

SISTEMA DE INFORMAÇÃO PARA A MODELAÇÃO MATEMÁTICA DE DERRAMES PETROLÍFEROS EM ZONAS COSTEIRAS. APLICAÇÃO AO DERRAME DO N/T PRESTIGE

Rui C. M. B. Gomes¹; José L. S. Pinho²; José M. P. Vieira³; José S. A. Carmo⁴.

¹*Aluno de Mestrado, ruibgomes@vizzavi.pt, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga, Portugal*

²*Professor Auxiliar, jpinho@civil.uminho.pt, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga, Portugal*

³*Professor Catedrático, jvieira@reitoria.uminho.pt, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga, Portugal*

⁴*Professor Auxiliar, jsacarmo@dec.uc.pt, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Pinhal de Marrocos, COIMBRA, Portugal*

RESUMO

Neste artigo apresenta-se um sistema de informação em desenvolvimento no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho para apoio à gestão de derrames acidentais de produtos petrolíferos em águas costeiras da Península Ibérica. Caracterizam-se as bases de dados utilizadas no sistema de informação e os modelos matemáticos incluídos. A componente de modelação do sistema de informação inclui dois modelos hidrodinâmicos adequados à simulação de correntes em águas costeiras, um modelo de transporte e um modelo evolutivo das propriedades dos produtos petrolíferos derramados. A informação georeferenciada é organizada num Sistema de Informação Geográfica. As potencialidades do sistema desenvolvido são ilustradas com a apresentação de resultados preliminares obtidos para o derrame do N/T Prestige.

ABSTRACT

This paper presents an information system that is being developed at the Department of Civil Engineering of the University of Minho as a management support tool for accidental oil spills in coastal waters of the Iberian Peninsula. Information system databases are characterized and the used models are presented. Two different hydrodynamic models for coastal waters, one mass transport model and an oil properties model are included as a component of the information system. Geo-referenced data is used in the implementation of a Geographical Information System. Some illustrative preliminary data processed through the information system with reference to the N/T Prestige oil spill are presented.

Palavras-Chave: derrames petrolíferos, modelação matemática, sistemas de informação

1. INTRODUÇÃO

Apesar dos muitos desenvolvimentos verificados nos últimos anos na proliferação de alternativas às fontes de energia convencionais, a nossa sociedade ainda baseia o seu desenvolvimento na utilização de combustíveis fósseis, principalmente no petróleo. A indústria utiliza o petróleo e seus derivados no fabrico de diversos produtos, tais como: plásticos, fertilizantes, combustíveis e produtos químicos, que continuarão a ser necessários no futuro.

O movimento de petróleo, desde a fonte ao consumidor final, envolve cerca de dez a quinze trasfegas para os diferentes meios de transporte marítimo e terrestre (FINGAS, 2001), sendo armazenado em diferentes locais para posterior transferência. Assim, os acidentes podem ocorrer em qualquer uma das operações de armazenamento e transporte. Os derrames de produtos petrolíferos são frequentes devido essencialmente às grandes quantidades utilizadas, estimando-se que são utilizadas no mundo inteiro 10 milhões de toneladas de petróleo, diariamente (FINGAS, 2001).

A remoção de produtos petrolíferos derramados acarreta elevados custos. Estima-se que estes custos se situem entre US\$20 a US\$200 por litro derramado, dependendo do local e do tipo de produto petrolífero (FINGAS, 2001).

Nesta perspectiva torna-se necessário gerir o risco de derrame de forma a minimizar ao máximo tanto o seu impacto negativo no meio ambiente, como os custos de limpeza.

O grande desenvolvimento das mais recentes tecnologias informáticas permite a utilização de novas ferramentas de

gestão ambiental, adequadas ao processamento eficiente da grande quantidade de informação necessária ao apoio à gestão de derrames acidentais. Destacam-se as ferramentas de modelação que adquirem um papel determinante na previsão da evolução de manchas, permitindo a adopção de medidas mitigadoras dos impactos negativos associados aos derrames (COSTA e ANTUNES DO CARMO, 1999, PINHO et al, 2002). A informação resultante das simulações realizadas com modelos, quando integrada em ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permite uma adequada análise dos resultados obtidos.

