

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

APLICAÇÃO DO SOFTWARE MOHID NA AVALIAÇÃO DE RISCO AMBIENTAL AOS CORAIS DE ÁGUAS PROFUNDAS PELO DESCOMISSIONAMENTO DE DUTOS SUBMARINOS NA BACIA DE CAMPOS

Pedro Mello Paiva¹ – pedromellopaiva@gmail.com

Jader Lugon Júnior²

Emiliano Nicolas Calderon¹

Maria Manuela Fraga Juliano³

Mauricio Mussi Molisani¹

¹ Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Conservação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, NUPEM – Macaé, RJ, Brasil

² Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Instituto Federal Fluminense – Macaé, RJ, Brasil

³ Institute of Marine Research – IMAR, University of Azores, Ponta Delgada, Portugal

Resumo. *O descomissionamento dos dutos submarinos é uma etapa necessária quando o ciclo de vida das operações dos campos de produção de petróleo chega ao fim. Diversas são as alternativas para desmobilização, desde a remoção completa, até o abandono in situ. Não há consenso sobre qual é a melhor alternativa, nem mesmo no âmbito de meio ambiente. As atividades de remoção ou de enterramento dos dutos submarinos podem causar a ressuspensão de sedimentos no leito marinho, que podem vir a se depositar sobre os bancos de corais mais próximos. A proposta do presente estudo foi adaptar a metodologia de CRA (Coral Risk Assessment), fazendo uso do software MOHID, verificando a aplicabilidade deste software na avaliação de risco de uma operação de remoção de um duto submarino, na Bacia de Campos, instalado em um região próxima a corais de águas profundas. O software MOHID se apresentou como uma ferramenta aplicável para o estudo de risco ambiental do cenário proposto, sendo capaz de representar os resultados da espessura das camadas de sedimentos depositados sobre o leito marinho, em regiões próximas ao duto.*

Palavras-chave: *Modelagem hidrodinâmica, Avaliação de Risco Ambiental, Corais de Águas Profundas, Descomissionamento, Sistemas Submarinos.*

1. INTRODUÇÃO

O descomissionamento ou desmobilização dos dutos submarinos é uma etapa necessária quando o ciclo de vida das operações dos campos de produção chega ao fim, sendo um assunto que vem ganhando relevância ao redor do mundo, seja pelo declínio da produção dos campos, pelo término do período de concessão, ou pelo fim da vida útil das instalações. Portanto, em um dado momento, faz-se necessária a desativação destas estruturas, que podem vir a ser removidas com o objetivo de reestabelecer as condições naturais do leito marinho.

Os dutos e umbilicais fazem parte do sistema submarino de produção, e são componentes de extrema relevância na operação de produção *offshore* de petróleo e gás. Os primeiros grandes projetos de descomissionamento de dutos submarinos vêm ocorrendo no Mar do Norte (Reino Unido), onde cerca de 45.000 km de dutos foram instalados para o transporte de óleo e gás. Toda esta infraestrutura instalada deverá ser desmobilizada nos próximos 30 anos, com custos estimados de US\$19,4 bilhões (UK, 2014).

A produção de petróleo dos campos maduros da Bacia de Campos (RJ) vem apresentando declínio (ANP, 2014), e a região se apresenta como um estudo de caso relevante para o tema. Cerca de 15% das plataformas de produção de petróleo e gás foram instaladas na década de 80, o que significa que já operam por aproximadamente 30 anos, e as alternativas de descomissionamento dos dutos já começam a ser estudadas.

Os dutos submarinos a serem descomissionados na Bacia de Campos são estruturas instaladas no leito marinho, que viabilizam o controle e operação do sistema de produção (Fig. 1). Estes dutos submarinos podem interligar as plataformas de produção aos poços, com diferentes finalidades, como por exemplo: produção e de óleo e gás, injeção de gás-lift, ou injeção de água. Existem ainda os oleodutos e gasodutos, responsáveis pelo escoamento da produção de óleo e gás para outras unidades, ou para o tratamento em plantas *onshore*. Por fim, podemos citar os dutos chamados de umbilicais, que permitem o acionamento hidráulico para operação dos equipamentos submarinos.



