

Modelagem computacional 3D do *blowout* de poço de petróleo: revisão sobre requisitos ambientais e metodologia

Oil Well Blowout 3D computational modeling: review of methodology and environmental requirements

Pedro Mello Paiva^{*}
Alexandre Nunes Barreto^{**}
Leticia Ferraço Campos^{***}
Jader Lugon Junior^{****}

Resumo

Tem-se como finalidade neste artigo de revisão bibliográfica apresentar as diferentes metodologias utilizadas na modelagem tridimensional da dispersão dos hidrocarbonetos originados do *blowout* de um poço de petróleo. São considerados os conceitos de sensibilidade e vulnerabilidade ambiental da costa, sua importância para a priorização de áreas mais vulneráveis em casos de contingência e a legislação pertinente. São levantados questionamentos sobre a metodologia atualmente utilizada nos estudos ambientais de deriva do óleo, que considera a simplificação do vazamento em superfície, mesmo nos cenários de *blowout* de poços. Os esforços para o melhor entendimento do comportamento do óleo e do gás na coluna d'água e da modelagem tridimensional da trajetória ganharam força após o vazamento da *Deepwater Horizon* em 2010 no Golfo do México. Os dados coletados e observações realizadas durante o acidente foram amplamente utilizados para ajuste dos modelos, que buscaram incorporar os diversos fatores referentes às forçantes hidrodinâmicas e aos processos de intemperismo aos quais os hidrocarbonetos são submetidos em vazamentos de subsuperfície tais como evaporação, dispersão, emulsificação, dissolução, oxidação, sedimentação e biodegradação. As dificuldades se apresentam ainda mais desafiadoras para o caso de *blowouts* em águas profundas, onde as incertezas são ainda maiores. Os estudos abordaram diferentes variáveis para realizar os ajustes dos modelos de dispersão do óleo e do gás ao longo da trajetória de subida, e, entre os fatores que exercem forte influência, destacam-se: a velocidade das correntes de subsuperfície; a separação do gás da pluma principal; a formação de hidrato, a dissolução das gotículas de óleo e gás; as variações no diâmetro das gotículas; a intrusão das gotículas em profundidades intermediárias; a biodegradação; e a parametrização adequada dos perfis de densidade, salinidade e temperatura da água ao longo da coluna.

Palavras-chave: Vazamento de óleo. Modelagem computacional. Validação de modelo. *Blowout*. Águas profundas. Trajetória. Intemperismo.

^{*} Mestre em Engenharia Ambiental (IFFluminense). Engenheiro de Petróleo, Petrobrás, Macaé/RJ - Brasil. E-mail: pedromellopaiva@gmail.com.

^{**} Doutor em Engenharia de Reservatório e Exploração de Petróleo (UENF). Engenheiro Elétrico, Professor do Instituto Federal Fluminense *campus* Macaé/RJ - Brasil. E-mail: alexandrenunesbarreto@hotmail.com.

^{***} Mestre em Engenharia Ambiental (IFFluminense). Engenheira Química, Doutoranda em Engenharia Química, UERJ, Rio de Janeiro/RJ - Brasil. E-mail: leticiaferraco@hotmail.com.

^{****} Doutor em Modelagem Computacional (UERJ). Engenheiro Mecânico, Professor do Instituto Federal Fluminense, *campus* Macaé/RJ - Brasil. E-mail: jlugonjr@gmail.com.

Abstract

This literature review aims to present the different methodologies used in the three-dimensional modeling of the hydrocarbons dispersion originated from an oil well blowout. It presents the concepts of coastal environmental sensitivity and vulnerability, their importance for prioritizing the most vulnerable areas in case of contingency, and the relevant legislation. We also discuss some limitations about the methodology currently used in environmental studies of oil drift, which considers simplification of the spill on the surface, even in the well blowout scenario. Efforts to better understand the oil and gas behavior in the water column and three-dimensional modeling of the trajectory gained strength after the Deepwater Horizon spill in 2010 in the Gulf of Mexico. The data collected and the observations made during the accident were widely used for adjustment of the models, incorporating various factors related to hydrodynamic forcing and weathering processes to which the hydrocarbons are subjected during subsurface leaks. The difficulties show to be even more challenging in the case of blowouts in deep waters, where the uncertainties are still larger. The studies addressed different variables to make adjustments of oil and gas dispersion models along the upward trajectory. Factors that exert strong influences include: speed of the subsurface currents; gas separation from the main plume; hydrate formation, dissolution of oil and gas droplets; variations in droplet diameter; intrusion of the droplets at intermediate depths; biodegradation; and appropriate parametrization of the density, salinity and temperature profiles of water through the column.

Keywords: Oil spill. Computational modeling. Model validation. Blowout. Deepwater. Trajectory. Weathering.

Introdução

Os riscos de acidentes e derramamento de óleo estão sempre presentes nas atividades de exploração e produção de petróleo, mesmo com o avanço tecnológico e o desenvolvimento das mais diversas técnicas de transporte e escoamento da produção. Os exemplos dos acidentes do navio *Exxon Valdez* (1989) e da plataforma *Deepwater Horizon* (2011) são amplamente conhecidos, em função do grande impacto ambiental e da forte repercussão na mídia. A sociedade tem se mostrado cada vez mais exigente e consciente em relação às questões ambientais, demandando dos governos uma legislação e ação mais efetivas junto às empresas, buscando um maior compromisso com o desenvolvimento sustentável.

No caso de derramamento de petróleo, as respostas das empresas se dão sob a forma de estudos sobre o planejamento de contingências e pronto atendimento nas ocorrências de acidentes (SILVA, 2012). Em geral, os estudos são apresentados sob a forma de uma análise bidimensional, apresentando a deriva da mancha de óleo na superfície do mar, os tempos e as probabilidades de toque na costa. A modelagem matemática cumpre um papel fundamental nessa previsão da trajetória.

Segundo Oliveira (2013), o vazamento da *Deepwater Horizon*, no Golfo do México, pode ser considerado um marco para a revisão dos aspectos relacionados à preservação do meio ambiente das áreas de exploração e produção de óleo e gás. Após a explosão da *Deepwater Horizon* em 20 de abril de 2010, o vazamento do poço a 1522 metros de profundidade liberou óleo e gás por 87 dias. Apesar de o vazamento ter tomado proporções catastróficas, foi uma rara oportunidade para aprender sobre as condições para formação de intrusões de óleo em profundidade e aprimorar os modelos existentes (LINDO-ATICHATI et al., 2014).

A descarga de óleo e gás quente e pressurizado, em regime turbulento, entrou em contato com a água em baixa temperatura e alta pressão, produzindo uma variedade de fases dispersas, incluindo pequenas partículas de óleo, bolhas de gás, emulsão de óleo e gás, e hidratos. A injeção de dispersante químico na cabeça do poço também contribuiu para a dispersão do óleo (PETERSON et al., 2012).

Segundo Socolofsky e colaboradores (2011), os hidrocarbonetos provenientes do vazamento originado no *blowout* da *Deepwater Horizon* foram encontrados em intrusões profundas de subsuperfície, mas poucos estudos discutem qual o mecanismo de formação dessa intrusão¹. Ainda segundo os autores, em geral, parte do óleo e do gás que formam a pluma se desprende e fica aprisionada em função das diferenças de densidades entre as gotículas e água do mar. Representar a trajetória do óleo em superfície, em duas dimensões, já se apresenta como uma tarefa complexa, mas prever o movimento das plumas submersas em três dimensões é um desafio ainda maior.

Entre os fatores de difícil parametrização para os modelos estão os processos de intemperismo aos quais estão submetidos os hidrocarbonetos ao longo da trajetória, entre eles: evaporação, dispersão, emulsificação, dissolução, oxidação, sedimentação e biodegradação. Segundo Lindo-Atichati e outros (2014), para as modelagens dos vazamentos em subsuperfície, a biodegradação cumpre um papel fundamental no destino final dos hidrocarbonetos.

