



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS - CFM  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

Maria Paula Lebrão Graziotto

**Modelagem numérica como ferramenta para caracterizar a dispersão da pluma de um derrame de óleo em São Francisco do Sul, Santa Catarina.**

Florianópolis  
2019

Maria Paula Lebrão Graziotto

**Modelagem numérica como ferramenta para caracterizar a dispersão da pluma de um derrame de óleo em São Francisco do Sul, Santa Catarina.**

*Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Oceanografia.  
Orientador: Prof. Dr. Renato Ramos da Silva.*

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Graziotto, Maria Paula  
MODELAGEM NUMÉRICA COMO FERRAMENTA PARA  
CARACTERIZAR A DISPERSÃO DA PLUMA DE UM DERRAME DE  
ÓLEO EM SÃO FRANCISCO DO SUL, SANTA CATARINA. /  
Maria Paula Graziotto ; orientador, Renato Ramos  
da Silva, 2019.  
62 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e  
Matemáticas, Programa de Pós-Graduação em  
Oceanografia, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. Modelagem numérica; . 3.  
Atlântico Sul; . 4. derrame de óleo;. 5. Delft3D. I.  
da Silva, Renato Ramos . II. Universidade Federal  
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em  
Oceanografia. III. Título.

Maria Paula Lebrão Graziotto

**MODELAGEM NUMÉRICA COMO FERRAMENTA PARA CARACTERIZAR A  
DISPERSÃO DA PLUMA DE UM DERRAME DE ÓLEO EM SÃO FRANCISCO DO SUL,  
SANTA CATARINA.**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

---

Prof. Carla de Abreu D'Aquino, Dra.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Felipe Mendonça Pimenta, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Oceanografia.

---

Prof. Antonio Henrique da Fontoura Klein, Dr.  
Coordenador do PPGOCEANO/UFSC

---

Prof. Renato Ramos da Silva, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 15 de março de 2019

*Este trabalho é dedicado aos meus pais e às futuras gerações.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação de Oceanografia da UFSC pela oportunidade e incentivo durante o processo do meu mestrado.

Ao meu orientador que dispôs seu tempo e conhecimento durante esses anos.

À Patrícia Alba Montovani pela assistência na parte jurídica.

Aos meus amigos pelo suporte e motivação, em especial ao Samuel Hora Yang o qual sem o conhecimento e amizade, este trabalho não seria possível.

Ao meu namorado Pedro Ueda, que esteve sempre comigo, me apoiando nos momentos mais difíceis.

E principalmente aos meus pais, aos quais devo tudo que conquistei até hoje.

*No ocean, no life. No ocean, no us.*

*(Sylvia A. Earle, 2014)*

## RESUMO

O óleo é extremamente utilizado no cotidiano do homem e, com grande demanda, o risco de acidentes é enorme, aumentando a preocupação com os efeitos no meio ambiente. Este estudo visa aplicar modelagem numérica para estimar a dispersão de pluma de derramamento de óleo em um ambiente marinho do porto de São Francisco do Sul, SC. Para atingir este objetivo, as simulações de verão e inverno foram realizadas com o modelo Delft 3D, tendo como condições de contorno os dados oceanográficos do Princeton Ocean Model (POM). Os resultados mostraram que as correntes e a elevação do nível do mar do modelo estão bem representadas. Para o período de verão, a pluma do local do derramamento de óleo se dissipou em direção ao sul, influenciada pelo fluxo de correntes costeiras, se espalhando e se estendendo por áreas mais amplas do fundo do mar. Para o período de inverno, a pluma de derramamento de óleo permanece mais tempo próxima do local de lançamento. Estes experimentos numéricos mostraram que o modelo pode ser uma ferramenta importante para monitorar esse local altamente vulnerável.

**Palavras-chave:** Modelagem numérica; Atlântico Sul; derrame de óleo; Delft3D

## ABSTRACT

Oil is extremely used in man's daily life, and with great demand the risk of accident is enormous, increasing the concern about the effects on the environment. This study aims to apply numerical modeling to estimate the dispersion of oil spill plume in a marine environment applied to the Port of São Francisco do Sul, Santa Catarina, Brazil. To reach this goal summer and winter simulations was perform with Delft 3D model having as boundary conditions the oceanographic data from the Princeton Ocean Model (POM). The results showed that the model currents and sea level are well represented. For the summer time, the oil spill plume dissipated towards south influenced by coastal currents spreading and sticking over broader areas of the ocean floor. For the winter time, the oil spill plume remains longer near the release site. These numerical experiments show that the model can be an important tool for monitoring this highly vulnerable location.

Key words: Numerical modeling, South Atlantic, oil spill, Delft3D.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Etapas da formação do petróleo.....	13
Figura 2- Processos físico-químicos que ocorrem durante um derrame de óleo, e escala de tempo que cada processo leva em média.....	15
Figura 3- Curva de evaporação de tipos de óleos mais comuns à temperatura de 15°C.....	16
Figura 4 -Carta de Sensibilidade Ambiental a Derramamento de óleo para o litoral norte e centro-norte de Santa Catarina. Em vermelho destacam-se as áreas de manguezais e marisma.....	18
Figura 5- Localização da área de estudo (Coordenadas UTM/ GWS 84).....	20
Figura 6- Representação do sistema de recebimento, estocagem e transferência do óleo Diesel da base da TRANSPETRO- São Francisco do Sul.....	21
Figura 7- Monobóia de São Francisco do Sul.....	21
Figura 2.1- Location of the Single buoy mooring (SrM) of the Port of São Francisco do Sul, Santa Catarina, Brazil (Coordinates UTM/ GWS 84).....	26
Figura 2.2- Map of the domain with a computational grid in the Datum WGS84, UTM.....	28
Figure 2.3- Map of the bathymetry in the study domain, in the Datum WGS84, UTM, with interpolated data of the ETOPO-1 model and nautical charts 1803 and 1804 of the Brazilian Navy.....	29
Figure 2.4-Monthly mean winds fields at 2m height from NCEP/NCAR Reanalysis for (A) January and (B) July of 2016.....	31
Figure 2.5-Monthly mean surface oceanic currents fields at 0.49m depth from Copernicus model Analysis for (A) January and (B) July of 2016.....	31
Figure 2.6- Model comparison with Copernicus data analysis for the SrM site located at 26°13'52"S -48°25'03"W, for zonal (u) and meridional (v) oceanic current speed for January 2016 (A and B) and July 2016 (C and D). The statistics RMSE estimated for the currents are presented on the figure.....	33
Figure 2.7- Spectral analysis between observed (orange line) and model sea level (blue line) in São Francisco do Sul for the winter of 2016.....	34
Figure 2.8- Spectral density between observed (orange line) and model sea level (blue line) in São Francisco do Sul for the winter of 2016.....	34
Figure 2.9- Oil spill plume (kg/m <sup>2</sup> ) and currents fields for January 2016.....	35
Figure 2.10- Oil spill plume (kg/m <sup>2</sup> ) and currents fields for July 2016.....	36
Figure 2.11- Sticking oil after 8 days of release in January and July of 2016.....	37
Figura 3.1- Temperatura para os dias (A) 1 de janeiro de 2016 e (B) 1 de julho de 2016, ambas as 14 horas.....	42
Figura 3.2- Salinidade para os dias (A) 1 de janeiro de 2016 e (B) 1 de julho de 2016, ambas as 14 horas.....	43

## LISTA DE TABELAS

Table 1- Inputs for Flow module.....	30
Table 2- The property values of spilled oil set in the model.....	30
Table 3- Inputs for Delft3D-PART module.....	32

## LISTA DE EQUAÇÕES

(1) °API = (141,5 / gravidade específica) – 130.....13

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 ORIGEM E COMPOSIÇÃO DO PETRÓLEO.....	13
1.2 INTEMPERISMO DO PETRÓLEO.....	14
1.3 ACIDENTES AMBIENTAIS E LEGISLAÇÕES VIGENTES.....	16
1.4 MODELAGEM NUMÉRICA DA DISPERSÃO DE POLUENTES MARINHOS.....	19
1.5 ÁREA DE ESTUDO.....	19
1.6 JUSTIFICATIVA.....	22
1.7 OBJETIVOS.....	22
<b>1.7.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>22</b>
<b>1.7.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>22</b>
2. OIL SPILL MODELING APPLIED FOR A COASTAL PORT IN SANTA ATARINA, BRAZIL.....	23
2.1 INTRODUCTION.....	25
2.2 MATERIAL AND METHODS.....	27
2.3 RESULTS.....	32
<b>2.3.1 Model evaluation.....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.2 Oil spill case.....</b>	<b>35</b>
2.4 DISCUSSION AND CONCLUSIONS.....	37
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39
APÊNDICE A.....	42
APÊNDICE B.....	43



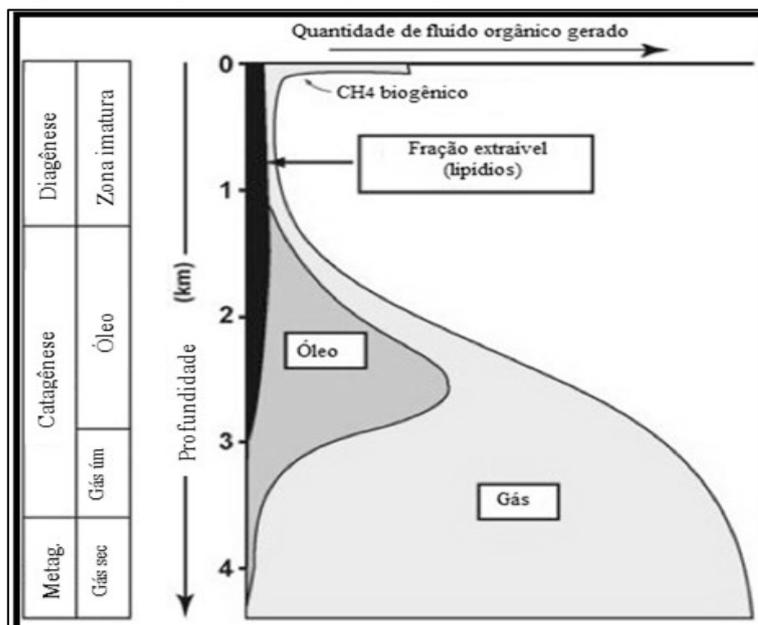
## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 ORIGEM E COMPOSIÇÃO DO PETRÓLEO

O petróleo é formado pela matéria orgânica (MO) derivada de organismos terrestres e, principalmente, marinhos depositados em bacias sedimentares nos fundos oceânicos há milhões de anos atrás, com qualidade de suportar os processos físico-químicos sofridos durante a maturação feita pela ação de micro-organismos, pressão elevada, altas temperaturas e tempo.

