INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
FLUMINENSE
Campus Macaé

Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica

Ministério da Educação

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

MODALIDADE PROFISSIONAL

MODELAGEM COMPUTACIONAL TRIDIMENSIONAL DO *BLOWOUT* DE POÇOS DE PETRÓLEO: METODOLOGIA E APLICAÇÕES

PEDRO MELLO PAIVA

MACAÉ/RJ
2016

PEDRO MELLO PAIVA

MODELAGEM COMPUTACIONAL TRIDIMENSIONAL DO *BLOWOUT* DE POÇOS DE PETRÓLEO: METODOLOGIA E APLICAÇÕES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, linha de pesquisa Avaliação e Gestão Ambiental.

Orientador: Professor D.Sc. Jader Lugon Junior – **IFF** (Doutor em Modelagem Computacional – **IPRJ/UERJ**)

MACAÉ/RJ
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P149m Paiva, Pedro Mello.
Modelagem computacional tridimensional do *blowout* de poços de petróleo: metodologia e aplicações/ Pedro Mello Paiva. — Macaé, RJ, 2016.
62 f.: il. color.

Orientador: Jader Lugon Junior.

Dissertação (Mestrado). — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Macaé, RJ, 2016.
Inclui bibliografia.

1. MOHID (Programa de computador). 2. Poços de petróleo – Perfuração. 3. Computação – Matemática. 4. Engenharia do petróleo - Poços de petróleo submarino – Perfuração. 5. Petróleo - Dispersão – Modelos matemáticos. 6. Sistemas de indicação visual tridimensional. I. Lugon Junior, Jader, orient. II. Título.

CDD 622.18282 23.ed.

Bibliotecário-Documentalista |Henrique Barreiros Alves | CRB-7/ 6326

Dissertação intitulada MODELAGEM COMPUTACIONAL TRIDIMENSIONAL DO BLOWOUT DE POÇOS DE PETRÓLEO: METODOLOGIA E APLICAÇÕES, elaborada por Pedro Mello Paiva, e apresentado publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental linha de pesquisa Avaliação e Gestão Ambiental, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense - IFF.

Aprovada em 18 de agosto de 2016.

Banca Examinadora:

.....

Jader Lugon Júnior – Orientador
Doutor em Modelagem Computacional/UERJ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense

Alexandre Nunes Barreto

.....

Alexandre Nunes Barreto
Doutor em Engenharia de Reservatório e Exploração de Petróleo/UENF
Engenharia de Automação e Controle
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense

Antônio José da Silva Neto

.....

Antônio José da Silva Neto
Doutor em Engenharia Mecânica/North Carolina State University
Instituto Politécnico
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

.....

José Augusto Ferreira da Silva
Doutor em Geografia/UNESP
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade, pelas amizades que fiz, e pela força que me foi dada durante a realização deste trabalho.

A minha esposa Cleide, pela paciência nos momentos mais difíceis e pelo apoio ao longo desta caminhada.

Aos colegas de trabalho, em especial a Gustavo, Bruna, Ana Paula e Laisa, pelo apoio incondicional durante esta empreitada, e pelas palavras de incentivo.

A minha mãe, meu pai e meu irmão, pela ajuda nos afazeres cotidianos, e pela compreensão nos momentos em que não pude estar presente.

Ao meu orientador, Professor Jader Lugon Junior, pelo apoio, sempre presente, na condução das diversas etapas deste trabalho.

Aos professores Ramiro Neves e Guilherme Franz, pelo auxílio na condução das etapas de modelagem computacional com o software MOHID.

A minha tia Dalila, e à Professora Maria Inês, por servirem de inspiração e exemplo de dedicação aos estudos nas áreas das ciências ambientais.

EPÍGRAFE

“Timoneiro nunca fui

Que eu não sou de velejar

O leme da minha vida

Deus é quem faz governar

E quando alguém me pergunta

Como se faz pra nadar

Explico que eu não navego

Quem me navega é o mar

Não sou eu quem me navega

Quem me navega é o mar”

Paulinho da Viola

RESUMO

Em geral, os estudos de deriva de óleo nos oceanos recebem uma abordagem bidimensional, considerando que todo o óleo do blowout de um poço de petróleo pode ser representado por um vazamento superficial nas mesmas coordenadas geográficas. 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. Parâmetros como a profundidade do vazamento, as propriedades físico-químicas do óleo, as correntes oceânicas e a dimensão das gotículas de óleo, podem impor deslocamentos horizontais significativos à pluma. A aplicação de dispersantes reduz o volume de óleo na chegada à superfície, além de forçar que isto ocorra em regiões mais afastadas do local do acidente. Por outro lado, este recurso reduz a dimensão das partículas e a sua velocidade subida, formando as intrusões de subsuperfície, que aprisionam as gotículas de óleo em trajetórias predominantemente horizontais. Este trabalho é um estudo de caso com o software MOHID na região da Bacia de Campos, em que foram confrontados os resultados das soluções lagrangeanas, de vazamentos de óleo em superfície com seus respectivos cenários de blowout de poços em diferentes condições de: profundidade, sazonalidade (verão e inverno), e aplicação de dispersantes na origem do vazamento. Os resultados reforçaram a importância da abordagem tridimensional para os cenários de águas profundas e ultraprofundas, principalmente para os casos em que foi considerada a injeção de dispersante na origem do vazamento.

Palavras-chave: Vazamento de óleo. Modelagem computacional. Blowout. Águas profundas. Trajetória. Modelo tridimensional.

ABSTRACT

In general, ocean oil drift studies receive a two-dimensional approach, whereas the whole oil from well blowout can be represented by an surface oil leak in the same geographical coordinates. 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. Parameters such as the depth of the leak, the physicochemical properties of the oil, ocean currents and the size of the oil droplets may impose significant horizontal displacements to the plume. The application of dispersants reduces the amount of oil at the surface, and forces this to occur in regions further away from the accident site. On the other hand, this feature reduces the particle size and its rising velocity, forming intrusions subsurface that trap the oil droplets in predominantly horizontal trajectories. This work is a case study with software MOHID in the Campos Basin region, where the results of surface oil leaks lagrangian solutions were confronted to their wells blowout scenarios in different conditions of depth, seasonal (summer and winter), and application of dispersants at the source of the leak. The results reinforced the importance of three-dimensional approach to the scenario of deep and ultradeep waters, especially for cases where it was considered the dispersant injection into the source of the leak.

Keywords: *Oil leak. Computational modeling. Blowout. Deepwater. Trajectory. Three-dimensional model.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelos de representação para *blowout* em águas rasas (a) e profundas (b). 18
Figura 2 – Comportamento da pluma para diferentes velocidades das correntes 26
Figura 3 – Esquema do comportamento da pluma 28
Figura 4 – Profundidade de aprisionamento em função das correntes e da razão gás-óleo 29
Figura 5 – Trajetória da pluma observada e simulada..... 30
Figura 6 – Variação da densidade e fluorescência medida, em função da profundidade..... 31
Figura 7 – Previsão do espalhamento na superfície 32
Figura 8 – Distribuição espacial das partículas em função do diâmetro 33
Figura 9 – Efeito da biodegradação no comportamento da pluma 34
Figura 10 – Níveis de interação com o solo em função da taxa de biodegradação 35
Figura 11 – Modelo conceitual das regiões de um *blowout* 44
Figura 12 – Distribuição do diâmetro das partículas sem o uso de dispersantes..... 47
Figura 13 – Distribuição do diâmetro das partículas com o uso de dispersantes 48
Figura 14 - Pontos de interesse para os cenários simulados..... 51
Figura 15 – Terreno digital no MOHID, polígono da região e origens das descargas..... 52
Figura 16 – Vazamentos superficiais: verão (esquerda) e inverno (direita)..... 56
Figura 17 – Representação gráfica das normas propostas: deslocamento e espalhamento 57
Figura 18 – Deslocamento (km) e espalhamento (%) calculados para os cenários..... 59
Figura 19 – Efeito da profundidade: cenários C10 e C12 60
Figura 20 – Efeito do uso de dispersantes: C03 e C04..... 61
Figura 21 – Efeitos da sazonalidade: C05 e C11..... 62
Figura 22 – Cenário de maior deslocamento (C09) 62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Processos modelados pelos diferentes softwares 23
Quadro 2 – Cenários de vazamento em profundidade simulados 56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas geográficas e profundidades dos pontos de interesse 50
Tabela 2 – Propriedades do óleo 53
Tabela 3 – Distribuição dos diâmetros, vazões e velocidades de subida 55
Tabela 4 – Resultados para as diferentes profundidades..... 60
Tabela 5 – Resultados para o uso de dispersantes..... 60
Tabela 6 – Resultados para a sazonalidade 62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADIOS - Automated Data Inquiry for Oil Spills, modelo metorológico da NOAA

CDOG - Comprehensive Deepwater Oil and Gas Blowout Model, modelo de dispersão de blowout da Universidade de Clarkson

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

GNOME - General NOAA Operational Modeling Environment, modelo de dispersão de óleo da NOAA

GulfSpill - modelo de dispersão do óleo desenvolvido pela KFUPM/RI (Research Institute of King Fahd University of Petroleum and Minerals)

MMA - Ministéiro do Meio Ambiente

MOHID – sistema tridimensional de modelagem de água, desenvolvido pela MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center) no IST (Instituto Superior Técnico) da Universidade Técnica de Lisboa

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration (U.S. Department of Commerce)

OILMAP - modelo de dispersão de óleo desenvolvido pela Applied Science Associates

OSCAR - Oil Spill Contingency and Response Model, modelo de dispersão de óleo da SINTEF

PA - Plano de Área

PEI - Plano de Emergência Indiviudual

PEVO-BC - Plano de Resposta a Vazamento de Óleo na Bacia de Campos, requisito estabelecido na Resolução CONAMA 398/2008

PNC - Plano Nacional de Contingência

SAO - Sensibilidade Ambiental ao Óleo (cartas)

SINTEF - Foundation for Scientific and Industrial Research at the Norwegian Institute of Technology

SUMÁRIO

RESUMO vi
ABSTRACT vii
LISTA DE FIGURAS viii
LISTA DE QUADROS ix
LISTA DE TABELAS x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS xi
APRESENTAÇÃO 13
ARTIGO CIENTÍFICO 1 15
RESUMO 15
ABSTRACT 15
INTRODUÇÃO 16
REVISÃO DE LITERATURA 19
RESULTADOS E DISCUSSÃO 25
CONCLUSÕES 36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 37
ARTIGO CIENTÍFICO 2 40
RESUMO 40
ABSTRACT 40
INTRODUÇÃO 41
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 43
MATERIAL E MÉTODO 49
RESULTADOS E DISCUSSÃO 58
CONCLUSÕES 63
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 64
AGRADECIMENTOS 64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 64

APRESENTAÇÃO

A exploração de petróleo caminha para águas cada vez mais profundas, e, mesmo com o avanço das tecnologias, os riscos de acidentes e derramamentos de óleo fazem parte da realidade desta atividade. Neste cenário, nos últimos anos, vimos um aumento significativo da demanda por estudos ambientais sobre o planejamento de contingências e pronto atendimento nas ocorrências de acidentes.

A identificação das áreas mais sensíveis, consolidada nas Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo (SAO), é fundamental para garantir uma proteção efetiva. No Brasil, neste último século, a importância do mapeamento de sensibilidade para o combate à poluição por derramamento de óleo é evidenciado pelo recente conjunto de normas e leis estabelecidas.

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 sobreposição dos mapas de sensibilidade e probabilidade permite uma estimativa da vulnerabilidade da região, e auxilia na definição de áreas prioritárias, tanto no planejamento, quanto nas operações de respostas a emergências.

Até o presente momento, os estudos ambientais e a legislação vigente demandam uma abordagem bidimensional na definição das áreas prioritárias. Mesmo quando os cenários de *blowout* são estudados, são representados como um derramamento superficial equivalente, desprezando a trajetória do óleo entre o assoalho marinho e superfície do mar. Esta simplificação deve-se ao fato de que as incertezas aumentam conforme vão sendo consideradas profundidades maiores, e os resultados perdem em precisão e confiabilidade.

No ano de 2010, o vazamento decorrente da explosão da plataforma *Deepwater Horizon* no Golfo do México, resultou em fortes impactos ambientais e grandes desafios para as operações de contingência. A descarga de óleo e gás quente pressurizado, em regime turbulento, entrou em contato com a água em baixa temperatura produzindo uma variedade de fases dispersas, incluindo pequenas partículas de óleo, bolhas de gás, emulsão de óleo e gás, e hidratos.

Apesar de ter tomado proporções catastróficas, o acidente se apresentou como um marco na revisão dos aspectos relacionados à preservação do meio ambiente, e uma rara oportunidade de aprimorar o entendimento sobre o comportamento da pluma de hidrocarbonetos gerada pelo fluxo descontrolado do poço em águas profundas.

Como consequência, os estudos solicitados pelos órgãos ambientais tendem a ser cada vez mais abrangentes, com modelos capazes de representar, em uma abordagem tridimensional, tanto a trajetória quanto os possíveis processos de intemperismo atuantes na coluna d'água.

Este trabalho se propõe a aplicar as metodologias mais utilizadas para simulação tridimensional da trajetória dos hidrocarbonetos, em um estudo de caso na região da Bacia de Campos. Com o uso do software MOHID, busca-se avaliar os possíveis ganhos na avaliação dos impactos da modelagem tridimensional, quando os resultados são comparados aos obtidos pela abordagem tradicional bidimensional. A dissertação é estruturada a partir de dois artigos científicos.

O primeiro artigo, por meio de uma revisão bibliográfica, faz um levantamento das metodologias utilizadas para incorporar aos modelos, os aspectos relevantes na modelagem tridimensional de um *blowout*. Apresenta-se, portanto, 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.

O segundo artigo, é composto por um estudo de caso na região da Bacia de Campos com o uso do software MOHID. Foram simulados os *blowouts* de poços em diferentes condições de profundidade, em períodos de verão e inverno, com e sem a aplicação de dispersantes na origem do vazamento. Os resultados dos cenários de *blowout* são comparados com os respectivos vazamentos em superfície, com a finalidade de verificar as incertezas envolvidas na simplificação bidimensional, tipicamente utilizada nos estudos ambientais.

ARTIGO CIENTÍFICO 1

MODELAGEM COMPUTACIONAL 3D DO *BLOWOUT* DE POÇO DE PETRÓLEO - REVISÃO SOBRE REQUISITOS AMBIENTAIS E METODOLOGIA

RESUMO

Este artigo de revisão bibliográfica tem por finalidade 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, a importância destes para a priorização de áreas mais vulneráveis em casos de contingência, e a legislação pertinente. São levantados os 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, dentre 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.