Figura 1: Exemplo de arranjo para o sistema submarino de produção (Subsea World News, 2014).

Diversas são as alternativas para desmobilização dos dutos submarinos, dentre elas estão: a remoção e recuperação completa; o enterramento ou entrenchamento; e o alijamento, também chamado de abandono, *in situ* ou outro local determinado. A decisão sobre como e quando realizar o descomissionamento é multidisciplinar, incluindo, mas não limitada a aspectos relacionados à engenharia; segurança; meio ambiente; custos; saúde; e sociedade (Fowler *et al.*, 2014).

Estudos demonstram que não há clareza sobre os impactos ambientais relacionados às diferentes alternativas de desmobilização, o que indica que não há consenso sobre a melhor alternativa, nem mesmo no âmbito dos impactos no meio ambiente (Ekins *et al.*, 2005). Martins (2015) destaca alguns dos principais impactos ambientais associados às operações de descomissionamento de dutos submarinos, dentre eles: vazamento de óleo acumulado no interior dos dutos; restrições impostas às atividades pesqueiras; contaminação *onshore* devido à disposição final dos dutos submarinos removidos; contaminação por NORM (materiais radiotivos de ocorrência natural) acumulado ao longo da vida produtiva dos dutos; e dano a fauna aquática, devido ao revolvimento dos sedimentos de fundo durante as operações de remoção, entrenchamento, ou corte dos dutos.

No Brasil, dentre os impactos ambientais que devem ser considerados na instalação, operação e descomissionamento dos equipamentos submarinos dos campos de produção, atenção especial tem sido dada aos danos causados aos corais de águas profundas. Os recifes de corais destas regiões são considerados habitats coralíneos de profundidade, com grande importância ecológica, pois oferecem inúmeros recursos biológicos e econômicos. Na Bacia de Campos, por exemplo, um campo de aproximadamente 40 km de comprimento hospeda bancos de corais com centenas de metros de extensão e mais de 10 metros de altura sobre o leito marinho (Viana *et al.*, 1998).

Os ecossistemas coralíneos de águas profundas são especialmente vulneráveis aos impactos antrópicos, uma vez que a maioria das espécies apresenta crescimento lento, baixas taxas de restauração e reprodução lenta e tardia, quando comparados com espécies de outros sistemas marinhos (Ramírez-Llodra *et al.*, 2011). Muitos dados sobre parâmetros ecológicos como taxas de crescimento, reprodução, dispersão larval, fisiologia e comportamento, ainda são necessários para um melhor entendimento sobre a resiliência destes organismos (Roberts, 2009).

As atividades de remoção ou de enterramento dos dutos submarinos podem causar danos físicos com deslocamento ou remoção dos corais, além de perturbações associadas à qualidade da água, causadas pela dispersão de sedimentos durante a operação. Os efeitos na qualidade da água podem afetar fauna e flora bentônica em proporções maiores, dependendo das condições de dispersão destes sedimentos. Os mecanismos de filtração das espécies podem ser obstruídos, a turbidez da água pode afetar o crescimento dos corais, e o soterramento pode chegar a níveis letais (Walker; Roberts, 2013)

A remoção total das estruturas se apresenta como uma das alternativas para a desmobilização dos dutos submarinos, pois neste caso, em princípio, o leito marinho estaria sendo deixado o mais próximo possível da condição original. Por outro lado, a retirada pode aumentar a deposição de sedimentos nos corais, resultando na diminuição da qualidade do ambiente ou até mesmo induzindo à morte dos corais.

A escolha dentre as alternativas de desmobilização dos dutos submarinos deve ser baseada em uma adequada avaliação dos respectivos riscos ambientais associados. Ulfnes *et al.* (2012) propõem um método de avaliação de riscos para os corais (CRA – Coral Risk Assessment), com o apoio de modelagem hidrodinâmica. São avaliados estudos de caso para o soterramento dos corais devido à disposição dos cascalhos de perfuração e às atividades de ancoragem de embarcações. Em estudos recentes, NAVAS *et al.* (2014) estudaram a hidrodinâmica em regiões próximas aos bancos de corais nos recifes de Mingulay (Escócia), fazendo uso do software MOHID, com o objetivo de caracterizar a oceanografia e ecologia da região.

