



VII SEMINAR and WORKSHOP in OCEAN ENGINEERING Rio Grande, November 23rd to 25th, 2016

ANÁLISES DE DOIS DERRAMES DE ÓLEO NA PLATAFORMA CONTINENTAL SUL DO BRASIL, NOS ANOS DE 2012 E 2014

Caroline Barbosa Monteiro*¹, Eduardo de Paula Kirinus¹, William Correa Marques², Juliana Costi², Phelype Haron Oleinik³

¹ Universidade Federal do Rio Grande
Programa de Pós Graduação em Oceanografia Química, Física e Geológica
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil
*e-mail: monteirocbm@gmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande
Instituto de Matemática, Estatística e Física
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil

³ Universidade Federal do Rio Grande
Engenharia Civil Costeira e Portuária - EE
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil

ABSTRACT

Numerical models have been widely used to simulate and predict the behavior and transport of oil spills in marine environments. Its behavior is governed by various physical, chemical and biological processes which are related to the hydrocarbon properties, hydrodynamic and weather conditions, and other environmental variables. The transport and interaction of oil particles were evaluated in simulations to reproduce two oil spills recorded in the northern part of the Southern Brazilian Shelf (SBS). The numerical simulations were performed using the model ECOS (Easy Coupling Oil System) together with the three-dimensional hydrodynamic module TELEMAC3D. The hydrodynamic model provides the variables needed by oil spill model to calculate and infer the properties and behavior of the oil slick. The results indicate that the local wind forcing is the most important factor in determining the oil fate, followed by the intensities and directions of coastal currents. Regarding the events, in 2012 the oil reaches the coast after 10 hours of the leak, however in 2014 it was transported oceanwards. The simulation strategy used in this article does not proved to be appropriate for estimates of the oil risk in the region, due to the distinct susceptibility responses between the events simulated.

Keywords: TELEMAC3D, ECOS, Oil Spill, Susceptibility, Wind Influence.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Bollmann et al. (2010), as quatro principais fontes de aporte de óleo para os oceanos são naturais, de navios, de efluentes e por fontes indefinidas. As naturais representam 5%, sendo que aproximadamente 35% provêm do trânsito de navios *tankers*, incluindo descartes ilegais e limpeza. A entrada do óleo no ambiente

também pode dar-se na forma de constituintes voláteis, emitidos para a atmosfera durante os diversos processos de queima. Essa parcela atmosférica adicionada aos montantes municipal e industrial de efluentes, além de plataformas de petróleo que resultam em 45% do aporte de óleo. Os outros 5% provêm de fontes indefinidas.

Nesse sentido, as áreas costeiras envolvidas em atividades portuárias e/ou petrolíferas representam regiões sensíveis que podem ser afetadas pela poluição de acidentes navais, principalmente próximo as zonas vitais como estuários, mangues e marismas (Tansel, 2014). Contudo, eventuais acidentes podem ocorrer longe da costa, e por consequência a poluição gerada pode ser transportada em direção à costa pelas correntes dos oceanos e os ventos superficiais (Marta-Almeida et al., 2013).

A maior parte dos derrames de óleo ocorridos na região da Plataforma Continental Sul do Brasil (PCSB) (Fig. 1a) decorre de falhas técnicas em unidades operacionais do sistema hidroviário local e do sistema de dutos de aproximadamente 90 km. O sistema conecta o Terminal Marítimo Almirante Soares Dutra (TEDUT) à Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP) na cidade de Canoas (Fig. 1b). De acordo com Michel e Fingas (2016) esses estudos são de grande importância, visto que entre 30 e 50% dos derrames de óleo são causados direta ou indiretamente por erros humanos e cerca de 20 e 40% são advindos de falhas em equipamentos.

Em conformidade com a legislação brasileira, as simulações numéricas de derrames de óleo, como as do presente trabalho, têm sido utilizadas na definição da área de influência de atividades com riscos de derramamentos de óleo. Ainda têm fundamentado diagnósticos ambientais diversos, a elaboração de mapas de risco, estudos de sensibilidade ao óleo, Planos de Emergência Individual (PEI), entre outros estudos.

1.1 Área de estudo

A região de estudo está inserida na PCSB (Fig. 1a, Fig. 1b). Trata-se de uma plataforma continental de contorno oeste, com padrão de correntes costeiras intensas e de grande variabilidade em meso-escala, geradas por variações batimétricas ou por fatores meteorológicos, como ação de ventos locais. Conforme Möller Jr et al. (2001) e Castelão e Möller Jr (2006), a região apresenta comportamento típico de micro marés, e as intensidades e direções dos ventos e suas interações com a topografia do fundo estão entre os fatores que ordenam os padrões de circulação costeira.

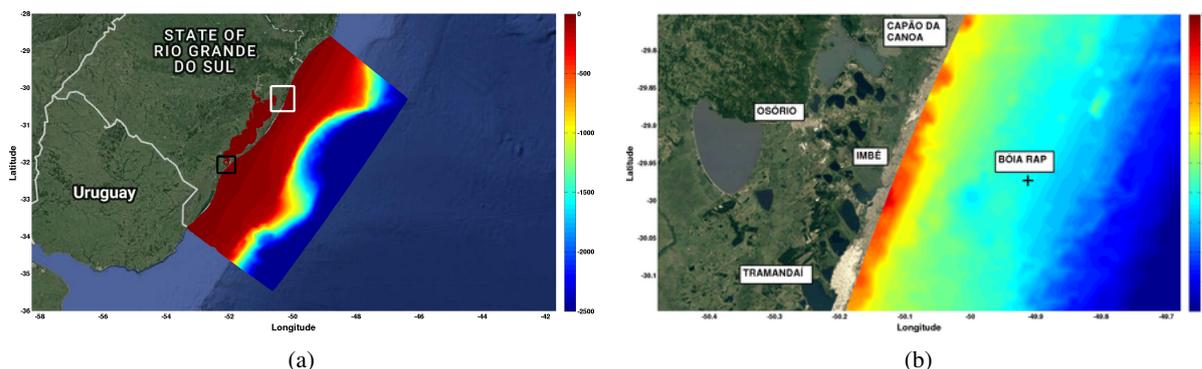


Figura 1: (a) PCSB com retângulo branco indicando a região de estudo, (b) litoral norte da PCSB, sendo "+" o ponto de partida das duas simulações (boia RAP - Refinaria Alberto Pasqualini).