Antes do acidente, o modelo mais aceito para representar os processos de intemperismo, a trajetória, o destino e os impactos ambientais refletiu-se como uma compreensão sintética do histórico de vazamentos ocorridos na superfície ou em águas rasas (PETERSON et al., 2012). No entendimento tradicional, o óleo rapidamente sobe para a superfície e o gás escapa para a atmosfera, ambos sem muito tempo de residência na coluna d'água (Figura 1-a). A retenção em subsuperfície de partículas de óleo dispersas e emulsionadas, a rápida biodegradação e dissolução dos hidrocarbonetos, juntamente com a injeção de dispersante na cabeça do poço, apresentaram um cenário sem precedentes (Figura 1-b).

¹ Chama-se de intrusão o aprisionamento de hidrocarbonetos, durante o evento do *blowout*, que se desprendem da pluma principal e perdem fluabilidade, ficando retidos por longos períodos de tempo em uma determinada faixa de profundidade.

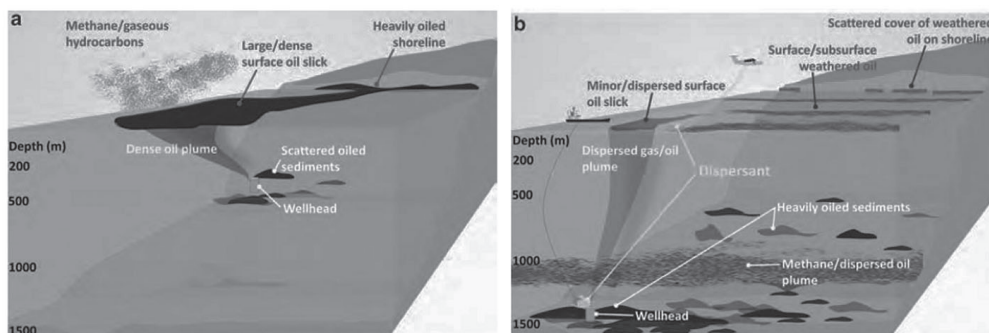


Figura 1 – Modelos de representação para blowout em águas rasas (a) e profundas (b)

Fonte: PETERSON et al. (2012)

Segundo North e colaboradores (2015), com o avanço das tecnologias que permitem a exploração de petróleo em profundidades cada vez maiores, faz-se necessário um entendimento melhor sobre a formação das gotículas de óleo, evolução, transporte e degradação em águas profundas. O uso de dispersantes aplicados na cabeça do poço como ação de contingência em caso de *blowouts* também exerce influência sobre a dimensão das gotículas e na trajetória da pluma (YAPA et al., 2012).

Além das preocupações dos danos ambientais causados pelos derramamentos, outras preocupações justificam a busca por um entendimento adequado do fenômeno (ZHENG et al., 2002): segurança das instalações marítimas, fogo e explosão, toxicidade e perda de fluviabilidade das embarcações.

Este estudo realiza, por meio de uma revisão bibliográfica, um levantamento das metodologias utilizadas e identificação dos aspectos relevantes na modelagem tridimensional de um *blowout*. Ou seja, o objetivo é realizar um levantamento dos principais aspectos que podem influenciar na trajetória do óleo e do gás, desde o leito marinho até a superfície, e que sejam capazes de alterar os resultados das tradicionais modelagens bidimensionais de dispersão do óleo.

Revisão de literatura

Legislação e Estudos Ambientais no Brasil: Abordagem Atual

O mapeamento da sensibilidade ao derramamento de óleo é uma importante ferramenta de decisão e priorização da proteção de ambientes desde a década de 70 (MARTINS, 2013), e classifica as regiões costeiras do continente de acordo com a dificuldade de remoção do óleo, caso este chegue a tocar a costa em situação de vazamento de óleo no mar. As Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo (Cartas SAO) indicam também a

localização dos recursos costeiros, as áreas mais sensíveis e apresentam informações básicas, fundamentais para o planejamento de contingência e avaliação de danos no caso de acidentes de derramamento. Em conjunto com a modelagem computacional, permitem a identificação de áreas cuja preservação deve ser priorizada durante as ações de contingência.

No Brasil, neste último século, a importância do mapeamento de sensibilidade para o combate à poluição por derramamento de óleo é evidenciada pelo recente conjunto de normas e leis estabelecidas.

A Lei N.º 9.996, de 28 de abril de 2000, trata da prevenção, controle e fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional, atribuindo ao Ministério do Meio Ambiente (MMA) a responsabilidade na identificação, localização e definição dos limites das áreas ecologicamente sensíveis. Essa mesma lei define e atribui as responsabilidades do Plano de Emergência Individual (PEI) que deve ser submetido à aprovação do órgão ambiental competente, para cada instalação portuária, plataforma de petróleo, bem como suas instalações de apoio.

No final de 2002, foi iniciado o Plano Cartográfico para Mapeamento de Sensibilidade Ambiental ao Óleo da zona costeira e marinha, que, sob a condução do Ministério do Meio Ambiente (MMA), vem desenvolvendo o trabalho de mapeamento de sensibilidade em todas as bacias sedimentares da costa brasileira, em parceria com o CNPq, universidades, empresas e demais atores.

O Decreto n.º 4.871 de 2003 estabelece que os Planos de Área (PA) para o combate à poluição por óleo devem conter mapas de sensibilidade ambiental, conforme as especificações e normas técnicas para elaboração das Cartas SAO (Sensibilidade Ambiental ao Óleo). A resolução CONAMA 398/2008 atribui a obrigatoriedade das Cartas SAO para determinados empreendimentos no conteúdo dos Planos de Emergência Individuais, introduzindo legalmente o conceito da vulnerabilidade, mesmo que de forma ainda incipiente.

A metodologia para elaboração das cartas SAO foi instituída no Brasil, em 2004, pelo documento “Especificações e normas técnicas para a elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo”, publicado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2004).

A identificação das áreas mais sensíveis, consolidada nas Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo (SAO), é fundamental para garantir uma proteção efetiva. Entretanto, essa ferramenta é potencializada quando considerado também o conceito de susceptibilidade, ou seja, a probabilidade de impacto, cuja estimativa pode ser realizada com o uso de modelagem numérica da dispersão da mancha de óleo de um possível vazamento.

A modelagem computacional da dispersão da mancha de óleo de um possível vazamento em estudo traz como possível resposta a probabilidade de toque ao longo da costa, representando a susceptibilidade da região. O resultado da sobreposição do índice de sensibilidade e susceptibilidade é dado pela vulnerabilidade. Romero (2013) apresenta os cálculos de vulnerabilidade com mapas no litoral paulista. A metodologia está se consolidando e ganhando aceitação.

A legislação brasileira, pela resolução CONAMA 398/2008, determina que as instalações, cuja operação ofereça risco de acidentes de poluição por óleo, em águas sob jurisdição nacional, deverão dispor de planos de emergência individuais (PEI). Estabelece ainda como requisito para o PEI o mapeamento da sensibilidade e vulnerabilidade ambiental ao óleo. O conceito de

sensibilidade ambiental é bem consolidado na literatura, assim como a metodologia para sua determinação. Entretanto, conforme observado por Silva (2012), não se pode dizer o mesmo para o conceito de vulnerabilidade, que ainda dá margens a diferentes interpretações e resultados.

Complementando os Planos de Emergência Individual (PEI) e de Área (PA), o Decreto n.º 8.127/2013 instituiu o Plano Nacional de Contingência (PNC), que deverá ser adotado em caso de acidentes de maiores proporções, nos quais não sejam suficientes as ações individualizadas dos agentes. O objetivo principal é ampliar a capacidade de resposta em incidentes de poluição por óleo, com uma atuação coordenada entre órgãos da administração pública e entidades públicas e privadas.

Como pode ser observado, a evolução dos estudos ambientais e da legislação sempre consideraram a modelagem bidimensional da dispersão do óleo para identificação das áreas mais sensíveis. Quando os cenários de *blowout* são considerados, são representados por um derramamento superficial, com volume total equivalente a 30 dias de produção do poço.