ABSTRACT

This review article aims to present the different methodologies used in the three-dimensional modeling of the hydrocarbons dispersion originated from an oil well blowout. The concepts of coastal environmental sensitivity and vulnerability, their importance for prioritizing the most vulnerable areas in case of contingency, and the

relevant legislation are presented. 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 blowout scenarios wells, are discussed. 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, and, among the factors that exert strong influences, stand out: the speed of the subsurface currents; the gas separation from the main plume; hydrate formation, the dissolution of oil and gas droplets; variations in droplet diameter; the intrusion of the droplets at intermediate depths; biodegradation; and the appropriate parametrization of the density, salinity and temperature profiles of water through the column.

Keywords: Oil spill. Computational modelling. 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* (2010) 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 nesta 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).

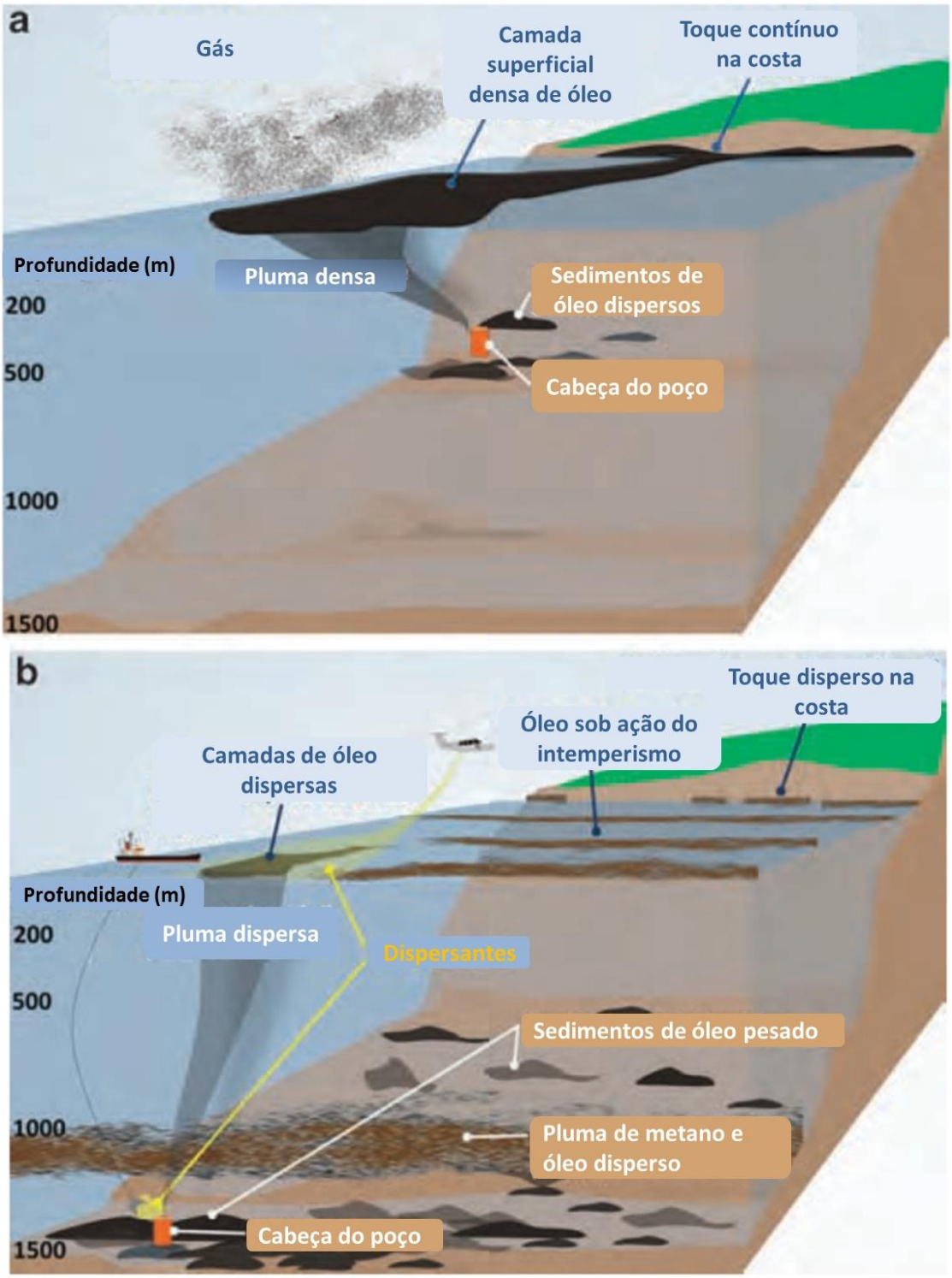
Segundo Socolofsky e colaboradores (2011), os hidrocarbonetos provenientes do vazamento originado no *blowout* da *Deepwater Horizon* foram encontrados em intrusões profundas de subsuperfície, mas poucos estudos discutem qual o mecanismo de formação dessa intrusão. Ainda segundo os autores, em geral, 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.

Dentre os fatores de difícil parametrização para os modelos estão os processos de intemperismo aos quais estão submetidos os hidrocarbonetos ao longo da trajetória, dentre 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 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).

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



Fonte: Adaptado de 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 exercem 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 flutuabilidade das embarcações.

Neste estudo, por meio de uma revisão bibliográfica, é realizado 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 classificam as regiões costeiras do continente de acordo com a dificuldade de remoção do óleo, caso este chegue a tocar a costa em caso 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 evidenciado pelo recente conjunto de normas e leis estabelecidas.

A Lei Nº 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. Esta 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 nº 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 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 resolução CONAMA 398/2008 recomenda que para as instalações cuja operação ofereça risco de acidentes de poluição por óleo, em águas sob jurisdição nacional, sejam elaborados planos de emergência individuais (PEI). O mapeamento da sensibilidade e vulnerabilidade ambiental ao óleo é um requisito para o PEI. 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 nº 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 ao órgão regulador sempre consideraram o vazamento na superfície, desprezando a trajetória do óleo entre o assoalho marinho e superfície do mar. Esta simplificação deve-se ao fato de que as incertezas aumentam conforme vão sendo consideradas profundidades maiores. A resposta defende ainda que, em função destas 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. Nestes 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. Estes 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 isto são utilizados os resultados do modelo hidrodinâmico, informações adicionais sobre o ambiente, às características do óleo, e detalhes do vazamento (volume, local, regime,...).

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 – dentre eles: ADIOS, GNOME, OILMAP, OSCAR, GulfSpill e MOHID – e os avanços para que estes 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.

Quadro 1 – Processos modelados pelos diferentes softwares

	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

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.

Dentre os modelos aqui já apresentados, destacamos ainda o CDOG. Este 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, neste 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, no Golfo do México, em 2010, 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, dentre outros aspectos.
- **Trajetória 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, serão vistos 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 apresenta fortes limitações.

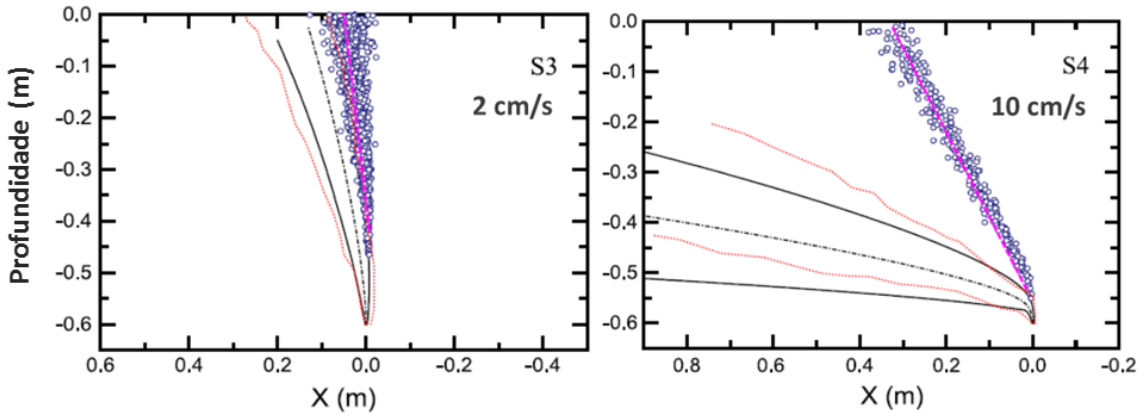
Comportamento do gás

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.

Este 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 a superfície. A comparação dos cenários que consideram ou não este 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. Este 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). Estes dados são muito valiosos e raros, em função das dificuldades logísticas e legais para se conduzir um experimento deste tipo. Entretanto, estes modelos não são aplicáveis para os cenários de vazamento em águas profundas.

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:

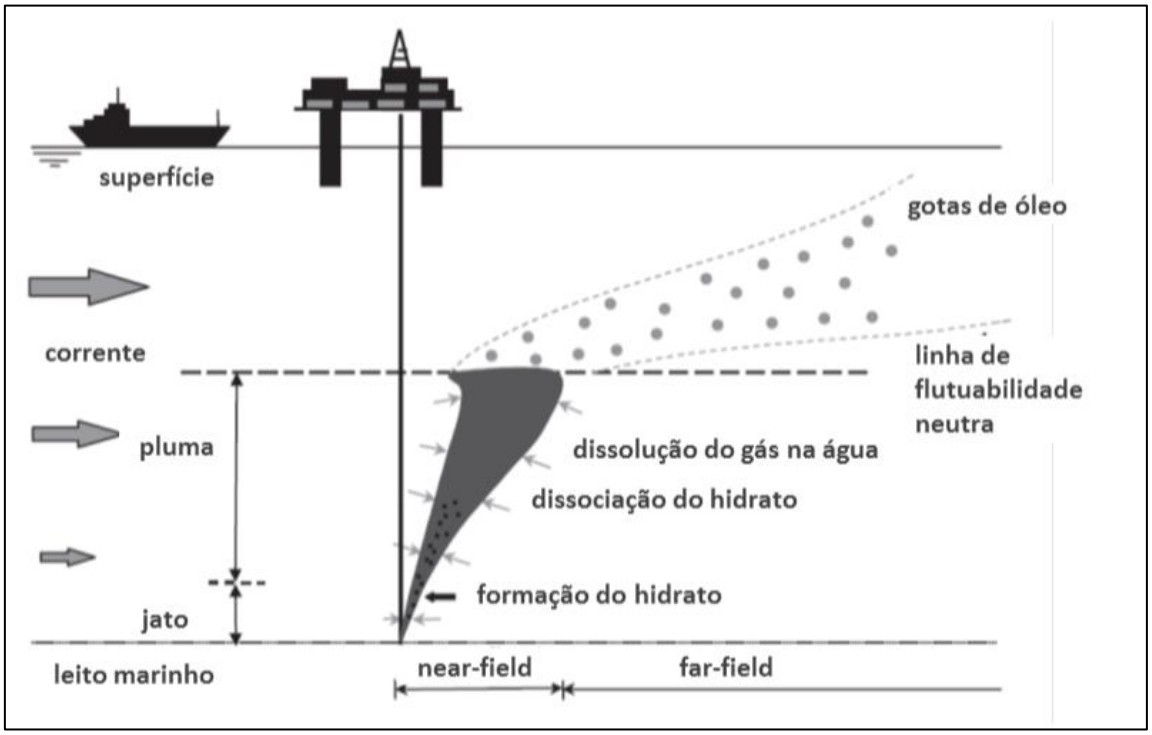
- Sob baixas temperaturas e altas pressões, em contato com a água, o gás pode se converter em hidrato;
- O gás livre pode se dissolver na água ao longo da trajetória, alterando a flutuabilidade da pluma;
- Sob altas pressões, o comportamento do gás é mais bem descrito pelas equações de gás não ideal;
- O tamanho das bolhas de gás e a sua velocidade de escorregamento não podem mais ser aproximadas 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 estas considerações, Zheng e colaboradores (2002) foram capazes de implementar em seu modelo as variações tridimensionais do ambiente, como velocidade, temperatura e salinidade. Estas 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.

Trajetória 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, dentre outros.

Figura 3 – Esquema do comportamento da pluma

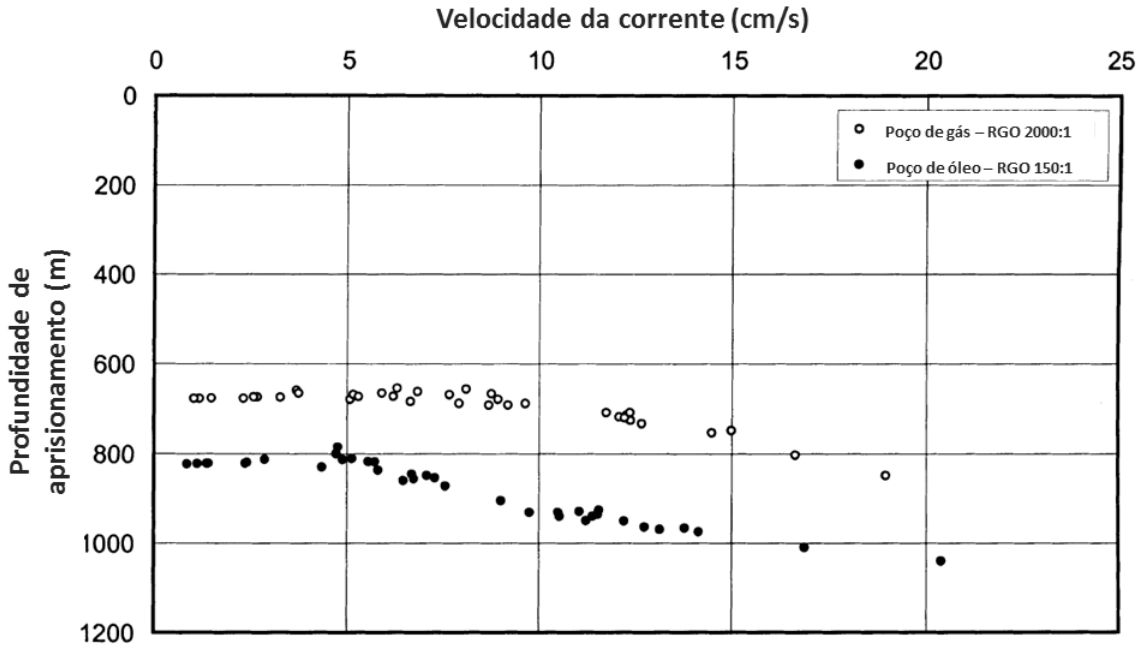


Fonte: Adaptado de Zheng et al., (2002).

Com o objetivo de apresentar o potencial efeito das correntes no comportamento da pluma, Johansen (2000) realizou simulações para diferentes perfis de correntes medidos. Na Figura 4 observa-se 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 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: Adaptado de Johansen (2000).