A PCSB possui duas principais fontes de água doce, o Rio da Prata e a pluma da Lagoa dos Patos que são responsáveis por gerar fortes gradientes halinos em determinados períodos. O encontro das águas continentais de baixa salinidade com as águas costeiras define regiões onde se observam altos gradientes de propriedades, as chamadas zonas de frente (Marques et al., 2009).

A pluma do Rio da Prata influencia essa região durante quase todo o ano, com exceção dos meses de verão, devido à circulação dirigida por gradientes de densidade que é observada na plataforma continental, além do transporte de águas mais frias e ricas em nutrientes em direção ao norte, as quais podem desempenhar um papel importante em episódios de produção primária na região (Soares et al., 2007).

A pluma da Lagoa dos Patos e a região de interação com a pluma do Rio da Prata têm grande importância para a região, pois controlam a circulação na plataforma continental interna, nas proximidades de Rio Grande, e pode se estender por dezenas de quilômetros desde sua desembocadura, apresentando também importância na produção biológica da região (Marques et al., 2009).

Os padrões de circulação da Lagoa dos Patos foram amplamente estudados, de forma que, diversos autores concluíram que as principais forçantes são: descarga fluvial, efeitos locais e remotos dos ventos que agem controlando os gradientes de pressão e os processos de troca (Möller Jr et al., 2001; Marques et al., 2014). A presença de estruturas antropogênicas como os molhes da barra de Rio Grande e estruturas auxiliares às atividades portuárias conferem à região uma maior complexidade.

No âmbito da dinâmica de fluidos geofísicos o vento atua como principal forçante da circulação oceânica superficial, dispersando energia pela tensão de cisalhamento superficial (Kundu e Cohen, 2002). Da mesma forma,

o vento atua controlando a hidrodinâmica da PCSB, onde as velocidades e as direções dos ventos interferem na formação de correntes costeiras.

Segundo Rubert et al. (2006) o padrão dos ventos na PCSB sofre a influência do Anticiclone do Atlântico Sul, sobretudo nos meses de primavera e verão, quando ocorrem as maiores intensidades das velocidades dos ventos. No outono as maiores interferências atmosféricas podem ser decorrentes de bloqueios atmosféricos, e no inverno ocasionadas aos distúrbios transientes.

O litoral do Rio Grande do Sul é formado por uma longa barreira arenosa, praticamente ininterrupta, com orientação Nordeste-Sudoeste, dominada pela ação de ondas com deriva litorânea bidirecional e com predominância em direção Nordeste (Calliari et al., 2006). A região de Tramandaí apresenta praias com baixa declividade, classificadas de intermediárias à dissipativas, com formação de dunas frontais bem desenvolvidas (Tomazelli e Villwock, 1992).

Tal contexto dinâmico, associado com a crescente necessidade e uso de combustíveis fósseis, gera um cenário de risco envolvendo acidentes com vazamentos de óleo. O litoral norte, compreendendo a região de Tramandaí, apresenta riscos de derrames devido à presença de boias captadoras de óleo que ligam o terminal de óleo da cidade com a Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP) em Porto Alegre. A região de plataforma e talude continental apresentam riscos devido ao tráfego de navios em direção ao porto do Rio Grande e a perfuração de poços de exploração por parte da Petrobras. Por outro lado, o litoral sul, compreendendo a região de Rio Grande, apresenta riscos devido ao intenso transporte de óleo associado à presença do Porto do Rio Grande, do Terminal Aquaviário da Transpetro (Petrobras) e da Refinaria de Petróleo Riograndense (Garção et al., 2012).

1.2 Processos envolvidos em derrames de óleo

O número de derrames de óleo na porção norte da PCSB tem aumentado na última década. Conforme o mapeamento nacional de sensibilidade ao óleo, a região do estudo está entre os territórios da PCSB com os maiores índices de sensibilidade litorânea ao óleo e seus derivados (MMA, 2002). O trecho compreendido entre os municípios de Tramandaí e Imbé tem alta susceptibilidade aos derrames de óleo devido à presença de boias de captura de óleo, além de atividades envolvendo manipulação e transporte de petróleo e seus derivados, como o abastecimento de embarcações, cargas de hidrocarbonetos e descarga de óleo bruto. Localizadas no litoral, essas boias permitem a captura do óleo de navios petroleiros e sucessivas transmissões de óleo para REFAP.

Variações nas taxas dos processos de emulsificação, evaporação, entre outros processos de degradação nos derrames de óleo são sensíveis ao tipo e idade do óleo, bem como aos fatores ambientais, como velocidade do vento, temperatura, altura de ondas, salinidade e misturas turbulentas no oceano (Mariano et al., 2011).

Emulsificação é o processo de formação de emulsões do tipo água em óleo ou do tipo óleo em água. O processo pode gerar grandes alterações nas propriedades e características das manchas de óleo, de forma que emulsões mais estáveis podem conter entre 50 e 80% de partículas de água sobre as partículas de óleo, resultando em expansões do volume das manchas de óleo de até cinco vezes o seu volume original (Fingas e Fieldhouse, 2003).

Com a evolução da emulsificação as colorações mais pretas e prateadas das manchas de óleo tendem a variar para os tons mais próximos do marrom, na medida do acréscimo do número de gotículas de água do mar suspensas sobre o óleo. Fingas e Banta (2016) realizaram ensaios para investigar o comportamento de diferentes tipos de óleos quanto à evolução das taxas de emulsificação, verificando que, apesar de suas solubilidades baixas, alguns hidrocarbonetos e sais solúveis de diferentes tipos de óleos tendem a formar uma emulsão.

A evaporação é outro processo de degradação importante a ser considerado no balanço de massa final do óleo. É responsável pela retirada da maior parte das frações voláteis de óleo em poucas horas após o derrame, sendo influenciada pela velocidade do vento e tamanho da área do derrame (Fingas, 1999).