A transformação do petróleo é dividida em três fases (Figura 1): diagênese, catagênese e metagênese. A diagênese ocorre após a deposição da MO sob baixas temperaturas, resultando na transformação desta em querogênio, gerando um único hidrocarboneto em quantidade significativa, o metano. Na catagênese, as temperaturas se elevam em torno de 50 a 150° C, formando assim o óleo, condensado e gás úmido, finalizando esta etapa quando o querogênio perde todas suas cadeias alifáticas. Com isso chega-se na metagênese, onde a temperatura varia entre 150 a 200° C e o produto dela é o gás seco (metano) e um resíduo carbonoso. Após esta fase, inicia-se o metaformismo (facies xisto-verde) (PGT, 2007).

Figura 1- Etapas da formação do petróleo.



Fonte: Imagem adaptada do Hauteville (2016).

Cada tipo de petróleo possui características diversas devido às diferentes condições que são submetidos. Por esta questão cada óleo tem uma assinatura única, tendo características físicas específicas de cada local de formação. As principais propriedades físicas que classificam o óleo são:

-Densidade: A indústria do petróleo necessitava de uma forma padrão para calcular a densidade do petróleo, surgindo então o grau API, determinado pela *American Petroleum Institute* (API), uma instituição americana que regula os padrões de qualidade do petróleo, e que utiliza a escala de Baumé, para líquidos com densidade menor que da água (densidade da água do mar é de 1025 kg/m<sup>3</sup>), e a gravidade específica do óleo para determinar o grau API, sendo calculado da seguinte maneira:

$$^{\circ}\text{API} = (141,5 / \text{gravidade específica}) - 130 \quad (1)$$

A gravidade específica é a razão entre a massa de uma substância e a massa do volume equivalente de água a uma determinada temperatura, no caso, pré-determinada a 10°C (ZHU et al., 2001).

Óleos com densidade inferior a 820 kg/m<sup>3</sup> possuem grau API maior que 30, sendo considerados leves. Os de densidade média são entre 820 kg/m<sup>3</sup> e 970 kg/m<sup>3</sup>, tendo o grau API entre 22 e 30, respectivamente, e acima de 970 kg/m<sup>3</sup> são os pesados, com grau API abaixo de 22. Sendo assim, quanto maior a densidade, menor o grau API. Quanto mais leve, maior seu valor comercial (FEISTHER, 2013).

-Viscosidade: É a característica de resistência de um fluido ao movimento. Quanto maior a viscosidade, menor é sua capacidade de escoar. A viscosidade do petróleo depende da sua composição (a quantidade de resinas e asfaltenos é diretamente proporcional a sua viscosidade) e temperatura do ambiente (quanto mais baixa a temperatura, maior é a viscosidade do óleo) (PGT, 2007; VENOSA; ZHU, 2003; ZHU et al., 2001).

-Solubilidade em água: Solubilidade é a quantidade máxima que uma substância pode dissolver-se em um líquido, e a solubilidade do óleo em água é extremamente baixa devido à suas características apolares. O que pode mudar o grau de solubilidade do óleo na água é a temperatura, deixando-o mais solúvel em temperaturas mais elevadas.

Cada característica, tanto física quanto química do óleo pode ser alterada quando exposto em ambiente aberto, este processo é chamado de intemperismo, e será mais bem descrito no tópico 1.2.

## 1.2 INTEMPERISMO DO PETRÓLEO

O intemperismo ou degradação é uma ação natural realizada por processos físico-químicos e biológicos. Cada processo é importante ser compreendido em cada caso de derrame de óleo para determinar o que é necessário para a remediação da região afetada.

O que determina como aquele óleo será intemperizado são suas características físico-químicas e as condições ambientais no dia do derrame. Este processo inicia-se logo após o contato do óleo com a água, e pode durar semanas, meses e até anos para degradar totalmente (Figura 2).

Os fenômenos que atuam na degradação do óleo descritos a seguir são os que o modelo utilizado neste trabalho considera:

-Advecção: É o deslocamento, normalmente horizontal, de um fluido. No caso de um derrame de óleo no mar, a advecção é gerada pela força do vento e das correntes superficiais (PALADINO, 2000).

-Espalhamento: É o processo que mais afeta a mancha logo após o derrame. O óleo tem a tendência de escoar sobre si mesmo, devido às forças da gravidade e tensão superficial (ASCE, 1996; PALADINO; MALISKA, 2000).

-Dispersão: Após o derrame, o óleo tende a se espalhar na água formando uma camada fina na superfície. A taxa de dispersão também é influenciada pela densidade do óleo. Óleos mais leves se espalham mais facilmente do que óleos mais pesados. Quanto mais disperso o óleo melhor os outros processos de degradação funcionam, pois a relação superfície-volume aumenta, tendo uma maior área de contato com o óleo (FINGAS, 2017; ZHU et al., 2001).

-Evaporação: A evaporação é o processo mais importante dos primeiros estágios de degradação. Nos dois primeiros dias após o derrame, cerca de 80% dos compostos do óleo serão evaporados, permanecendo os compostos mais pesados (Figura 3).

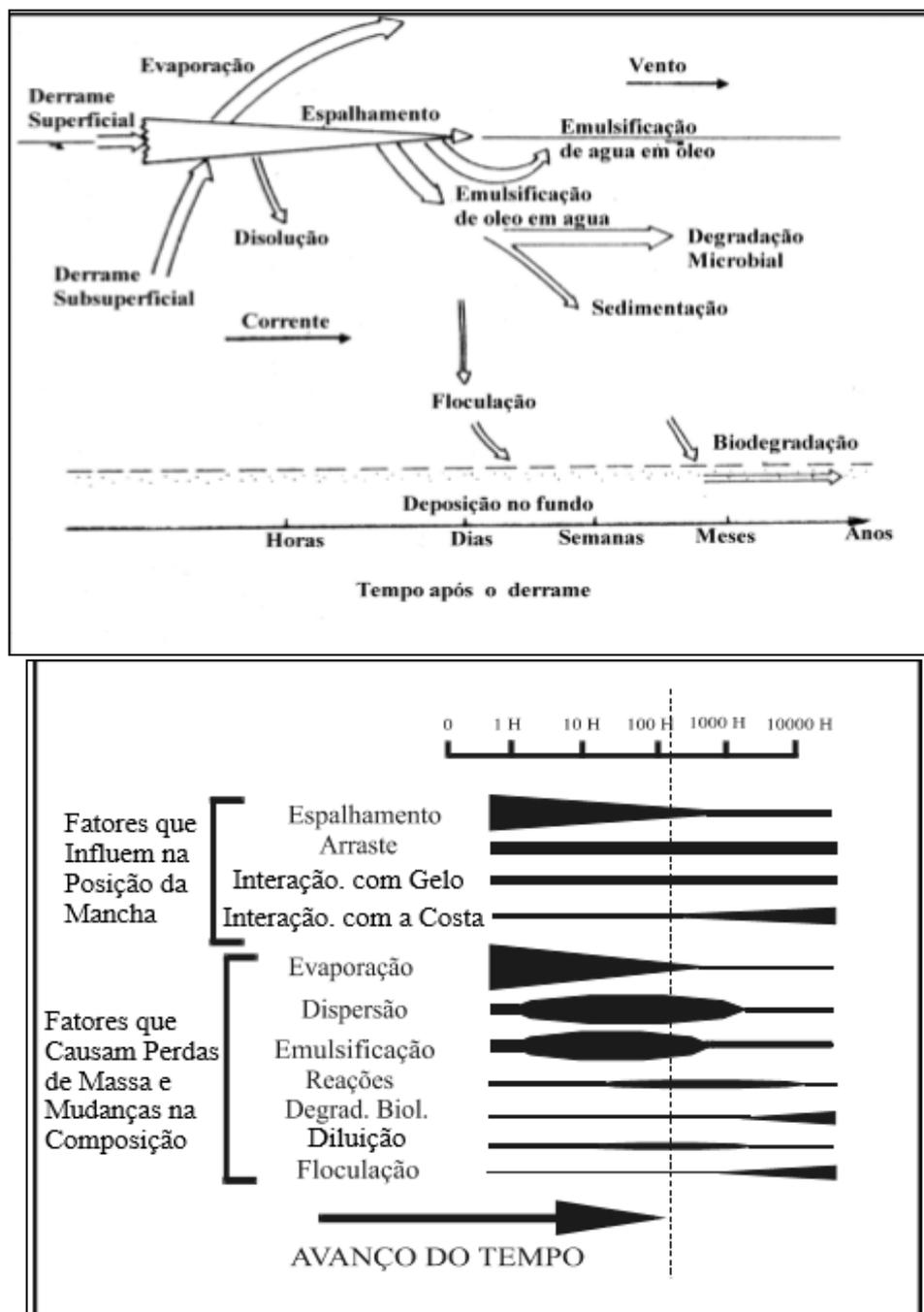
Óleos mais leves têm uma taxa de evaporação mais rápida do que os mais os mais pesados, porém após alguns dias, ambos vão estabilizar, deixando alguns componentes mais pesados na água. A

Figura 3 demonstra a curva logarítmica que a maioria dos óleos segue no processo de evaporação. Os fatores que mais afetam a evaporação são: velocidade do vento, propriedades físicas do óleo, superfície da mancha, pressão de vapor, espessura da mancha, temperatura e radiação solar local (FINGAS, 2017).