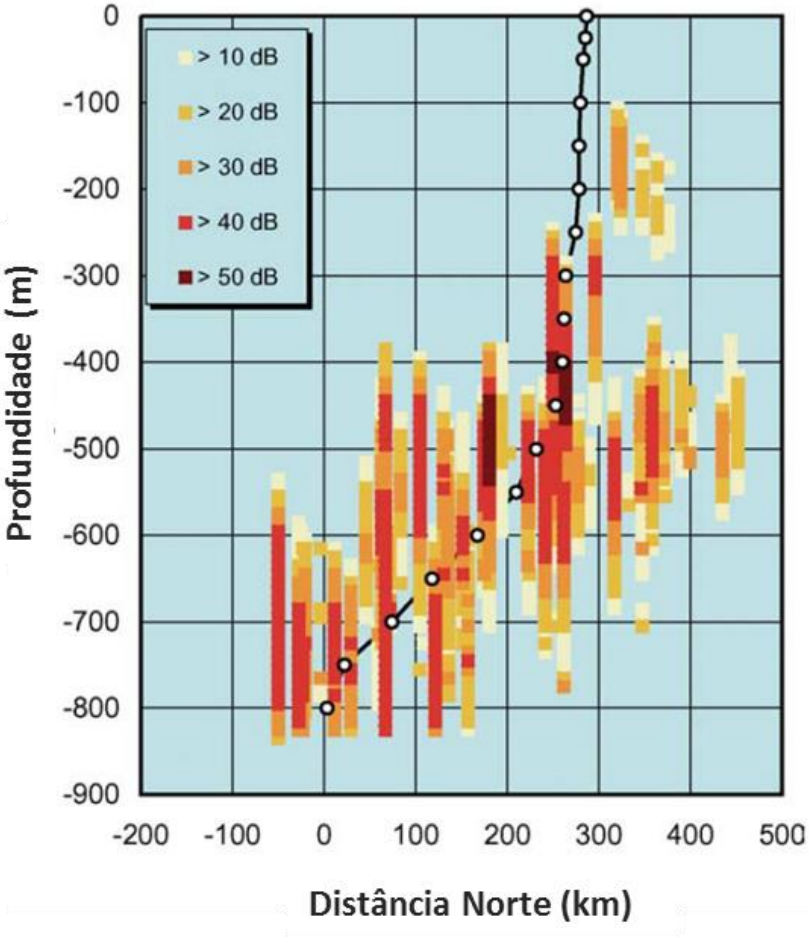
Na busca pela validação deste seu modelo, Johansen e colaboradores (2003) descrevem em seu artigo o experimento *DeepSpill*, conduzido nos mares da Noruega, em junho de 2000, em que foram realizadas quatro descargas controladas de óleo e gás, totalizando o volume de 120 m³ de óleo e 10 mil Nm³ de gás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



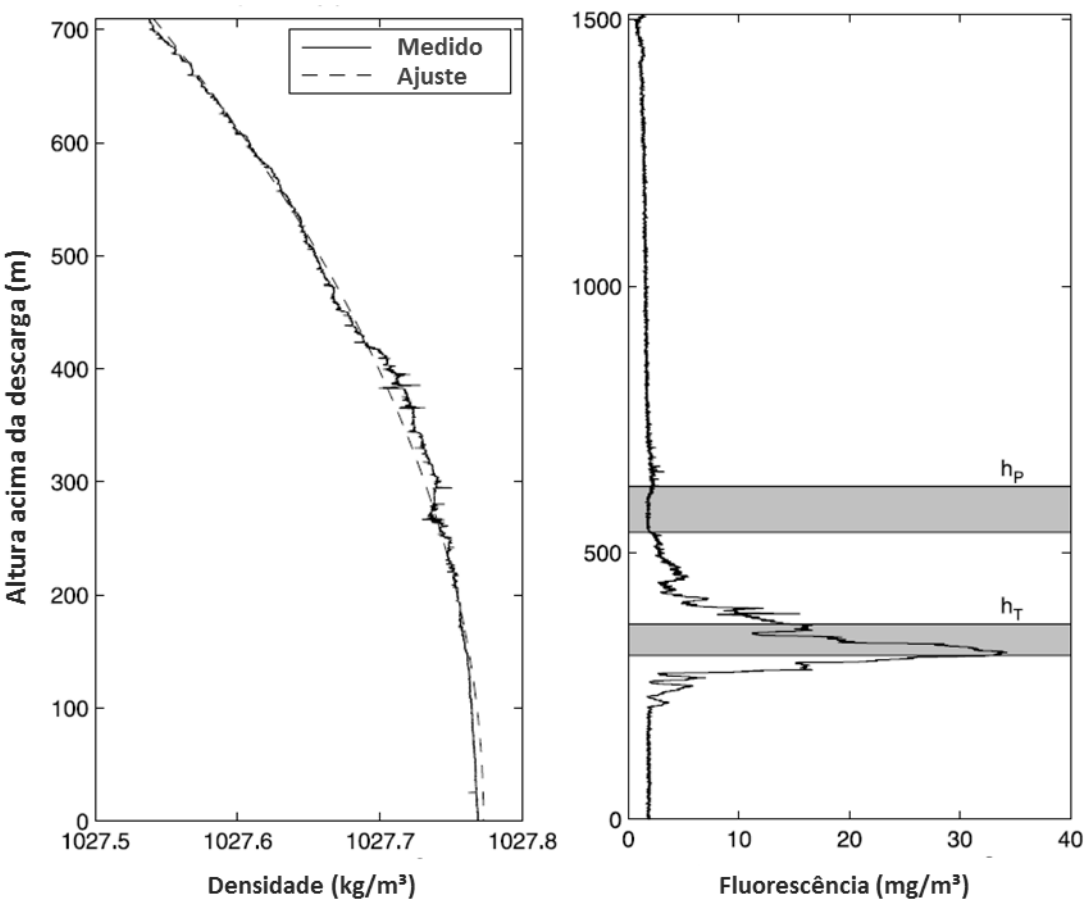
Fonte: Adaptado de Johansen et al. (2003).

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.

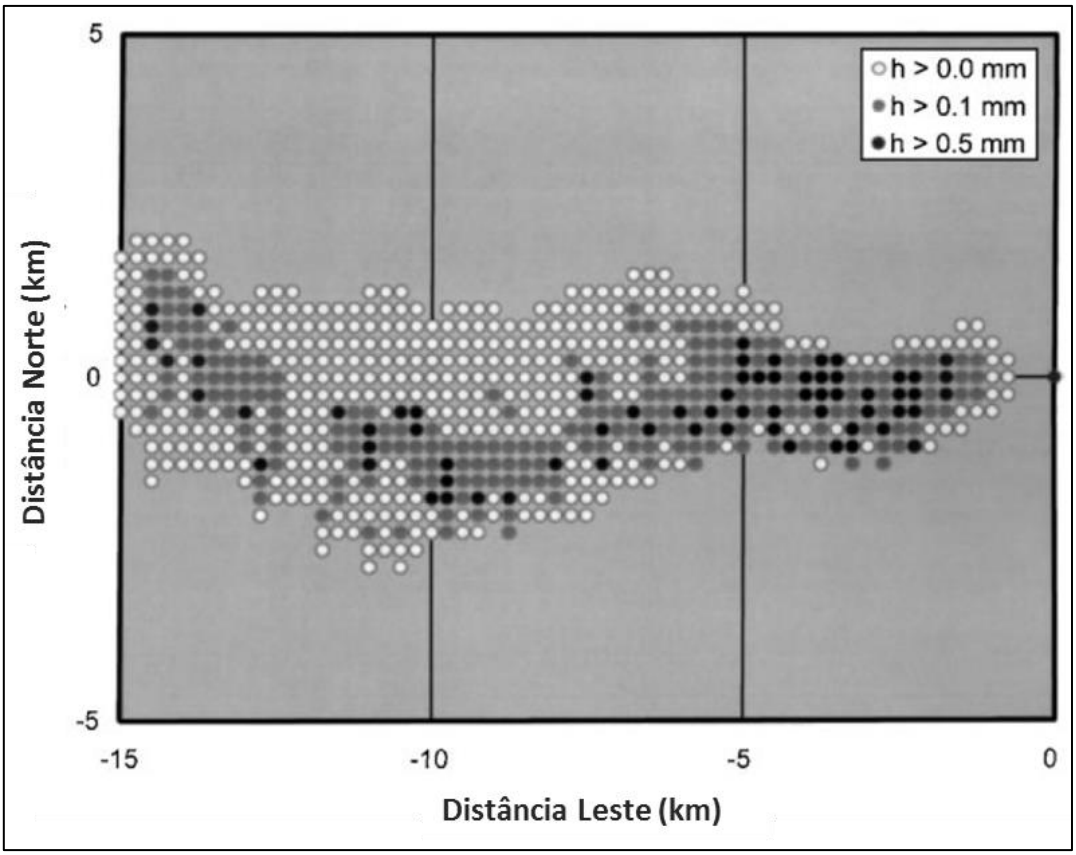
A flutuabilidade coletiva do óleo e do gás criou uma pluma com tendência de subida, mas as diferentes fases se comportaram de maneiras distintas. Grande parte do hidrocarboneto se separou da água arrastada pela pluma, aparentemente ficando aprisionada em subsuperfície pelas descontinuidades físicas inerentes 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 e 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, consequentemente, a previsão do seu espalhamento na superfície e espessura da camada. Um exemplo de resultado do espalhamento superficial com este tipo de cálculo é apresentado na Figura 7, onde h é a espessura da camada.

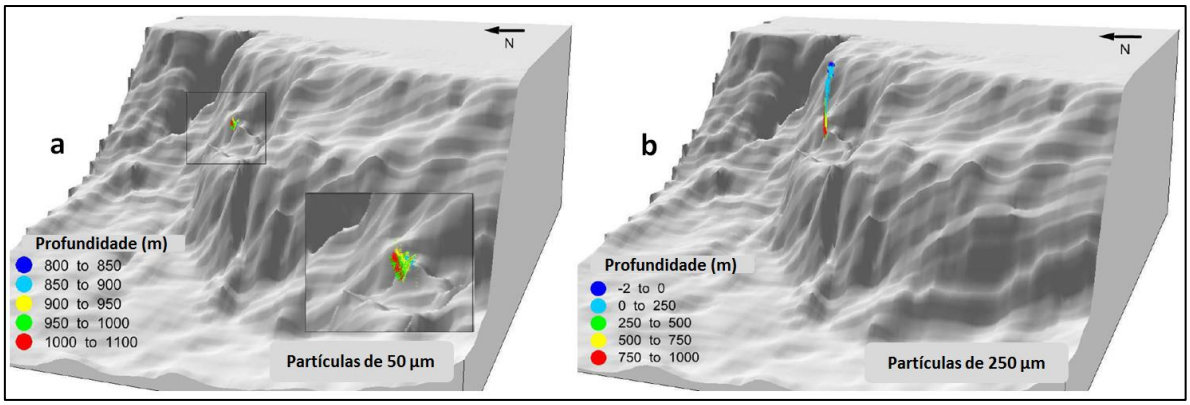
Figura 7 – Previsão do espalhamento na superfície



Fonte: Adaptado de 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 distribuição espacial das partículas da pluma após três dias de *blowout* para partículas de 50 µm (a) e 250 µm (b) é apresentada na Figura 8.

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:

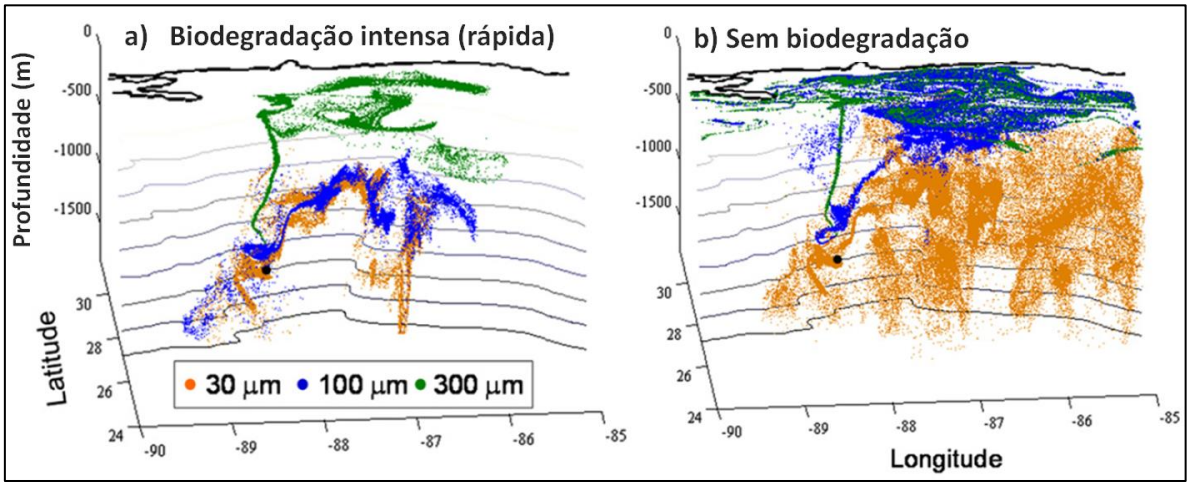
- As gotículas menores que 50 µm possuem flutuabilidade quase nula, e se mantiveram em camadas mais profundas, sujeitas a interações com o leito marinho;
- As partículas maiores, entre 50 e 100 µm foram mais influenciadas pela estratificação vertical do fluxo e formaram plumas a profundidades menores;
- 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)

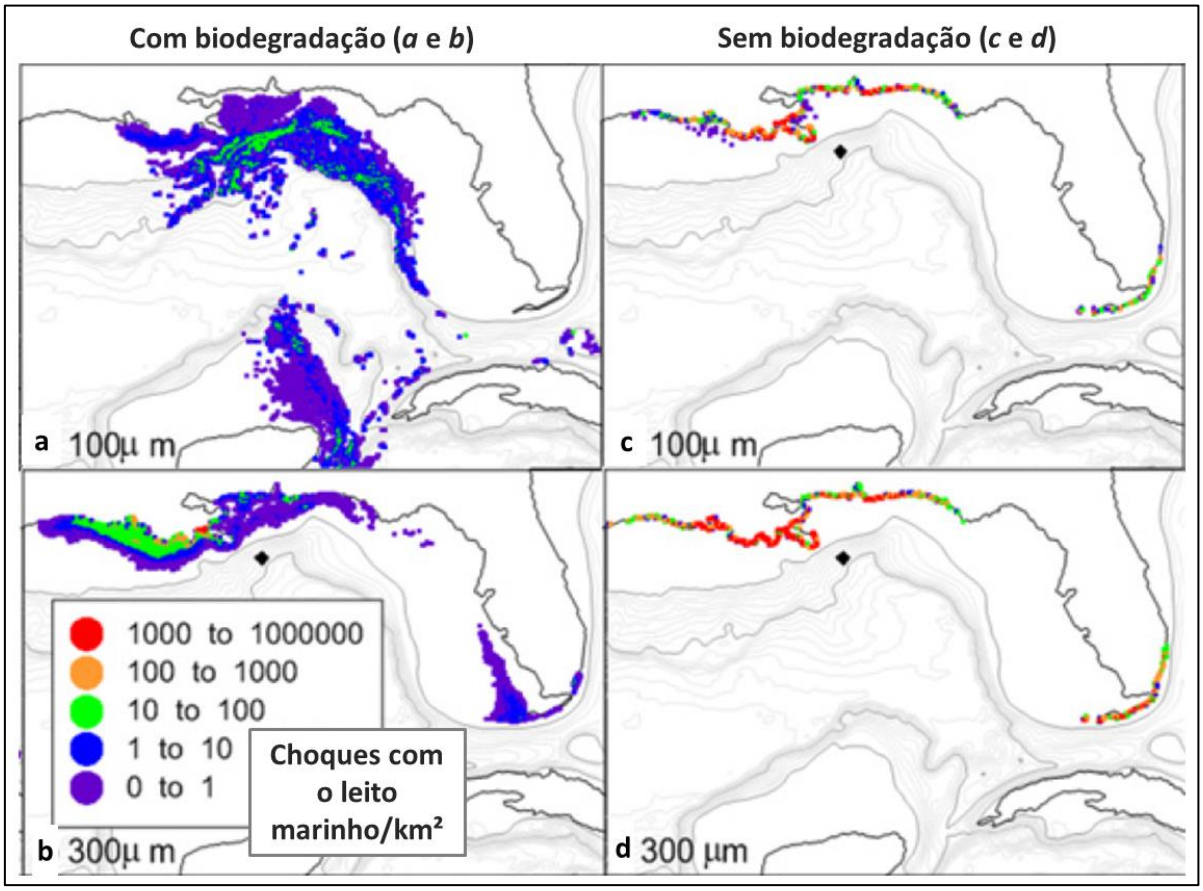
Os resultados demonstraram que o entendimento de processo de biodegradação é importante para previsão da dispersão das gotículas em subsuperfície. É particularmente importante nos casos em que os tamanhos iniciais das partículas são pequenos o suficiente para que o óleo fique submerso por um longo período de tempo (NORTH et al., 2015). Desta 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, consequentemente, 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 a extensão desta 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 Figura 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 Figura 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 flutuabilidade. Este 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 e YAPA, 2004).