Neste artigo descrevem-se os diversos componentes de um Sistema de Informação (SI) em desenvolvimento no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho de apoio à gestão de derrames acidentais de produtos petrolíferos em águas marinhas. Caracterizam-se os diferentes componentes do SI, nomeadamente: informação de base utilizada e respectivo processamento, metodologia de integração da informação georeferenciada num SIG e ferramentas de modelação integradas no sistema. Ilustram-se as potencialidades do SI através da apresentação de resultados preliminares da informação processada relativa ao derrame ocorrido com o N/T Prestige.

2. COMPONENTES DO SISTEMA

Com o SI em desenvolvimento pretende-se conseguir a sistematização de toda a informação necessária à gestão de derrames acidentais que possam ocorrer junto à costa da Península Ibérica. O sistema é constituído por três

componentes principais (Figura 1): uma componente em que é estruturada toda a informação de base envolvida neste tipo de estudos, uma outra componente formada por um conjunto de modelos matemáticos vocacionados para as modelações hidrodinâmica e de transporte das manchas provocadas por derrames e, finalmente, uma terceira componente baseada numa ferramenta de SIG, que permite a organização e análise de dados e resultados de modelos georeferenciados.



Figura 1 - Principais componentes do Sistema de Informação.

A informação encontra-se estruturada em bases de dados nos formatos originais. Sempre que é necessária recorre-se a uma aplicação desenvolvida para o efeito, realizando-se as tarefas de processamento necessárias à sua utilização nas diferentes componentes do SI.

2.1. Informação de base

A informação de base do sistema foi organizada em quatro conjuntos distintos: batimetria, características do derrame, informação meteorológica e outras características do meio receptor em que ocorre o acidente.

Os dados relativos à batimetria são constituídos essencialmente pela base global de batimetria ETOPO2 (SMITH e SANDWELL, 1997), que apresenta uma resolução espacial de 2', e pela base global de linhas costeiras de alta resolução GSHHS (WESSEL e SMITH, 1996). Esta informação encontra-se definida em coordenadas geográficas. Inclui-se ainda outra informação batimétrica, com maior resolução espacial, de alguns estuários da Península Ibérica. A informação é utilizada para a construção dos modelos hidrodinâmicos e de transporte e na criação do SIG associado aos acidentes estudados. Assim, a sua utilização nas referidas ferramentas obriga a um processamento prévio em que se procede à extração das bases originais da informação relativa à área de interesse, à eventual transformação para um sistema métrico de coordenadas e posterior gravação em formatos adequados. Estas tarefas são realizadas em aplicações especificamente desenvolvidas para o efeito. Eventuais tarefas de edição desta informação são realizadas numa ferramenta de CAD (Computer Added Design), utilizando-se o formato DXF (Drawing eXchange Format).

O conjunto de dados relativos às características do derrame compreende toda a informação sobre o acidente e sobre o produto derramado. Esta informação é crucial para a posterior modelação da evolução das propriedades dos produtos derramados. Dada a enorme variedade de produtos petrolíferos, está a ser organizada uma base de dados em que se reúnem propriedades de diferentes produtos: massa volúmica, tensão superficial, viscosidade, constante de emulsificação, fracção evaporável e composição química (hidrocarbonetos saturados, hidrocarbonetos aromáticos, resinas e asfaltenos).

O conjunto de dados meteorológicos está estruturado de forma a receber informação relativa a estações meteorológicas costeiras e informação (resultante quer de observações quer de simulações com modelos atmosféricos) com cobertura espacial bidimensional. São registados valores das temperaturas, da pressão atmosférica e da velocidade do vento. Este conjunto de dados será alimentado principalmente a partir das bases de dados relativas às estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia e do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF, 2003). O deslocamento das manchas em zonas marinhas é essencialmente dependente da velocidade do vento. Assim, foi desenvolvida uma aplicação que permite gerar os campos de correntes resultantes, a partir da soma vectorial das correntes calculadas por um modelo hidrodinâmico bidimensional com uma parcela que é obtida directamente a partir das velocidades do vento (registadas ou previstas), ou calcular, a partir destas últimas, as tensões tangenciais a aplicar como condição de fronteira na superfície livre, utilizando o modelo hidrodinâmico tridimensional.