Segundo Fingas (1997) as taxas de evaporação oscilam em função de acréscimos de turbulência, velocidade do vento e área superficial de determinada mancha de óleo. Assim como é verificado no processo de emulsificação, os processos de misturas físicas ocasionados pela turbulência das águas superficiais do oceano também são agentes intervenientes no processo de evaporação. Além disso, características do óleo como volatilidade, viscosidade, densidade, entre outras, podem orientar variações nas taxas de evaporação ao longo do tempo (Mariano et al., 2011).

Sendo assim, o principal objetivo deste trabalho é avaliar as taxas de degradação do óleo em dois eventos de derrames ocorridos na boia da REFAP. Além disso, determinar coerentemente as forçantes meteorológicas e oceânicas responsáveis pela trajetória dos derrames simulados, permitindo um conhecimento preliminar de suas susceptibilidades ao óleo.

2. METODOLOGIA

A metodologia baseou-se no desenvolvimento e aplicação acoplada dos modelos numéricos TELEMAC3D (www.opentelemac.org) e ECOS - Easy Coupling Oil System (BR 51 2013 00013 INPI - www.lansd.furg.br) para a simulação de dois derrames de óleo do tipo Marlim Sul ocorridos no litoral norte da PCSB, entre as cidades de Tramandaí e Imbé. Foram simulados dois eventos de referência da região, um de 26 de Janeiro de 2012 (13 m^3)

e outro de 3 de Julho de 2014 ($4 m^3$). As duas simulações adotaram o mesmo ponto de partida ($30^{\circ}01'54.3''S$, $50^{\circ}04'35.1''W$)(Fig. 1b).

2.1 Sistema TELEMAC

Nas simulações hidrodinâmicas foi utilizado o modelo numérico TELEMAC3D. Esse modelo resolve as equações de Navier-Stokes considerando as variações locais na superfície livre do fluido, desprezando as variações de densidade na equação de conservação da massa, considerando a pressão hidrostática e a aproximação de Boussinesq para resolver as equações de conservação da quantidade de movimento (Hervouet, 2007).

O modelo aplica a técnica de elementos finitos para resolver as equações hidrodinâmicas usando o sistema de coordenadas sigma na discretização vertical, de forma a acompanhar os limites superficiais e de fundo. O Método de Elementos Finitos (MEF) permite o controle da distribuição de elementos na grade computacional utilizada, permitindo estabelecer alta resolução em áreas de morfologia costeira e batimetria complexa.

A turbulência horizontal e vertical são resolvidas pelo modelo $k-\epsilon$, que resulta do acoplamento da solução das equações do balanço para k (energia turbulenta) e para ϵ (dissipação turbulenta). Aplicando o modelo $k-\epsilon$ implica no uso de uma malha bidimensional mais refinada do que as malhas em que os outros modelos de turbulência trabalham, aumentando o tempo computacional em prol de resultados mais precisos (Villaret et al., 2013). Para uma descrição mais detalhada sobre o equacionamento e a parametrização do modelo TELEMAC3D é recomendada a referência (Hervouet, 2007).

2.2 Modelo ECOS

O modelo de óleo ECOS vem sendo desenvolvido pela utilização de técnicas de programação modular, que permitem uma melhor estruturação e controle das bibliotecas dos subprogramas e funções (Stringari et al., 2013, 2014). Esse tipo de estruturação possibilita a compilação de cada um dos módulos separadamente, reduzindo o tempo computacional, de forma que a reutilização das funções é facilitada. O modelo é baseado no paradigma imperativo de programação, que obtém a mudança de estados de acordo com as ações computadas, sendo descrito na linguagem de programação FORTRAN 95 (*Formula Translation System*).

O modelo possui uma interface de acoplamento (módulo de interação com o usuário) que contém todas as informações necessárias a serem compartilhadas pelos modelos de óleo e hidrodinâmico, sendo passível de acoplado a qualquer outro modelo sem grandes alterações em sua estrutura. Alguns processos aos quais as plumas de óleo estão sujeitas quando chegam ao ambiente estão incluídos no modelo de óleo, como: espalhamento, evaporação, dispersão, sedimentação, dissolução, emulsificação, solubilização e deposição.

2.3 Acoplamento ECOS-TELEMAC

Com a progressão do transporte das partículas de óleo pela água, a mancha de óleo é submetida a uma série de processos físicos, químicos e biológicos devido às intempéries oceanográficas. Fatores climáticos, ambientais e características dos tipos de óleo controlam as velocidades desses processos.

O modelo de óleo é construído pela utilização de módulos de transporte Lagrangeano e de propriedades escalares que representam o processo de degradação do óleo quando em contato com a água. Esse modelo utiliza de forma acoplada os resultados da hidrodinâmica tridimensional proveniente do TELEMAC3D. O modelo hidrodinâmico simula o campo de velocidades necessário para o módulo Lagrangeano calcular a trajetória do óleo. Tal trajetória é calculada considerando que o óleo pode ser idealizado como um número grande de partículas que se movem independentemente na água.

A combinação do transporte de partículas com os processos estimados pelo módulo de degradação da mancha de óleo (*weathering*) resulta na informação sobre o campo de óleo obtido a cada passo de tempo. As interações do óleo com as propriedades da água e do fundo são transferidas para o TELEMAC3D que segue atualizando as propriedades que serão novamente informadas ao modelo ECOS.

2.4 Condições de Contorno e Iniciais

O contorno oceânico é prescrito por marés astronômicas, elevação do nível do mar, salinidade e temperatura. Os dados de descarga fluvial, precipitação e níveis de água foram obtidos da página da ANA (Agência Nacional de Águas¹). Dados de salinidade, temperatura, velocidade e direção das correntes, foram obtidos do modelo de simulação e previsão oceânica HYCOM², e foram utilizados para a criação das condições iniciais e de contorno do sistema de modelagem numérica.

Dados de ventos e temperatura do ar foram obtidos na página da NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration³) para serem utilizados como condições de contorno superficiais para o sistema de modelagem

¹www.ana.gov.br

²www.hycom.org/dataserver

³www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis

numérica. Informações sobre as oito principais componentes relacionadas às marés astronômicas (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1) obtidas do sistema de modelagem de marés oceânicas Grenoble Model FES95.2 (*Finite Element Solution* v.95.6).