A formação de hidrato se apresentou como um fator importante para os *blowouts* em águas profundas, entre 700 a 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 flutuabilidade 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 flutuabilidade quando parte do gás se separa, por possuir velocidade de subida maior que óleo (CHEN e 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 demostraram contribuir fortemente para a coerência dos resultados (ZHENG et al., 2002 e 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, consequentemente, 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 se apresentou como 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 BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Decreto Federal n°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°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 nº 4.871, de 6 de novembro de 2003, e o Decreto nº 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°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°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 of the…** 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.

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, p. 97-115, 2013.

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.** Geophysical Monograph Series. Washington, v. 195, p. 217-226, 2011.

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 nº 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.

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.

ARTIGO CIENTÍFICO 2

MODELAGEM COMPUTACIONAL 3D DO *BLOWOUT* DE POÇO DE PETRÓLEO – UM ESTUDO DE CASO NA BACIA DE CAMPOS COM O SOFTWARE MOHID

RESUMO

O *blowout* de um poço de petróleo lança hidrocarbonetos para o ambiente marinho sob a forma de gotículas de óleo e bolhas de gás que, no primeiro momento, comportam-se como uma pluma única. Posteriormente, o gás tende a se separar da pluma de óleo, devido a sua menor densidade e maior capacidade de solubilização na água. A trajetória do óleo, por sua vez, é fortemente influenciada por processos físicos, químicos e biológicos. Em geral, os estudos de deriva de óleo nos oceanos recebem uma abordagem bidimensional, considerando que todo o óleo do *blowout* de um poço de petróleo pode ser representado por um vazamento superficial nas mesmas coordenadas geográficas. Entretanto, como foi possível observar no acidente da *Deepwater Horizon*, no Golfo do México, em 2010, parâmetros como a profundidade do vazamento, as propriedades físico-químicas do óleo, as correntes oceânicas e a dimensão das gotículas de óleo, podem impor deslocamentos horizontais significativos à pluma. A aplicação de dispersantes reduz o volume de óleo na chegada à superfície, além de forçar que isto ocorra em regiões mais afastadas do local do acidente. Por outro lado, este recurso reduz a dimensão das partículas e a sua velocidade subida, formando as intrusões de subsuperfície, que aprisionam as gotículas de óleo em trajetórias predominantemente horizontais, cujos impactos ambientais ainda não são bem entendidos. Este trabalho é um estudo de caso com o software MOHID na região da Bacia de Campos, em que foram confrontados os resultados das soluções lagrangeanas, de vazamentos de óleo em superfície com seus respectivos cenários de *blowout* de poços em diferentes condições de: profundidade, sazonalidade (verão e inverno), e aplicação de dispersantes na origem do vazamento. Os resultados reforçaram a importância da abordagem tridimensional para os cenários de águas profundas e ultraprofundas, principalmente para os casos em que foi considerada a injeção de dispersante na origem do vazamento.

Palavras-chave: Vazamento de óleo. Modelagem Computacional. Modelo Tridimensional. *Blowout*. Trajetória. Dispersantes.

ABSTRACT

The blowout of an oil well releases hydrocarbons into the marine environment in the form of oil droplets and gas bubbles. At first, these phase behave as a single plume. Subsequently, the gas tends to separate from the oil plume, because of its lower density and higher solubilizing capacity in water. The trajectory of the oil, on the other hand, is strongly influenced by physical, chemical and biological processes. In general, ocean oil drift studies receive a two-dimensional approach, whereas the whole oil from well blowout can be represented by an surface oil leak in the same geographical coordinates. However, as observed in the Deepwater Horizon accident in the Gulf of Mexico in

2010, parameters such as the depth of the leak, the physicochemical properties of the oil, ocean currents and the size of the oil droplets may impose significant horizontal displacements to the plume. The application of dispersants reduces the amount of oil at the surface, and forces this to occur in regions further away from the accident site. On the other hand, this feature reduces the particle size and its rising velocity, forming intrusions subsurface that trap the oil droplets in predominantly horizontal trajectories, whose environmental impacts are not well understood. This work is a case study with software MOHID in the Campos Basin region, where the results of surface oil leaks lagrangian solutions were confronted to their wells blowout scenarios in different conditions of depth, seasonal (summer and winter), and application of dispersants at the source of the leak. The results reinforced the importance of three-dimensional approach to the scenario of deep and ultradeep waters, especially for cases where it was considered the dispersant injection into the source of the leak.

Keywords: Oil leak. Computational modeling. Three-dimensional model. Blowout. Trajectory. Dispersants.

INTRODUÇÃO

O *blowout* de um poço de petróleo em águas profundas lança óleo e gás para o ambiente marinho sob a forma de um jato flutuante submerso. Após este lançamento, em função das interações do óleo e do gás com a massa da coluna d'água, diferentes tamanhos de gotículas e bolhas são formadas, em diferentes profundidades (ZHAO et al., 2014). Gotículas maiores e menores terão diferentes velocidades de subida, em função dos efeitos de flutuabilidade. Ryerson e colaboradores (2012) estimaram que o tempo de subida das gotículas maiores até a superfície seria de algumas horas, enquanto alguns dias ou semanas seriam necessários para as partículas menores atingirem a superfície, assim como aconteceu no acidente da *Deepwater Horizon*, em Macondo, no Golfo do México, no ano de 2010. Partículas menores podem se manter na coluna d'água por períodos prolongados devido à turbulência vertical, estratificação por densidade, ou pelo arraste das correntes oceânicas (JOHANSEN et al., 2003).

A trajetória e o destino da pluma de óleo proveniente de um vazamento no oceano são determinados por processos físicos, químicos e biológicos, em função das propriedades do óleo, condições hidrodinâmicas, meteorológicas e ambientais (WANG et al., 2005). Dentre estes processos podemos destacar a advecção, difusão, espalhamento, evaporação, dissolução e emulsificação. Quando o óleo é derramado na superfície, a

tendência é de espalhamento, formando um filme fino: a mancha de óleo (WANG et al., 2008).

A grande maioria dos modelos para simulação do vazamento de óleo limita-se à representação da trajetória bidimensional da mancha, considerando efeitos como a evaporação e perda de massa devido ao intemperismo (FAY, 1971). Os modelos mais recentes estão buscando aperfeiçoar as previsões da trajetória ao longo da coluna d'água do óleo derramado em subsuperfície (PAIVA et al., 2016).

Em casos de vazamentos em subsuperfície, o espalhamento da mancha de óleo é um processo tridimensional, regido pela dimensão das gotículas de óleo e por processos de difusão por cisalhamento (WANG et al., 2008).

Recentemente alguns trabalhos de simulação 3D têm sido realizados com o objetivo de melhor entender os processos envolvidos ao longo da trajetória da pluma (PAIVA et al., 2016), dentre eles: o tamanho das gotículas, o arraste pelas correntes oceânicas, a flutuabilidade do óleo e o uso de dispersantes sintéticos.

Antes de um poço de petróleo ser perfurado e completado, é prudente formular planos de contingência para o caso acidental de vazamentos ou *blowout*. Estes planos, em geral, são requisitos legais para o início das operações (WHITE e BERRY, 2014). Os modelos de deriva são importantes para os estudos ambientais e avaliação de impactos de um acidente real ou hipotético, durante a fase de operação ou licenciamento de toda infraestrutura offshore da indústria de petróleo (SOCOLOFSKY et al., 2015). Nesse contexto, a modelagem da deriva do óleo derramado cumpre um importante papel na avaliação de riscos e danos ambientais, além de exercerem importante influência para definição de estratégias e ações dos planos de contingência.

O acidente da *Deepwater Horizon* corresponde ao maior vazamento de petróleo da história nas águas dos Estados Unidos, e a primeira vez que os dispersantes químicos foram aplicados diretamente na cabeça do poço em *blowout*. É sabido que a adição de dispersantes reduz a tensão interfacial entre o óleo e a água, promovendo a formação de gotículas menores (ZHAO et al., 2014). Os dispersantes são usados com a intenção de reduzir o diâmetro das partículas, o que pode acarretar em maior tempo de residências das partículas na coluna d'água. Isto facilita o trabalho da equipe de respostas, uma vez

que há uma tendência de que o óleo chegue à superfície em regiões mais afastadas do ponto do vazamento (SOCOLOFSKY et al., 2015).

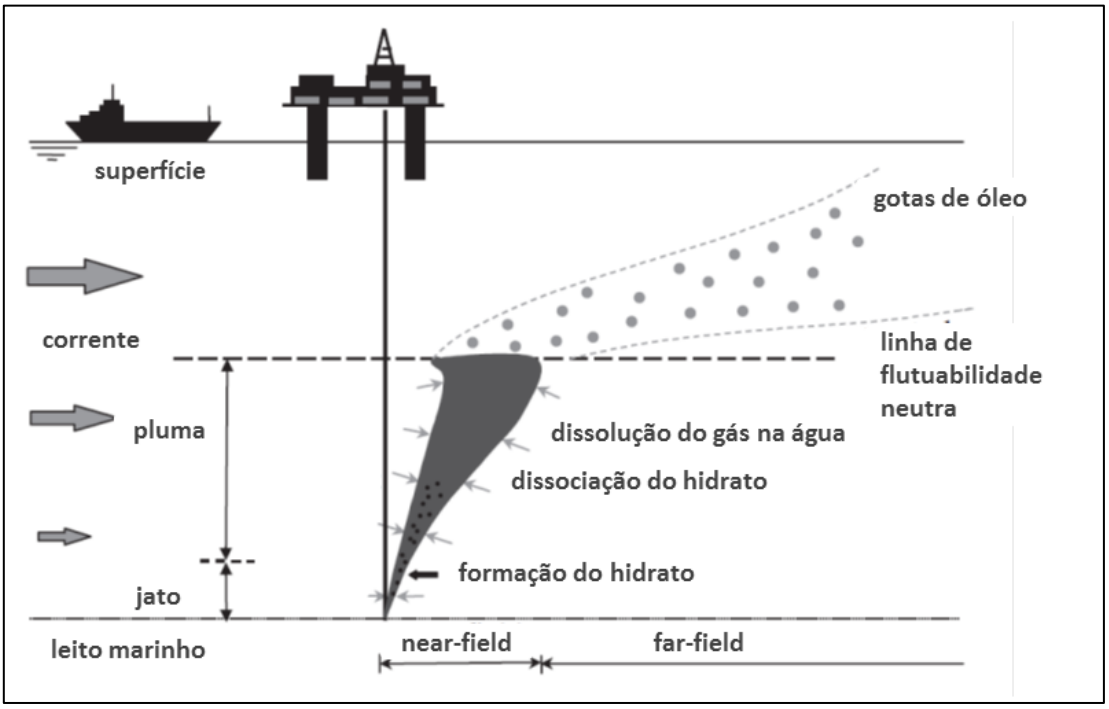
A redução do diâmetro das partículas aumenta também as taxas de biodegradação (consumo de hidrocarbonetos por microrganismos) em subsuperfície, reduzindo a quantidade de óleo que chega à superfície. Por outro lado, esses benefícios aparentes causam efeitos no ecossistema que ainda não são bem entendidos, e esta é mais uma motivação para melhorar os modelos de dispersão de óleo contemplando uma abordagem tridimensional. A avaliação destes impactos e as medidas mitigadoras são muito dependentes de um melhor entendimento sobre o transporte e destino destas gotículas, assim como estimativas das parcelas que deixam de ser recuperada pelas embarcações (SOCOLOFSKY et al., 2015).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em cenários de *blowout* de poços em águas profundas ocorre o vazamento descontrolado de hidrocarbonetos para o ambiente marinho. As bolhas de gás não tendem a ficar aprisionadas na coluna d'água por períodos muito longos devido à grande diferença de densidade e à rápida dissolução do gás na água (WHITE, 2014). Por outro lado, os estudos numéricos de Paris e colaboradores (2012) sugerem que as gotículas menores de óleo tendem a se separar da pluma principal a profundidades próximas de 1.000 m, em movimentos laterais significativos.

De uma maneira geral, os modelos dividem o *blowout* em três regiões, conforme apresentado na Figura 11. O jato inicial, que ocorre muito próximo do ponto de vazamento, define a região de rompimento (*break up region*), e é de fundamental importância para a definição do diâmetro das partículas (ZHAO et al., 2014) . Posteriormente, o jato de óleo e gás se comporta como uma pluma única pela coluna d'água, (*near-field region*) e podem ser simulados tipicamente como um despejo de efluentes no corpo d'água, adaptado para as condições de fluxo multifásico (ZHENG et al., 2003).

Figura 11 – Modelo conceitual das regiões de um *blowout*



Fonte: Adaptado de Zheng et al. (2003)

Esta pluma perde velocidade gradativamente enquanto sobe pela coluna d'água, até chegar à linha teórica de flutuabilidade neutra, que define ao início da terceira e última região (*far-field region*), na qual não há mais interações entre as partículas de óleo e gás, que se movem de forma independente. Fatores como a estratificação do ambiente, densidade do óleo, profundidade do vazamento e velocidade da descarga, vão determinar se as partículas atingem ou não a linha de flutuabilidade neutra antes de chegarem à superfície (ZHENG et al., 2003).