A modelagem 3D da trajetória

Em função do forte impacto ambiental causado pelo acidente da *Deepwater Horizon*, e dos diferentes efeitos que foram observados durante e após o acidente, vieram à tona alguns questionamentos que não eram antes abordados nos estudos, nem na legislação. Recentes questionamentos têm sido realizados pelo órgão regulador brasileiro em relação à apresentação de resultados das simulações de *blowout* conforme características geológicas da região e com vazamento em profundidade, em uma abordagem tridimensional (PETROBRAS, 2015).

Segundo a Petrobras (2015), em resposta ao parecer técnico do órgão regulador, as simulações de *blowout* apresentadas a esse órgão sempre consideraram o vazamento na superfície, desprezando a trajetória do óleo entre o assoalho marinho e a superfície do mar. Essa simplificação deve-se ao fato de que as incertezas aumentam conforme vão sendo consideradas profundidades maiores. A resposta defende ainda que, em função dessas incertezas, são grandes os desafios para que a modelagem probabilística de dispersão de óleo 3D seja considerada nos estudos ambientais de vulnerabilidade. Se os dados de entrada não são adequados, os resultados da simulação não serão confiáveis.

É mais comum o uso de modelagem de vazamentos a partir do fundo para a reprodução de vazamentos reais. Durante períodos de tempo mais curtos, em uma área restrita, é possível reproduzir as condições meteorológicas e oceanográficas do momento do acidente, por meio de ajustes nos perfis de correntes. Nesses casos, conhecidas as condições ambientais no período do vazamento, a modelagem tem o objetivo de avaliar danos ambientais efetivos decorrentes do acidente (PETROBRAS, 2015).

Os modelos de dispersão de trajetória da mancha de óleo passam basicamente por duas etapas. Em um primeiro momento é necessário que se tenha um modelo hidrodinâmico, cuja função é representar as condições oceanográficas da área e período de estudo. Tais modelos possuem como entrada dados como contorno da linha da costa, batimetria, ventos, marés etc. Este primeiro modelo, hidrodinâmico, serve como base para o cálculo da trajetória e dos processos de intemperismo. Em geral, mesmo que a simulação tenha o objetivo de representar o deslocamento

apenas na superfície, os modelos hidrodinâmicos são gerados em três dimensões.

Na segunda etapa, o objetivo é calcular a trajetória do óleo derramado e os processos de intemperismo aos quais ele está submetido. Para isso são utilizados os resultados do modelo hidrodinâmico, informações adicionais sobre o ambiente, as características do óleo, e detalhes do vazamento (volume, local, regime etc).

Os estudos solicitados pelos órgãos ambientais tendem a ser cada vez mais abrangentes, com modelos capazes de representar os processos de intemperismo e a trajetória, sendo que esta última deve ser apresentada ainda sob a forma determinística e probabilística, dependendo do objetivo da análise.

Aqui são apresentados alguns trabalhos que buscaram identificar os fatores relevantes para a abordagem tridimensional do comportamento da pluma de um *blowout*, ou seja, parâmetros que devem ser levados em consideração na modelagem matemática para que os resultados sejam coerentes e aplicáveis.

A evolução dos modelos computacionais caminhou para modelos tridimensionais que calculam as trajetórias das partículas na superfície e na própria coluna de água, contemplando também os processos de intemperismo. Entretanto, observa-se que, em geral, os modelos são capazes de representar melhor ou a trajetória ou o intemperismo. Segundo Fernandes e colaboradores (2013), o software ADIOS (NOAA), por exemplo, é uma das referências na modelagem dos fenômenos de intemperismo, entretanto não simula a trajetória. O autor apresenta os softwares mais utilizados atualmente nos estudos ambientais de previsão de trajetória — entre eles: ADIOS, GNOME, OILMAP, OSCAR, GulfSpill e MOHID — e os avanços para que incorporem tanto os fenômenos de intemperismo, quanto a trajetória ao longo da coluna d'água, como funções das condições meteoceanográficas. O Quadro 1 traz um resumo das potencialidades atuais dos modelos.

	ADIOS	GNOME	OILMAP	OSCAR	GulfSpill	MOHID
Advecção		X	X	X	X	X
Difusão		X	X	X	X	X
Interação com a costa		X	X	X	X	X
Espalhamento	X		X	X	X	X
Evaporação	X	X	X	X	X	X
Emulsificação	X		X	X	X	X
Dispersão	X		X	X	X	X
Movimento Vertical			X	X		X
Dissolução			X	X		X
Sedimentação				X		X

Quadro 1– Processos modelados pelos diferentes softwares

Fonte: Adaptado de Fernandes et al. (2013)

Johansen (2000) apresenta uma aplicação da modelagem a uma descarga multifásica em uma coluna estratificada com correntes variáveis. O estudo mostra que o gás pode se combinar com a água e formar hidrato, dissolver-se na pluma de água, ou se separar da pluma seguindo uma trajetória independente. São apresentados alguns estudos de caso nos quais o comportamento não ideal do gás é levado em consideração pela equação de estado do fator de compressibilidade em função de temperatura e pressão.

Entre os modelos aqui já apresentados, destacamos ainda o CDOG. Esse modelo de Zheng e colaboradores (2002) apresenta algumas modificações em relação ao trabalho anterior de Yapa e Zheng (1997), que formulou a modelagem da pluma para águas rasas. Em águas profundas, as altas pressões e baixas temperaturas têm forte influência nas mudanças de fase nos gases, que, combinadas com as fortes correntes, trazem grandes desafios para a modelagem das plumas de *blowouts* de óleo e gás. A modelagem se propôs a integrar a hidrodinâmica e termodinâmica da pluma do *blowout* a fenômenos como: formação de hidrato, decomposição de hidrato, dissolução de gás, comportamento não ideal do gás e separação do gás da pluma principal.

A abordagem de Chen e Yapa (2004) também traz questionamentos sobre o comportamento do óleo e do gás na pluma. Em águas profundas, as pressões são altas e as temperaturas baixas. Segundo o autor, nesse cenário, o gás apresenta um comportamento diferente, quando comparado ao ambiente de águas rasas: além de possuir características mais distantes de um gás ideal, o gás encontra condições propícias para a formação de hidrato. Há regiões de águas profundas em que o fluxo das correntes favorece a separação do gás da pluma principal da mistura de gás e óleo.

Para um melhor entendimento sobre o comportamento do óleo e do gás durante um *blowout* em águas profundas, foi conduzido o experimento *DeepSpill* a uma profundidade de 844 metros, a 125 km da costa, nos mares da Noruega. Johansen e outros (2003) detalham o experimento e apresentam o tratamento dos dados, cujos objetivos principais foram desenvolver modelos numéricos e testar métodos de vigilância submarina, realizando-se descargas controladas de óleo e gás em subsuperfície, acompanhando alguns parâmetros como: vento, correntes, densidade da água, concentração do óleo na superfície e em subsuperfície, além da coleta de amostras para análises químicas e biológicas por toda a extensão da coluna de água.

Com o foco no entendimento do mecanismo de intrusão dos hidrocarbonetos na coluna d'água, Socolofsky e colaboradores (2011) combinaram dados medidos e estimados do acidente de Macondo com relações empíricas desenvolvidas por estudos anteriores para identificar os mecanismos responsáveis pela formação da intrusão e caracterizar a pluma do acidente.

Leitão e colaboradores (2013) apresentam uma visão geral sobre a simulação tridimensional de um *blowout* na costa do Caribe por meio de uma comparação com os resultados da simulação bidimensional.

Por sua vez, Lindo-Atichati e outros (2014) avaliaram a contribuição da dimensão da gotícula, fluxos variáveis na descarga, biodegradação em alta pressão e a influência das velocidades verticais das correntes do modelo hidrodinâmico na evolução da pluma de óleo.