Finalmente, no quarto conjunto de dados, organiza-se toda a informação relativa às massas de água da região onde ocorre o acidente. O conjunto é formado essencialmente por variáveis oceanográficas: dados de temperatura e salinidade, intensidade das correntes e características da maré e da agitação marítima. Relativamente à temperatura e salinidade das massas de água oceânicas recorre-se à base de dados LEVITUS94 (LEVITUS e BOYER, 1994) e a dados resultantes de outras campanhas oceanográficas realizadas esporadicamente. Recorre-se ainda à base de dados do projecto ARGOS (FRATANTONI, 2001). As características das marés são definidas recorrendo-se ao modelo SR95 (JPL, 1996). Os dados de agitação marítima (alturas de onda significativa e respectivos períodos) são obtidos a partir de redes de medida pertencentes a entidades espanholas e portuguesas, cujas estações se localizam na proximidade da costa. Estas informações são essencialmente utilizadas no estabelecimento das condições iniciais dos modelos hidrodinâmicos e na sua calibração e validação. Salienta-se que este é um dos conjuntos de dados mais frágil do SI, uma vez que as séries disponíveis raramente são compatíveis com as escalas espaciais e temporais das simulações realizadas com os modelos.

2.2. SIG

Os Sistemas de Informação Geográfica integram e permitem gerir dados georeferenciados e informação alfanumérica numa plataforma de visualização espacial, permitindo uma melhor compreensão dos fenómenos a serem analisados (MATOS, 2001). A informação georeferenciada é tratada com o software ArcView (ESRI, 1996). No SIG associado a um determinado acidente são incluídos desde temas relativos à batimetria da região, linha de costa, estações meteorológicas, bóias de registo da agitação marítima, delimitação de zonas costeiras sensíveis, até aos resultados obtidos sobre previsões das trajectórias das manchas. Consegue-se desta forma a integração uniformizada da informação contida ou processada nas diferentes componentes do SI. Para a inclusão dos resultados obtidos pelos modelos de simulação desenvolveram-se metodologias e aplicações específicas que realizam as tarefas de conversão de formatos e a síntese necessária.

2.3. Ferramentas de modelação

As ferramentas de modelação disponíveis actualmente no SI compreendem programas de modelação hidrodinâmica (um programa bidimensional no plano horizontal -2DH- e um programa quasi-tridimensional –quasi-3D), um programa para simulação do transporte das manchas e um programa de modelação da evolução das características dos produtos petrolíferos.

Os modelos hidrodinâmicos 2DH são implementados no programa RMA2, baseado num método de elementos finitos (WES-HL, 1996). Os modelos quasi-3D são implementados recorrendo ao programa POM (MELLOR, 1998), baseado num método de diferenças finitas. Nas situações em que a estrutura vertical das correntes marítimas possa ser desprezada o cálculo das velocidades é realizado recorrendo a modelos 2DH. Nos outros casos utilizam-se as correntes calculadas para a camada superficial recorrendo a um modelo quasi-3D.

Para o cálculo do transporte das manchas recorre-se à seguinte equação:

$$\vec{U} = \vec{U}_w + C_v \vec{U}_v \quad (1)$$

em que a velocidade resultante $\vec{U} \equiv (U, V)$ é calculada a partir das velocidades obtidas pelo modelo hidrodinâmico 2DH $\vec{U}_w \equiv (U_w, V_w)$, sendo $\vec{U}_v \equiv (U_v, V_v)$ as componentes da velocidade do vento e C_v é um coeficiente de atrito empírico. No caso de se recorrer a um modelo quasi-3D para o cálculo das correntes considera-se $\vec{U} \equiv (U, V) \equiv \vec{U}_w$, em que $\vec{U}_w \equiv (U_w, V_w)$ são as componentes horizontais da velocidade na camada superficial.