Conforme apresentado por Socolofsky e colaboradores (2015), esta região (*far-field*) é a principal para os modelos de águas profundas, uma vez que, como observado em seus modelos, aproximadamente 85% do transporte das partículas é realizado nesta região. Por isto, para o caso de *blowout* em águas profundas, o tamanho da partícula assume papel fundamental, assim como a dissolução e a biodegradação. Bolhas e gotículas maiores chegam à superfície em pontos mais próximos da origem do vazamento, enquanto as menores tendem a se distanciar mais da origem antes de atingir a superfície.

Em função do gradiente de densidade do oceano, as partículas são arrastadas enquanto sobem pela coluna d'água, e uma ou mais intrusões podem se formar. Ainda não é bem entendido como as gotículas ou bolhas são transportadas imediatamente acima das

camadas de intrusões. Segundo Socolofsky e colaboradores (2015), é esperado um comportamento similar ao transporte lagrangeano de partículas, em que os efeitos de flutuabilidade e dinâmica da pluma perdem muita influência.

Os únicos dados experimentais de campo de plumas de *blowout* são do experimento *DeepSpill* (JOHANSEN et al., 2003). Neste experimento não foram observadas múltiplas intrusões, como no *blowout* da *Deepwater Horizon*, possivelmente pelo fato de ter sido conduzido em um local com menor estratificação e correntes mais fortes. Por este motivo, o mais comum é encontrar modelos baseados em algoritmos de intrusão simples, como o CDOG de Chen e Yapa (2003), e o *DeepBlow* de Johansen e colaboradores (2003).

Em geral, os modelos de trajetória das partículas simulam a trajetória destas ao longo da coluna d'água a partir da região de flutuabilidade neutra. Além da advecção devida às correntes do ambiente, e da velocidade de subida devido à flutuabilidade, os modelos contemplam também um movimento aleatório, relacionado ao fenômeno de difusão, tanto na horizontal quanto na vertical. É comum que alguns modelos contemplem também uma taxa de perda de massa, representando a biodegradação (SOCOLOFSKY et al., 2015).

Os modelos de Johansen e colaboradores (2003) sugerem que os diâmetros iniciais das gotas estavam na faixa entre 1 e 10 mm nos períodos em que não havia aplicação de dispersantes no vazamento da *Deepwater Horizon*. Em questão de horas, as gotículas já chegariam à superfície, tempo muito curto para uma biodegradação significativa na coluna d'água. Os dispersantes químicos reduzem a tensão superficial entre o óleo e a água. Neste mesmo estudo (JOHANSEN et al., 2003), os resultados sugerem que, para o *blowout* da *Deepwater Horizon*, quando o fluxo foi tratado com biodispersantes, estima-se que as gotículas eram cerca de 100 vezes menores, em uma faixa entre 100 e 1000 µm.

Estas partículas menores seriam as responsáveis pela formação das plumas subsuperficiais, também chamadas de intrusões, que se destacam da pluma principal (CHAN et al., 2015), que podem levar algumas centenas de horas para chegar à superfície.

Na prática, a adição de dispersantes tende a diminuir o tamanho das gotículas, o que aumenta a área de contato da massa de óleo, potencializando os fenômenos da dissolução e biodegradação. Reduz também a velocidade de subida, aumentando o tempo de residência da gotícula na coluna d'água (SOCOLOFSKY et al., 2015). Os modelos que desconsideram a injeção de dispersante, quando comparados aos que consideram, tendem a encontrar menores tempos de chegada de óleo à superfície, deslocamentos horizontais em relação à origem do vazamento da ordem de 100 vezes menores, e volumes bem maiores de óleo chegando à superfície.

Modelos tridimensionais utilizados para simular o vazamento da *Deepwater Horizon* indicaram que as gotículas menores que 80 µm formaram estas intrusões (NORTH et al., 2011), que a aplicação de dispersantes na cabeça do poço desloca estas intrusões para camadas mais profundas (PARIS et al., 2012), e que a biodegradação aumenta o tempo de residência do óleo na coluna d'água (LINDO-ATICHATI et al., 2014).

As partículas menores possuem velocidades de subida na mesma ordem de grandeza ou até mesmo inferiores às velocidades das correntes oceânicas, com forte tendência de dispersão devido às condições ambientais. Por outro lado, as partículas com diâmetros maiores tendem a subir mais rapidamente, com velocidades bem maiores que a hidrodinâmica ambiental, atingindo rapidamente a superfície (LEITÃO et al., 2013).

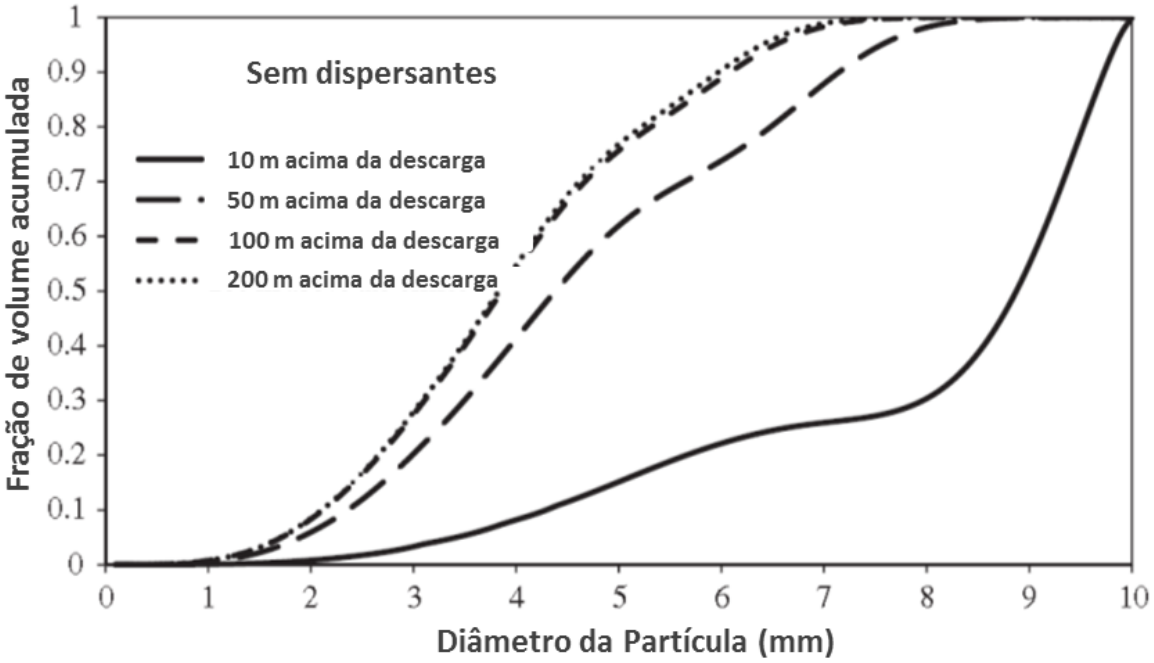
Socolofsky e colaboradores (2015) compararam as previsões dos modelos de *blowouts* em subsuperfície, com e sem a injeção de dispersantes químicos, para águas rasas e profundas. Em suas simulações, variaram também as razões gás-óleo e o fluxo cruzado provocado pela hidrodinâmica. Para as condições testadas, as previsões foram de diâmetros de partículas variando de 0,3 a 6 mm nos casos sem dispersantes, e de 0,01 a 0,8 mm nos casos com injeção de dispersantes.

Segundo Aman e colaboradores (2015), não há observações experimentais diretas para suportar a formação de gotículas de óleo com diâmetros maiores que 1000 µm em *blowouts* de águas profundas. Ryerson et al. (2011) utilizou os dados das observações iniciais do acidente de Macondo para estimar os diâmetros de partículas entre 3 e 10 mm. Esta estimativa desconsidera a dinâmica do óleo livre, que rapidamente chega à superfície, que poderia acelerar as primeiras aparições de óleo na superfície.

Johansen e colaboradores (2003) apresentaram os resultados do experimento de campo *DeepSpill*, que simulou um *blowout* na costa da Noruega, com o recurso de monitoramento submarino (ROV – remote operating vehicle), que registrou partículas com dimensões na ordem de 8 a 10 mm. Segundo Aman e colaboradores (2015), o uso de diesel pode ter aumentado artificialmente o diâmetro das gotículas, por ser uma substância menos densa e menos viscosa que o óleo de um poço de petróleo.

Zhao e colaboradores (2014) apresentam em seu estudo a distribuição volumétrica das gotículas para os diversos diâmetros. A distâncias menores do orifício da descarga, a maior parte das gotículas tem diâmetros entre 8,5 e 10 mm. O processo de quebra destas gotículas ocorre principalmente dentro dos primeiros 50 m em função das altas forças envolvidas no jato inicial. Acima dos 50 m, este efeito se reduz e a distribuição dos diâmetros começa a ficar mais estável. A partir dos 100 m acima do ponto de descarga, praticamente não se observa mais alteração (Figura 12).

Figura 12 – Distribuição do diâmetro das partículas sem o uso de dispersantes

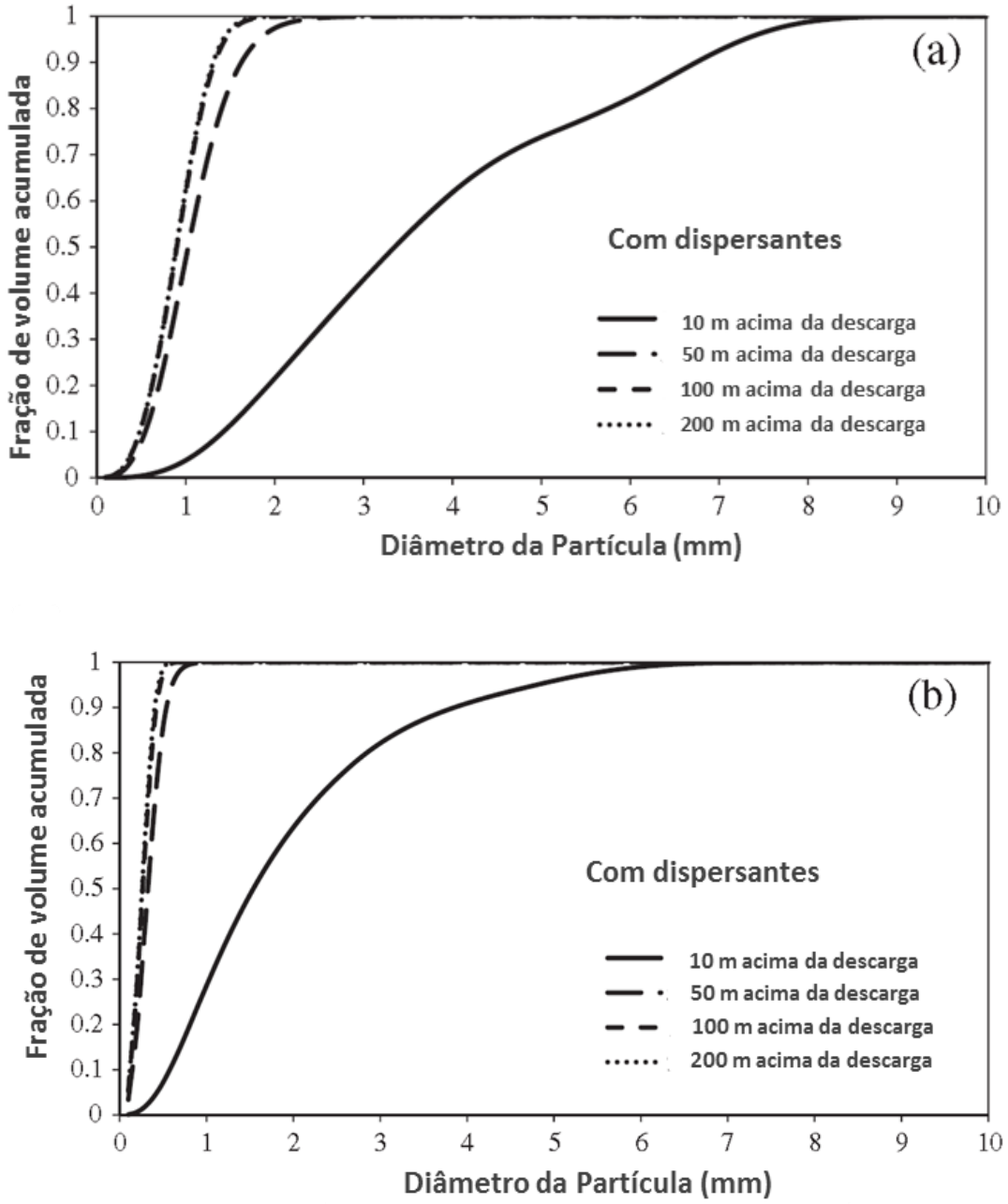


Fonte: Adaptado de Zhao et al., 2014

Para a simulação dos cenários com aplicação de dispersante, Zhao e colaboradores (2014) assumiram duas situações: redução em 10 vezes no diâmetro das partículas (a), e redução em 1000 vezes no diâmetro das partículas (b). Em ambas foi considerada a

eficiência de 100% no tratamento. A distribuição dos diâmetros das partículas para estes cenários é apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Distribuição do diâmetro das partículas com o uso de dispersantes



Fonte: Adaptado de Zhao et al., 2014

Nos estudos de North e colaboradores (2015) foram utilizados tempos de meia-vida de 1,2 dias, 3,05 dias e 6,1 dias para as taxas de biodegradação consideradas rápida, média e lenta, respectivamente. Os resultados obtidos indicaram que o transporte das gotículas é muito sensível às taxas de biodegradação, a distribuição vertical das partículas aprofundou-se em centenas de metros, e a distribuição horizontal teve variações de

centenas a milhares de quilômetros. O diâmetro inicial das partículas também influenciou os resultados. As gotículas com diâmetro inicial de 300 µm rapidamente atingiram a superfície, enquanto aquelas de 30 µm foram encontradas em subsuperfície após 73 dias.

Os resultados sugeriram ainda que as intrusões subsuperficiais de gotículas de óleo podem ter forte interação com o leito marinho, especialmente quando aplicadas as taxas de biodegradação, e que estas plumas de subsuperfície podem entrar em contato com o leito marinho a distâncias de dezenas a centenas de quilômetros do local do vazamento (NORTH et al., 2015).

Com a melhoria das estimativas das taxas de biodegradação, os modelos tridimensionais tendem a ganhar maior confiabilidade, aprimorando as suas previsões, provendo uma ferramenta importante para as análises de riscos e planos de contingência para derramamentos de óleo.

A velocidade terminal de subida da gotícula é ditada pela flutuabilidade, que depende da sua densidade, tamanho e viscosidade do fluido (ZHENG et al., 2003). Com já vimos, o movimento de cada partícula é a composição da sua velocidade vertical, da contribuição das correntes oceânicas de cada instante de tempo, e de uma componente aleatória de turbulência (LINDO-ATICHATI et al., 2014).