O estudo de North e outros (2015) procurou um melhor entendimento sobre a formação das gotículas de óleo, evolução, transporte e degradação, pela comparação entre os dados de campo e cenários simulados considerando diferentes taxas de biodegradação.

Resultados e discussão

Para a discussão dos trabalhos que fizeram parte desta revisão bibliográfica, foi conveniente a separação dos resultados obtidos em três grandes grupos:

- **Comportamento do gás:** conjunto dos esforços para o entendimento da influência das mudanças de fase do gás no comportamento da pluma, a sua dissolução, formação de hidrato, a separação do gás da pluma principal, entre outros aspectos.
- **Trajatória da pluma de óleo e mecanismos de formação das intrusões:** em geral, estes resultados buscaram refinar os modelos, confrontando as medições experimentais das concentrações de hidrocarbonetos ao longo da coluna d'água, melhorando as previsões para a trajetória da pluma e das intrusões formadas pelas gotículas aprisionadas em subsuperfície.
- **Dimensão das gotículas e biodegradação:** por fim, veremos os trabalhos que buscaram melhorar as estimativas das dimensões das gotículas de óleo e o fenômeno da biodegradação. Apesar de possuírem fundamental importância na modelagem da pluma e dos mecanismos de intrusão, como veremos, a estimativa destes parâmetros apresentam fortes limitações.

Comportamento do gás

| 59 |

Com o objetivo de identificar os fatores determinantes do comportamento do gás para as diferentes profundidades, Johansen (2000) confrontou o modelo com os resultados do experimento de campo (RYE et al., 1997), conduzido nos mares da Noruega, que simulou um *blowout* a 100 metros de profundidade. Os resultados se apresentaram favoráveis, quando levada em consideração a dissolução do gás na água. Em profundidades entre 100 e 250 metros, os dois fatores determinantes foram a dissolução do gás na água e a separação das bolhas de gás da pluma. Interessante observar que quanto mais bolhas se separam, maior é a perda de flutuabilidade da pluma e maior é o tempo para dissolução. Por fim, para descargas em águas profundas (700 a 1500 metros), a formação de hidrato parece ser o processo dominante na limitação da subida da pluma.

Para avaliação dos efeitos das correntes sobre o comportamento do gás, Chen e Yapa (2004) verificaram que os ambientes de correntes mais fortes são capazes de impor uma determinada inclinação à pluma (Figura 2). Como o gás tem velocidade de subida maior que o óleo, existe uma tendência a que se desprenda do fluxo principal, reduzindo a flutuabilidade da pluma.

Esse fenômeno pode alterar significativamente tanto a trajetória das partículas de óleo na coluna d'água quanto o comportamento da mancha de óleo na superfície, além do tempo e localização da chegada à superfície. A comparação dos cenários que consideram ou não esse efeito, quando confrontados com os dados experimentais, demonstraram a importância de considerá-lo nos cálculos.

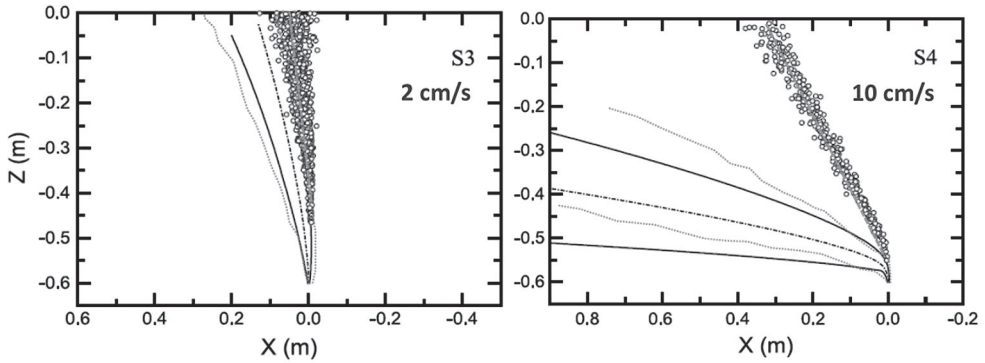


Figura 2 – Comportamento da pluma para diferentes velocidades das correntes
 Fonte: Adaptado de Chen e Yapa (2004)

Yapa e Zheng (1997) detalharam um modelo para simulação dos acidentes de vazamento em subsuperfície. Esse modelo também incorporava a presença de gás em plumas relativamente verticais. A simulação do modelo foi confrontada com os dados de experimentos de campo, conduzidos pela SINTEF, no mar da Noruega. Foram lançados óleo e gás a uma profundidade de 100 metros (RYE et al., 1997). Esses dados são muito valiosos e raros, em função das dificuldades logísticas e legais para se conduzir um experimento desse tipo. Entretanto, esses modelos não são aplicáveis para os cenários de vazamento em águas profundas.

60 | O trabalho de Yapa e Zheng (1997) foi aprimorado por Zheng e colaboradores (2002) para que pudesse representar os cenários de *blowout* em águas profundas, defendendo que os *blowouts* em águas profundas diferem daqueles em águas rasas em função de alguns aspectos:

- Sob baixas temperaturas e altas pressões, em contato com a água, o gás pode se converter em hidrato;
- O gás livre pode se dissolver na água ao longo da trajetória, alterando a flutuabilidade da pluma;
- Sob altas pressões, o comportamento do gás é mais bem descrito pelas equações de gás não ideal;
- O tamanho das bolhas de gás e a sua velocidade de escorregamento não pode mais ser aproximado como uma constante, pois devem ser considerados os processos de formação/decomposição de hidrato, dissolução e expansão do gás;
- O gás pode escapar da pluma, caso as fortes correntes forcem a inclinação da pluma.

Com essas considerações, Zheng e colaboradores (2002) foram capazes de implementar em seu modelo as variações tridimensionais do ambiente, como velocidade, temperatura e salinidade. Tais variáveis são utilizadas para o cálculo do arraste, equações hidrodinâmicas, e cálculo do movimento do óleo e do gás nas diversas etapas da trajetória. A temperatura e a salinidade são levadas em consideração na estratificação da densidade da coluna d'água. A temperatura também influencia

diretamente na termodinâmica da pluma e na dissolução e mudanças de fase do gás. O modelo considera ainda a possibilidade de separação de gás da pluma na presença de fortes correntes.

Trajatória da pluma de óleo e mecanismos de formação das intrusões

Segundo Zheng e outros (2002), inicialmente a mistura de óleo e gás se lança sob a forma de pluma para o ambiente, e gradativamente vai perdendo velocidade e flutuabilidade em função da interação com a água do mar e o ambiente estratificado do oceano. Por outro lado, o gás se expande ao subir, em função da queda de pressão, aumentando a flutuabilidade da pluma. Em distâncias maiores do ponto de descarga, as partículas de óleo e gás se movem como partículas individuais, sem maiores interações (Figura 3). Entretanto, conforme demonstrado por Zheng e outros (2002), até que se alcance o nível de flutuabilidade neutra, a trajetória da pluma é fortemente dependente das interações entre as gotículas de gás e óleo, da estratificação das propriedades da coluna d'água, da densidade do óleo, da profundidade e da velocidade da descarga, entre outros.