Informações sobre o tipo de óleo utilizado, densidade, viscosidade cinemática, tensão interfacial e coeficiente de transporte por vento foram obtidas de tabelas de companhias ambientais e de relatórios técnicos do Porto de Rio Grande. A Tabela 1 apresenta as condições iniciais utilizadas pelo modelo de óleo nas simulações dos dois eventos do estudo. Entre as condições iniciais que foram utilizadas estão o k_c (coeficiente de transporte de correntes); k_w (coeficiente de transporte do vento); $\rho_{\text{óleo}}$ (densidade do óleo); Δ_t (passo de tempo da simulação); $\nu_{\text{água}}$ (viscosidade cinemática da água do mar).

Tabela 1: Condições iniciais para os dois eventos simulados.

	<i>Evento de 20/01/2012</i>	<i>Evento de 03/07/2014</i>
<i>volume do derrame</i>	13 m ³	4 m ³
$\rho_{\text{óleo}}$	980 kg/m ³	980 kg/m ³
$\nu_{\text{água}}$	0,89 10 ⁶ m ² .s	0,89 10 ⁶ m ² .s
<i>volume de traçadores</i>	0,05 m ³	0,05 m ³
Δ_t	90"	90"
k_w	0,3	0,3
k_c	1	1

2.5 Setup e Validação

O modelo TELEMAC3D foi calibrado e validado para a realização de estudos na região da Lagoa dos Patos e zona costeira adjacente do litoral do Rio Grande do Sul em estudos anteriores Marques et al. (2009, 2012, 2016). Além dos estudos previamente destacados, outros estudos envolvendo testes de calibração e validação foram realizados para a região costeira de Tramandaí e Imbé, visando maior precisão nas análises associadas aos processos analisados (Stringari et al., 2014; Marques et al., 2016).

As propriedades escalares associadas aos processos de degradação do óleo e estimadas pelo modelo ECOS também podem ser calibradas e validadas pela comparação direta com resultados obtidos do modelo ADIOS2 (Automated Data Inquiry for Oil Spills⁴) da NOAA (Stringari et al., 2013; Marques et al., 2016).

A calibração e validação dos resultados do modelo ECOS representa um desafio para os estudos posteriores. Os resultados do modelo ECOS podem ser calibrados e validados utilizando imagens de sensores SAR (Synthetic Aperture Radar) obtidas durante derrames que tenham ocorrido ao longo dos últimos anos na Plataforma Continental do Sul do Brasil. Entretanto, ainda não foi possível aplicar essa técnica de calibração, devido a escassez de imagens SAR para as datas dos eventos simulados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das duas simulações realizadas, serão abordados de acordo com as médias de cada evento, associando as variáveis oceânicas como variação do nível do mar, velocidade de corrente incidente e suas associações às forçantes de degradação do óleo.

3.1 Análise dos eventos

A análise da média de elevação do nível do mar dos 50 dias anteriores a cada evento pode ser observada na Fig. 2. Podemos observar que em ambos os casos, existe a predominância de alto nível na costa e baixo nível em sentido *offshore*. As médias de elevação para o evento de 2012 (26/01/2012, Fig. 2a), oscilaram entre 0,75 e 0,78 m. Para o evento de 2014 (03/07/2014, Fig. 2b) as flutuações do nível da superfície do mar foram superiores aos valores de 2012, situando-se entre 0,81 e 0,82 m, com aumentos dos valores em direção à linha de costa.

No evento de 2012, os valores máximos de elevação do nível do mar (1,60 m) foram correspondentes ao verificado anteriormente para a região (Stringari et al., 2014; Marques et al., 2016). O nível médio de elevação da superfície do mar no evento de 2014 (0,90 m) foi menor que o de 2012, embora tenha superado a média de elevação de 2012 (0,75 m). Esse padrão de maior elevação da superfície do nível do mar em 2012 pode ser relacionado com o fato dos valores máximos de intensidade de correntes, em torno de 0,35 m/s, serem superiores aos valores obtidos para 2014 (0,30 m/s). Em ambos os eventos, as oscilações nas intensidades de correntes acompanharam as flutuações na superfície do mar, apontando para o padrão clássico de circulação costeira conduzido pelo vento (Möller Jr et al., 1996, 2001; Castelão e Möller Jr, 2006; Rubert et al., 2006).

Esta região apresenta grande variabilidade sazonal no campo de ventos, sendo caracterizada por dominância de ventos de nordeste durante o verão e ventos de sudeste durante o inverno (Braga e Krusche, 2000). Conforme

⁴<http://archive.orr.noaa.gov>

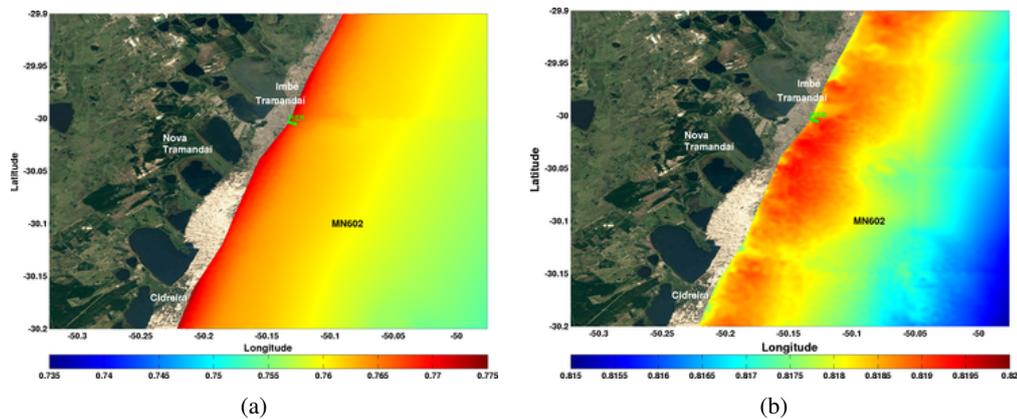


Figura 2: Condições das elevações médias da superfície do mar para os dois eventos simulados. (a) Média de elevação do nível do mar dos 50 dias anteriores ao derrame de 2012 e (b) para 2014.

verificado em estudos anteriores, a circulação costeira é fortemente direcionada pela tensão de cisalhamento do vento da superfície do fluido, que direciona o fluxo residual para leste e oeste, respectivamente (Kundu e Cohen, 2002; Marques et al., 2009). Esses efeitos podem ser intensificados por eventos de El Niño Oscilação Sul (ENSO).