Assim sendo, especialmente nos casos de vazamentos em águas profundas, a distribuição do tamanho inicial da partícula, assim como as taxas de biodegradação e dissolução, são parâmetros críticos para a confiabilidade das previsões do modelo (SOCOLOFSKY et al., 2015).

MATERIAL E MÉTODO

O MOHID é uma plataforma de simulação hidrodinâmica e transporte de constituintes em suspensão e solução. O MOHID tem sido aplicado em diversas regiões costeiras e estuarinas, mostrando-se capaz de simular complexas características presentes em escoamentos observados nessas regiões.

Como exemplos da aplicação do MOHID para modelos em mar aberto, alguns estudos foram feitos na região do Atlântico Nordeste, incluindo a corrente costeira de Portugal (COELHO et al., 1994), e o comportamento de correntes ao longo do limite da

Plataforma Continental no Atlântico Europeu (NEVES *et al.*, 1998). Ainda com o software MOHID, na costa sudeste brasileira, podemos citar os trabalhos de Franz e colaboradores (*in press*), que buscaram refinar o modelo hidrodinâmico da plataforma sudeste brasileira por meio da técnica de *downscaling*; e Campos e Lugon Jr. (*in press*), que modelaram o descarte dos resíduos de cimentação em águas profundas.

Com relação à modelagem da deriva de óleo em mar aberto, podemos destacar o trabalho de Juliano e colaboradores (2012), que realizaram a simulação do vazamento de óleo na costa sudeste brasileira, em 2011; e o trabalho de Leitão e colaboradores (2013) na costa caribenha da Colômbia.

Neste presente trabalho, o software MOHID foi utilizado para simular os *blowouts* de poços de petróleo na região da Bacia de Campos em diversos cenários, permitindo um confronto entre os resultados obtidos e a simplificação, tipicamente aplicada nos modelos bidimensionais, de que o vazamento ocorre todo na superfície. O objetivo dos cenários propostos foi testar a sensibilidade do modelo às diferentes profundidades de vazamento, às variações das correntes oceânicas devido à sazonalidade, e às distintas velocidades de subida das gotículas, correspondentes aos diâmetros adotados.

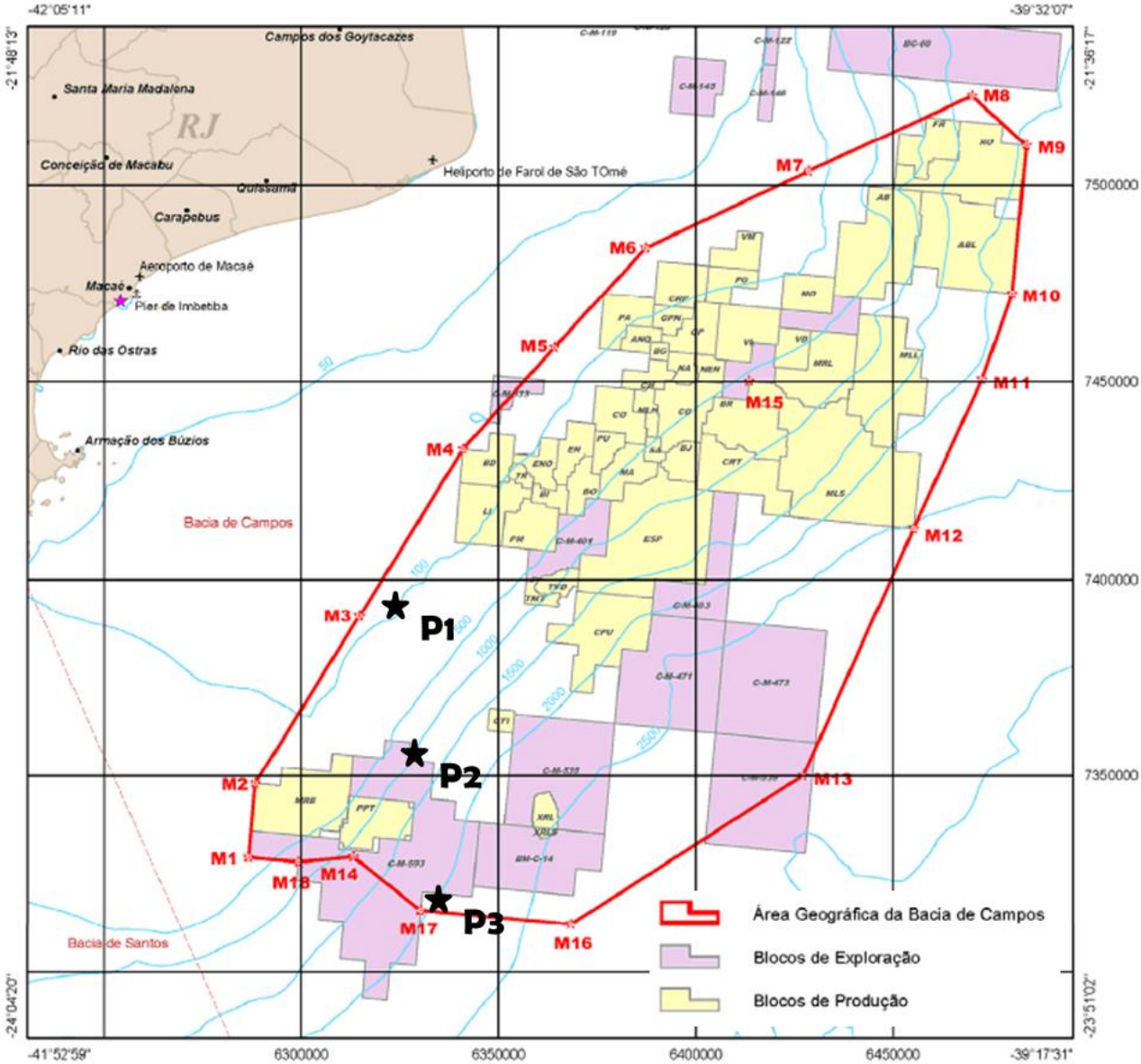
Foram adotados como origem dos vazamentos, sejam eles em superfície ou em profundidade, os pontos cujas coordenadas estão apresentadas na Tabela 1. As profundidades dos poços P1, P2 e P3 foram assumidas, de acordo com a batimetria de região: 80, 1400 e 2000 metros, respectivamente.

Tabela 1 – Coordenadas geográficas e profundidades dos pontos de interesse

	Longitude (°)	Latitude (°)	Profundidade (m)
P1	-41.00	-23.00	80
P2	-40.75	-23.25	1400
P3	-40.50	-23.50	2000

As coordenadas geográficas escolhidas (P1, P2 e P3), pertencem ao polígono que define a região da bacia de campos na UO-BC, de acordo com o PEVO-BC, conforme Figura 14.

Figura 14 - Pontos de interesse para os cenários simulados



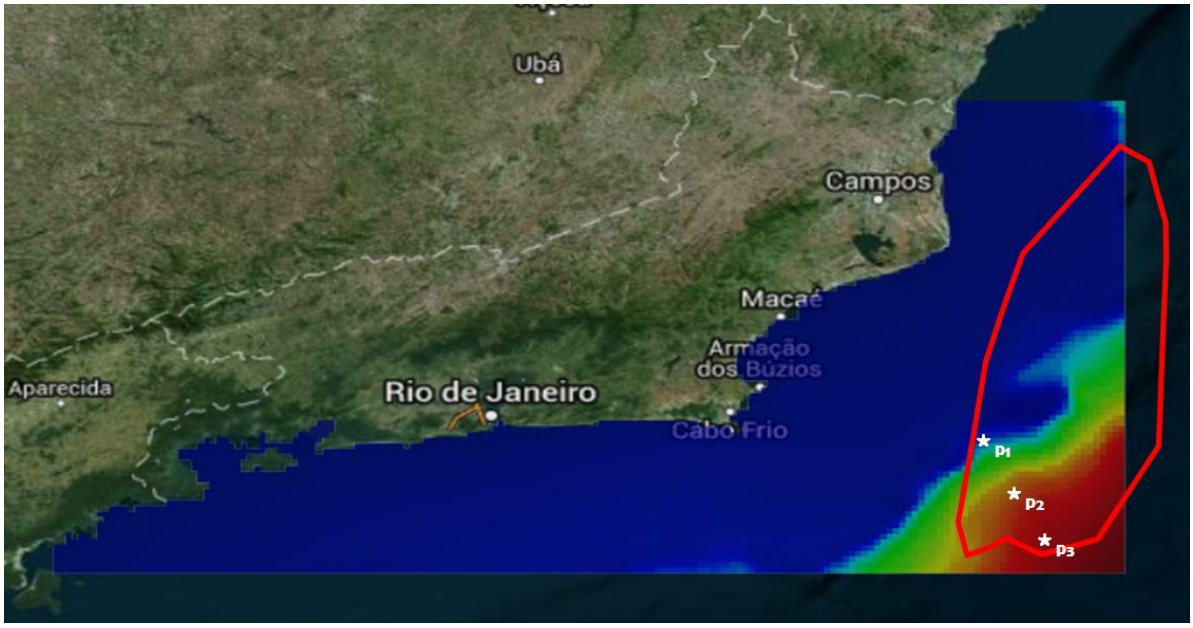
Fonte: Adaptado do PEVO-BC

O sistema MOHID está estruturado em módulos. Destacamos aqui os módulos fundamentais para o entendimento deste estudo de caso. O módulo “Geometria” é composto pelas informações de dimensão do *grid* do modelo e de suas células, e tem como um dos principais dados de entrada a batimetria do terreno. Este módulo computa as áreas laterais e volumes finitos das células que são geradas no método de discretização adotado, fazendo uso dos dados batimétricos que são informados ao modelo.

Neste estudo de caso, o *grid* que limita as células do modelo é assim composto: 172 células na longitude, 85 células na latitude, e 45 camadas representando a profundidade,

ou seja, 172 x 85 x 45. A batimetria da região foi gerada a partir da base de dados GEBCO 1' Grid, versão 2.0 (www.gebco.net). Com esses dados de entrada foi gerado o terreno digital, cuja batimetria está representada na Figura 15, que apresenta ainda o polígono que delimita a região da Bacia de Campos, e a posição geográfica dos pontos adotados como origem dos vazamentos.

Figura 15 – Terreno digital no MOHID, polígono da região e origens das descargas



O módulo "Hidrodinâmico" 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 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 (IST, 2016).

Para o modelo utilizado neste estudo foi imposta a solução hidrodinâmica do trabalho de Franz e colaboradores (*in press*), que buscou refinar o modelo da plataforma sudeste brasileira por meio da técnica de *downscaling*, utilizando o software MOHID. Para representar os períodos de inverno, foram utilizados os resultados da modelagem hidrodinâmica para os dias 10 e 11 de julho de 2015. Por sua vez, os períodos de verão, foram aqui representados pelos dias 3 e 4 de dezembro de 2015.

O conceito de traçador é utilizado pelo módulo "Lagrangeano" (IST, 2016). 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 petróleo. O campo de velocidades gerado pelo módulo “Hidrodinâmico” é muito influente nos resultados obtidos nas simulações do módulo “Lagrangeano”.

Por fim, no módulo “Petróleo” são informadas as propriedades do óleo como densidade e viscosidade. As propriedades do óleo utilizadas neste estudo de caso foram as mesmas adotadas no PEVO-BC (Tabela 2).

Tabela 2 – Propriedades do óleo

PARÂMETRO	VALOR
Nome do Produto	Marlim Leste
API (º)	17,8
Densidade a 20ºC (g/cm^3)	0,948 g/cm^3
Viscosidade dinâmica a 25ºC (cP)	749,189

Fonte: PEVO-BC

O módulo “Petróleo” do MOHID é capaz ainda de simular os efeitos do intemperismo ao qual é submetido o óleo ao longo da trajetória (PAIVA et al., 2016): espalhamento, evaporação, dispersão, sedimentação, dissolução, emulsificação, dentre outros. Entretanto este recurso é aplicável apenas para os casos de simulação de deriva na superfície, bidimensional. Neste estudo de caso, como estamos interessados na trajetória tridimensional ao longo da coluna d’água, não foi possível simular estes efeitos com o MOHID. Os efeitos do intemperismo são mais perceptíveis a partir de alguns dias de simulação, portanto não seriam esperadas alterações significativas nos resultados deste estudo, que busca representar as primeiras 48 horas da trajetória.

O diâmetro adotado para as partículas de óleo, assim como as diferenças de viscosidade entre o óleo e a água, são fatores determinantes para o cálculo desta velocidade de empuxo, que é imposta no módulo “Lagrangeano”. Esta velocidade de subida influencia fortemente no resultado final da posição vertical da partícula, controlando o comportamento da pluma de subsuperfície, o tempo de chegada até a superfície, além da direção e extensão da dispersão horizontal da pluma. Conforme a metodologia proposta por Leitão e colaboradores (2013), o cálculo deste parâmetro, também chamada

velocidade de empuxo, é baseado na formulação apresentada por Wang e colaboradores (2005).

A equação que determina esta velocidade de subida é função do diâmetro crítico para o cenário estudado. O diâmetro crítico das partículas é dado pela equação (1):

$$d_c = \frac{(9.52v)^{\frac{2}{3}}}{g^{\frac{1}{3}}\left(1 - \rho_0/\rho_w\right)^{\frac{1}{3}}} \qquad (1)$$

onde: v é a viscosidade da água, g é a aceleração da gravidade, ρ_0 e ρ_w são a densidade do óleo e da água, respectivamente.

Para gotículas de óleo menores que o diâmetro crítico, a lei de Stokes fornece a equação (2) para o cálculo da velocidade de empuxo (u_{LS}):

$$u_{LS} = g d_i^2 \frac{\left(1 - \rho_0/\rho_w\right)^{\frac{1}{3}}}{18v} \qquad (2)$$

onde: d_i é o diâmetro da partícula.

Para gotículas com diâmetros maiores ou iguais ao diâmetro crítico, a lei de Reynolds leva à equação (3) para o cálculo desta velocidade (u_{LR}):

$$u_{LR} = \sqrt{\frac{8}{3} g d_i \left(1 - \rho_0/\rho_w\right)} \qquad (3)$$

Como já vimos, a injeção de dispersantes cumpre um papel muito importante na redução do diâmetro das partículas, e consequentemente na velocidade de subida. Assim sendo, além de contemplar as possíveis influências da sazonalidade (verão e inverno),

este estudo busca também representar as diferenças de comportamento da pluma para os casos de injeção de dispersante na origem dos vazamentos em profundidade.

Os diâmetros representativos das partículas foram definidos, de acordo com cada cenário, baseados nos resultados de Zhao e colaboradores (2014) (Figuras 12 e 13). Conforme os autores, as reduções das gotículas para os casos de injeção de dispersantes variam entre 10 e 1000 vezes. Neste estudo, assumimos que as partículas para os cenários com injeção de dispersantes reduzem os seus diâmetros em 40 vezes, fator suficiente para que todas as partículas tenham seu diâmetro reduzido abaixo do diâmetro crítico.

