



XI SILUBESA
Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

5. Martins I., Pardal M.A., Lillebø A.I., Flindt M.R., Marques J.C. (2001). *Hydrodynamics as a Major Factor Controlling the Occurrence of Green Macroalgal Blooms in a Eutrophic Estuary: a Case Study on the Influence of Precipitation and River Management*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, **52**, 165-177.
6. Pardal M.A (1998). *Impacto da Eutrofização nas Comunidades Macrobentônicas do Braço Sul do Estuário do Mondego (Portugal)*. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Portugal.
7. US WES-HL (1996). Users Guide to RMA2 Version 4.3, US Army Corps of Engineers - Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory. Vicksburg, USA.
8. Vieira J.M.P. e Lijklema L. (1989). *Development and Application of a Model for Regional Water Quality Management*. Water Research, **23** (6), 767-777.
9. 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** (3), 121-128