Sendo assim, as variabilidades das correntes costeiras foram associadas às flutuações da elevação da superfície do mar, e foram elaboradas séries temporais para os dois eventos analisados (Fig. 3a e 3b). Observando as séries temporais para os eventos de 2012 e 2014, o padrão de elevação do nível do mar e da intensidade de corrente demonstram alta correlação, devido à resposta do ambiente ao sistema de ventos predominantemente bimodais, conferindo alto nível para ventos de sudeste e o inverso para nordeste. O mesmo padrão é observado para o ano de 2014.

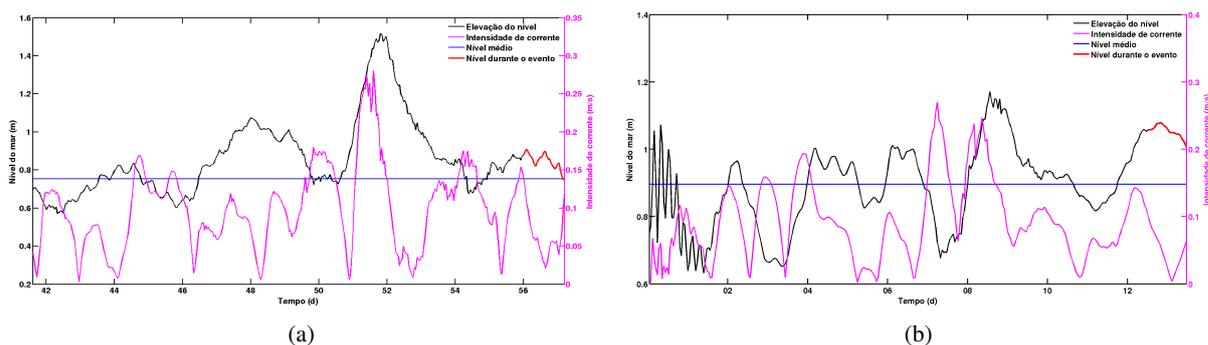


Figura 3: Série temporal das variáveis hidrodinâmicas do estudo. Em (a) e (b) estão as oscilações de intensidade de correntes, nível médio da superfície do mar para as duas semanas anteriores aos derrames modelados.

Os padrões verificados para a variabilidade na superfície do mar acompanharam as oscilações de ventos e correntes, ressaltando a importância de sistemas de previsões atmosféricas aplicados aos sistemas de modelagem e monitoramento de derrames de óleo no mar.

3.2 Análise da degradação

O modelo ECOS consegue calcular as propriedades do óleo no tempo, e dessa forma permitir a avaliação da degradação das partículas durante os derrames estudados. Como as oscilações nos padrões de ventos locais exercem interferências diretas no transporte do óleo, suas causas e efeitos precisam ser analisados em modelagens de derrames de óleo. Sendo assim, as Figs. 4 e 5 mostram a variação temporal e espacial para os dois eventos modelados. A intensidade das correntes é representada pelas variações de cores de fundo da imagem. Os vetores de cor branca representam as direções das correntes e os de cor vermelha representam as direções dos ventos.

Em 2012 (Fig. 4), o óleo atinge a região costeira de Tramandaí após 10 horas de simulação, sendo conduzido à praia, sob influência de ventos que favorecem o empilhamento de água em direção à costa, dominantes durante o período estudado e no dia do evento. As intensidades das correntes oscilaram entre 0,02 e 0,35 m/s , com valores em torno de 0,10 e 0,16 m/s no dia do evento. O tempo para que as partículas de óleo atingissem a praia (10 horas após o derrame) foi equivalente aos valores verificados em estudos similares para a mesma área (Stringari et al., 2014). O transporte de óleo acontece em escalas de baixo período, ocorrendo entre 64 e 128 horas (3 a 6 dias), dentro da escala de tempo dos processos sinóticos, sendo principalmente dominado pelo vento (Marques et al., 2016).

Por terem densidades menores que a da água do mar, as posições das partículas de óleo são influenciadas pela

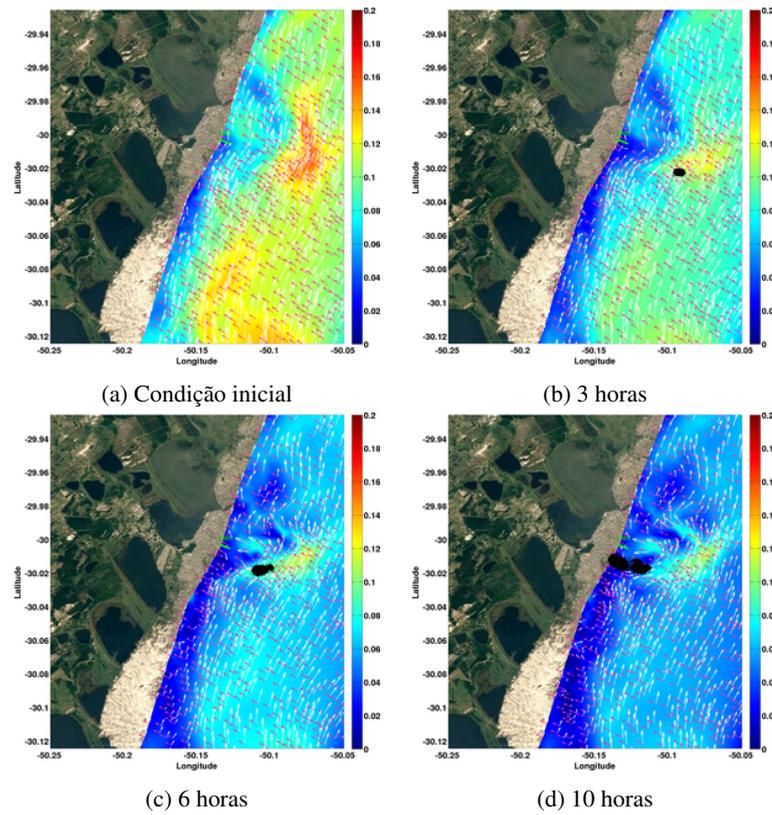


Figura 4: Variabilidade temporal e espacial das partículas de óleo para o derrame de 26/01/2012.