A proposta deste presente estudo é utilizar a metodologia de avaliação de risco aos corais (CRA), para verificar a aplicabilidade do software MOHID aos estudos ambientais de atividades de instalação e remoção de dutos submarinos.

2. METODOLOGIA

As imagens de ROV (*Remotely Operated Vehicles*) e AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) são utilizadas para identificação de potenciais bancos de corais, e definição dos limites dos habitats. Depois de caracterizadas e delimitadas as regiões de potenciais bancos de corais, estes habitats devem ser classificados quanto a sua condição (ou sensibilidade ambiental), e diversos são os fatores que podem ser levados em consideração nesta classificação, dentre eles: altura das estruturas em relação ao leito marinho, quantidade de espécies diferentes para uma determinada região, e a quantidade de estruturas identificadas para uma determinada área (Ulfsnes *et al.*, 2012).

Para avaliar a consequência, é necessário levar em consideração a condição dos corais, e a espessura da camada de sedimentos depositada sobre os mesmos, ou seja, o grau de impacto (Tabela 2), conforme metodologia de avaliação de risco aos corais (CRA – Coral Risk Assessment) proposta por Ulfsnes *et al.* (2012). Ainda segundo os autores, as consequências para os corais podem ser estimadas baseadas no trabalho de Larsson & Purser (2011), que avaliou os efeitos do soterramento na taxa de crescimento dos corais e na mortalidade.

Tabela 1: Parâmetros para classificação da consequência. Adaptado de (Ulfsnes *et al.*, 2012).

		CONDIÇÃO DO CORAL			
		Morto	Pobre	Moderado	Bom
CAMADA DE SEDIMENTOS	0,1 - 1 mm	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo
	1 - 10 mm	Mínimo	Baixo	Baixo	Considerável
	10 - 50 mm	Mínimo	Baixo	Considerável	Severo
	> 50 mm	Mínimo	Considerável	Severo	Severo

A quantidade de sedimentos depositados, por sua vez, é um resultado de observações ou da modelagem computacional. Em resumo, de acordo com esta abordagem, a consequência é tanto maior, quanto maior for o soterramento, e maior for a sensibilidade ambiental (condição) dos corais expostos ao risco.

Conceitualmente, o risco é uma composição das possíveis consequências e da probabilidade de ocorrência. Este estudo limitou-se a realizar uma simulação determinística da dispersão dos sedimentos, representando os resultados de espessura de camadas de sedimentos depositada em uma única simulação, não contemplando a etapa de classificação dos bancos quanto à condição.

2.1 Modelagem hidrodinâmica

O estudo se desenvolveu na região norte da Baía de Campos, devido à disponibilidade de dados da hidrodinâmica em profundidades próximas ao leito marinho, disponibilizadas pelo projeto MAPEM (Monitoramento Ambiental em Atividades de Perfuração Exploratória Marítima) (Toldo *et al.*, 2004).

O módulo “Hidrodinâmico” do software MOHID é responsável pelo cálculo de variáveis como nível do mar, velocidade das correntes e os fluxos de água, em um modelo tridimensional baroclínico, a partir de dados de entrada como batimetria da região, variação de maré, e velocidade do vento. Por meio das equações que compõem este módulo, o MOHID resolve as equações primitivas que formulam o escoamento tridimensional incompressível.

O módulo “Hidrodinâmico” do software MOHID, possibilita o refinamento da malha, tanto na horizontal quanto na vertical, com o objetivo de permitir o melhor entendimento da dinâmica da região próxima ao leito marinho, e já vem sendo utilizado em estudos de áreas coralíneas (Navas *et al.*, 2014) (Fig. 2).