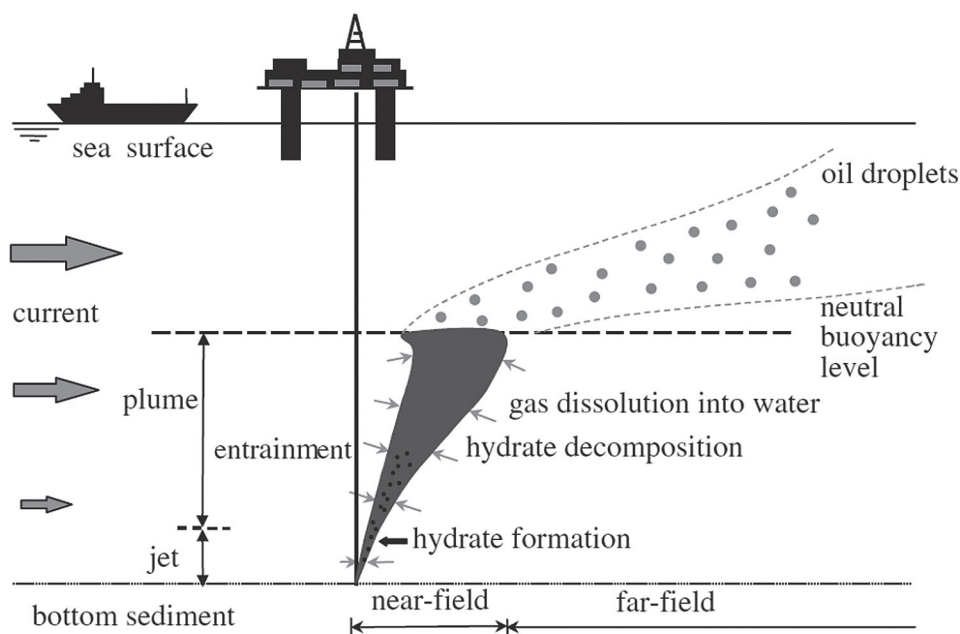


Figura 3 – Esquema do comportamento da pluma

Fonte: Zheng et al. (2002)

Com o objetivo de apresentar o potencial efeito das correntes no comportamento da pluma, Johansen (2000) realizou simulações para diferentes perfis de correntes medidas. A Figura 4 mostra a variação na profundidade de aprisionamento em função das correntes de fundo medidas. A profundidade de aprisionamento é definida como o último ponto da

trajetória da pluma. Observa-se uma tendência de mais rápido o aprisionamento das gotículas, quanto maiores são as velocidades das correntes.

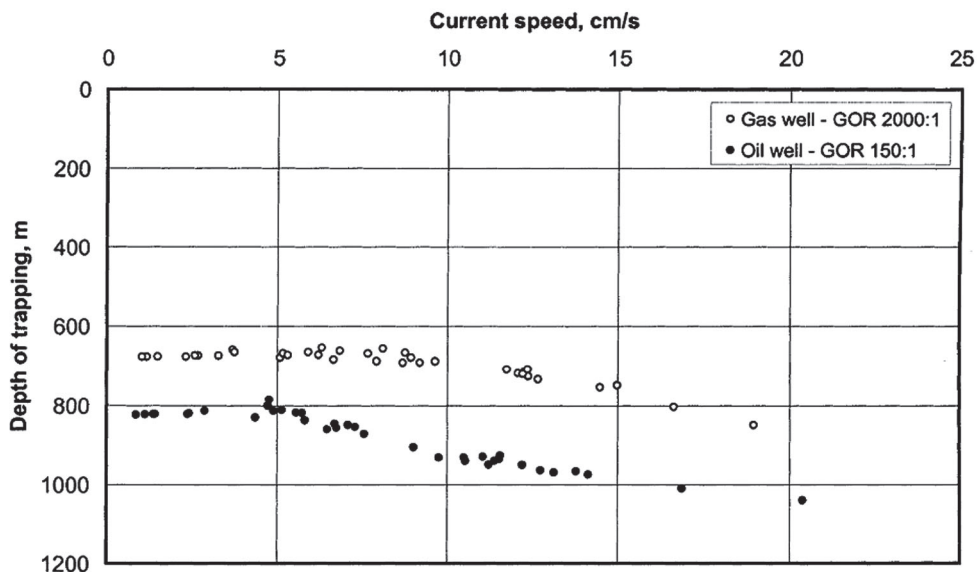


Figura 4 – Profundidade de aprisionamento em função das correntes e da razão gás-óleo
 Fonte: Johansen (2000)

Na busca pela validação desse seu modelo, Johansen e colaboradores (2003) descrevem em seu artigo o experimento *DeepSpill*, conduzido nos mares da Noruega, em junho de 2000, em que foram realizadas quatro descargas controladas de óleo e gás, totalizando o volume de 120 m³ de óleo e 10 mil Nm³ de gás natural, a uma profundidade de 844 metros.

Os resultados mostraram que o óleo atingiu a superfície aproximadamente uma hora após o início da descarga, a uma distância de algumas centenas de metros do ponto de liberação. A chegada do óleo foi observada ainda por algumas horas após a interrupção da descarga. Apesar da expectativa pela formação de hidrato, sugerida pelo equilíbrio termodinâmico, isso não ocorreu. Não se observou a chegada de gás à superfície, indicando que a dissolução foi completa, mas não tão rápida quanto prevista pelos algoritmos.

As camadas de óleo formadas na superfície foram mais finas do que aquelas geradas a partir de um derramamento superficial. Observou-se também a formação de óleo emulsionado na superfície, com uma tendência de aumento do teor de água com o passar do tempo.

Sondas acústicas permitiram a visualização da trajetória da pluma ao longo do percurso até a superfície. O modelo da pluma foi capaz de prever com razoável precisão o tempo de chegada de óleo na superfície e a sua localização (Figura 5), demandando ainda alguns ajustes no tamanho das partículas, taxa de dissolução do gás e formação de hidrato (JOHANSEN et al., 2003).

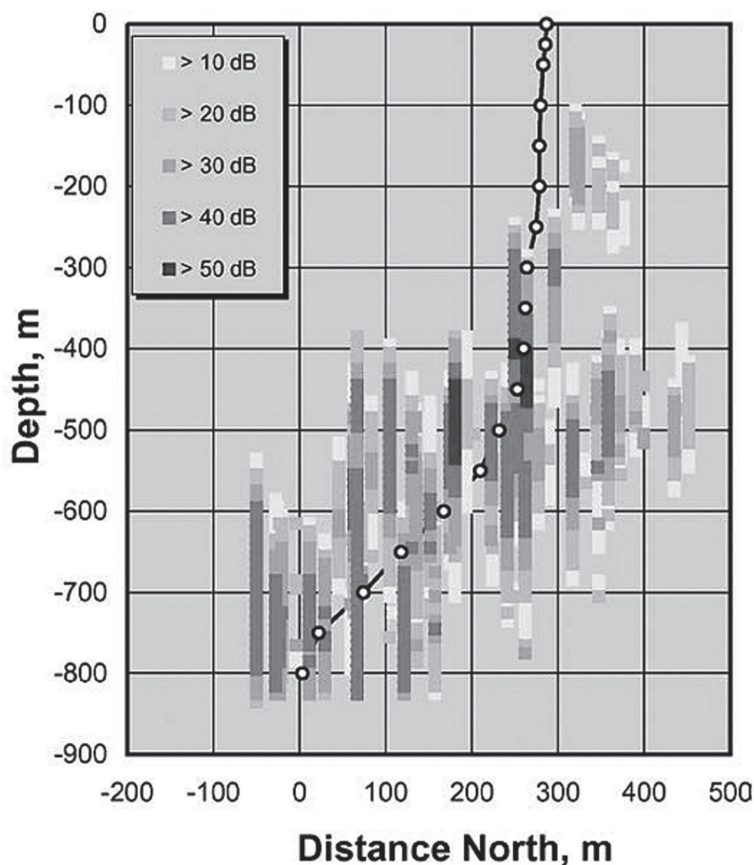


Figura 5 – Trajetória da pluma observada e simulada

Fonte: Johansen et al. (2003)

Socolofsky e outros (2011) combinaram as relações empíricas desenvolvidas por estudos anteriores com dados medidos e estimados do acidente de Macondo, para identificar os mecanismos responsáveis pela formação da intrusão e caracterizar a pluma do *blowout* de Macondo.

Os resultados indicaram que as intrusões se originam de uma pluma multifásica, caracterizada por múltiplas intrusões subsuperficiais compostas por óleo e gás dissolvidos em conjunto com pequenas partículas de óleo.