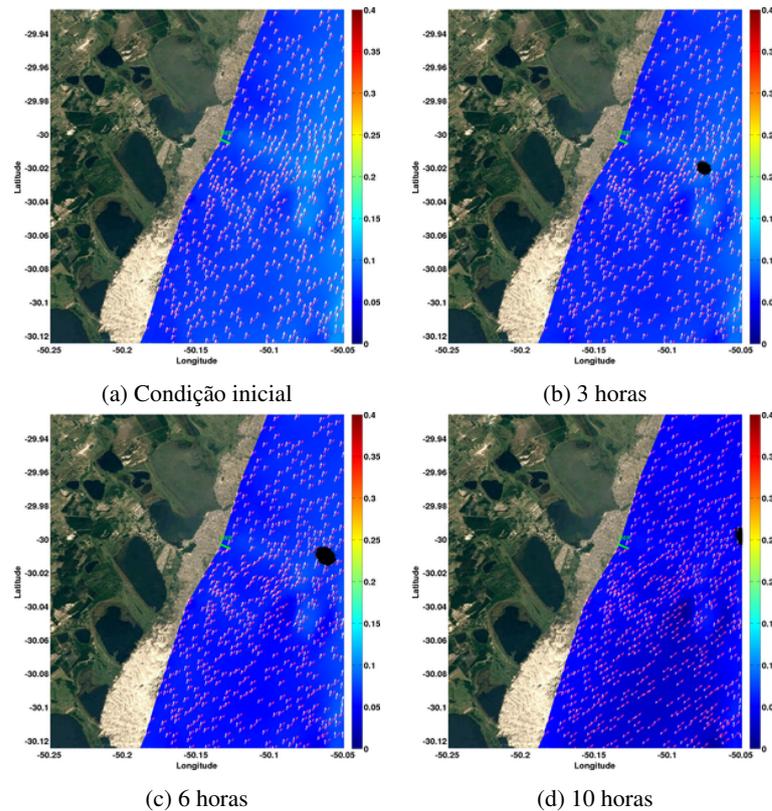


Figura 5: Variabilidade temporal e espacial das partículas de óleo para o derrame de 03/07/2014.

ação superficial dos ventos locais, em função de suas intensidades e direções. Conforme verificado em estudos anteriores sobre a hidrodinâmica da região do estudo Möller Jr et al. (1996, 2001); Castelão e Möller Jr (2006) o padrão dos ventos locais interfere na formação das correntes costeiras, alterando as condições de espalhamento e turbulência das águas costeiras, e por consequência, interferindo no transporte das partículas de óleo.

Observando as séries temporais para os eventos de 2012 e 2014 (Fig. 3a e 3b, respectivamente), foi possível

verificar que as direções médias do transporte das manchas de óleo foram contrárias ao comportamento previsto pelas médias das variáveis hidrodinâmicas da região (Fig. 2a e 2b). Tal verificação confirma as observações de estudos anteriores, que defendem que o transporte e degradação do óleo é principalmente condicionado pelas condições atmosféricas, sendo importante que modelos de óleo baseiem-se em informações confiáveis de sistemas de previsão atmosféricas.

Diferentemente da direção do transporte do óleo de 2012 (Fig. 4) (*onshore*), no evento de 2014 (Fig. 5) o óleo não chegou até a costa, possivelmente porque a combinação das condições meteorológicas do momento do derrame (Fig. 3b) orientaram as resultantes dos ventos e correntes para a direção *offshore*. Outro possível fator foi o pequeno volume do derrame ($4 m^3$).

As diferentes trajetórias obtidas para as manchas dos dois eventos refletem condições contraditórias de susceptibilidade ao risco de derrames de óleo na região. Estratégias de simulações aleatórias e sistemáticas desses eventos constituiriam um melhor método para análises mais realísticas desses níveis de susceptibilidade. Isso pode ser explicado pelo fato da deriva de óleo no mar ser sensível às flutuações de variáveis ambientais, meteorológicas e oceanográficas.

Em 2014 o transporte de óleo, em direção *offshore*, deu-se sob velocidades de correntes com valores superiores aos obtidos para 2012, variando entre 0,02 e 0,40 m/s . Embora os valores máximos de intensidade de correntes (0,30 m/s) tenham sido inferiores ao de 2012, no dia do evento as velocidades das correntes oscilaram entre 0,05 e 0,15 m/s . Assim como observado em 2012, a intensidade das correntes também apresentou pouca variação ao longo das 10 horas simuladas.

Conforme verificado, a direção e intensidade das correntes costeiras, produto da ação dos ventos locais, está entre os principais agentes na advecção do óleo para a região em estudo. Contudo, os processos de dispersão do óleo dos dois eventos não foram analisados, mas também precisam ser considerados para uma simulação mais completa, uma vez que o comportamento difusivo durante a dispersão horizontal da mancha também pode ser afetado pelos padrões das correntes costeiras.

No derrame de 2012 o óleo foi transportado em direção à linha de costa, ficando aprisionado na praia e nas feições e infraestruturas costeiras associadas. Tal confinamento do óleo na faixa costeira poderia contribuir com o aumento dos processos difusivos, uma vez que a linha de costa funcionaria como uma barreira física ao fluxo da mancha de óleo. Análises de contribuição dos diferentes processos de degradação para os dois eventos poderiam fornecer informações para subsidiar tal tipo de constatação.