A equação de transporte das manchas apresenta a forma de uma equação euleriana de conservação da massa:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UC) + \frac{\partial}{\partial y}(VC) - \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + k_c C = 0 \quad (2)$$

onde, $C = \rho \delta$ é a concentração local de produto petrolífero derramado, t é o tempo, ρ é a massa volúmica do produto petrolífero, δ é a espessura da mancha, E_x e E_y são os coeficientes de difusão segundo as direcções x e y , respectivamente, e k_c é um coeficiente de decaimento relacionado com os processos que originam perdas de massa da mancha (evaporação e dissolução). A equação anterior é resolvida numericamente por uma versão modificada do programa RMA4 (PINHO, 2001), considerando uma profundidade unitária em todo o domínio.

A fracção de perdas por evaporação (F_e) é determinada a partir da seguinte equação (BUCKANAN e HURFORD, 1988):

$$\frac{dF_e}{dt} = \frac{K A_o}{V_o} \exp\left[A - \frac{B}{T}(T_0 + T_G F_e)\right] \quad (3)$$

onde, $K = 2.5 \times 10^{-3} U_v^{0.78}$, T = temperature do produto ($^{\circ}\text{K}$); T_0 = temperature inicial (quando $F_e = 0$); $A = 6.3$; $B = 10.3$; T_G = gradiente da curva de destilação ($^{\circ}\text{K}$); μ = viscosidade dinâmica (cP); A_o = área da mancha (m^2); e V_o = volume de produto petrolífero (m^3).

As perdas por dispersão vertical são modeladas utilizando a taxa proposta por MACKAY et al. (1980):

$$Y_d = \frac{0.11(U_v + 1)^2}{1 + 50\mu \delta \gamma_{ow}} \quad (4)$$

onde μ = viscosidade dinâmica (cP); δ = espessura da mancha (cm); and γ_{ow} = tensão superficial produto-água (dyne/cm).

Considerando as perdas anteriores, a variação de volume do produto derramado pode ser expressa por (considerando V_{o0} = volume inicial do produto):

$$\frac{dV_o}{dt} = -V_{o0} \frac{dF_e}{dt} - Y_d V_o \quad (5)$$

O crescimento da área da mancha é modelado utilizando a seguinte expressão (MACKAY et al, 1980):

$$\frac{dA_o}{dt} = K_1 A_o^{1/3} \left[\frac{V_o}{A_o} \right]^{4/3} \quad (6)$$

O processo de emulsificação apresenta a seguinte formulação (considerando Y como a fracção de água no produto petrolífero):

$$\frac{dY}{dt} = 2.0 \times 10^{-6} (U_v + 1)^2 \left(1 - \frac{Y}{Y^F} \right) \quad (7)$$

com, $Y^F = 0.70$ (crudes pesados) a 0.25 (fracções leves de petróleo). As evoluções da viscosidade dinâmica e da massa volumica são traduzidas pelas seguintes expressões:

$$\frac{d\mu}{dt} = C_\mu \mu_0 \frac{dF_e}{dt} + \frac{2.5\mu_0}{1 - Y^F Y} \frac{dY}{dt} \quad (8)$$

$$\rho_e = Y\rho_w + (1 - Y)(\rho_o + Y^F F_e) \quad (9)$$

com μ_0 = viscosidade dinâmica inicial (cP) e C_μ é a taxa de recuperação mecânica do produto ao longo do tempo: $C_\mu = 1$ (gasolina) a 15 (crudes pesados). Para a resolução das Eqs. 3 a 9 recorre-se a uma aplicação desenvolvida para o efeito, que permite realizar a sua integração numérica.

3. CASO DE ESTUDO

O acidente com o N/T Prestige ocorreu a 13 de Novembro de 2002. O navio de casco simples transportava cerca de 77 000 toneladas de fuelóleo pesado, tendo ocorrido uma ruptura do seu casco, ao largo do cabo Finisterra (Figura 2). O navio derramou mais de 30 000 toneladas (CCMM, 2003). O fuelóleo derramado pelo Prestige é classificado como fuel oil nº.6, um produto muito viscoso, praticamente insolúvel e com uma cor característica de petróleo (CEDRE, 2003).