-Emulsificação: Consiste na mistura entre dois líquidos imiscíveis, de forma que estes fiquem estáveis por um determinado tempo. Não é um processo espontâneo, precisando de energia para acontecer. No caso do óleo no mar, a turbulência de ondas, correntes e ventos são os fatores que ajudam este processo. Outro fator que ajuda a emulsificação do óleo é a alta viscosidade após a evaporação. A emulsificação é visual, pois deixa o óleo com um aspecto de ‘mousse de chocolate’ (FINGAS, 2017; ZHU et al., 2001).

-Sedimentação: É o processo em que o óleo afunda em direção ao fundo marinho. Isto acontece depois das gotículas de óleo atingirem uma densidade maior do que da água devido à interação com minerais disponíveis na água. Normalmente ocorre próximo à costa, quando a concentração de minerais na coluna d’água é alta (FINGAS, 2017).

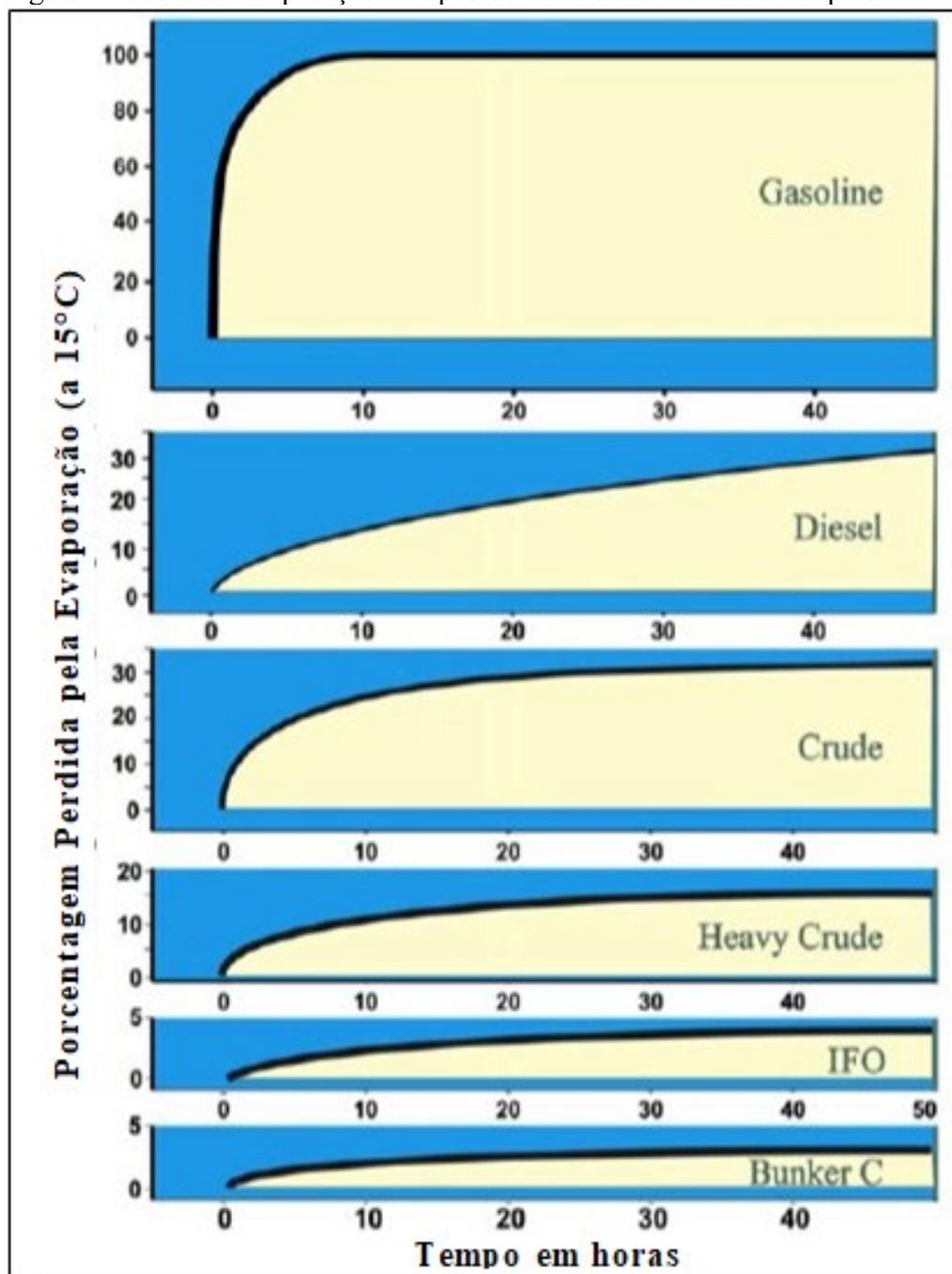
Figura 2- Processos físico-químicos que ocorrem durante um derrame de óleo, e escala de tempo que cada processo leva em média.



-Interação com a linha de costa: quando o óleo chega à linha de costa isso pode alterar sua composição física, pois incorpora o sedimento, ocorrendo a floculação. Outro problema é a variação de ambiente costeiro e a sensibilidade de cada um deles.

Tendo o conhecimento destes aspectos do petróleo e como ele se comporta no ambiente aberto, cada país criou suas leis, normas e procedimentos para conter e remediar o meio ambiente em caso de acidente. As principais leis e normativas do Brasil estão descritas no tópico a seguir.

Figura 3- Curva de evaporação de tipos de óleos mais comuns à temperatura de 15°C.



Fonte: Imagem adaptado de (FINGAS,2015 apud FINGAS, 2017).

### 1.3 ACIDENTES AMBIENTAIS E LEGISLAÇÕES VIGENTES

O petróleo e seus derivados foram responsáveis por 34,20% de toda energia consumida no mundo no ano de 2017, o qual aumentou 1.8%, superando a média de 10 anos (BP, 2018). Em acidentes de transporte marítimo um dos principais poluentes a serem derramados no mar é o

petróleo. Segundo a Federação Internacional de Poluição por Proprietários de Petroleiros (ITOPF, International Taker Owners Pollution Federation), entre 1970 e 2013, aproximadamente 5,74 milhões de toneladas de petróleo vazaram no mar (ITOPF, 2016), e apesar do número de derrames por ano diminuírem consideravelmente nos últimos anos (ITOPF, 2019), o meio ambiente já está saturado com diversos poluentes.

Um dos principais acidentes foi o do petroleiro Exxon Valdez em 1989, que cerca de 3,276 milhões de toneladas de petróleo vazou do navio tanque no Alasca. Como consequência imediata milhares de animais foram mortos por intoxicação afetando não só o meio ambiente, mas também a economia local, já que a pesca era a base da economia local (CRONE; TOLSTOY, 2010; ITOPF, 2016).

Ainda nos Estados Unidos, em 2010, no Golfo do México houve o maior derrame de óleo do país com a explosão da plataforma BP Deepwater Horizon. Neste acidente, cerca de 6,8 milhões de toneladas de petróleo vazaram no mar. Devido ao grande volume e a dificuldade em acessar o poço, somente após três meses este foi fechado e o vazamento contido. O impacto deste acidente foi enorme na economia da região (CRONE; TOLSTOY, 2010).

No Brasil alguns acidentes de grande porte também foram relatados. Em 2000, 1,6 milhão de toneladas de óleo de um navio da Petrobras, foram derramados na Baía de Guanabara, Rio de Janeiro. Em 2011, a empresa americana Chevron foi responsável por um derrame de 514 mil toneladas de petróleo na Bacia de Campos (EBC, 2015). E, apesar de acidentes de menores proporções, são os que ocorrem com maior frequência, prejudicando não só o meio ambiente, mas também quem vive dele, como foi o caso do acidente em São Francisco do Sul em 2008, causado pela empresa Norsul, que apesar de não ter sido divulgado a quantidade do vazamento de óleo e outros químicos, os pescadores artesanais não puderam pescar por quase um ano na Baía da Babitonga (KREIDLLOW, 2013).

Sabe-se que cada ambiente responde de uma forma específica a cada tipo de poluente, portanto, se faz necessário a elaboração de planos específicos conjuntos com órgãos ambientais e a indústria do petróleo. Por tais iniciativas destacam-se as pesquisas e resoluções propostas pela Agência Ambiental Americana (EPA) e da Comissão das Comunidades Europeias seguidas mundialmente.