A velocidade de deslocamento da mancha de 2012, de aproximadamente 0,08 m/s , está de acordo com resultados observados anteriormente para a área da PCSB por Stringari et al. (2014) e Marques et al. (2016), que obtiveram velocidades de 0,07 m/s , para a mesma região em condições de simulação similares. No evento de 2014 os resultados indicaram um deslocamento das partículas de óleo com velocidade média em torno de 0,09 m/s , possivelmente devido às maiores intensidades de correntes (0,02 e 0,40 m/s).

Na análise dos resultados de transporte e degradação do óleo, os valores foram avaliados de forma direta, observando a variação temporal e o comportamento fenomenológico da mancha de óleo, com os seus respectivos destinos, para os eventos de 2012 (Fig. 4) e 2014 (Fig. 5).

A degradação do óleo ocorreu pela análise dos fenômenos de emulsificação e evaporação, representados nas figuras (Fig. 6a e 6b). Para 2012 os resultados indicaram taxas de 55% de evaporação e 75% de emulsificação, equivalendo ao observado por Stringari et al. (2013, 2014) e Marques et al. (2016).

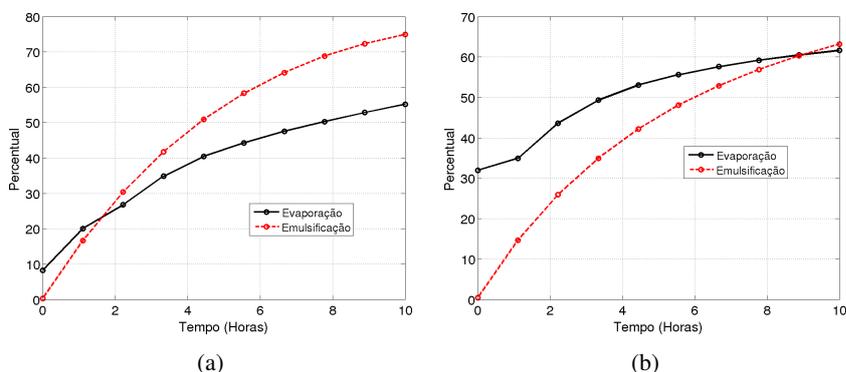


Figura 6: Evolução dos processos de degradação das manchas de óleo para os dois eventos estudados. Taxas das perdas por emulsificação e por evaporação para o evento de 26/01/2012 (a) e para o evento de 03/07/2014 (b).

No evento de 2014 as taxas de evaporação e emulsificação foram praticamente as mesmas (60%), possivelmente devido ao sentido dos ventos locais em direção *offshore* além das pequenas dimensões do derrame ($4 m^3$). As taxas de emulsificação nos dois eventos estudados assemelham-se aos valores encontrados na literatura para estudos similares para a região costeira de Tramandaí e Imbé (Stringari et al., 2014; Marques et al., 2016).

As taxas de evaporação obtidas para 2012 e 2014 também são similares às constatações de Langevin et al.

(2004), que obtiveram que as taxas de evaporação para o óleo superficial geralmente oscilam entre 20 e 80%, sendo mais significativas na primeira semana após o evento. Os valores das taxas de evaporação também são semelhantes ao verificado em estudos similares de degradação de óleo realizados por Fingas e Fieldhouse (2003). A evaporação foi maior para o evento de 2014, provavelmente pelo maior espalhamento da mancha de óleo, que era de pequenas dimensões, em comparação com tamanho da mancha de 2012.

Conforme Mishra e Kumar (2015), evoluções nas taxas de emulsificação e evaporação podem favorecer o processo de afundamento de partículas de óleo, alterando significativamente a viscosidade e densidade das partículas. Contudo, as oscilações nos valores de viscosidade e densidade das partículas de óleo não foram previstas no presente artigo, e constitui um tópico a ser abordado em modelagens posteriores.

4. CONCLUSÕES

As oscilações no estado de elevação do mar, dadas na medida das flutuações de intensidades das correntes costeiras, são concordantes com os padrões clássicos de circulação costeira dirigida pelo vento, típicos da região do estudo.

As variações nas direções e intensidades dos ventos e correntes costeiras podem ser devidas à influência dos ventos dominantes que favorecem o empilhamento ou o rebaixamento do nível do mar na costa. O padrão de circulação costeira dirigido pelos ventos exerce maior influência na determinação da direção média das correntes dominantes em poucos dias anteriores e nos dias dos derrames.

Nesse estudo do transporte e comportamento do óleo em região costeira, as atuações de ventos dominantes favoráveis ao empilhamento de água na costa além de interferirem no transporte das manchas, também orientaram as taxas de perdas por evaporação e emulsificação.

A estratégia de simulação adotada pelo estudo, baseada na reprodução de dois eventos de derrames de óleo, não mostrou-se apropriada à avaliação da susceptibilidade, seja pela oposição entre os destinos das manchas em uma mesma área, devido às oscilações nos parâmetros dos derrames e variáveis ambientais envolvidas, como pelo número insuficiente de simulações para uma boa confiabilidade dessa análise.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e a Agência Nacional do Petróleo - ANP pelas concessões das bolsas de estudo que auxiliaram o desenvolvimento deste trabalho. Também à Marinha Brasileira pelos dados batimétricos fornecidos; à Agência Nacional de Águas, à NOAA e ao HYCOM pelos dados hidrológicos, oceanográficos e meteorológicos utilizados nas condições de contorno dos modelos, e à HR Wallingford pela licença acadêmica do sistema TELEMAR. Pesquisa desenvolvida com o apoio do Centro Nacional de Supercomputação (CESUP), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

