

AValiação de Impacte Ambiental e Modelização de Descargas de Águas Residuais Usando Observações Bio-Ópticas de Veículos Submarinos Autónomos

Environmental Assessment and Modeling of Wastewater Discharges Using Bio-Optical Observations from Autonomous Underwater Vehicles

PATRÍCIA RAMOS ^(1,2), NUNO CRUZ ^(1,3), ANÍBAL MATOS ^(1,4) e NUNO ABREU ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Investigador(a), INESC Porto,
Campus da FEUP, Rua do Dr. Roberto Frias 378, 4200-465 Porto, Portugal
pramos@inescporto.pt, ncruz@inescporto.pt, amatos@inescporto.pt, nabreu@inescporto.pt

⁽²⁾ Professora Adjunta, ISCAP-IPP,
Rua Jaime Lopes Amorim s/n, 4465-004 S. Mamede Infesta, Portugal, patricia@iscap.ipp.pt

⁽³⁾ Assistente, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal, nacruz@fe.up.pt

⁽⁴⁾ Professor Auxiliar, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal, anibal@fe.up.pt

Resumo

O número de emissários submarinos a descarregar águas residuais em ambientes costeiros em todo o mundo é já bastante significativo e espera-se que venha a aumentar. No entanto, a avaliação do impacte ambiental destas estruturas no meio envolvente é ainda bastante difícil. Nesta publicação é ilustrado como é que um veículo submarino autónomo pode ser utilizado para monitorização de emissários submarinos, apresentando os resultados obtidos numa campanha com sensores ópticos multi-comprimento de onda recentemente instalados, que permitem obter uma assinatura clara do campo de escoamento e a quantificação dos seus componentes.

Palavras-chave: Impacte ambiental, águas residuais, veículos submarinos autónomos, observações *in-situ* bio-ópticas.

Abstract

Around the world, the number of ocean outfalls discharging wastewater on coastal waters is already significant and is expected to grow. However, the environmental impact assessment of these structures is still difficult. In this paper it is shown how an autonomous underwater vehicle can be used for monitoring of sea outfalls, presenting the results obtained in a campaign, and the multi-wavelength optical sensors recently installed onboard which allow to obtain clear signatures of the particle field in order to quantify its components.

Keywords: Environmental impact, wastewater, autonomous underwater vehicles, *in-situ* bio-optical observations.

1. Introdução

Os emissários submarinos constituem importantes fontes de poluentes para os ecossistemas costeiros. Este método de descarga tem vantagens em termos económicos e um impacto relativamente pequeno em termos sociais, mas levanta ao mesmo tempo preocupações importantes acerca da saúde pública e da preservação e qualidade do ecossistema (Hunt *et al.*, 2002; Petrenko *et al.*, 1998; Washburn *et al.*, 1992; Wu *et al.*, 1994).

O oceano oferece uma capacidade de diluição relativamente rápida de algumas substâncias nocivas, mas também integra partículas contendo metais pesados, bactérias, vírus e outras substâncias.

A questão que se coloca é quais são os reais impactes destas substâncias nas populações urbanas e nos ecossistemas costeiros.

Os Veículos Submarinos Autónomos (VSAs), pela relativa facilidade de operação e capacidade de recolha de grandes quantidades de dados, de natureza muito diversa, a diferentes profundidades e com grande rapidez, constituem uma tecnologia de vanguarda para monitorização ambiental e em particular podem ser utilizados com elevado sucesso na avaliação das condições de funcionamento dos emissários submarinos (Ramos, 2005).

Nesta publicação fazemos uma breve descrição do VSA MARES e apresentamos os detalhes de uma campanha de monitorização ao emissário submarino da Foz do Arelho realizada em Novembro de 2007. Para além da caracterização da área de operação do veículo e dos dados por ele recolhidos, são apresentados os resultados da campanha, os quais permitem comprovar a eficácia desta tecnologia na detecção e mapeamento de plumas de efluente.

Foram recentemente disponibilizados comercialmente sensores de atenuação, sensores de reflexão e fluorómetros multi-comprimento de onda, com tamanho apropriado para serem integrados em VSAs. Estes sensores permitem medir as propriedades ópticas inerentes (POIs) e fluorescência da água em mais do que um comprimento de onda, sendo possível obter-se uma assinatura clara do campo de escoamento e a quantificação dos seus componentes (Bishop *et al.*, 2002; Boss *et al.*, 2001a; Boss *et al.*, 2001b; Boss *et al.*, 2004; Coble *et al.*, 1996; Siegel *et al.*, 1989; Twardowski *et al.*, 2001). Neste trabalho descrevem-se ainda os dois sensores óptimos que foram recentemente instalados no VSA MARES e mostra-se como é que estes podem ser utilizados para monitorização ambiental de emissários submarinos.