Já no Brasil, a Lei Federal nº 9.478/97 (Lei do Petróleo) (BRASIL, 1997) Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) como órgãos administrativos indiretos, vinculados ao Ministério de Minas e Energias.

Para a fiscalização e licenciamento ambiental, a Lei Federal nº 7.735/89 (BRASIL, 1989) estabeleceu que o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) seja o responsável, juntamente com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), através das Resoluções nº 273 e nº 293 (CONAMA, 2000, 2007, 2009).

A Lei Federal nº 9.966 (BRASIL, 2000) determina que as empresas devem elaborar planos de emergência para o caso de acidentes. Esta lei também estabeleceu procedimentos para o transporte de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas, assim como o descarte apropriado quando necessário. Os planos a serem gerados pelas empresas são o Plano de Ação de Emergência (PAE), que visa uma ação rápida e eficaz no caso de acidente ambiental; e o Plano de Emergência Individual (PEI), que tem como objetivo as diretrizes a serem aplicadas no caso do vazamento de óleo em regiões costeiras. Além de detalhar as atribuições e responsabilidades dos envolvidos, o PEI também dispõe a Carta de Sensibilidade Ambiental a Derrames de Óleo (Cartas SAO) após a Resolução CONAMA nº 398/08 (MMA, 2016).

As cartas SAO foram criadas pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) na Lei nº 9.966/00, com o objetivo de identificar, localizar e definir os limites das áreas ecologicamente sensíveis ao derrame de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas sob jurisdição nacional (

Figura 4). Para isso foi criado um Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL), definido com base na geomorfologia da costa, quanto à sua exposição a ondas, substrato, inclinação, entre outros. Este

índice vai de 1 a 10, sendo 1 costões rochosos expostos ao mar e 10 áreas de mangue abrigados (MMA, 2016).

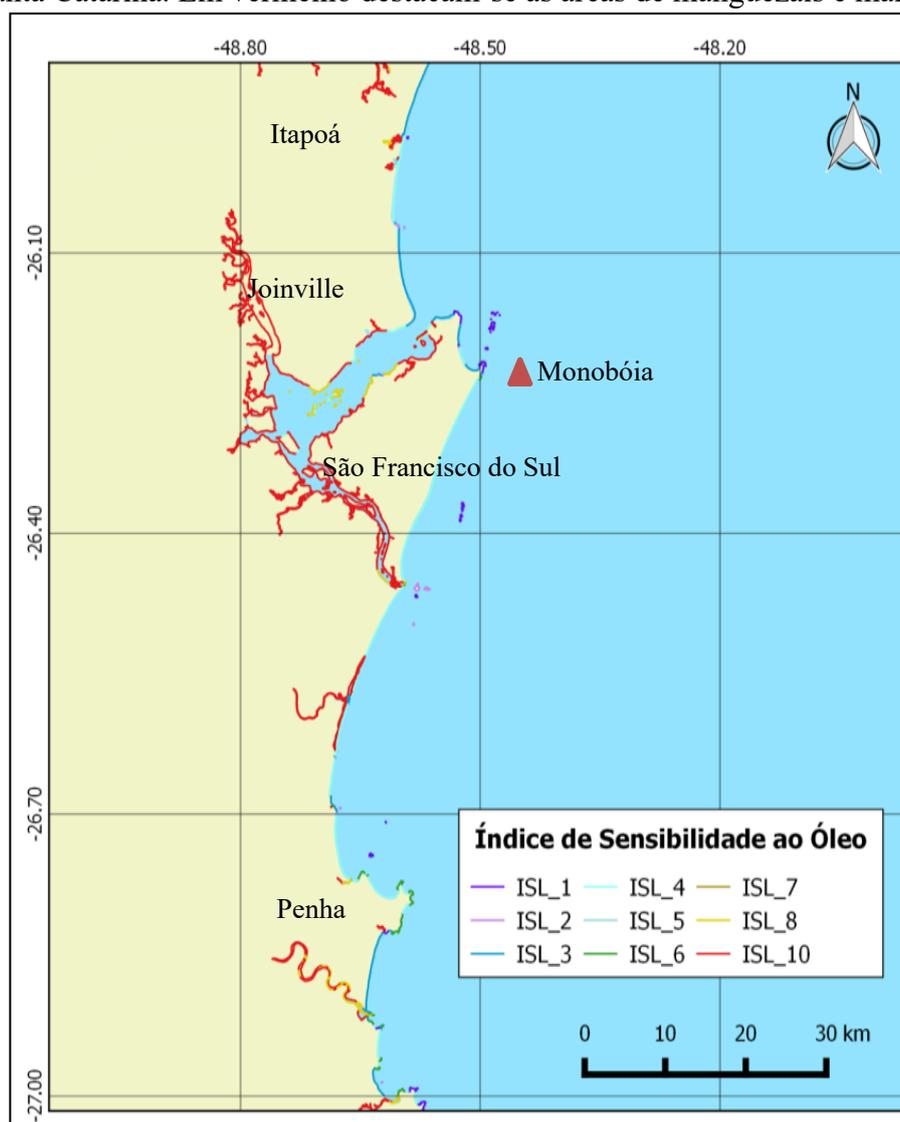
Estes documentos são pontuais e não englobam todos os aspectos de degradação ambiental. Os estudos mais detalhados são o Estudo Prévio de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), definidos pela Resolução CONAMA nº 001 (CONAMA, 1986). Eles garantem que as atividades realizadas a partir de recursos ambientais com potencial de degradação ou poluição ambiental sejam controladas e possuam mediações.

Porém a garantia da prevenção de acidentes ambientais está especificamente ligada ao monitoramento constante que deve ser realizado por equipe técnica competente, fazendo uso de tecnologias de apoio, como os modelos numéricos, que possam prever qualquer situação anormal, assim como equipamentos contenção e contingências que serão manuseados por equipe treinada periodicamente respeitando os exercícios simulados do PAE e do PEI.

A maioria dos acidentes após a investigação apresentam como causas a falta de manutenção, (fator de condição) falta de monitoramento dos pontos atestados como críticos na Matriz de Aspectos e Impactos, (fator de gestão) descumprimento de Procedimento Operacional (fator humano), ou decisões de projetos que levam a escolha de controles com menor custo e mais risco (fator financeiro).

Cabe à empresa equilibrar suas escolhas e definir suas prioridades para garantir a preservação do meio ambiente.

Figura 4 -Carta de Sensibilidade Ambiental a Derramamento de óleo para o litoral norte e centro-norte de Santa Catarina. Em vermelho destacam-se as áreas de manguezais e marisma.



Fonte: (MMA, 2016).

## 1.4 MODELAGEM NUMÉRICA DA DISPERSÃO DE POLUENTES MARINHOS

A modelagem numérica veio como uma importante ferramenta para assessorar o monitoramento e treinamento para a prevenção e resposta a acidentes no meio marinho.

Um modelo numérico é uma forma de representar um sistema ou algum objeto em uma linguagem computacional, permitindo assim uma melhor compreensão do comportamento do fenômeno em estudo. Em Oceanografia, a modelagem numérica hidrodinâmica utiliza equações básicas de conservação de massa e movimento juntamente com medições *in situ* de nível médio do mar, correntes e propriedades físico-químicas da água do mar, como temperatura e salinidade. Os resultados de um modelo hidrodinâmico podem ser utilizados em outros programas para simular o trajeto de um derrame de petróleo e a sua intemperização. Uma série de modelos foram desenvolvidos, os quais seguem diversas abordagens (ITOPF, 2017).

Para utilizar estes modelos é necessária uma série de passos. O primeiro deles é compreender a dinâmica do ambiente. O segundo passo é transformar este conhecimento para um modelo matemático utilizando equações diferenciais. Após esta etapa, é realizado o processamento, o qual permite obterem-se informações qualitativas por dados de entradas, como, por exemplo, dados de corrente, vento e ondas. Por último, o pós-processamento envolve confirmar os resultados do pré-processamento pelo processo de calibração e validação com dado real ou provável (CASEIRO, 2011).

A aquisição de dados necessários para a fase do processamento pode ser feita *in situ*, por coleta remota como boias meteo-oceanográficas ou de resultados de análise de outros modelos (HARARI, 2015). Alguns exemplos de banco de dados que utilizam modelos globais validados com assimilação de dados observados são o *Princeton Ocean Model* (POM), *Hybrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM), e o *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* para dados oceanográficos e o banco de dados *Reanalysis* (NCEP) para dados meteorológicos, entre outros.

Para a etapa do processamento hidrodinâmico, modelos como o *Nucleus for European Modelling of the Ocean* (NEMO) da *NEMO Consortium* e o Delft3D da *Deltares*, resolvem as equações através do método de diferenças finitas em uma grade tipo sigma. O modelo Delft3D é um modelo euleriano, utiliza as equações de conservação de massa, momentum e energia de Navier-Stokes e que permite a solução destas equações hidrodinâmicas com alta resolução espacial para a região de estudo e considera as principais componentes da maré astronômica (DELTARES, 2017; MADEC, 2016).

Com o grande número de derrames de óleo no ambiente marinho criaram-se modelos especializados em prever a dispersão da mancha de petróleo em determinadas condições, sendo posteriormente usados para planos de contingência e para treinamento de resposta em emergência. Os principais dados de entrada são a quantidade e o tipo de óleo derramado, direção e intensidade de vento, direção e intensidade de corrente, maré e temperatura do ar e da água do mar (ITOPF, 2017). Diversos modelos foram desenvolvidos com essas funções, alguns deles são o ADIOS/GNOME (NOAA), e o próprio Delft 3D, o qual possui um módulo de trajetória de partículas (PART), que calcula o transporte das partícula pelo Modelo Lagrangeano e utilizam o método estocástico para simular a localização da partícula (DELTARES, 2017; NOAA, 2019).