O modelo proposto por Socolofsky e colaboradores (2011) considera que a densidade da água varia quadraticamente com a profundidade, e os resultados estimados ficaram coerentes com os observados, representando adequadamente a altura máxima da pluma principal (h_p) e a camada de intrusão (h_t), conforme Figura 6.

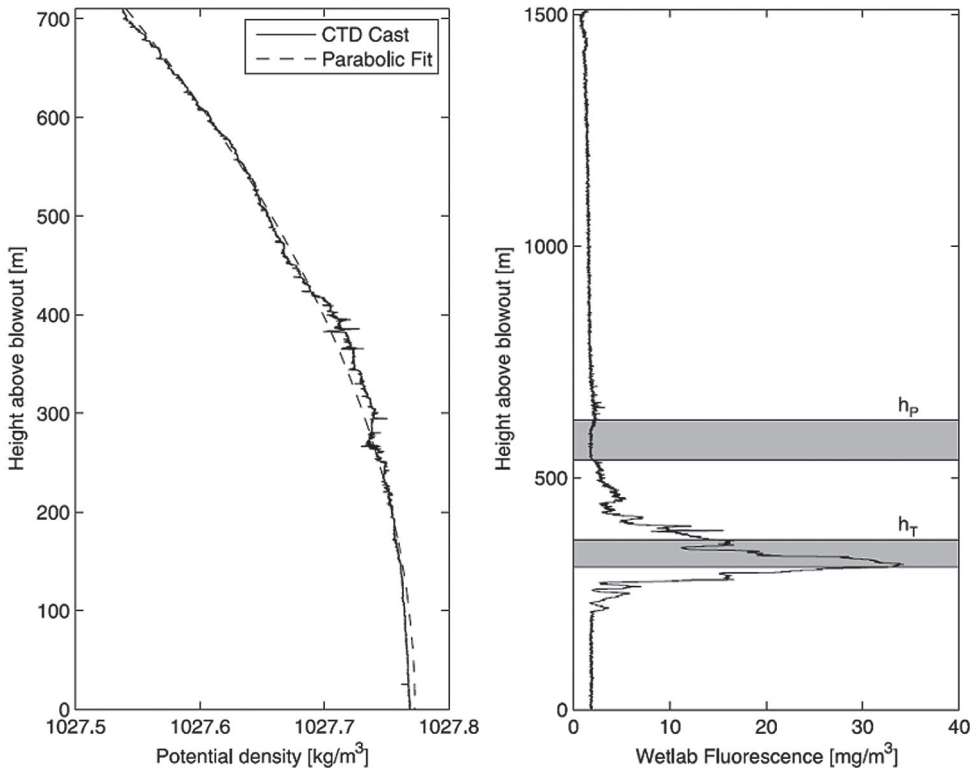


Figura 6 – Variação da densidade e fluorescência medida, em função da profundidade
 Fonte: Adaptado de Socolofsky et al. (2011)

Os resultados obtidos foram diferentes daqueles provenientes do estudo de campo em águas profundas conhecido como *DeepSpill* (JOHANSEN et al., 2003; ZHENG et al., 2002), cujo comportamento da pluma era dominado pelas velocidades horizontais, pelo fato de representarem vazamentos em condições diferentes, com velocidades e vazões mais baixas.

A flutuabilidade coletiva do óleo e do gás criou uma pluma com tendência de subida, mas as diferentes fases se comportaram de maneiras distintas. Grande parte do hidrocarboneto se separou da água arrastada pela pluma, aparentemente ficando aprisionada em subsuperfície pelas discontinuidades físicas inerentes às maiores profundidades, e foram defletidas lateralmente pelas correntes do ambiente (SOCOLOFSKY et al. 2011).

Dimensão das gotículas e biodegradação

Segundo Johansen (2000), a formação das gotículas é causada por diferentes mecanismos, dependendo da condição de fluxo da descarga (LE-FEBVRE, 1989 apud JOHANSEN, 2000). A distribuição do tamanho das partículas é mais bem prevista nas condições de baixa velocidade do jato (KUMAR; HARLAND, 1996 apud JOHANSEN, 2000) ou em fluxo disperso em tubos

(KARABELAS, 1978 apud JOHANSEN, 2000). Entretanto, não há uma boa estimativa quando as gotículas são formadas por atomização, fenômeno predominante para as grandes vazões de óleo e gás típicas dos *blowouts*. Partindo do princípio de que se conhece o tamanho das gotículas, a sua distribuição no tempo ao longo da trajetória pode ser bem descrita e, conseqüentemente, a previsão do seu espalhamento na superfície e espessura da camada. Um exemplo resultado do espalhamento superficial desse tipo de cálculo é apresentado na Figura 7.

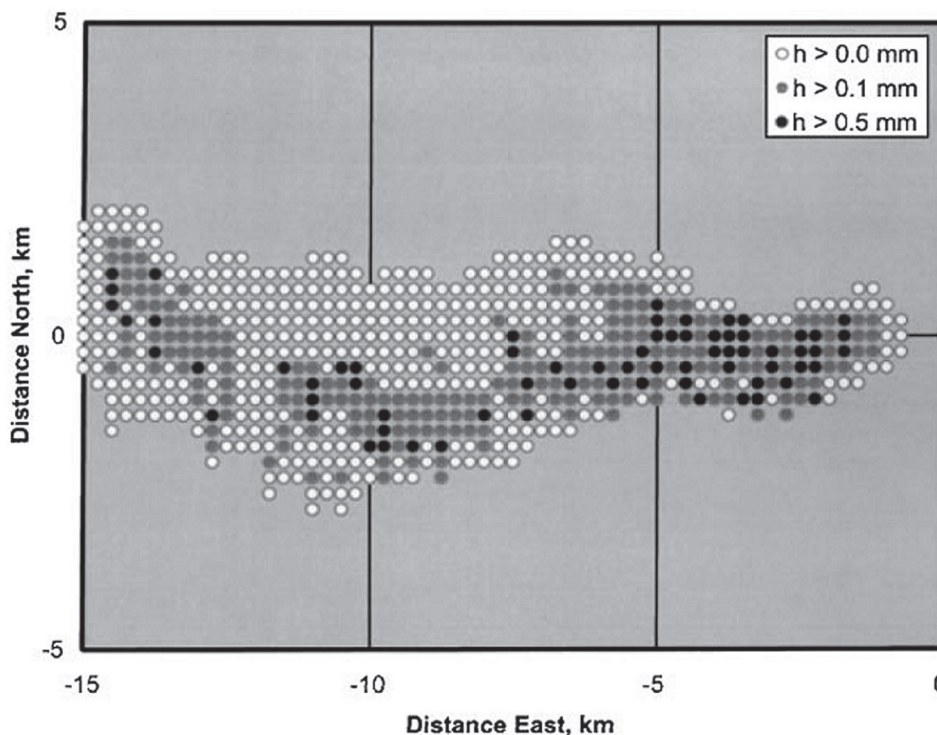


Figura 7 – Previsão do espalhamento na superfície
 Fonte: Johansen (2000)

Os resultados obtidos por Leitão e outros (2013) reforçam a relevância da dimensão das partículas nas previsões de comportamento da pluma. As partículas com diâmetro menor que 50 μm formaram uma pluma subsuperficial, com uma área de impacto muito restrita, em função das baixas velocidades a profundidades próximas de 1.000 m. Os demais cenários simulados, com partículas com diâmetros de 250 μm , 1 mm e 10 mm, atingiram a superfície rapidamente. A Figura 8 apresenta a distribuição espacial das partículas da pluma após três dias de *blowout* para partículas de 50 μm (a) e 250 μm (b).