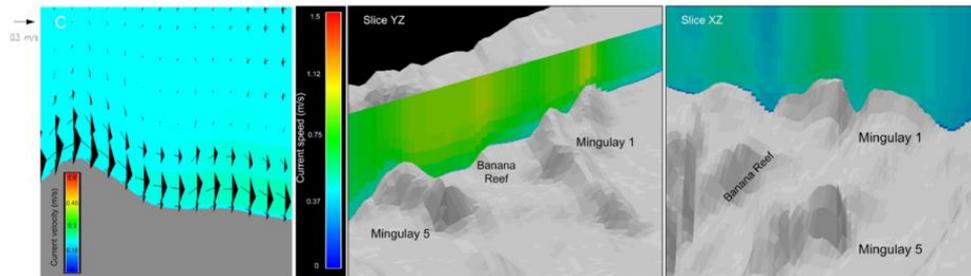


Figura 2: Detalhe do padrão de circulação das correntes em regiões próximas aos bancos de corais (Navas, 2014).

Os dados hidrodinâmicos deste estudo foram obtidos por meio de técnicas de *downscaling* (Franz *et al.*, 2016), como pode ser visto na Fig. 3, utilizando as seguintes forçantes globais: valores diários de salinidade, temperatura e nível da água obtidos a partir do modelo Glorys2V4, disponibilizado em escala global no site do projeto Copernicus (Copernicus, 2018); dados das condições atmosféricas a cada 3 horas obtidas do modelo NCEP através do site da NOAA (NCEP, 2018); e informações sobre as componentes harmônicas da maré obtidas do modelo FES2012 (Carrère *et al.*, 2012).

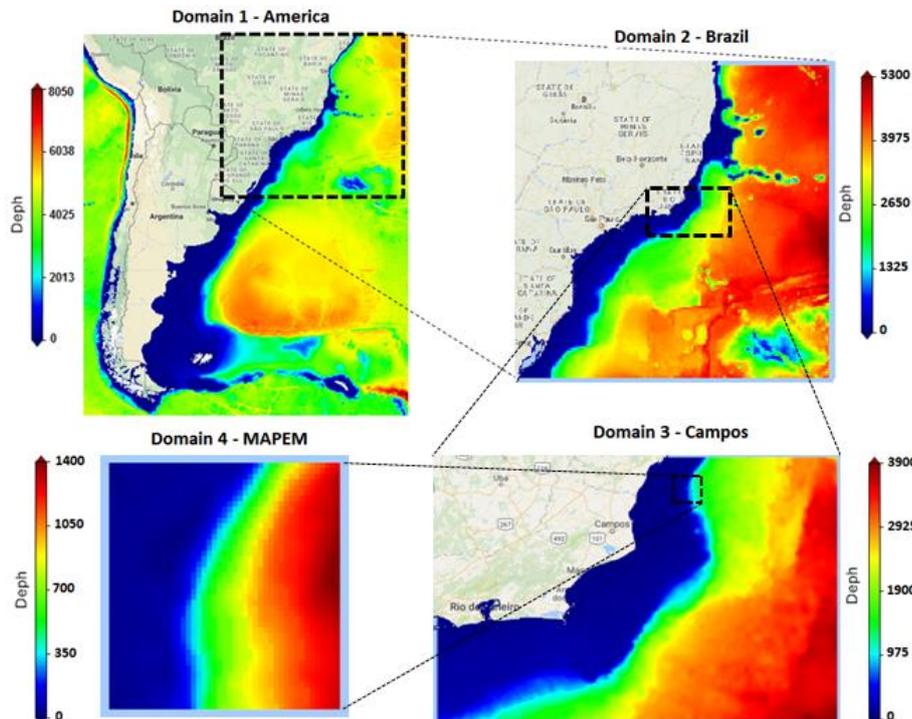


Figura 3: Domínios utilizados no *downscaling*.

O refinamento da malha espacial teve por objetivo representar adequadamente as condições de correntes em escala local, sendo utilizadas as resoluções horizontais apresentadas na Tabela 1.