2. VSA MARES

O MARES (Modular Autonomous Robot for Environment Sampling) é um veículo submarino autónomo extremamente modular que foi desenvolvido pelo Grupo de Sistemas Oceanográficos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto/INESC Porto. O MARES tem um diâmetro de 20 cm, aproximadamente 1.5 m de comprimento, pesando cerca de 32 kg no ar (ver Figura 1).

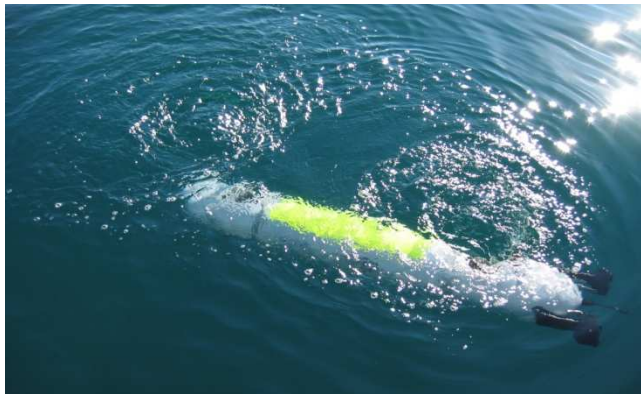


Figura 1. VSA MARES durante a missão de monitorização ao emissário submarino da Foz do Arelho.

Este VSA possui uma estrutura mecânica altamente modular, com um casco central e várias secções adicionais, sendo a maioria destas feitas de copolímero de acetato. Uma vez que estas secções são extensões, podem ser facilmente trocadas, sendo muito simples a inserção de novas secções. A propulsão e direcção são controladas por dois impulsores horizontais independentes situados na parte traseira. Um conjunto de impulsores instalados na direcção vertical controla a velocidade vertical e o ângulo de inclinação. Os quatro impulsores permitem diversas operações em áreas restritas com movimentos horizontais e verticais independentes e velocidade iniciando em 0 m/s. Os circuitos electrónicos estão localizados no casco central. A energia é fornecida por baterias Li-Ion, com um total de energia de 600 Wh. Dependendo da velocidade do veículo, essas baterias podem durar até 10 horas, correspondendo a uma autonomia de cerca de 40 km. O computador principal é um PC-104 com bateria suplementar, uma CPU, uma placa de comunicação e um disco de estado sólido.

O sistema de navegação é baseado numa rede acústica LBL, com 2 NIBs sendo posicionado na área de operação. O VSA MARES tem pouco espaço para acomodar carga útil mas é simples incluir outros sectores, e o casco principal tem vários conectores excedentes para fornecer energia e comunicações. As missões são programadas usando um GUI software (interface gráfica do utilizador), onde todos os segmentos da missão estão detalhados (coordenadas, velocidade, profundidade, etc). Durante a missão, as duas bóias de navegação acústica transmitem os dados de localização do veículo para uma embarcação de apoio, de modo que a trajectória do VSA pode ser seguida em tempo real. No final, o veículo inicia a sua própria transmissão da posição por rádio, quando na superfície.

3. Missão de Monitorização ao Emissário Submarino da Foz do Arelho

O VSA MARES tem as características físicas ideais para monitorização ambiental de emissários submarinos.

Em 28 de Novembro de 2007 foi utilizado numa campanha de monitorização ao emissário submarino da Foz do Arelho. Esta campanha pretendeu comprovar a eficácia desta tecnologia na detecção e mapeamento de plumas de efluente.

3.1. Equipamento utilizado

Para a campanha de monitorização ao emissário submarino da Foz do Arelho, o VSAS MARES foi equipado com uma sonda CTD SBE49, fabricada pela empresa Sea-Bird Electronics, Inc. Esta sonda permite a medição da condutividade, temperatura e pressão do meio em que está inserida. Estes dados são transmitidos para o sistema computacional do VSA, à medida que este se desloca na área de operação, e aí armazenados para posterior processamento. A elevada sensibilidade desta sonda permite a medição de pequenas diferenças destes parâmetros hidrológicos, potenciando assim a detecção da pluma. Durante a missão de monitorização ao emissário submarino da Foz do Arelho (~ 1 hora), enquanto navegava a uma velocidade constante de aproximadamente 2 nós (~ 1 m/s), o veículo recolheu e guardou no computador de bordo, os dados de CTD a uma taxa de 16 Hz. Para além do VSA e da referida sonda, foram ainda utilizadas nesta campanha duas bóias de navegação acústica (ver Figura 2), também desenvolvidas pela FEUP/INESC Porto, bem como o restante equipamento de apoio à operação do veículo.