As vazões de descarga foram estimadas proporcionalmente à distribuição mássica também apresentada por Zhao e colaboradores (2014). Sabe-se que a vazão de descarga pode variar durante o evento. Neste estudo, por simplificação, este parâmetro foi considerado constante durante toda a simulação. Adotando a mesma metodologia utilizada no PEVO-BC, que faz referência à Resolução CONAMA 398/2008 (BRASIL, 2008), foi adotada uma vazão média de 1.000 m³/d de óleo para cada cenário, como representativa da hipótese acidental de pior caso. A proporção desta vazão atribuída a cada diâmetro representativo está disposta na Tabela 3.

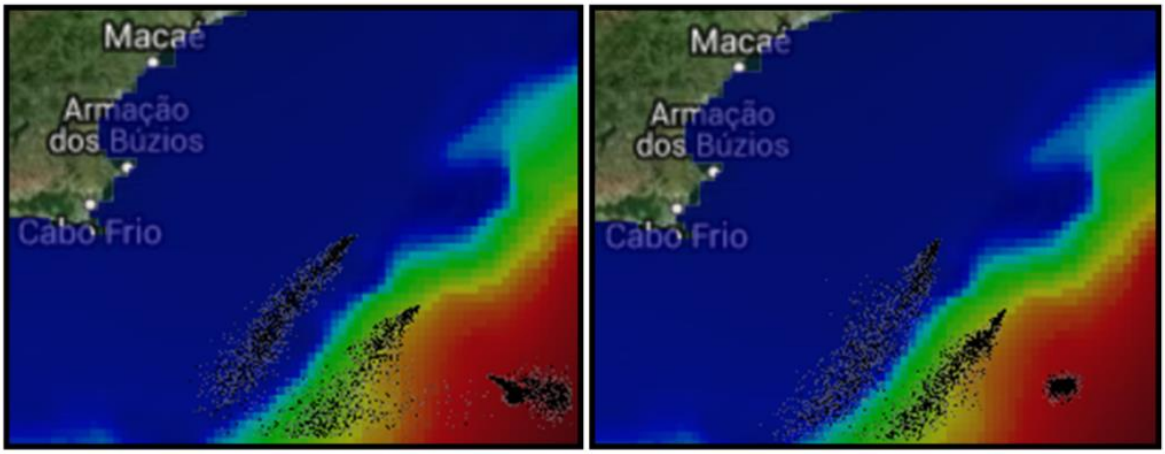
Tabela 3 – Distribuição dos diâmetros, vazões e velocidades de subida

	Diâmetro (µm)	Distribuição (Zhao, 2014)	Vazão (m^3/s)	Velocidade de subida (m/s)
Sem injeção de dispersantes	1000	10%	0.0012	0.05
	4000	70%	0.0084	0.09
	6000	20%	0.0024	0.11
Com injeção de dispersantes	25	10%	0.0012	0.000004
	100	70%	0.0084	0.000015
	150	20%	0.0024	0.000023

O principal objetivo é ilustrar o comportamento tridimensional da pluma formada para as diferentes profundidades e diâmetros de partículas. A intenção é avaliar os resultados, confrontando-os com a simplificação de que a pluma atinge rapidamente a superfície, ou seja, com a hipótese de que o vazamento ocorre todo em superfície, sendo suficiente uma análise bidimensional do evento.

Foram realizadas as simulações com duração de 48 horas, considerando a origem dos vazamentos em superfície, conforme as coordenadas predefinidas (P1, P2 e P3), para os períodos representativos de inverno e verão, como parâmetro inicial para comparação entre os demais cenários simulados. Estes primeiros resultados são apresentados na Figura 16.

Figura 16 – Vazamentos superficiais: verão (esquerda) e inverno (direita)



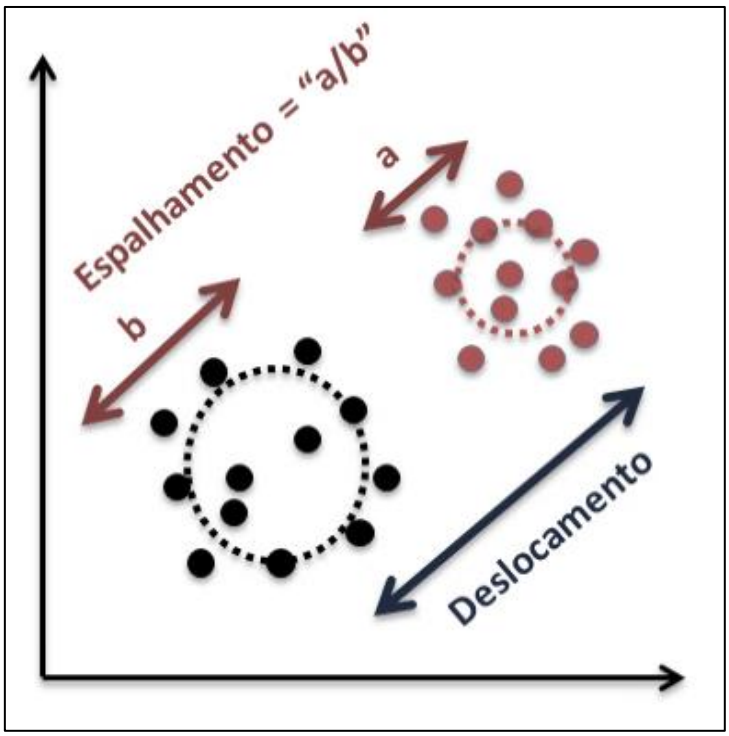
Com o objetivo de confrontar os resultados dos vazamentos em profundidade, foram simulados ainda 12 cenários de *blowout* (Quadro 2), contemplando: as diferentes coordenadas e profundidades associadas, as condições hidrodinâmicas de verão e inverno, e o uso ou não de dispersantes na origem do vazamento.

Quadro 2 – Cenários de vazamento em profundidade simulados

Cenário	Verão/Inverno	Poço	Uso de dispersantes
C01	inverno	P1	com
C02	inverno	P1	sem
C03	inverno	P2	com
C04	inverno	P2	sem
C05	inverno	P3	com
C06	inverno	P3	sem
C07	verão	P1	com
C08	verão	P1	sem
C09	verão	P2	com
C10	verão	P2	sem
C11	verão	P3	com
C12	verão	P3	sem

Para efeito de comparação entre os resultados dos diferentes cenários, foram propostas duas normas, chamadas neste trabalho de “deslocamento” e “espalhamento”. Na Figura 17 são representadas de forma gráfica estas duas normas.

Figura 17 – Representação gráfica das normas propostas: deslocamento e espalhamento



A medida da norma “deslocamento” foi proposta, com a finalidade de identificar o quanto a trajetória de subida da partícula ao longo da coluna d’água impacta nas suas coordenadas geográficas finais. Esta medida busca quantificar o distanciamento entre a média das posições das partículas do caso “i”, e a média das posições das partículas do vazamento correspondente em superfície. O cálculo do deslocamento para os diferentes cenários foi proposto conforme equação (4):

$$Deslocamento\ (km) = \sqrt{\left(\mu_{xi} - \mu_{xsup}\right)^2 + \left(\mu_{yi} - \mu_{ysup}\right)^2}\ x\ 100 \qquad (4)$$

onde:

μ: média

xi: referente à longitude do cenário i

xsup: referente à longitude do correspondente vazamento em superfície

yi: referente à latitude do cenário i

xsup: referente à latitude do correspondente vazamento em superfície

Um deslocamento baixo indica que não há grande alteração na média das posições finais das partículas de um *blowout*, quando comparadas à hipótese de que todo o vazamento ocorre em superfície, corroborando com a hipótese de que a simplificação bidimensional para os casos de *blowout* é válida. O deslocamento alto, por sua vez, indica que há grande variação entre os resultados, atribuindo maior importância para a modelagem tridimensional.

Por outro lado, com o objetivo de avaliar o efeito da trajetória de subida no espalhamento das partículas, ou seja, no distanciamento destas em relação à posição média, foi proposta norma "espalhamento", utilizando o valor do desvio padrão da distribuição de longitudes e longitudes dos diversos cenários "i", e confrontando-os com os mesmos valores dos correspondentes vazamentos em superfície. O cálculo do espalhamento relativo para os diferentes cenários foi proposto conforme equação (5):

$$Espalhamento\ (\%) = \left[\frac{\sqrt{\left(\sigma_{xi} + \sigma_{yi}\right)^2}}{\sqrt{\left(\sigma_{xsup} + \sigma_{ysup}\right)^2}} - 1\right] x\ 100\% \qquad (5)$$

onde:

σ: desvio padrão
xi: referente à longitude e cenário i
xsup: referente à longitude e correspondente vazamento em superfície
yi: referente à latitude e cenário i
xsup: referente à latitude e correspondente vazamento em superfície

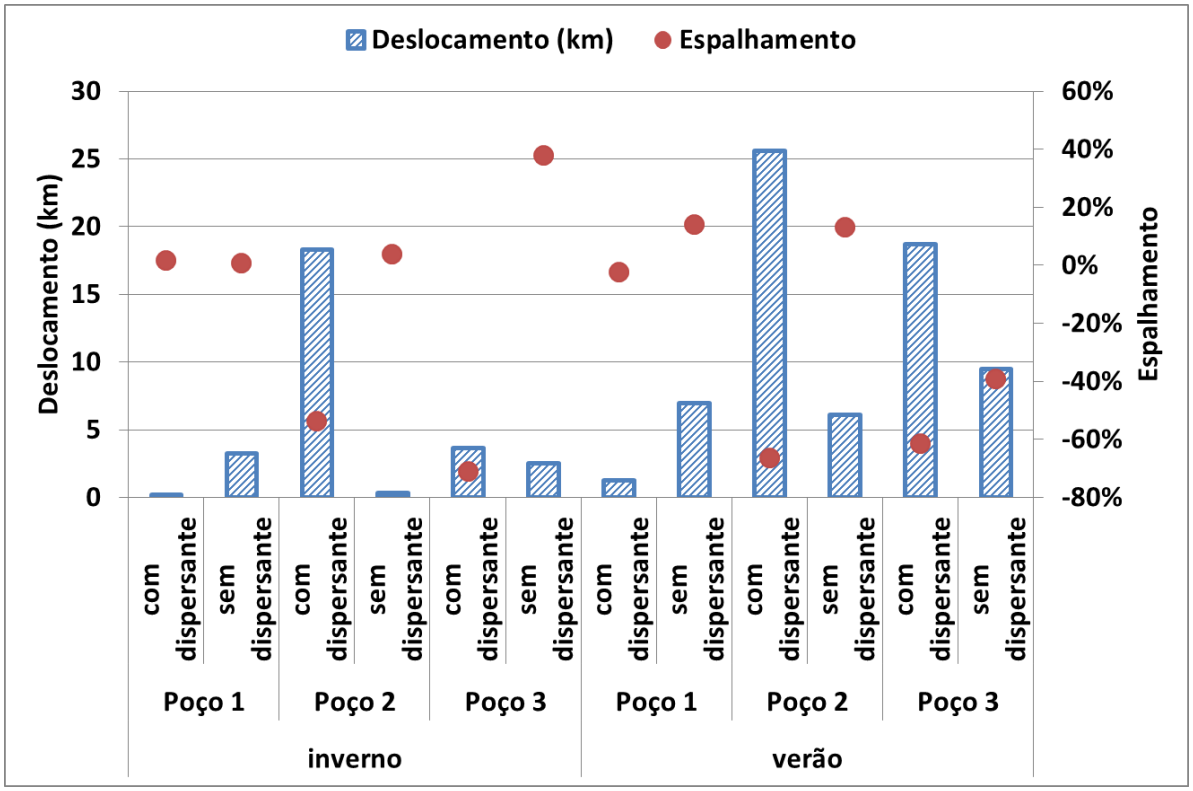
O espalhamento relativo próximo do valor nulo indica que não há efeito da trajetória de subida sobre o espalhamento da pluma. Por sua vez, valores negativos indicam que o *blowout* teve uma pluma com espalhamento menor que o correspondente vazamento em superfície, e valores positivos indicam maior dispersão do *blowout* em relação ao vazamento superficial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após as 48 horas simuladas, as posições finais de longitude e latitude das partículas de cada um dos cenários (diferentes poços; períodos de verão e inverno; e uso de dispersante), foram confrontadas com as posições finais das partículas dos respectivos

vazamentos em superfície por meio do cálculo de “deslocamento” e “espalhamento”, definidos na seção anterior. Os resultados estão dispostos na Figura 18.

Figura 18 – Deslocamento (km) e espalhamento (%) calculados para os cenários



Os valores de deslocamento e espalhamento calculados para os cenários envolvendo as coordenadas do Poço 1 foram bem baixos. Ainda assim, as pequenas variações encontradas, independentemente das demais situações de aplicação de dispersante, ou de sazonalidade, devem-se muito mais às fortes correntes das águas mais rasas do que ao efeito da trajetória das partículas ao longo da coluna d’água propriamente dito.

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios de deslocamento e espalhamento para todos os cenários de cada poço, e consolida a constatação de que as variações no Poço 1 são pequenas, seja qual for o cenário adotado, tanto para o deslocamento, quanto para o espalhamento. Quando os resultados do Poço 1 são confrontados com os cenários de *blowout* que ocorrem em maiores profundidades (Poço 2 e Poço 3), há uma tendência de aumentar de três a quatro vezes a média do deslocamento.

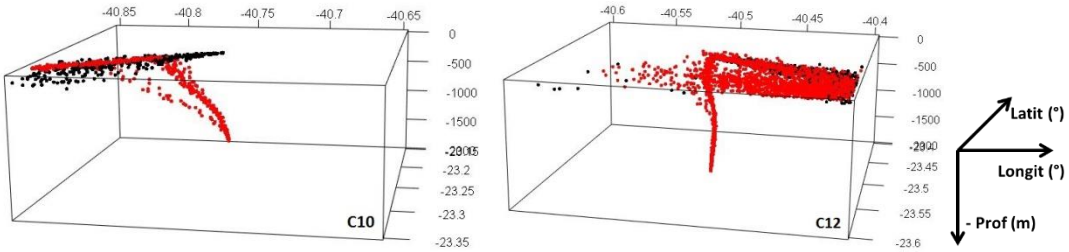
Tabela 4 – Resultados para as diferentes profundidades

	Profundidade (m)	Média do Deslocamento (km)	Média do Espalhamento
Poço 1	80	2.92	4%
Poço 2	1400	12.58	-26%
Poço 3	2000	8.59	-33%

O aumento do deslocamento com a profundidade deve-se ao maior tempo que as partículas permanecem na coluna d'água, em um movimento distinto do que estaria imprimindo caso estivesse em superfície. Em geral, profundidades maiores estão associadas a velocidades de corrente mais baixas, justificando também a tendência de redução do espalhamento.