O pós-processamento baseia-se em cálculos estatísticos para comparar se os principais resultados dos processos físicos simulados pelo modelo são compatíveis com outras análises e dados coletados *in situ*.

## 1.5 ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo usou como base a monobóia da empresa PETROBRAS Transportes (TRANSPETRO) no porto de São Francisco do Sul, Santa Catarina (Figura 5), única monobóia do estado, para gerar um cenário de derrame hipotético.

O porto de São Francisco se encontra no complexo estuarino da Baía da Babitonga, região norte do estado de Santa Catarina, o qual abriga o maior manguezal da região Sul do país. A

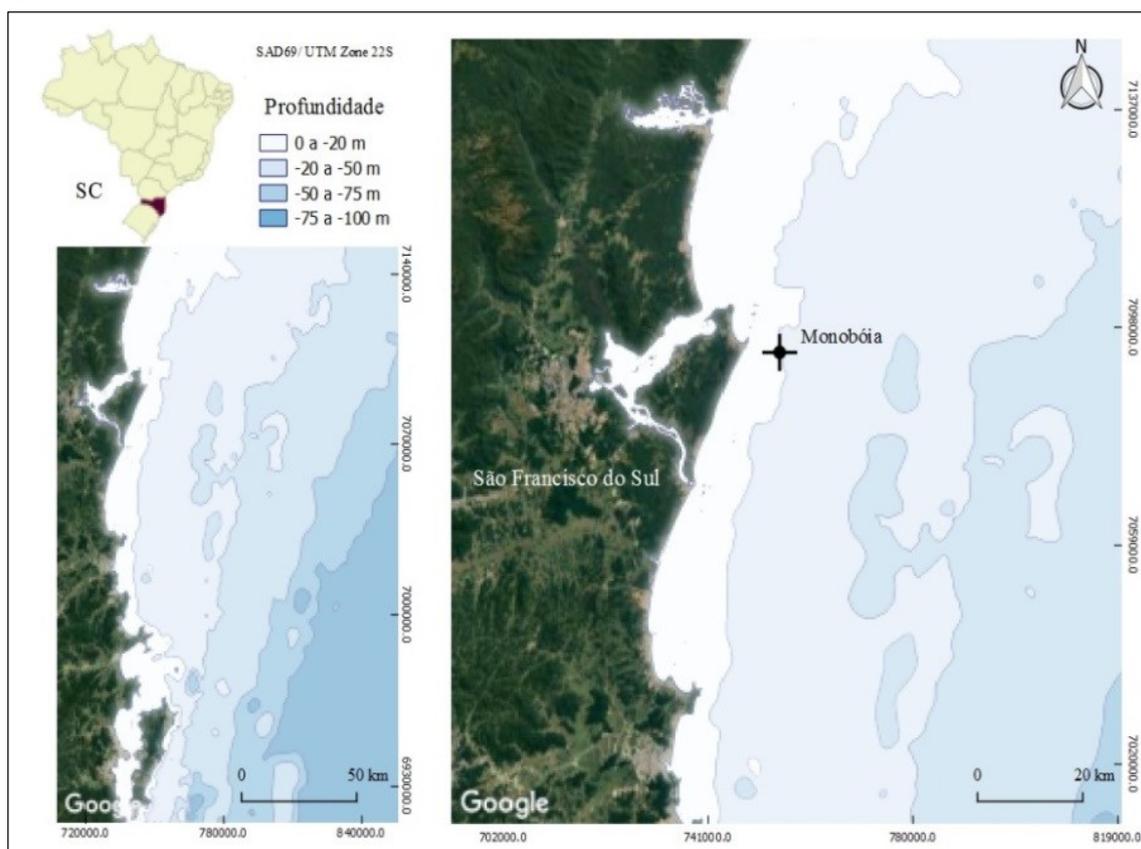
conexão principal com o mar se dá por um a barra principal a nordeste, com largura máxima de 185 m, e 28 m de profundidade, sendo o porto natural de maior calado do Brasil (PETROBRAS, 2016).

Segundo Truccolo (1998), a maré predominante é a astronômica, classificada como micro maré, com amplitude média de 0,85 m, com picos de 1,28 m em períodos de sizígia e valores mínimos de 0,27 m em períodos de quadratura. Em caso de frentes frias, a maré meteorológica contribui com até 0,8 m de sobre-elevação.

A distribuição de massas d'água no litoral centro norte catarinense possui dois padrões. Primavera-verão: a termoclina é bem definida, e, quando os ventos de quadrante norte atuam, promovem o afastamento da água costeira e a ressurgência da Água Central do Atlântico Sul. Quando ventos de quadrante sul atuam, há o empilhamento da água costeira e o abaixamento da termoclina. Outono-inverno: a coluna d'água é homogênea em função da subsidência costeira ocasionada pela grande frequência de ventos intensos provenientes do sul (frentes frias) e também pela advecção das águas subantárticas (CARVALHO; SCHETTINI; RIBAS, 1998).

Dois sistemas de circulação atmosférica influenciam o regime de vento da região, o Anticiclone do Atlântico Sul, que é semi-estacionário, de alta pressão e tem ventos dominantes de nordeste, e o Anticiclone Polar Móvel, que altera as condições normais, trazendo frentes frias proveniente de sudoeste em direção ao nordeste, indo de encontro com o Anticiclone do Atlântico, o qual faz com que este fique estacionado na região por um grande período de tempo (TRUCCOLO, 1998). O clima da região é classificado como subtropical úmido, marcado por duas estações distintas, verão e inverno (KNIE, 2002).

Figura 5- Localização da área de estudo (Coordenadas UTM/ GWS 84).



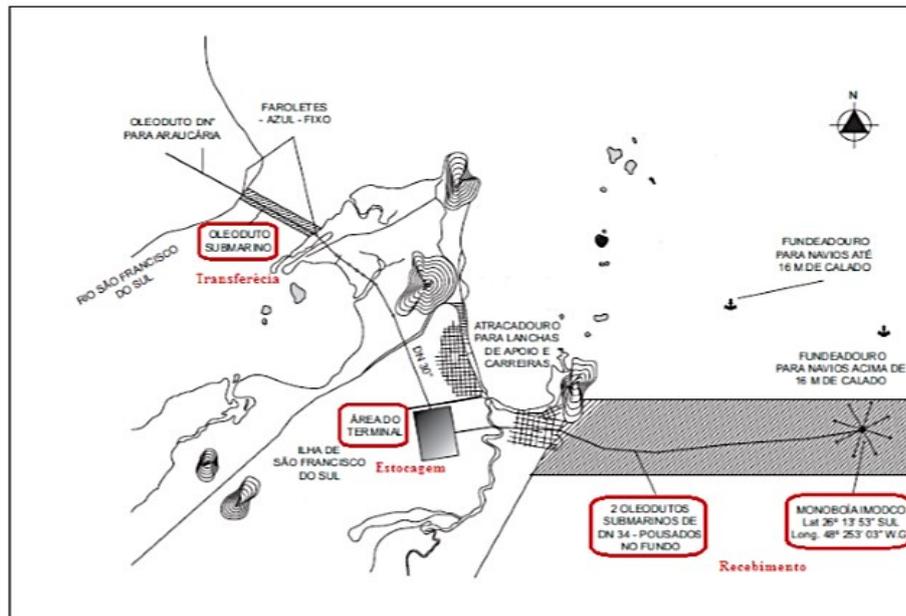
O modelo de monobóia da PETROBRAS é composto basicamente pelos sistemas de recebimento, estocagem e transferência do óleo (

Figura 6). A monobóia tem 143 toneladas (Figura 7), e é responsável pelo recebimento do petróleo bruto da Bacia de Campos classificado como pesado ( $^{\circ}\text{API} < 22$ ) de cerca de 30 navios por mês. Nela estão conectadas duas linhas paralelas de mangotes duplas de 20" de diâmetro cada, e 290 m de extensão. No navio que atraca para descarregar, há um mangote especial ligado nas extremidades de cada linha, de 16" de diâmetro, específico para a conexão manifold (principal) do

navio. Em condições normais, os navios conseguem descarregar até 10.000 m<sup>3</sup>/h (PETROBRAS, 2016).

O óleo recebido é bombeado para a estação de estocagem pelos oleodutos, os quais possuem 11,5 km de comprimento e 34” de diâmetro, chegando no sistema de armazenagem que possui sete tanques. Depois é transferido para a Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) em Araucária, Paraná, por um duto de 117 km e 30” de diâmetro (PETROBRAS, 2016).

Figura 6- Representação do sistema de recebimento, estocagem e transferência do óleo Diesel da base da TRANSPETRO- São Francisco do Sul.



Fonte: (PETROBRAS, 2016).

Figura 7- Monobóia de São Francisco do Sul.



Fonte: (Google, 2019).

## 1.6 JUSTIFICATIVA

Acidentes com derramamento de óleo são comuns, principalmente os de pequeno porte.

Particularmente em ambiente costeiro, estes derrames são muito mais danosos, devido aos ambientes sensíveis e de grande absorção, como mangues e praias.

Sendo assim, cientistas e empresas desenvolveram ferramentas e técnicas de resposta a derrames de elementos químicos em áreas costeiras. A ferramenta que tem sido comprovada como imprescindível para tomadas de decisão quando ocorre um derrame de petróleo no mar são os modelos matemáticos com capacidade de estimar o deslocamento da pluma de um poluente.