Figura 2. Bóia de navegação acústica na zona de operação.

3.2. Previsão da localização da pluma

A zona de operação do VSA foi definida com base num modelo de previsão da localização da pluma, que tem como entradas o caudal de descarga do emissário, a velocidade e direcção da corrente e ainda informação sobre a estratificação da coluna de água. Estes dados foram obtidos de diferentes fontes. Os dados de estratificação da coluna de água foram baseados nas medições registadas pelo Prof. Ramiro Neves do Instituto Superior Técnico (IST), nas imediações do emissário submarino, duas semanas antes da realização desta campanha, Figura 3.

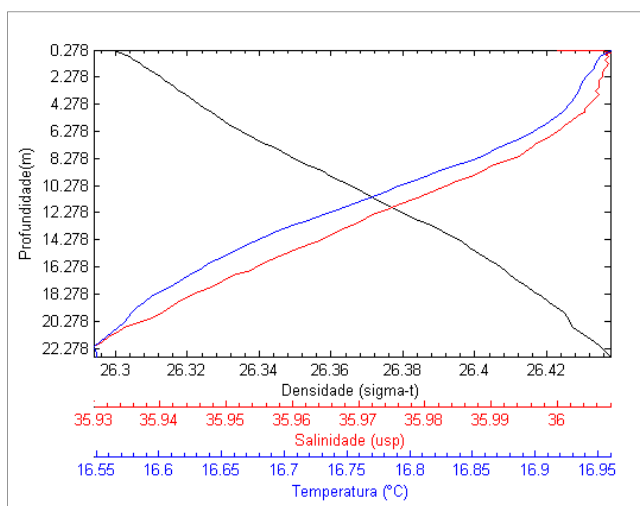


Figura 3. Perfil de CTD usado na simulação da previsão do posicionamento da pluma.

Como se pode verificar pelos dados deste perfil, as condições de estratificação da coluna de água eram fracas, registando-se entre a superfície e o fundo diferenças de temperatura, salinidade e densidade de, respectivamente, 0.4°C, 0.08 usp, 0.13 sigma-t. Nestas condições, para correntes relativamente fracas, deve esperar-se que a pluma se aproxime da superfície.

A direcção da corrente considerada no modelo foi baseada em previsões da intensidade e direcção do vento para o dia da campanha, fornecidas no dia anterior também pelo Prof. Ramiro Neves (IST). Estas previsões apresentam-se na Tabela 1.

Tabela 1. Previsões do vento e da corrente à superfície para o dia da campanha.

Hora	Intensidade do vento (m/s)	Direcção do vento e da corrente (°)
09:00h	6.4	111
10:00h	6.4	112
11:00h	6.1	114
12:00h	5.1	115
13:00h	3.9	112
14:00h	2.7	101
15:00h	2.0	71

Nestes dados, observa-se uma grande estabilidade da intensidade e direcção do vento ao longo da manhã, registando-se uma diminuição da intensidade e uma rotação da direcção a partir do início da tarde.

Perante estes valores, considerou-se que a corrente teria uma direcção de 110° durante toda a missão, uma vez que esta estava prevista para a parte da manhã. Relativamente à intensidade da corrente, e na ausência de previsões para o dia da campanha, foram utilizados dados históricos obtidos pelo Instituto Hidrográfico relativos ao período de 3 de Outubro de 2000 a 29 de Dezembro de 2000, fornecidos pelo Prof. Ramiro Neves. Com base nestes dados, obtidos para as profundidades de 2.6 m, 10 m e 20 m, foram calculadas as respectivas intensidades médias da corrente para estas profundidades tendo os valores obtidos sido respectivamente de 0.18 m/s, 0.11 m/s e 0.08 m/s. Estes valores correspondem a uma intensidade média da corrente em toda a coluna de água de 0.12 m/s.