Tabela 2 – Discretização especial dos diferentes domínios

Nível	Domínio	Resolução Horizontal		Profundidade Máxima
1	América do Sul	0.120°	12,000 m	8050 m
2	Brasil	0.120°	12,000 m	5300 m
3	Bacia de Campos	0.024°	2,400 m	3890 m
4	Região do MAPEM	0.008°	800 m	1420 m

A resolução vertical do modelo foi mantida exatamente como a adotada pelo modelo Glorys de 75 camadas, sendo implementadas com: 7 camadas *sigma* próximas à superfície, que modelam aproximadamente os 10 metros de lâmina d'água mais rasa; e 68 camadas cartesianas, que alcançam a profundidade de 6.000 metros. Na região de interesse, em profundidades próximas a 1.000 metros, cada camada é responsável pela modelagem de uma lâmina d'água com espessura variando entre 80 e 100 metros.

2.2 Modelagem da ressuspensão e deposição de sedimentos

O conceito de traçador é utilizado pelo módulo “Lagrangeano” no software MOHID. O resultado principal dos cálculos realizados por este módulo é a posição no espaço (x, y, z) para cada *time-step* da simulação. O módulo “Hidrodinâmico” simula o campo de velocidades necessário ao módulo “Lagrangeano”, para calcular a trajetória das partículas de sedimentos. O campo de velocidades gerado pelo módulo “Hidrodinâmico” é muito influente nos resultados obtidos nas simulações do módulo “Lagrangeano”.

Os resultados obtidos pelas simulações do módulo “Lagrangeano” permitem um mapeamento das regiões mais afetadas pelo depósito de sedimentos, e uma estimativa para a espessura da camada de sedimentos. É possível observar ainda a porção da coluna d'água que eventualmente é afetada pela pluma de turbidez. A concentração destes sedimentos na água, e o tempo que os sedimentos ficam suspensos, são parâmetros importantes na interação com o ambiente marinho.

Segundo (Viana *et al.*, 1998), no talude médio da Bacia de Campos, entre 550 e 1.200 m de profundidade, a sedimentologia do fundo é caracterizada principalmente por areias finas e siltes arenosos. Desta forma, neste presente estudo, foram consideradas partículas com 0,2 mm de diâmetro, o que corresponde a uma velocidade de sedimentação de 0,02 m/s (Smith; Cheung, 2003). Para simular a ressuspensão dos sedimentos, as origens das descargas foram definidas a uma altura de cerca de 50 metros do leito marinho.

Na região central do modelo hidrodinâmico proposto, hipoteticamente, foi considerada a disposição de um duto flexível, de aproximadamente 5 km de comprimento, posicionado sobre o leito marinho.

Na modelagem da ressuspensão e deposição de sedimentos, oriundos de uma possível operação de remoção deste duto, seis pontos foram considerados como possíveis origens. Na região de batimetria mais rasa (800 metros), apenas uma origem foi considerada. Na região mais ao fundo (900 metros), duas origens foram consideradas. Por fim, na região intermediária (850 metros de profundidade), foram dispostas três origens, compondo a representação hipotética considerada neste estudo.

Estas origens estão representando pontos de maior potencial de ressuspensão de sedimentos durante a operação de remoção do duto, e diversas são as possíveis causas deste volume maior ressuspêndido, dentre elas: trechos onde o duto encontra-se enterrado; trechos onde há necessidade de corte do duto; trechos de maior movimentação da embarcação (*heave*) que está realizando a operação; ou ainda, trechos nos quais a embarcação interrompe a operação, e a movimentação do duto devido ao *heave* da embarcação, fica restrita a uma região menor.

A Fig. 4 representa a visualização 3-D da ressuspensão dos sedimentos nas suas respectivas origens, nos primeiros 30 minutos de simulação, tempo estimado como suficiente para representar a deposição dos sedimentos sobre o leito marinho. Ainda nesta figura, os pontos vermelhos representam os sedimentos que foram ressuspêndidos, e, a cada time-step de 10 minutos, está sendo representada a posição das partículas.