6. REFERÊNCIAS

- Bollmann, M., Bosch, T., Colijn, F., Ebinghaus, R., Froese, R. e Güssow, K., 2010. *World Ocean Review*. Maribus, Hamburg, 2010, 1 edição.
- Braga, M.F. e Krusche, N., 2000. "Padrão de ventos em Rio Grande, RS, no período de 1992 a 1995." *Atlântica*, Vol 22, pp. 27–40.
- Calliari, L., Junior, E.E.T. e Nicolodi, J.L., 2006. "Classificação Geomorfológica". Em D. Muehe (editor), "Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro", Ministério do Meio Ambiente, Brasília. Brasil, 2006. 1 edição, 438–445.
- Castelão, R.M. e Möller Jr, O.O., 2006. "A modeling study of Patos lagoon (Brazil) flow response to idealized wind and river discharge: dynamical analysis". *Brazilian Journal of Oceanography*, Vol 54, n° 1, pp. 1–17.
- Fingas, M. e Fieldhouse, B., 2003. "Studies of the formation process of water-in-oil emulsions". *Marine Pollution Bulletin*, Vol 47, n° 9-12, pp. 369–396.
- Fingas, M.F., 1997. "Studies on the evaporation of crude oil and petroleum products: I. The relationship between evaporation rate and time". *Journal of Hazardous Materials*, Vol 56, n° 3, pp. 227–236.
- Fingas, M.F., 1999. "the Evaporation of Oil Spills : Development and Implementation of New Prediction Methodology". *International Oil Spill Conference*, pp. 281–287.
- Fingas, M.F. e Banta, J., 2016. "Polar Compounds in Oils and their Aquatic Toxicity". Em "Environment and Climate Change Canada", 2016, 197–259.
- Garção, H.F., Mendes, F.L., dos Santos, F., Cerrone, B. e da Cruz, L.M., 2012. "Modelagem de Transporte de Óleo". Relatório técnico, PROOCEANO, Rio de Janeiro.

- Hervouet, J.M., 2007. "Free surface flows: Modelling with the finite element methods".
- Kundu, P.K. e Cohen, I.M., 2002. Fluid Mechanics. Academic Press, Orlando, USA, 2002, second edição.
- Langevin, D., Poteau, S., Hénaut, I. e Argillier, J.F., 2004. "Crude Oil Emulsion Properties and Their Application to Heavy Oil Transportation". Oil & Gas Science and Technology, Vol 59, nº 5, pp. 511–521.
- Mariano, A.J., Kourafalou, V.H., Srinivasan, A., Kang, H., Halliwell, G.R., Ryan, E.H. e Roffer, M., 2011. "On the modeling of the 2010 Gulf of Mexico Oil Spill". Dynamics of Atmospheres and Oceans.
- Marques, W.C., Fernandes, E.H.L., Malcherek, A. e Rocha, L.A.O., 2012. "Energy converting structures in the Southern Brazilian Shelf: Energy Conversion and its influence on the hydrodynamic and morphodynamic processes." Journal of Geophysical Research.
- Marques, W.C., Fernandes, E.H.L., Monteiro, I.O. e Möller, O.O., 2009. "Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil". Continental Shelf Research, Vol 29, pp. 556–571.
- Marques, W.C., Stringari, C.E. e Eidt, R.T., 2014. "The Exchange Processes of the Patos Lagoon Estuary – Brazil: A Typical El Niño Year versus a Normal Meteorological Conditions Year". Advances in Water Resource and Protection, Vol 2, pp. 11–20.
- Marques, W.C., Stringari, C.E., Kirinus, E.P., Moller Jr, O.O., Toldo Jr, E.E. e Andrade, M.M., 2016. "Numerical Modeling of the Tramandaí Beach Oil Spill, Brazil – a case study of the event". Progress in Oceanography. Artigo em revisão.
- Marta-Almeida, M., Ruiz-Villarreal, M., Pereira, J., Otero, P., Cirano, M., Zhang, X. e Hetland, R.D., 2013. "Efficient tools for marine operational forecast and oil spill tracking." Marine pollution bulletin, Vol 71, nº 1-2, pp. 139–51.
- Michel, J. e Fingas, M., 2016. "Oil Spills: Causes, Consequences, Prevention, and Countermeasures". Em "Fossil Fuels", World Scientific, 2016. 159–201.
- Mishra, A.K. e Kumar, G.S., 2015. "Weathering of Oil Spill: Modeling and Analysis". Aquatic Procedia, Vol 4, nº 1, pp. 435–442.
- MMA, 2002. Especificações e Normas Técnicas para a Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo. Brasília, 2002, 1ª edição.
- Möller Jr, O.O., Castaing, P., Salomon, J.C. e Lazure, P., 2001. "The Influence of Local and Non-Local Forcing Effects on the Subtidal Circulation of Patos Lagoon". Estuaries, Vol 24, nº 2, pp. 297.
- Möller Jr, O.O., Lorenzenti, J.a., Stech, J. e Math, M.M., 1996. "The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics". Continental Shelf Research, Vol 16, nº 3, pp. 335–351.
- Rubert, J., Santos, M.B. e Krusche, N., 2006. "Comparação entre medidas de velocidade do vento em rio grande, rs, de 2001 a 2006". XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia.
- Soares, I.D., Kourafalou, V. e Lee, T.N., 2007. "Circulation on the western South Atlantic continental shelf: 1. Numerical process studies on buoyancy". Journal of Geophysical Research, Vol 112, nº C4.
- Stringari, C.E., Correa Marques, W., Eidt, R.T. e Mello, L.F., 2013. "Modeling an Oil Spill along the Southern Brazilian Shelf: Forcing Characterization and Its Influence on the Oil Fate". International Journal of Geosciences, Vol 4, nº March, pp. 397–407.
- Stringari, C.E., Marques, W.C., Fagundes De Mello, L. e Eidt, R.T., 2014. "Application of telemac -ecos modeling system at the southern brazilian shelf: case study of Tramandaí beach oil spill". Vol 9, nº 2, pp. 105–112.
- Tansel, B., 2014. "Propagation of impacts after oil spills at sea: Categorization and quantification of local vs regional and immediate vs delayed impacts". International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol 7, pp. 1–8.
- Tomazelli, L.J. e Villwock, J.A., 1992. "Considerações sobre o ambiente praias e a deriva litorânea de sedimentos ao longo do litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil." Pesquisas em Geociências, Vol 19, nº 1, pp. 3–12.
- Villaret, C., Hervouet, J.M., Kopmann, R., Merkel, U. e Davies, A.G., 2013. "Morphodynamic modeling using the Telemac finite-element system". Computers & Geosciences, Vol 53, pp. 105–113.

7. AVISO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pela veracidade do material incluído no presente artigo.