Relativamente à caracterização do efluente foram utilizados dados de temperatura e salinidade disponibilizados pela Águas do Oeste S.A., relativos a uma campanha de monitorização realizada em Abril/Maio de 2006. Estes dados foram, respectivamente, 19°C e 2 usp. Em relação ao caudal, também fornecido pela Águas do Oeste S.A, foi considerado o valor de 0.11 m³/s, que correspondente a um valor médio de descarga típico para a parte da manhã.

A Figura 4 mostra a interface gráfica do modelo de previsão do comportamento da pluma utilizado. Com base nas características do difusor, no caudal descarregado e nas condições ambientais, este modelo prevê o comportamento da pluma no final da zona de estabilização, fornecendo parâmetros tais como a diluição mínima e respectiva altura, o posicionamento da pluma na coluna de água e a largura e o comprimento dessa zona. Esta zona de estabilização é habitualmente tomada como ponto de referência para a avaliação das condições de diluição proporcionadas pelo emissário submarino. Na mesma figura podem ainda observar-se os resultados da previsão das características da pluma para a manhã do dia da campanha. Segundo esta previsão a pluma encontrava-se estabilizada a 1 m da superfície, sendo a diluição mínima de 920/1 atingida a 141 m do difusor.

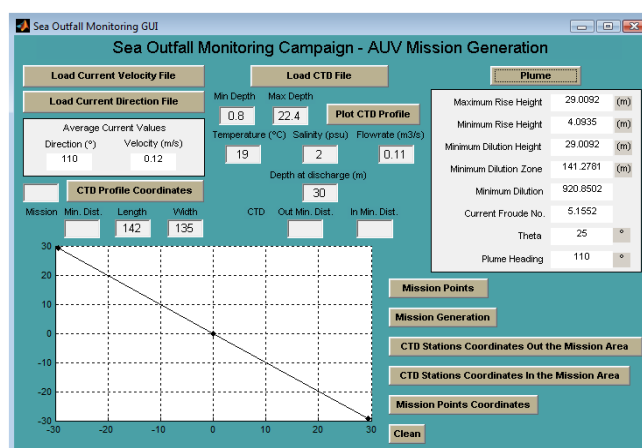


Figura 4. Resultados da simulação do comportamento da pluma para o dia da campanha usando o software "Sea Outfall Monitoring GUI".

3.3. Operação do VSA

Com base nos dados disponíveis optou-se por planear a trajectória do VSA para a situação correspondente a uma corrente de 0.12 m/s com direcção de 110°.

Tratando-se da primeira operação deste VSA neste cenário, planeou-se uma missão de recolha de dados de duração mais limitada, acomodando-se ainda assim alguma variação da direcção da corrente face aos valores previstos para o final da manhã.

A zona a mapear, mostrada na Figura 5, situou-se maioritariamente na direcção este-nordeste do ponto médio do emissário, abrangendo uma área total de cerca de 20000 m².

A recolha de dados ocorreu às profundidades de 1.5 m e 3 m, de acordo com a previsão da altura de estabilização da pluma. À profundidade de 3 m apenas foram recolhidos dados nas imediações do difusor.

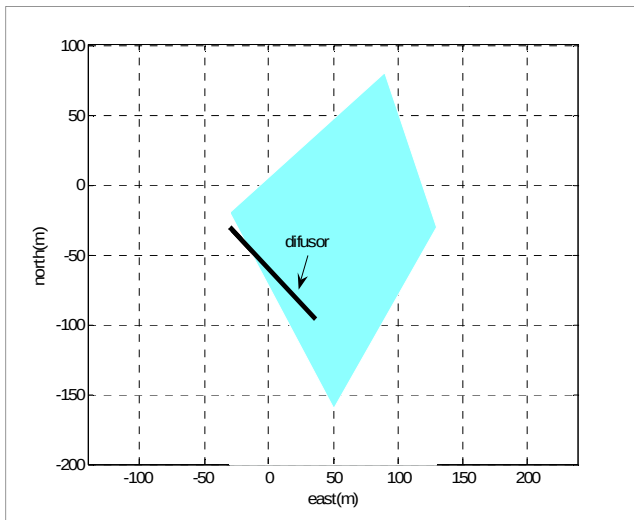


Figura 5. Área de operação do VSA.

A recolha de dados pelo VSA teve uma duração total de 40 minutos, tendo o VSA percorrido uma distância total de cerca de 2000 m.