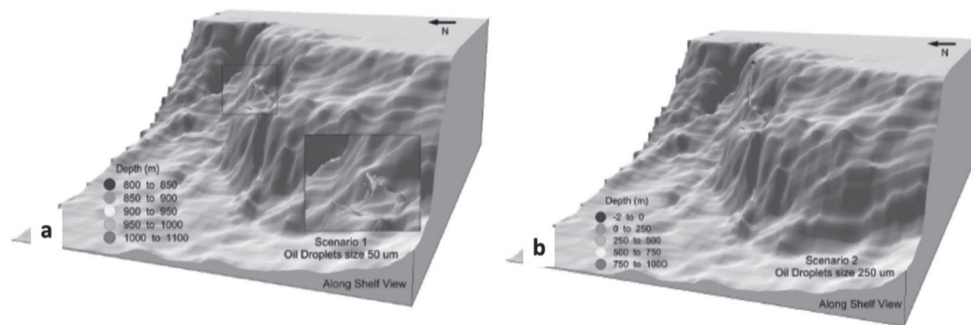


Figura 8 – Distribuição espacial das partículas em função do diâmetro
 Fonte: Adaptado de Leitão et al. (2013)

Lindo-Atichati e colaboradores (2014), na avaliação do seu modelo, procuraram representar as diferentes vazões de descarga registradas durante o evento, e os impactos no resultado final. Consideraram também as possíveis variações da dimensão da gotícula, a biodegradação em alta pressão e a velocidade vertical das correntes do modelo hidrodinâmico na evolução da pluma de óleo. O modelo foi capaz de representar bem os processos ao longo de toda a trajetória. As principais conclusões foram:

- As gotículas menores que 50 µm possuem flutuabilidade quase nula e se mantiveram em camadas mais profundas, sujeitas a interações com o leito marinho;
- As partículas maiores, entre 50 e 100 µm foram mais influenciadas pela estratificação vertical do fluxo e formaram plumas a profundidades menores;
- O aprimoramento das condições iniciais da descarga no modelo, pela imposição das vazões variáveis, atribuíram maior coerência aos resultados;
- A biodegradação em altas temperaturas, acoplada à dissolução de gotículas, permitiu uma estimativa mais realista da densidade e tamanho das partículas, aumentando o tempo de residência do óleo na coluna d'água.

Por meio de comparações entre os dados de campo e cenários simulados, considerando diferentes taxas de biodegradação, o estudo de North e colaboradores (2015) procurou um melhor entendimento sobre a formação das gotículas de óleo, evolução, transporte e degradação.

Os resultados indicaram que o transporte das partículas de óleo foi muito sensível às taxas de biodegradação (Figura 9), que, quando aplicadas, afetaram a distribuição das partículas no sentido vertical em centenas de metros para regiões mais profundas e, no sentido horizontal, para centenas de quilômetros mais distantes do local do vazamento.

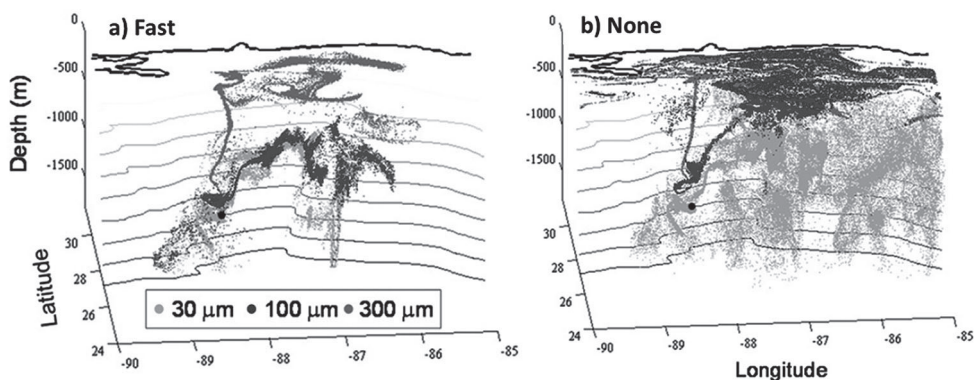


Figura 9 – Efeito da biodegradação no comportamento da pluma
 Fonte: Adaptado de North et al. (2015)

Os resultados demonstraram que o entendimento de processo de biodegradação é importante para previsão da dispersão das gotículas em subsuperfície. É particularmente importante nos casos em que os tamanhos iniciais das partículas são pequenos o suficiente para que o óleo fique submerso por um longo período de tempo (NORTH et al., 2015). Dessa forma, a biodegradação é um fenômeno que contribui para o espalhamento do óleo que chega à superfície.

O fenômeno também contribui fortemente no transporte horizontal das partículas de óleo, e, conseqüentemente, na concentração de hidrocarbonetos. Estudos anteriores sugeriam que as gotículas menores que 80 µm formavam as plumas de subsuperfície (NORTH et al., 2011). North e colaboradores (2015) sugerem que as partículas com diâmetro inicial menor que 100 µm, que experimentam altas taxas de biodegradação e uma velocidade de subida menor devido ao encolhimento, podem também formar as plumas de subsuperfície.

Os resultados sugerem também que as plumas de subsuperfície possuem algum grau de interação com o leito marinho principalmente em regiões mais inclinadas, e que a extensão dessa interação é sensível ao processo de biodegradação. Quando o fenômeno é levado em consideração, o contato das gotículas maiores (100 a 300 µm) ocorre em largas regiões de águas rasas, em função da velocidade de subida ser menor (Figura 10-a e 10-b). Entretanto, quando o fenômeno não é levado em consideração, as gotículas têm baixa (ou nula) interação com o solo, em função da tendência de subida rápida (Figura 10-c e 10-d) (NORTH et al., 2015).

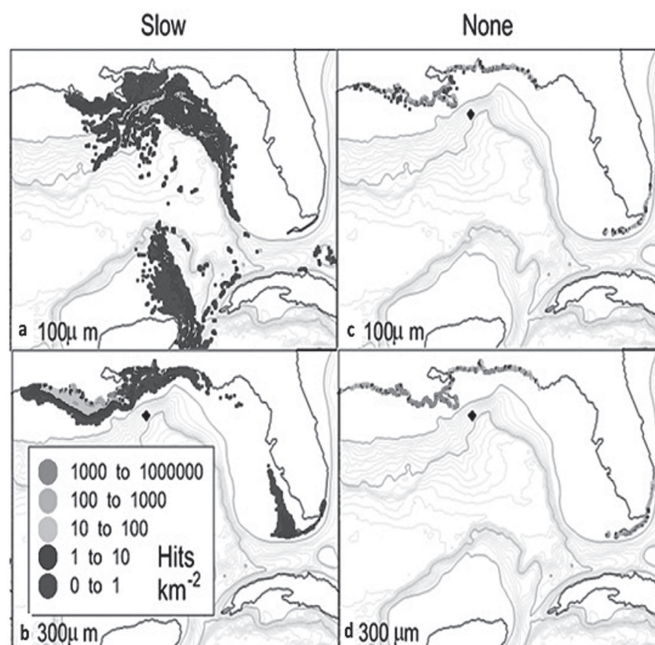


Figura 10 – Níveis de interação com o solo em função da taxa de biodegradação
 Fonte: Adaptado de North et al. (2015)

Conclusões

A previsão da trajetória do óleo na superfície, em duas dimensões, já é uma tarefa complexa. Prever o movimento das plumas submersas em três dimensões se apresenta como desafio ainda maior, em função do aumento das incertezas.

Quando parte do gás se separa da pluma principal, esta perde fluviabilidade. Esse fenômeno pode alterar significativamente tanto a trajetória das partículas de óleo na coluna d'água quanto o comportamento da mancha de óleo na superfície, além do tempo e localização da chegada à superfície (CHEN; YAPA, 2004).

A formação de hidrato se apresentou como um fator importante para os *blowouts* em águas profundas, entre 700 e 1500 metros (JOHANSEN, 2000), em função das propícias condições de alta pressão e baixa temperatura.

A dissolução e a separação das bolhas de gás, para profundidades entre 100 e 250 metros, foram apontadas como fenômenos determinantes na trajetória da pluma, além de se apresentarem como fenômenos complementares: quanto mais bolhas se separam, maior é a perda de fluviabilidade da pluma e maior é o tempo para a dissolução (JOHANSEN, 2000).