Com estas tecnologias à disposição, poucos estudos foram feitos na área de estudo, e os que foram realizados são de difícil acesso. Com isso, este trabalho traz respostas que podem ajudar em futuros casos de acidentes para que possam realizar uma resposta mais efetiva.

## 1.7 OBJETIVOS

### 1.7.1 Objetivo Geral

Simular um derramamento de óleo hipotético para mapear a dispersão da pluma de petróleo em um acidente na Monobóia do porto de São Francisco do Sul, para os períodos de verão e inverno de 2016.

### 1.7.2 Objetivos Específicos

- Modelar matematicamente a hidrodinâmica da região costeira de São Francisco do Sul.
- Modelar matematicamente o comportamento da pluma de óleo no cenário ambiental no verão e inverno.

## **2. OIL SPILL MODELING APPLIED FOR A COASTAL PORT IN SANTA ATARINA, BRAZIL**

Este capítulo apresenta o conteúdo do artigo que compõe esta dissertação e foi submetido à revista *Marine Pollution Bulletin* em 14/02/2019. O conteúdo apresentado a seguir segue na íntegra o publicado na revista, mudando apenas a formatação do texto. A confirmação da submissão é apresentada na próxima página.

Marine Pollution Bulletin

Ref: MPB-D-19-00216

Title: Oil spill modeling applied for a coastal port in the South Atlantic

Authors: Maria Paula Graziotto, Msc; Renato Ramos-da-Silva, Dr; Samuel H Yang, Msc

Article Type: Research Paper

## Oil spill modeling applied for a coastal port in Santa Catarina, Brazil

Maria Paula Graziotto<sup>1</sup>, Renato Ramos-da-Silva<sup>1</sup>, Samuel Hora Yang<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Postgraduate Program in Oceanography, Federal University of Santa Catarina, Center for Physical and Mathematical Sciences – CFM, Agrônômico Andrey Cristian Ferreira street, hallway B, Room B-14.

<sup>2</sup> Institute of Energy and Environment of the University of São Paulo, Professor Luciano Gualberto Avenue, 1289 University City - São Paulo SP.

### ABSTRACT

Oil and its derivatives are used routinely in man's daily life, and with this demand the risk of accident, even a small one, is unexceptional. The concern about the effects on the environment is growing. This study aims to apply numerical modeling to estimate the dispersion of oil spill plume in a marine environment applied to a port in Santa Catarina, Brazil. To reach this goal summer and winter of 2016 simulations were performed with Delft 3D model having as boundary conditions the oceanographic data from the Princeton Ocean Model (POM). The results showed that the model currents and sea level are well represented. For the summer time, the oil spill plume dissipated towards south influenced by the flow of coastal currents spreading and sticking over broader areas of the ocean floor. For the winter time, the oil spill plume tends to remain near the release site. This experiment shows that the model can be an important tool for monitoring this highly vulnerable location.

Key words: Numerical modeling, South Atlantic, oil spill, Delft3D.

### 2.1 INTRODUCTION

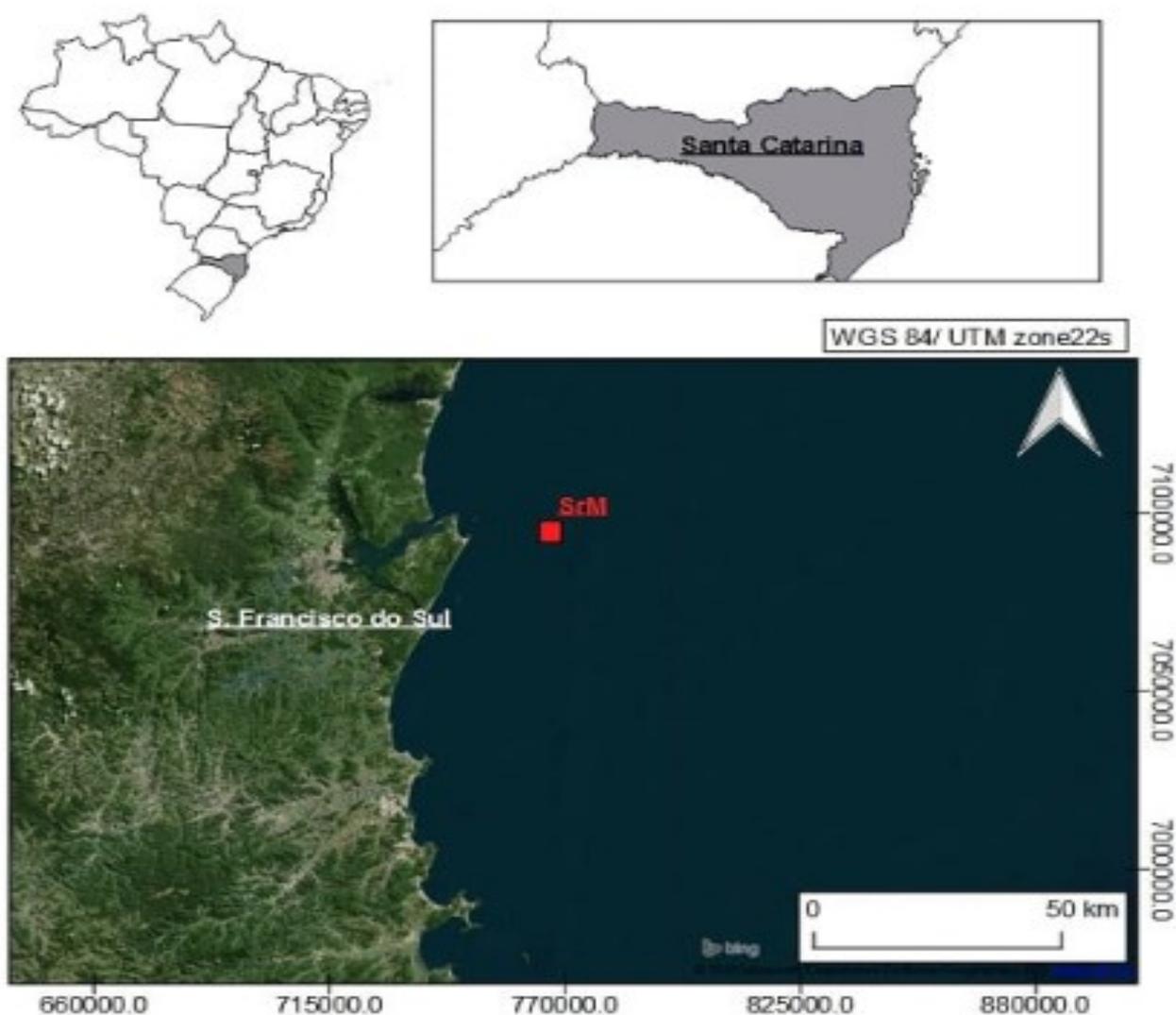
Oil, in general, has been part of everyday life for a long time, from the conservation and cooking of food, to heating and lighting. After World War II, society became dependent on oil and its derivatives, as fuel and raw material. Currently, the world production of oil exceeds 92.6 million barrels/day, and Brazil, in 2017, was in 10th place, producing 2.7 million barrels/day (ANP, 2018).

With the increasing use of this substance, the risk of accidents becomes larger. One of the most famous accident was the 1989 Exxon Valdez oil tanker accident, where about 3.276 million of tons of oil leaked from a tanker in Alaska. In 2010, in the Gulf of Mexico there was the largest oil spill in the United States with the explosion of the BP Deepwater Horizon platform. In this accident, about 6.8 million of tons of oil blowout into the sea (CRONE; TOLSTOY, 2010; TRUCCOLO, 1998). In Brazil, in 2000, 1.6 million of tons of oil from a Petrobras ship were spilled into Guanabara Bay, Rio de Janeiro. In 2011, the US company Chevron was responsible for a spill of 514 thousand tons of oil in the Campo Basin (EBC, 2015). The International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF) published that in 2018, 116 thousand tons of oil were spilled into the environment, a 24 year record (ITOPF, 2019).

Particularly in coastal environments, these spills cause much greater damage due to sensitive and highly vulnerable environments, such as mangroves and beaches. However, it is easier to reach on time and controlled than to an offshore blowout. Overall, chemical spills, specifically petroleum, are the main polluters of water in port regions, and as such, studies and training on how to remedy this problem are needed.

The Brazilian oil company PETROBRAS extract most of its petroleum at the shallow waters in south Brazil near the coast. The oil is then transported and carried inland through a port that has a Single buoy mooring (SrM) for transfer, this buoy can receive till 10.000 m<sup>3</sup>/h of heavy fuel oil. This site of transfer is located 8.5 km offshore at the port of São Francisco do Sul, at latitude 26 ° 13'52 "S and longitude 48 ° 25'03" W (Figure 2.1).

Figure 2.1- Location of the Single buoy mooring (SrM) of the Port of São Francisco do Sul, Santa Catarina, Brazil (Coordinates UTM/ GWS 84).



The port of São Francisco do Sul is located in the estuary complex of Babitonga Bay, in the northern part of the state of Santa Catarina, which is home to the largest mangrove swamp in the southern region of the country.

The distribution of water mass in the north central coast of Santa Catarina has two patterns. Spring-summer: the thermocline is well defined, and when the north quadrant winds act, they promote the removal of the coastal water and the resurgence of the relatively cold South Atlantic Central Water. Currently of the year, the tropical Brazil current is well established having a strong southward flow. When south quadrant winds act, there is the stacking of the mixing coastal water

and the lowering of the thermocline. Autumn-winter: the water column is homogeneous due to the coastal subsidence caused by the high frequency of intense winds from the south (cold fronts) and also by the advection of the Rio de la Plata and sub-antarctic waters (CARVALHO; SCHETTINI; RIBAS, 1998; TRUCCOLO, 1998).