Durante o seu percurso, foram armazenados os dados da sonda CTD a uma taxa de 16 medidas por segundo, correspondendo a um total de cerca de 40 000 pontos de medição geo-referenciados.

3.4. Resultados

Os dados registados durante a campanha foram posteriormente processados, usando o software Matlab®, de forma a obter mapas das diferentes grandezas medidas em toda a zona de operação.

Na Figura 6 e na Figura 7 apresentam-se, respectivamente, os mapas da distribuição da temperatura e condutividade relativas às profundidades de 1.5 m e 3 m.

Nestes mapas pode detectar-se a presença da pluma de efluente através da diminuição da temperatura e da condutividade do meio.

Note-se que a diferença máxima de temperatura detectada é da ordem de 0.1 °C e que a diferença máxima de condutividade registada é inferior a 0.01 S/m. Refira-se que estas diferenças reduzidas apenas foram possíveis de detectar dada a elevada sensibilidade da sonda CTD utilizada.

Embora a zona de operação definida para o VSA não tivesse sido suficientemente extensa de modo a permitir um completo mapeamento da pluma, é possível verificar que à profundidade de 1.5 m a pluma de efluente se estende entre as direcções nordeste e sudeste a partir do ponto médio do difusor.

Os dados recolhidos a 3 m de profundidade indicam uma maior proximidade da pluma ao difusor, tal como seria de esperar. Contudo, a zona de operação coberta a esta profundidade não permite uma caracterização mais precisa da pluma. Nesta profundidade a pluma é detectada na direcção Este do ponto médio do difusor.

Com base nas medidas de temperatura, condutividade e pressão é possível determinar a salinidade do meio, cuja distribuição relativa às profundidades de 1.5 m e 3 m se apresenta na Figura 8.

Também aqui se confirma a presença da pluma à profundidade de 1.5 m entre as direcções nordeste e sudeste a partir do ponto médio do difusor, e à profundidade de 3 m na direcção Este do ponto médio do difusor.

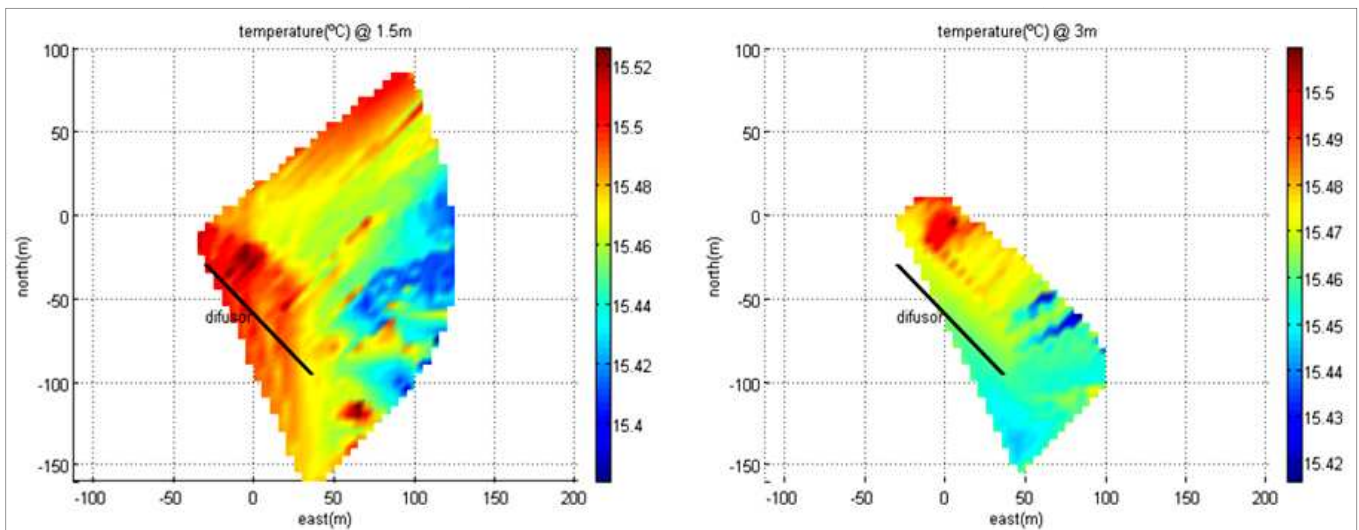


Figura 6. Mapas da distribuição da temperatura relativa às profundidades de 1.5 m e 3 m.