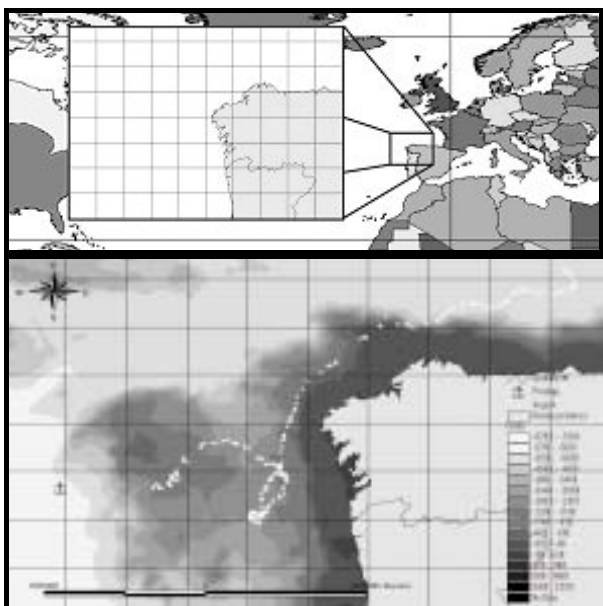


Figura 2 - Derrame do N/T Prestige: localização e dados de batimetria e trajetória de um sistema derivante.

A informação relativa a este acidente tem sido utilizada como caso de teste do SI em desenvolvimento. Da figura anterior, obtida do SIG criado para este acidente, consta informação relativa à batimetria, características do acidente (localização do afundamento) e dados relativos ao meio (trajetória de um sistema derivante utilizado para a caracterização das correntes superficiais). Na Figura 3 apresentam-se uma malha de elementos finitos, utilizada para a simulação das correntes (programa

RMA2) e o transporte de manchas (programa RMA4), e o campo de velocidades correspondente a uma simulação hidrodinâmica (2DH).

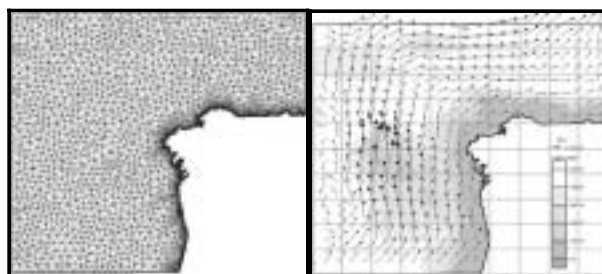


Figura 3 - Derrame do N/T Prestige: malha de elementos finitos e campo de velocidades da corrente resultante de uma simulação hidrodinâmica.

Na Figura 4 apresentam-se, a título ilustrativo, os resultados obtidos para a evolução de uma mancha de fuelóleo. Na simulação realizada foram consideradas condições de corrente superficial simplificadas: considerou-se uma corrente uniforme de Sudoeste durante as primeiras seis horas de simulação e posteriormente uma corrente de igual intensidade mas proveniente de Oeste durante dezoito horas consecutivas. Nas simulações numéricas em curso procura-se reproduzir as trajetórias dos sistemas derivantes lançados durante a ocorrência do acidente, calibrando-se desta forma os modelos utilizados no SI.