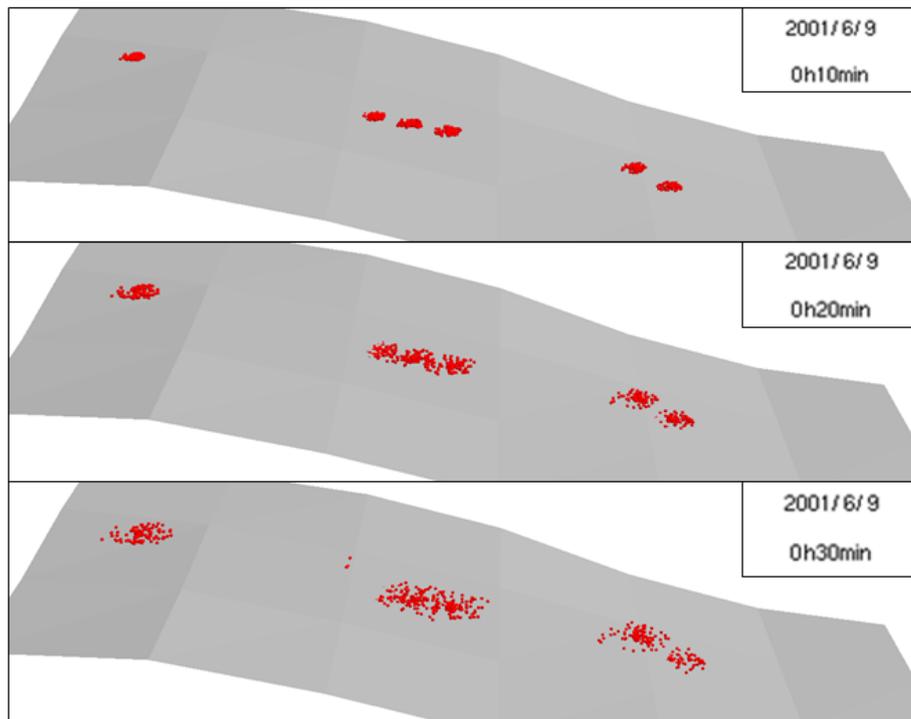


Figura 4: Visualização 3-D da dispersão de sedimentos ao longo dos 30 minutos de simulação

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como vimos, para aplicação da metodologia proposta por Ulfnes *et al.* (2012), faz-se necessária a representação da classificação da condição dos corais, sobreposta à representação da espessura da camada de sedimentos depositados. A Fig. 5 representa a disposição do duto sobre o leito marinho, em uma vista superior, e as diferentes faixas de espessura da camada de sedimentos depositada sobre o leito marinho, na região próxima ao duto, ao final da simulação.