Two atmospheric circulation systems influence the region's wind patterns, the South Atlantic Anticyclone, which is semi-stationary, high pressure and has dominant north-easterly winds, and the Mobile Polar High, which changes normal conditions, bringing cold fronts from the southwest towards the northeast, going against the Atlantic Anticyclone, which makes it stay in the region for a long period of time. The climate of the region is classified as humid subtropical, marked by two distinct seasons, summer and winter (KNIE, 2002; TRUCCOLO, 1998).

Scientists and companies have developed tools and techniques for responding to chemical spills in coastal areas. The tools that have been proven to be essential for decision making when an oil spill occurs at sea are the mathematical models capable of estimate the likely displacement of a pollutant's plume.

For the hydrodynamic preprocessing stage, the software used was Delft 3D from Deltares. It has been developed and constantly revised to achieve the best multi-disciplinary and 3D modelling for coastal, river and estuarine areas. New studies and works such as Abascal *et al.* (2017), Eladawy *et al.* (2018) and Jones *et al.* (2016) used this software and had great results of their hydrodynamics fields.

With emphasis on oil dispersion Delft3D have the module of Particle Tracking (PART), which simulates transport and water quality processes. Some works developed with this module are Wang *et al.* (2017) and Kleissen *et al.* (2007).

For the input of boundary conditions, in addition to the in-situ collection, there are several databases which uses satellite data, buoys, and others models already validated that provide reanalysis of the observed parameters. These include the global Princeton Ocean Model (POM) used by Harari *et al.* (2004) and in this work by a downscaling to resolve the locally hydrodynamic problem. And the NCEP/NCAR Reanalysis (NOAA) model that's provides an analysis and forecast meteorological data assimilation.

This work has the aim of simulating an oil spill to track the dispersion of the oil plume in an accident in the Single buoy mooring (SrM) of the port of São Francisco do Sul and infer how the variable environmental seasonal changes for the summer and winter periods of 2016 affects the plume dispersion.

## 2.2 MATERIAL AND METHODS

### 2.2.1 Description of Delft3D Model

Delft3D model is composed of different modules, which allow the user to reproduce the hydrodynamics and morphology of the region (FLOW), the waves (WAVE), the water quality (Del-WAQ), and the particle trajectory (PART) (DELTAIRES, 2017). In this work only the FLOW and PART modules were used.

Delft3D-FLOW can be applied to an extensive range of environments, such as rivers, estuaries and coastlines. This owing to the enormous number of process that can be considered in this module, like wind shear, drying and flooding of inter-tidal flats, density driven flows and stratification due to salinity and/or temperature gradients, atmospheric pressure changes, waves tidal forces, etc. Is a multidimensional model that performs 2D and 3D calculations, which uses a sigma-layer system for the three dimensional grid. It solves the shallow water equations from Navier-Stokes with hydrostatic pressure assumption (ABASCAL *et al.*, 2017; LESSER, 2009; YANG, 2016).

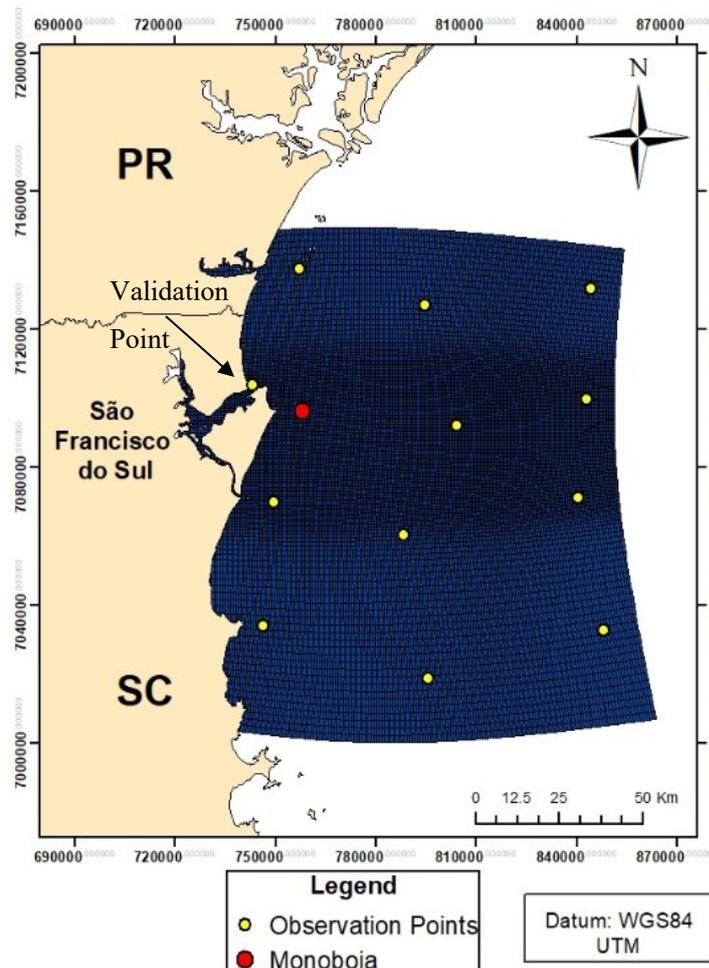
Delft3D-PART is comprised of a random walk particle tracking sub-model, which can be specified for oil spills. It uses physical data from the Flow module, such as currents, wind, turbulence, temperature and salinity, among others. The oil modeling accounts for several physical processes that affect the particles concentration. Such as oil entrainment in water, emulsification, dispersion, evaporation, advection of surface floating, sticking of oil to seabed or coast, oxidation and decay rate (DELTARES, 2018; KLEISSEN et al., 2007).

The track has three dimensions over time, which continuously changes the physical and chemical properties of the oil, having to calculate the mass of particles through the dynamic concentration in the model grid cell. To track the oil during the simulation, the release input is the number of particles in the substance and each particle has a coordinate at each time step, showing its path. The movement of the particles consists of two elements. The first is that for each time interval the advection due to shear stresses of the currents and the wind is the first stage. The second step is the random walk, where the direction and size of the movement is a random process, although it is related to vertical and horizontal dispersion (KLEISSEN et al., 2007; WANG et al., 2017).

## 2.2.2 Numerical Experiment Description

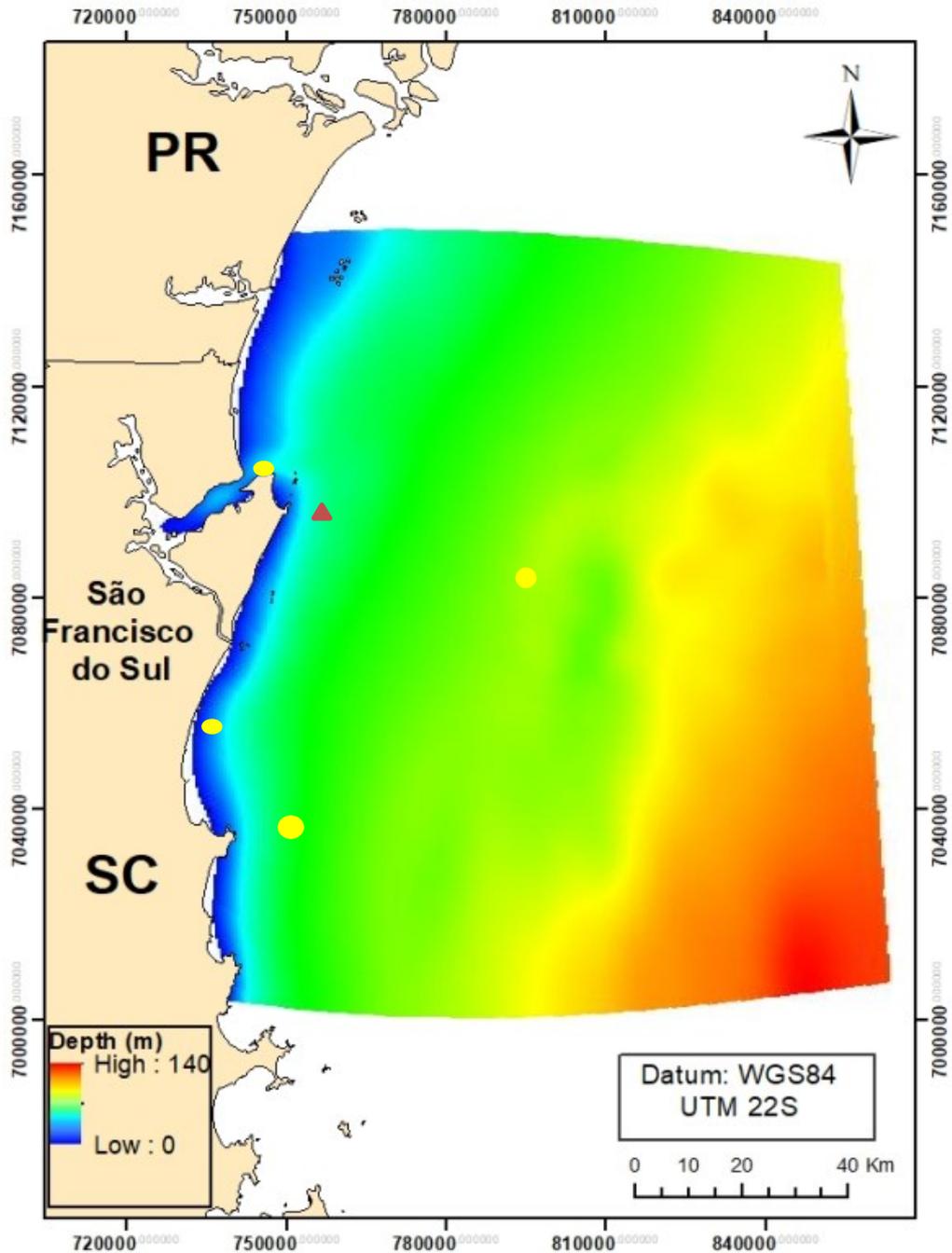
The computational grid has 22,400 elements with 128 cells in the east-west direction and 175 in the north-south direction, with 131 km by 140 km respectively (Figure 2.2). At the north and south ends the cells of the grid have a spacing of 950 m by 1500 m, converging to a resolution of 700 m by 1000 m in the central area. The vertical spacing consists of 5 sigma layers.