Este efeito fica bem visível ao se comparar os cenários C10 (Poço 2, 1.400 metros de profundidade) e C12 (Poço 3, 2.000 metros de profundidade), ambos no verão, sem injeção de dispersante, conforme a Figura 19. As partículas vermelhas representam as posições finais dos vazamentos em profundidade, e as partículas pretas representam as posições finais do correspondente vazamento em superfície, a partir da mesma coordenada geográfica.

Figura 19 – Efeito da profundidade: cenários C10 e C12



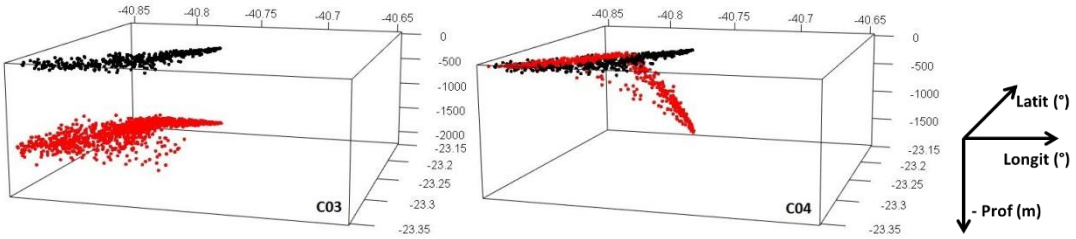
A injeção de dispersante tende a reduzir o diâmetro das gotículas e a sua velocidade de subida, aumentando o seu deslocamento, e reduzindo o espalhamento, com efeitos análogos aos observados com o aumento da profundidade. Entretanto, em lugar de aumentar a coluna d'água, aumenta-se o tempo para que a partícula percorra a trajetória. Na Tabela 5 observa-se que os valores médios de deslocamento obtidos para todos os cenários com injeção de dispersante são cerca de 2,4 vezes maior que aqueles sem injeção de dispersante.

Tabela 5 – Resultados para o uso de dispersantes

	Média do Deslocamento (km)	Média do Espalhamento
Com dispersante	11.29	-42%
Sem dispersante	4.77	5%

É possível observar esse efeito também na Figura 20, que compara os cenários C03 (com injeção de dispersante) e C04 (sem injeção de dispersante), ambos na condição de inverno e para o mesmo Poço 2. Vale observar que, no cenário C03, com injeção de dispersante, há uma tendência da pluma do vazamento de superfície para se deslocar no sentido sul, enquanto a pluma de subsuperfície tende a se deslocar para o norte, aumentando o valor do deslocamento calculado. Esse efeito é muito reduzido no cenário C04, em que não há injeção de dispersante, uma vez que a pluma emerge rapidamente a superfície.

Figura 20 – Efeito do uso de dispersantes: C03 e C04



Para os casos em que os diâmetros das partículas estão acima do diâmetro crítico, a velocidade de subida é alta. Em questão de horas a pluma alcança a superfície, e rapidamente assume configuração muito próxima da hipótese de que todo o vazamento ocorre em superfície. Para os cenários em que se assume a injeção de dispersante, neste estudo, os diâmetros das partículas estão abaixo do diâmetro crítico, resultando em velocidades de subida bem baixas. Nestes cenários, o tempo de 48 horas de simulação não foi suficiente para a chegada da pluma à superfície, e o comportamento das partículas é muito semelhante aos das intrusões descritas nas seções anteriores, que ocorrem quando as gotículas ficam aprisionadas na coluna d'água por longos períodos, percorrendo grandes distâncias.

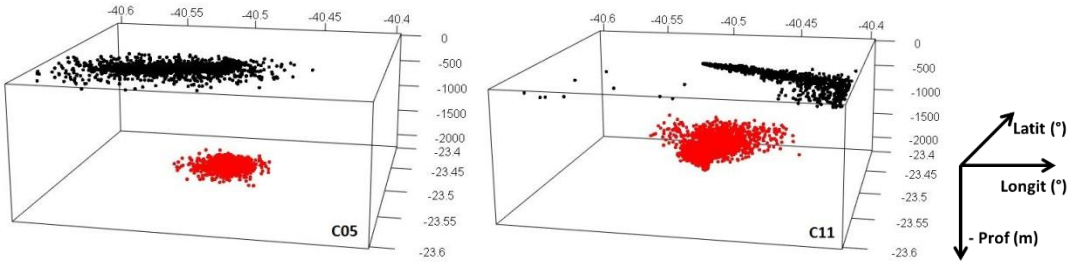
Em geral, na região sudeste da costa brasileira, as correntes oceânicas tendem a ser mais fortes no período de verão, gerando resultados de deslocamento maiores para as plumas de subsuperfície, quando comparados aos cenários de inverno. Na Tabela 6 comparam-se as médias de deslocamento e espalhamento calculados para os cenários de inverno e verão, independentemente das demais condições. Observa-se que o valor de deslocamento é, em média, 2,5 vezes maior para os cenários de verão em relação aos cenários de inverno. Isto mostra a importância de considerar a sazonalidade nos estudos de dispersão da mancha de óleo, inclusive para as modelagens tridimensionais.

Tabela 6 – Resultados para a sazonalidade

	Média do Deslocamento (km)	Média do Espalhamento
Inverno	4.71	-13%
Verão	11.35	-24%

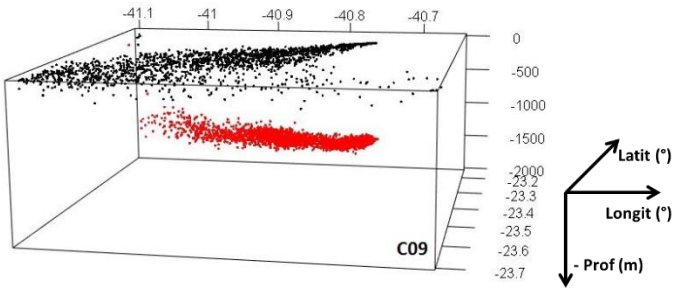
Na Figura 21 é feita uma comparação entre os cenários C05 (inverno) e C11 (verão), ambos para o Poço 3, e com injeção de dispersante, exemplificando este efeito. Em primeiro lugar é possível observar que o arraste, tanto na superfície quanto em profundidade, é bem maior no cenário de verão (C11). Como há uma diferença significativa entre os módulos das correntes superficiais e as mais profundas, este fato já seria suficiente para aumentar significativamente o deslocamento. Soma-se a isto, a tendência da pluma subsuperficial se deslocar na direção norte, enquanto a pluma da superfície se desloca na direção sul, aumentando ainda mais a diferença da posição final das plumas.

Figura 21 – Efeitos da sazonalidade: C05 e C11



Vale observar que cada um dos efeitos exemplificados até aqui separadamente são potencializados quando atuando em conjunto. Exemplo disso é o caso de maior deslocamento calculado, no cenário C09, conforme Figura 22: Poço 2, com o uso de dispersante, no período de verão.

Figura 22 – Cenário de maior deslocamento (C09)



Pelo fato de estar posicionado no talude continental, o modelo lagrangeano de dispersão do *blowout* deste poço sofre fortíssima influência das correntes oceânicas,

especialmente no verão. Neste cenário, o poço está em uma região de águas profundas (1.400 metros), e ainda foi imposto o efeito da aplicação de dispersante, resultando em um deslocamento estimado em 25 km (Figura 18). Com maior tempo de simulação, a tendência é de que esse valor aumente ainda mais, dificultando bastante a previsão da coordenada geográfica em que esta pluma atingiria a superfície, e o trabalho da equipe de reposta em situações de emergência.

CONCLUSÕES

A forte sensibilidade dos resultados em relação à sazonalidade e suas inerentes variações na magnitude das correntes oceânicas contribuíram para que os resultados obtidos neste trabalho indiquem que o uso da modelagem tridimensional é uma ferramenta importante para o entendimento dos cenários de *blowout* de poços de petróleo em águas profundas (300 a 1.500 metros) e ultraprofundas (a partir de 1.500 metros). Os resultados indicam que o modelo 3D não é dispensável para os cenários estudados em condições de águas rasas (até 300 metros), mas traz poucos ganhos em relação à simplificação bidimensional.

Ressalta-se que também se demonstrou de extrema relevância a adequada estimativa da dimensão das gotículas. Como foi possível observar, quando são adotados diâmetros de partículas inferiores ao diâmetro crítico, as velocidades de subida são muito baixas e há a tendência de formação das intrusões, que alteram significativamente o tempo e a posição de chegada das gotículas à superfície.

As diferenças não se demonstraram expressivas para os cenários com partículas maiores que o diâmetro crítico, ou seja, com altas velocidades de subida. Entretanto, qualquer fração do vazamento que possa vir a apresentar partículas abaixo do diâmetro crítico, fortalece a necessidade de uma análise tridimensional da trajetória da pluma.

Na prática, enquanto houver a possibilidade de, durante um evento de *blowout* em águas profundas e ultraprofundas, serem formadas gotículas com diâmetro abaixo do crítico, ou for cogitada a possibilidade de se aplicar dispersante em subsuperfície, a modelagem tridimensional se apresenta como uma ferramenta importante, tanto para os estudos de impactos ambientais quanto para auxiliar na tomada de decisão das equipes de resposta a emergências.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho evidenciou a importância da correta estimativa da dimensão das gotículas, além dos possíveis efeitos sobre este parâmetro ao longo da trajetória devido à biodegradação e à aplicação de dispersantes.

Há muitas incertezas sobre a adequada definição dos diâmetros das partículas, e consequentemente da velocidade de subida. O melhor entendimento sobre o mecanismo de formação das gotículas, e sobre os efeitos da aplicação de dispersantes na dimensão destas, é fundamental para aprimorar os modelos tridimensionais de dispersão de óleo.

Ainda nesta temática, há ainda outro aspecto que merece uma investigação mais aprofundada. As partículas com diâmetros menores que o diâmetro crítico, em função da baixa velocidade de subida, apresentaram grande potencial para a interação com o leito marinho. Por outro lado, o efeito da biodegradação pode reduzir bastante esta interação e seus impactos, uma vez que reduz a massa de óleo que pode chegar a tocar o fundo do oceano.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo apoio fornecido durante o desenvolvimento deste trabalho, e aos professores Ramiro Neves e Guilherme Franz, pelo auxílio na condução das etapas de modelagem computacional com o software MOHID.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMAN, Zachary M. et al. High-pressure visual experimental studies of oil-in-water dispersion droplet size. **Chemical Engineering Science**, v. 127, p. 392-400, 2015.

BRASIL. Resolução CONAMA n°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.

CAMPOS, L. F.; LUGON JR, J. Simulação computacional do descarte em mar aberto do resíduo da limpeza de unidade de cimentação gerado na operação de cimentação de poços de óleo e gás. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**. Essentia Editora, *in press*.

CHAN, G. K. Y.; CHOW, A. C.; ADAMS, E. E. Effects of droplet size on intrusion of sub-surface oil spills. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 15, n. 5, p. 959-973, 2015.

CHEN, F.; YAPA, P. D. A model for simulating deep water oil and gas blowouts-Part II: Comparison of numerical simulations with "Deepspill" field experiments. **Journal of Hydraulic Research**, v. 41, n. 4, p. 353-365, 2003.

COELHO, H.; SANTOS, A.; ROSA, T. L.; NEVES, R. **Modelling the wind driven flow off Iberian Peninsula**. GAIA, v.8, p.71-78, 1994.

FAY, J. A. Physical processes in the spread of oil on a water surface. In: INTERNATIONAL OIL SPILL CONFERENCE. American Petroleum Institute, 1971. p. 463-467.

FRANZ, G.; LEITÃO, P.; SANTOS, A. dos; JULIANO, M.; NEVES. R. From regional to local scale modelling on the south-eastern brazilian shelf: case study of Paranaguá estuarine system**.** **System for Estuarine, Coastal and Shelf Science**. Manuscript Draft. Elsevier Editorial, *in press*.

IST (Instituto Superior Técnico). **MOHID Modelling System Description**. Disponível em: <http://www.maretec.mohid.com/portugueseestuaries/Reports/MOHID_Description.pdf>. Acesso em 30 jul. 2016.

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.

JULIANO, M. M. F. et al. Aplicação da Plataforma MOHID para simulação computacional de deriva oceânica de petróleo na bacia de Campos-RJ. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 6, n. 1, p. 161-172, 2013.

LEITÃO, P. C. et al. An Overview for simulating the blowout of oil spills with a Three-Dimensional model approach (Caribbean Coast, Colombia). **Ocean Modelling for Coastal Management–Case Studies with MOHID, edited by: Mateus, M. and Neves, R., IST PRESS**, p. 97-115, 2013.

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. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 129, p. 301-310, 2014.

NEVES, R. et al. **A numerical investigation of the slope current along the western European margin**. BURGANO, V.; KARATZAS, G.; PAYATAKAS, A.; BREBBIA, C.; GRAY, W.; PINDER, G. (Ed.). In: COMPUTACIONAL METHODS IN WATER RESOURCES, 12., v.2, p. 369-376, 1998.

NORTH, E. W. et al. Simulating oil droplet dispersal from the Deepwater Horizon spill with a Lagrangian approach. **Monitoring and Modeling the Deepwater Horizon Oil Spill: A Record-Breaking Enterprise**, p. 217-226, 2011.

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, p. 024016, 2015.

PAIVA, P. M. et al. Modelagem computacional 3D do blowout de poço de petróleo: revisão sobre requisitos ambientais e metodologia. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**. Essentia Editora, *in press*.

PARIS, C. B. et al. Evolution of the Macondo well blowout: Simulating the effects of the circulation and synthetic dispersants on the subsea oil transport. **Environmental science & technology**, v. 46, n. 24, p. 13293-13302, 2012.

RYERSON, T. B. et al. Chemical data quantify Deepwater Horizon hydrocarbon flow rate and environmental distribution. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.109, p. 20246-20253.

SOCOLOFSKY, S. A. et al. Intercomparison of oil spill prediction models for accidental blowout scenarios with and without subsea chemical dispersant injection. **Marine pollution bulletin**, v. 96, n. 1, p. 110-126, 2015.

WANG, S. D. et al. Three-dimensional numerical simulation for transport of oil spills in seas. **Ocean Engineering**, v. 35, p. 503–510, 2008.

WANG, S. D.; SHEN, Y. M.; ZHENG, Y. H. Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. **Ocean Engineering**, v. 32, p. 1556–1571, 2005.

WHITE, J.; BERRY, G.; Emergency response planning for subsea hydrocarbon release using advanced engineering analysis. In: ABU DHABI INTERNATIONAL PETROLEUM EXHIBITION AND CONFERENCE. Society of Petroleum Engineers, 2014.

ZHAO, L. et al**.** Evolution of droplets in subsea oil and gas blowouts: Development and validation of the numerical model VDROP-J. **Marine Pollution Bulletin**, v. 83, n. 1, p. 58-69, 2014.

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, 2003.