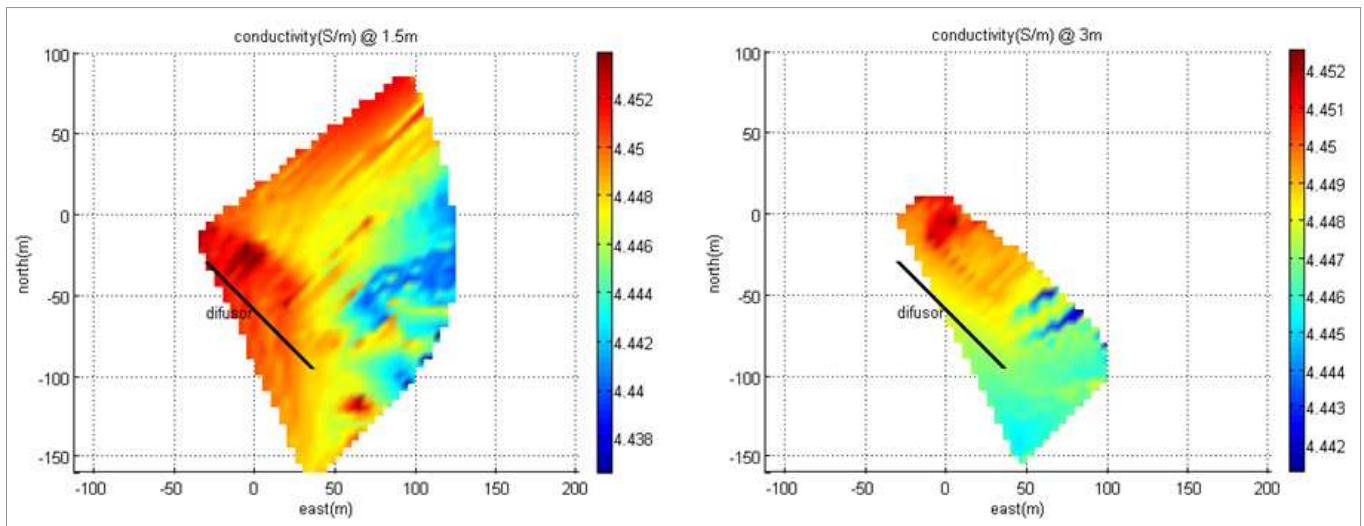


Figura 7. Mapas da distribuição da condutividade relativa às profundidades de 1.5 m e 3 m.

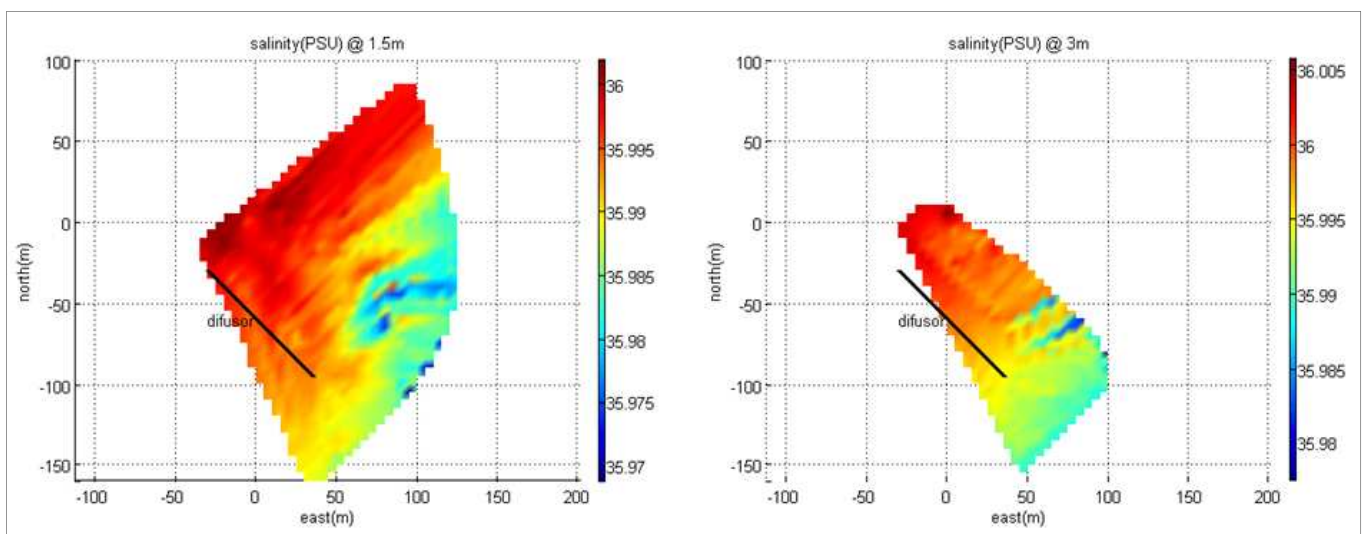


Figura 8. Mapas da distribuição da salinidade relativa às profundidades de 1.5 m e 3 m.