As correntes subsuperficiais mais fortes também demonstraram forte influência. Elas são capazes de impor uma determinada inclinação à pluma, que perde fluviabilidade quando

parte do gás se separa, por possuir velocidade de subida maior que óleo (CHEN; YAPA, 2004). Os perfis de corrente demonstraram ser importantes também para a estimativa das profundidades de aprisionamento (JOHANSEN, 2000).

A representação adequada dos perfis de temperatura, salinidade e densidade ao longo da coluna d'água demonstrou contribuir fortemente para a coerência dos resultados (ZHENG et al., 2002; SOCOLOFSKY et al., 2011).

A dimensão das gotículas de óleo demonstrou ser fundamental para a predição das velocidades de subida das gotículas (LEITÃO et al., 2013) e, conseqüentemente, para a estimativa do percentual do volume que chega à superfície, em relação ao que fica aprisionado em subsuperfície (LINDO-ATICHATI et al., 2014). O fluxo variável na descarga ao longo do tempo também é uma variável importante para os possíveis ajustes do modelo (LINDO-ATICHATI et al., 2014).

As dificuldades encontradas pelos modelos para prever a espessura da camada de óleo que chega à superfície e o seu espalhamento estão relacionadas com uma limitação na estimativa da dimensão das gotículas formadas na descarga (JOHANSEN, 2000).

Entretanto, os resultados do experimento *DeepSpill*, apresentado por Johansen e colaboradores (2003), mostraram que as camadas de óleo formadas na superfície foram mais finas do que aquelas geradas a partir de um derramamento superficial. Observou-se também a formação de óleo emulsionado na superfície, com uma tendência de aumento do teor de água com o passar do tempo.

Por fim, a biodegradação influenciou fortemente na densidade e no tamanho das partículas, aumentando o tempo de residência do óleo na coluna d'água (LINDO-ATICHATI et al., 2014). Também demonstrou afetar os resultados de distribuição das partículas no sentido vertical e horizontal, de espalhamento do óleo que chega à superfície, e de possíveis interações das plumas de subsuperfície com o leito marinho (NORTH et al., 2015).

Referências

BRASIL. Decreto Federal n.º 4.871, de 11 de junho de 2003. Dispõe sobre a instituição dos Planos de Áreas para o combate à poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, 07 nov. 2003.

BRASIL. Decreto Federal n.º 8.127, de 22 de outubro de 2013. Institui o Plano Nacional de Contingência para Incidentes de Poluição por Óleo em Águas sob Jurisdição Nacional, altera o Decreto n.º 4.871, de 6 de novembro de 2003, e o Decreto n.º 4.136, de 20 de fevereiro de 2002, e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, 04 out. 2014.

BRASIL. Lei n.º 9.966, de 28 de abril de 2000. Dispõe sobre a prevenção, o controle e a fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, 29 abr. 2000.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental nos Assentamentos Humanos. Programa de Gerenciamento Ambiental Territorial. Projeto de Gestão Integrada dos Ambientes Costeiro e Marinho. *Especificações e Normas Técnicas para a Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para derramamentos de óleo*. Brasília, 2004.

BRASIL. Resolução CONAMA n.º 398, de 11 de junho de 2008. Dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional, originados em portos organizados, instalações portuárias, terminais, dutos, sondas terrestres, plataformas e suas instalações de apoio, refinarias, estaleiros, marinas, clubes náuticos e instalações similares, e orienta a sua elaboração. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, 12 jun. 2008.

CHEN, F.; YAPA, P. D. Modeling gas separation from a bent deepwater oil and gas jet/plume. *Journal of Marine Systems*, New Orleans, v. 45, n. 3-4, p. 189-203, 2004.

FERNANDES, R. et al. Integration of an oil and inert spill model in a framework for risk management of spills at sea – a case study for the Atlantic area. In: AMOP TECHNICAL SEMINAR ON ENVIRONMENTAL CONTAMINATION AND RESPONSE, 36., 2013, Halifax. *Proceedings ...* Halifax, p. 326-353.

JOHANSEN, O. DeepBlow: a lagrangian plume model for deep water blowouts. *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 6, n. 2, p. 103-111, 2000.

| 70 | JOHANSEN, O.; RYE, H.; COOPER, C. DeepSpill-Field study of a simulated oil and gas blowout in deep water. *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 8, n. 5-6, p. 433-443, 2003.

KARABELAS, A. J. Droplet size spectra generated in turbulent pipe flow of dilute liquid/liquid dispersions. *AIChE Journal*, v. 24, n.2, p. 170-180, 1978.

KUMAR, A.; HARLAND, S. Unified correlations for the prediction of drop size in liquid±liquid extraction columns. *Industrial Engineering Chemical Resources*, n. 35, p. 2682-2695, 1996

LEITÃO, P. C. et al. An overview for simulating the blow out of oil spills with a three-dimensional model approach (Caribbean coast, Colombia). In: MATEUS, M.; NEVES, R. (Ed.). *Ocean Modelling for Coastal Management: case studies with MOHID*. IST Press, 2013. p. 97-115.

LINDO-ATICHATI, D. et al. Simulating the effects of droplet size, high-pressure biodegradation, and variable flow rate on the subsea evolution of deep plumes from the Macondo blowout. In: MILLIMAN, J. (Ed.). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2014.01.011>>. Acesso em: 25 jun. 2015.

MARTINS, P. T. A. et al. Carta de sensibilidade ambiental ao óleo: origem, evolução e tendências. *Ciência e Natura*, Santa Maria, RS, v. 35, p. 163-175, 2013.

NORTH, E. W. et al. Simulating oil droplet dispersal from the Deepwater Horizon spill with a lagrangian approach. In: LIU, Y. et al. (Ed.). *Monitoring and modeling the Deepwater Horizon oil spill: a record-*

breaking enterprise. Washington, [s.n.], 2011. p. 217-226 (Geophysical Monograph Series; v. 195).

NORTH, E. W. et al. The influence of droplet size and biodegradation on the transport of subsurface oil droplets during the Deepwater Horizon Spill: a model sensitivity study. *Environmental Research Letters*, v. 10, n. 2, 2015.

OLIVEIRA, B. L. A. *Modelagem quase-tridimensional de dispersão de óleo*. 2013. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

PETERSON, C. et al. A tale of two spills: novel science and policy implications of an emerging new oil spill model. *BioScience magazine*, Califórnia, v. 62, n. 5, p. 461-469, 2012.

PETROBRAS, 2015. *Resposta ao Parecer Técnico CGPEG/IBAMA n.º 02022.000385/2014-96*, Janeiro de 2015.

ROMERO, A. F. et al. Integrated assessment for establishing an oil environmental vulnerability map: Case study for the Santos Basin region, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, Philadelphia, v. 74, p. 156-164, 2013.

RYE, H.; BRANDVIK, P. J.; STROM, T. Subsurface blowouts: results from field experiments. *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 4, n. 4, p. 239-256, 1997.

SILVA G. H. et al. Mapeamento da vulnerabilidade ambiental a derrames de óleo em ambientes costeiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO, 1., 2012, São Paulo, SP.

| 71 |

SOCOLOFSKY, S. A.; ADAMS, E. E.; SHERWOOD, C. R. Formation dynamics of subsurface hydrocarbon intrusions following the Deepwater Horizon blowout. *Geophysical Research Letters*, v. 38, n. 9, 2011.

YAPA, P. D. et al. How does oil and gas behave when released in deep water? *Journal of Hydro-environment Research*, v. 6, n. 4, p. 275-285, 2012.

YAPA, P. D.; ZHENG, L. Modelling oil and gas releases from deep water: a review. *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 4, n. 4, p. 189-198, 1997.

ZHENG, L.; YAPA, P. D.; CHEN, F. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts: Part I: Theory and model formulation. *Journal of Hydraulic Research*, v. 41, n. 4, p. 339-351, 2002