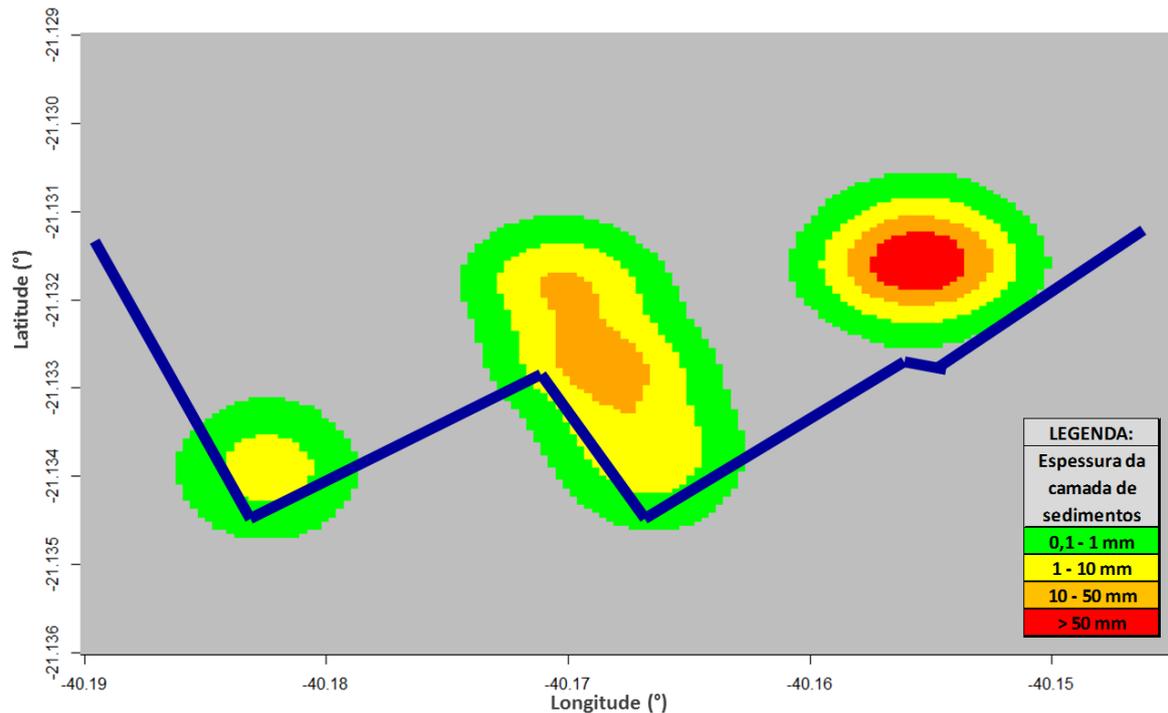


Figura 5: Sobreposição da condição dos corais à representação da espessura da camada de sedimentos depositada.

A simulação da dispersão dos sedimentos, com origem nos seis pontos propostos, formou três principais regiões de depósito, com espessura da camadas de sedimentos variando em todas as faixas propostas: 0,1 a 1 mm; 1 -10 mm; 10 a 50 mm; e maior que 50 mm.

4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O software MOHID se apresentou como uma ferramenta aplicável para o estudo de risco ambiental de operações de remoção de dutos submarinos em regiões próximas a bancos de coral, permitindo a simulação da dispersão e deposição de sedimentos sobre o leito marinho em regiões próximas ao duto. A resolução vertical ainda se apresenta como uma limitação do modelo. Para obter resultados mais confiáveis, faz-se necessário reduzir a dimensão vertical das células mais profundas do modelo hidrodinâmico, para que seja capazes de representar, efetivamente, as correntes mais próximas o leito marinho.

Este estudo limitou-se a realizar uma simulação determinística da dispersão de sedimentos, que permitiria avaliação da consequência da remoção de um duto para um determinado cenário. Vale lembrar que o conceito de risco precisa contemplar a probabilidade de ocorrência dos eventos. Para isto, faz-se necessária a simulação em diferentes cenários, para diferentes condições de hidrodinâmica, em uma abordagem probabilística, composta por diversas simulações.

Os dados de disposição do duto utilizados neste trabalho foram fictícios. Trabalhos futuros poderiam testar esta abordagem em um estudo com dados reais, se possível, em regiões da Baía de Campos em que há, de fato, expectativa de operação de remoção de dutos no descomissionamento das instalações.

Tanto o modelo hidrodinâmico quanto o de dispersão de sedimentos dependem de ajustes e validação, por meio da comparação com dados de campo. Além disso, para que o estudo

alcance a avaliação de risco aos corais, faz-se necessário a sobreposição dos dados disposição e condição de corais, aos resultados da dispersão de sedimentos. Portanto, para os trabalhos futuros, recomenda-se que sejam coletados e disponibilizados dados de campo como: medições de correntes submarinas em regiões próximas ao leito marinho; medições de taxas de ressuspensão/deposição de sedimentos, por meio de instalação de armadilhas de sedimentos, durante operação de remoção de dutos; e imagens de ROV e AUV, com dados de distribuição e condição dos bancos de corais nestas regiões.