3.5. Discussão

As medições de condutividade, temperatura e pressão obtidas com o VSA permitiram uma fácil identificação da zona de extensão da pluma de efluente proveniente do emissário submarino.

Este facto é digno de relevo uma vez que o baixo caudal de efluente resulta numa rápida diluição deste no meio receptor, originando reduzidas assinaturas em termos das grandezas consideradas. Pode assim concluir-se que esta tecnologia tem potencialidades elevadas para a monitorização de emissários submarinos.

Relativamente à definição da zona de operação, verificou-se que a área varrida pelo VSA não foi suficientemente extensa de forma a mapear completamente a pluma de efluente. Este facto indicia que a intensidade da corrente na área de operação terá sido significativamente mais elevada do que a considerada no planeamento da missão do VSA.

Na verdade, o sistema de navegação do VSA fornece uma estimativa global da intensidade e direcção da corrente sentida, tendo-se registado valores aproximados de 0.4 m/s e 70°, respectivamente.

Relativamente a este ponto, refira-se ainda que em operações futuras será utilizado um sensor ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) que permitirá obter dados sobre a velocidade e direcção da corrente durante a operação e efectuar ajustes na zona de operação do VSA sempre que estes se tornem necessários, garantindo assim uma melhor cobertura da área de interesse.

4. Instrumentação Óptica para Medição *in-situ*

Apesar da elevada sensibilidade da sonda de CTD utilizada, tem de referir-se que estes parâmetros hidrológicos, por si só, podem não conferir uma assinatura clara da presença da pluma, não sendo possível, nesse caso, identificar a sua extensão.

Para uma avaliação do impacte ambiental da descarga, a estimação da diluição proporcionada pelo emissário também é um dado fundamental. Contudo, essa estimação apenas com estes parâmetros hidrológicos é extremamente difícil.

Torna-se assim necessário complementar a informação fornecida pelos dados de CTD com outro tipo de medidas.

Recentemente foi disponibilizada comercialmente instrumentação multi-comprimento de onda, isto é, sensores de atenuação, sensores de *backscattering* e fluorómetros, com tamanho apropriado para serem integrados em VSAs, capazes de medir *in situ* propriedades ópticas inerentes (POIs) espectrais e a fluorescência do meio. Vários estudos (Bishop *et al.*, 2002; Boss *et al.*, 2001a; Boss *et al.*, 2001b; Boss *et al.*, 2004; Coble *et al.*, 1996; Siegel *et al.*, 1989; Twardowski *et al.*, 2001) mostram que medindo as POIs em mais do que um comprimento de onda e usando dados de fluorescência é possível tirar vantagem das potenciais assinaturas espectrais do campo de partículas de fluido por forma a quantificar os seus componentes. No âmbito do projecto WWECO, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (Ref: PTDC/MAR/74059/2006) foram recentemente adquiridos um fluorímetro (ver Figura 9) da marca WetLabs, modelo ECO-Puck na versão Triplet, que mede simultaneamente a concentração de Clorofila-a, CDOM (Color Dissolved Organic Matter) e reflexão da luz no comprimento de onda de 660 nm e um sensor de atenuação óptica (ver Figura 10) da marca WetLabs, modelo SAM (Scattering Attenuation Meter), que permite aferir a atenuação da luz através de medidas da reflexão. Estes dois sensores foram recentemente instalados a bordo do VSA MARES e serão brevemente utilizados numa nova campanha de monitorização ao emissário submarino da Foz do Arelho.



Figura 9. Sensor ECO-Puck Triplet.



Figura 10. Sensor BAM-HYD.

Na Figura 11 mostra-se o adaptador que foi construído para instalação do sensor ECO-Puck Triplet. Este adaptador é constituído por um anel feito em copolímero de acetato que se insere no corpo principal do veículo. Neste adaptador foi também possível instalar um transdutor T217 da marca Neptune Sonar que é utilizado pelo sistema acústico.