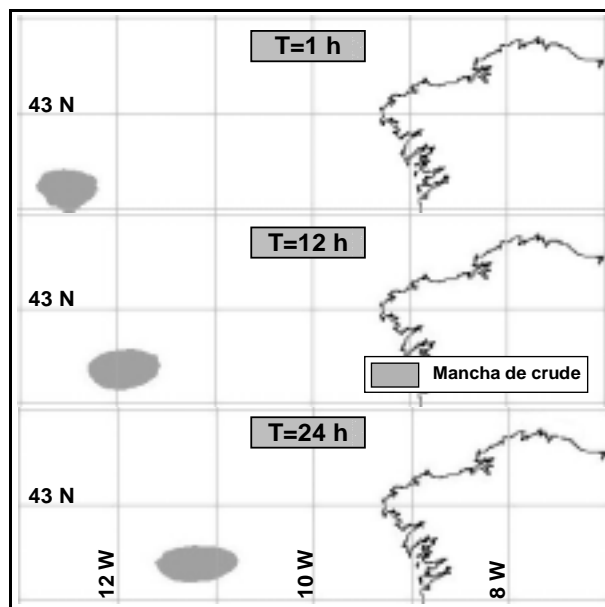


Figura 4 - Resultados da simulação do transporte de uma mancha de fuelóleo.

4. CONCLUSÃO

O trabalho apresentado constitui uma etapa intermédia do desenvolvimento de um SI vocacionado para o apoio à gestão de derrames petrolíferos em zonas costeiras.

Foram caracterizadas as principais fontes de informação em que se baseia o sistema e apresentadas as ferramentas de modelação que lhe conferem enormes potencialidades

em termos de capacidade de previsão da evolução de derrames acidentais.

Foram já desenvolvidas a maioria das aplicações específicas para o processamento da informação a ser utilizada nas diferentes componentes do SI. A utilização de uma ferramenta de SIG facilita a integração e análise da informação (muito diversificada) envolvida.

WESSEL, P. e SMITH, W. H. F., 1996. A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline Database, *J. Geophys. Res.*, 101, 8741-8743.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BUCHANAN, I. e HURFORD, N., 1988. Methods for Predicting the Physical Changes in Oil Spilt at Sea. *Crude Chem. Pollut.*, 4(4), 311-328.
- CCMM, 2003. Xunta de Galicia - www.cmm-prestige.cesga.es.
- CEDRE, 2003. Centre de Documentacion de Recherche et d'Experimentation sur les Pollution Accidentelles des Eaux - www.le-cedre.fr.
- COSTA, M. O. e ANTUNES DO CARMO, J. S., 1999. Evolução de Hidrocarbonetos Derramados em Zonas Costeiras e Estuarinas. Actas do IV SILUSBA, Coimbra, Portugal.
- ECMWF, 2003. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - www.ecmwf.int.
- ESRI, 1996. Using ArcView GIS, Environmental Systems Research Institute, Inc., USA.
- FINGAS, M., 2001. The Basics of Oils Spill Cleanup (Second Edition). Lewis Publishers.
- FRATANTONI, D. M., 2001. North Atlantic surface circulation during the 1990's observed with satellite-tracked drifters. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 196, No. C10, 22067-22093.
- JPL, 1996. A Collection of Global Ocean Tide Models, Jet Propulsion Laboratory, Physical Oceanography Distributed Active Archive Center Pasadena, CA.
- LEVITUS, S. e BOYER, T., 1994. World Ocean Atlas 1994 Volume 4: Temperature. NOAA Atlas NESDIS 4, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C..
- MACKAY, D., BUIST, I., MASCARENHAS, R. e PETERSEN, S., 1980. Oil Spill Processes and Models. Environmental Protection Service, Canada, Report EE-8.
- MATOS, J. L., 2001. Fundamentos de Informação Geográfica. LIDEL Edições Técnicas Lda.
- MELLOR, G., 1998. Users Guide for a Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model, Princeton University, Princeton, USA.
- PINHO J. L. S., 2001. Aplicação de Modelação Matemática ao Estudo da Hidrodinâmica e da Qualidade da Água em Zonas Costeiras, PhD Thesis, University of Minho, Portugal.
- PINHO, J. L. S., ANTUNES DO CARMO, J. S. e VIEIRA, J. M. P., 2002. Numerical Modelling of Oil Spills in Coastal Zones. A Case Study. Actas da Conf. Oil Spill 2002, Rhodes, Grécia, WITPRESS, 35-45.
- SMITH, W. H. F. e SANDWELL, D. T., 1997. Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings, *Science Magazine*, Vol. 277, issue 5334.
- WES-HL, 1996. Users Guide to RMA2 Version 4.3, US Army Corps of Engineers – Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory, Vicksburg, USA.