REFERÊNCIAS

- ANP. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2014**. Rio de Janeiro, Brasil: ANP, 2014.
- CARRÈRE, L.; LYARD, F.; CANCEY, M.; GUILLOT, A., ROBLOUT, L. *FES2012: A new global tidal model taking advantage of nearly 20 years of altimetry*. En proceedings of the meeting 20 Years of Altimetry, Venice, 2012.
- COPERNICUS. *Marine Environment Monitoring Service*. [ref. 25th of July 2018]. Accessed in Web: <http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/>.
- EKINS, Paul; VANNER, Robin; FIREBRACE, James. DECOMMISSIONING OF OFFSHORE OIL AND GAS FACILITIES: DECOMMISSIONING SCENARIOS: A COMPARATIVE ASSESSMENT USING FLOW ANALYSIS March 2005. 2005.
- FOWLER, A. M. et al. A multi-criteria decision approach to decommissioning of offshore oil and gas infrastructure. *Ocean & Coastal Management*, v. 87, p. 20–29, 2014.
- FRANZ, G.A.S.; LEITÃO, P.; SANTOS, A.; JULIANO, M., NEVES, R. *From regional to local scale modelling on the south-eastern Brazilian shelf: case study of Paranaguá estuarine system*. *Brazilian Journal of Oceanography*, 2016, vol. 64, núm. 3, pp. 277-294.
- LARSSON, Ann I.; PURSER, Autun. Sedimentation on the cold-water coral *Lophelia pertusa*: Cleaning efficiency from natural sediments and drill cuttings. *Marine Pollution Bulletin*, v. 62, n. 6, p. 1159–1168, 2011.
- NAVAS, Juan Moreno et al. Ecohydrodynamics of Cold-Water Coral Reefs: A Case Study of the Mingulay Reef Complex (Western Scotland). *PLoS ONE*, v. 9, n. 5, p. e98218, 2014.
- NCEP-DOE, Reanalysis. Earth System Research Laboratory, Physical Sciences Division, National Oceanic & Atmospheric Administration. [ref. 25th of July 2018]. <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.gaussian.html>
- RAMIREZ-LLODRA, Eva et al. Man and the Last Great Wilderness: Human Impact on the Deep Sea. *PLoS ONE*, v. 6, n. 8, p. e22588, 2011.
- ROBERTS, J. Murray. **Cold-water corals: the biology and geology of deep-sea coral habitats**. Cambridge, UK; New York: Cambridge University Press, 2009. Disponível em: <<http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=442834>>. Acesso em: 6 nov. 2017.
- SMITH, David A.; CHEUNG, Kwok Fai. Settling Characteristics of Calcareous Sand. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 129, n. 6, p. 479–483, 2003.
- SUBSEA WORLD NEWS. Five Additional FMC Technologies' Subsea Manifolds for Petrobras' Fields. **Press Release**, 2014. Disponível em: <<http://subseaworldnews.com/2014/08/19/126395/>>. Acesso em: 6 nov. 2017.
- UK. **Decommissioning Insight 2014**. Aberdeen, Escócia: UK, 2014.
- ULFSNES, A.; MOESKELAND, T.; AARNES, O. Coral Risk Assessment - Tool Development. In: 2012, **Anais...** : Society of Petroleum Engineers, 2012.
- VIANA, A. R. et al. Hydrology, morphology and sedimentology of the Campos continental margin, offshore Brazil. *Sedimentary Geology*, v. 115, n. 1–4, p. 133–157, 1998.
- WALKER, Alan; ROBERTS, Jenny. **Decommissioning in the North Sea**. Londres, Inglaterra: Royal Academy of Engineering, 2013.

APPLICATION OF MOHID SOFTWARE TO THE RISK ASSESSMENT OF DECOMMISSIONING SUBSEA PIPELINES ON DEEPWATER CORALS IN CAMPOS BASIN

Abstract. *The decommissioning of subsea pipelines is a necessary step when the life cycle of oil field operations comes to the end. There are several alternatives for demobilization, from complete removal to “in situ” abandonment. There is no consensus about the best alternative, not even in the ambit of the environmental impacts. Removal or burial of subsea pipelines may cause resuspension of sediments from seabed, which may be deposited on the surrounding coral banks. The purpose of this study was to adapt the CRA (Coral Risk Assessment) methodology, making use of MOHID software, to verify its applicability in the risk assessment of a possible subsea pipeline remotion in the Campos Basin, installed in a region close to deepwater corals. As a result, the MOHID software is an applicable tool for the environmental risk assessment of the proposed scenario, being able to represent the results of the thickness of the sediment layers deposited over the sea floor, near the pipeline.*

Keywords: *Hydrodynamic Modeling, Environmental Risk Assessment, Deepwater Corals, Decommissioning, Subsea Systems.*