As condições do mar da costa oeste portuguesa são extremamente adversas para a realização de campanhas de recolha de dados.

Das várias experiências já por nós realizadas concluiu-se que para que o VSA MARES possa ser utilizado para monitorização de rotina e de emergência dos emissários submarinos instalados é necessário que as campanhas sejam realizadas com a mínima intervenção dos operadores e que o veículo disponha de mecanismos de acompanhamento e de recuperação.

Nos últimos anos têm sido efectuados vários desenvolvimentos nesse sentido, estando neste momento a ser concebida uma aplicação de software que irá controlar e monitorizar todas as fases da campanha, desde a especificação da trajectória da missão em tempo real, de acordo com as condições oceanográficas do meio obtidas através do CTD instalado no veículo e do ADCP, até à visualização do percurso que está a ser desenvolvido pelo veículo no mar.



Figura 11. Adaptador para o sensor ECO-Puck Triplet.

5. Conclusões

O VSA MARES constitui uma tecnologia de vanguarda para monitorização ambiental de emissários submarinos. Os resultados mais recentes obtidos numa campanha de monitorização ao emissário submarino da Foz do Arelho usando dados de CTD mostram que a elevada sensibilidade da sonda utilizada permite identificar de forma clara a extensão da pluma no meio receptor.

Este trabalho permitiu também concluir que para que seja possível a estimativa da diluição proporcionada pelo emissário, dado fundamental para a avaliação do impacte ambiental da descarga, é necessário complementar a informação fornecida pelo CTD com outro tipo de medidas. Para colmatar esta necessidade foram recentemente instalados no VSA MARES dois sensores ópticos multi-comprimento de onda que permitirão obter uma assinatura clara do campo de escoamento e a quantificação dos seus componentes.

Referências

- Bishop, J., Davis, R. et al. (2002). *Robotic observations of dust storm enhancement of carbon biomass in the North Pacific*, Science 298, pp. 817-820.
- Boss, E., Pegau, Lee, M., Twardowski, M. S., Shybanov, E., Korotaev, G., Baratange, F. (2004). *The particulate backscattering ratio at LEO 15 and its use to study particle composition and distribution*, J. Geophysical Research 109 C01014.
- Boss, E., Pegau, W. S., Gardner, W. D., Zaneveld, J. R. V., Barnard, A. H., Twardowski, M. S., Chang, G. C., Dickey, T. D. (2001b). *Spectral particulate attenuation and particle size distribution in the bottom boundary layer of a continental shelf*, Journal of Geophysical Research 106(C5), pp. 9509 -9516.
- Boss E., Twardowski, M. S., Herring, S. (2001a). *Shape of the particulate beam attenuation spectrum and its inversion to obtain the shape of the particulate size distribution*, Applied Optics, 40, (27), pp. 4885-4893.
- Coble, P. G. (1996). *Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation -emission matrix spectroscopy*, Marine Chemistry 51, pp. 325 -346.
- Hunt, C. D. et al. (2002). *Massachusetts Water Resources Authority Effluent Outfall Dilution: April 2001, July 2001*, Report ENQUAD, Boston: Massachusetts Water Resources Authority.
- Petrenko, A. A., Jones, B. H., Dickey, T. D. (1998). *Shape and initial dilution of sand island, Hawaii sewage plume*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 124(6), pp. 565 -571.
- Ramos, P. (2005). *Advanced mathematical modeling for outfall plume tracking and management using autonomous underwater vehicles based systems*, PhD Thesis, FEUP.
- Siegel, D. A., Dickey, T. D., Washburn, L., Hamilton, M. K., Mitchell, B. G. (1989). *Optical determination of particulate abundance and production variations in the oligotrophic ocean*, Deep-Sea Research 36, pp. 211-222.
- Twardowski, M., Boss, E., Macdonald, J. B., Pegau, W. S., Barnard, A. H., Zaneveld, J. R. V. (2001). *A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition in case I and case II waters*, Journal of Geophysical Research 106(C7), pp. 14129 -14142.
- Washburn, L., Jones, B. H., Bratkovich, A., Dickey, T. D., Chen, M. (1992). *Mixing, dispersion, and resuspension in vicinity of ocean wastewater plume*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 118(1), pp. 38-58.
- Wu, Y., Washburn, L., Jones, B. H. (1994). *Buoyant plume dispersion in a coastal environment: evolving plume structure and dynamics*, Continental Shelf Research 14(9), pp. 1001-1023.