Figure 2.2- Map of the domain with a computational grid and observations points of the hydrodynamic model in the Datum WGS84, UTM.



The local bathymetry was generated through interpolation of ETOPO-1 data with a resolution of 1.8 km and nautical charts 1803 and 1804 of the Brazilian Navy on Delft3D QUICKIN tool. At the study region, bathymetry is shallow having an average depth of 22 m near the local of Petrobras buoy (Figure 2.3).

Figure 2.3- Map of the bathymetry in the study domain, in the Datum WGS84, UTM, with interpolated data of the ETOPO-1 model and nautical charts 1803 and 1804 of the Brazilian Navy. Yellow points show the POM domain and the red triangle shows the SrM location.



It is an open boundary model (Table 1) with data created in Delft DashBoard 6.0 software with the forcing data from a downscaling customized version of the Princeton Ocean Model (POM) (yellow points on Figure 2.3), provided by the Laboratory of Meteorology Applied to Time Systems (MASTER) of the Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences of the University of São Paulo (IAG-USP) (CAMARGO; HARARI, 2014). At the boundaries, the lateral

forcing used was temperature and salinity in five sigma layers and mean sea level with a time resolution of one hour. Wind forcing data were obtained from the NCEP/NCAR Reanalysis Project (KANAMITSU et al., 2002) at a height of 10 m with time step every 6 hours for the entire year of 2016.

Table 1- Inputs for Flow module.

Variables	Values
Model start time	0:00Am 01-January-2016
Model end time	23:59Pm 31-December-2016
Time step	60s
Wind data	Every 6 hours NCEP/NCAR Reanalysis.
Tidal constituents Temperature Salinity	Every hour POM data from MASTER's Lab.

The oil data used were from the Delft3D-PART Heavy Fuel Oil set (DELTARES, 2018). The oil characteristics was adjusted to resemble the types of oil (heavy oil, with  $^{\circ}\text{API} \leq 22$ ) transported in the São Francisco do Sul SrM port and their parameters are described in Table 2. All others parameters like sedimentation, erosion, horizontal dispersion, were set as the Case 1 in the Delft3D-PART manual suggest.

Table 2- The property values of spilled oil set in the model.

Parameters of oil properties	Values
Evaporation per day (1/day)	0.05
Stickiness probability [0-1]	0.5
Volatile fraction [0-1]	0.94
Emulsification parameter	$2 \cdot 10^{-6}$
Maximum water content [0-1]	0.7
Fraction at which emulsification starts [0-1]	0.05
Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	990
Kinematic viscosity (cst)	1500
Dispersion (entrainment)	Calculated
Minimum thickness	0.0000
	5
Deflection angle	0

Two different spill periods were simulated: one in the month of January, representing the local summer conditions (A) and the other in the month of July, representing the winter conditions (B). These two periods are characterized by different mean wind fields (

Figure 2.4) and oceanic currents (Figure 2.5). The stronger easterly wind fields during summer (

Figure 2.4A) is associated with stronger southerly oceanic currents (Figure 2.5A), as compared with the winter time. Both oil spill simulations were carried for 3 months to evaluate the dispersion of the oil from an instantaneous release with 200,000 particles, representing 1,000,000 kg (8,607 barrels) of oil (Table 3).

Figure 2.4-Monthly mean winds fields at 2m height from NCEP/NCAR Reanalysis for (A) January and (B) July of 2016.

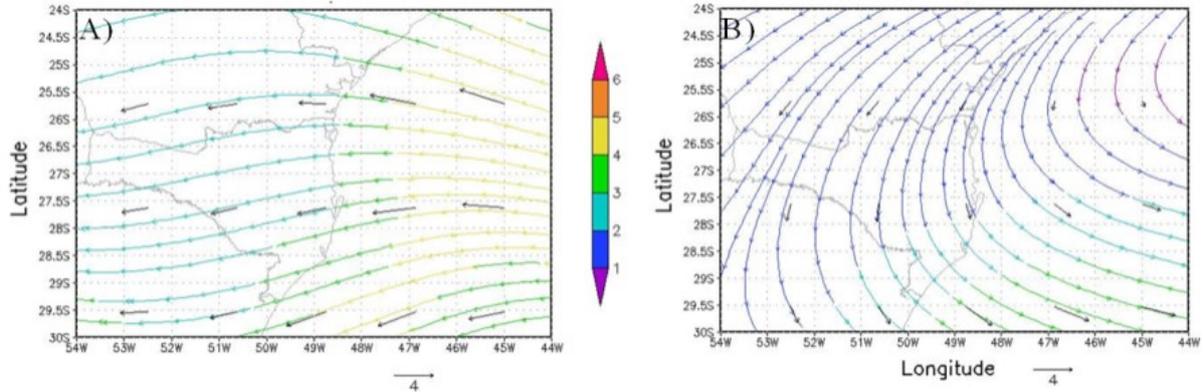
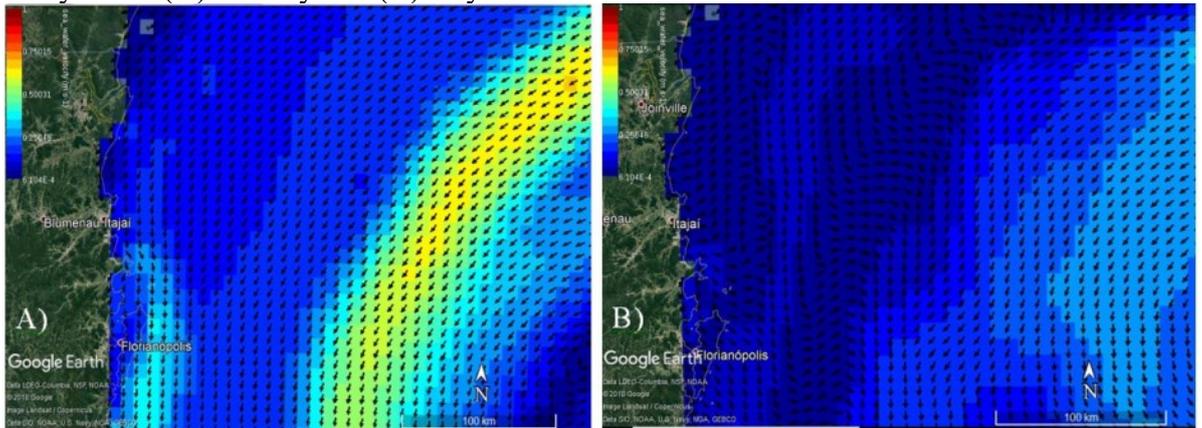


Figure 2.5-Monthly mean surface oceanic currents fields at 0.49m depth from Copernicus model Analysis for (A) January and (B) July of 2016.



Furthermore, the baroclinic circulation caused by temperature and salinity has an important influence on water transport and oil spreading. In this region, in summer the values for sea water temperature and salinity varies between 25°C and 27°C, and 35‰, respectively. During winter, its varies between 15°C and 19°C and 34.5‰, respectively (ALVES et al., 2004).

Table 3- Inputs for Delft3D-PART module.

Variables	Values
Spill start time	A- 01/Jan/16 00h / B-01/Jul/16 00h
Time step	15 min
Spill site	26°13'52"S -48°25'03"W (SrM)
Oil quantity	1000000 kg
Release type	Instantaneous
<b>Number of oil particle</b>	200,000
<b>Sedimentation rate</b>	Processes exclude
<b>Non-cyclic Component Vellocity</b>	A0 [m/s] → $-1 \cdot 10^{-4}$ ; A1[m/s]→ 0; V <sub>min</sub> [m/s]→ -10; V <sub>max</sub> [m/s]→ 100.

Besides to initial and boundary data, the models require data for validation. These data can be of in situ, remote measurements or of results of other models. It is important to infer the quality of the model simulation results (HARARI, 2015). Local oceanic data from the Copernicus European Earth Observation and Monitoring Program was used to evaluate the model performance. This data is constructed with in-situ and satellite data assimilation into the Mercator oceanic model to provide a global analysis (CMEMS; NOUEL, 2018).

Local tide data from Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (Ciram/Epagri) was used to evaluate the model performance. This data is from Ilha da Paz station, located at latitude - 26°10'48.00"S, longitude 48°29'24.00"O for the months of June to September of 2016. The hydrodynamic observation point utilized for the validation is located at outfall of the port (Figure 2.2).

## 2.3 RESULTS

### 2.3.1 Model evaluation

To evaluate the model performance, the simulated results were compared with the Copernicus zonal and meridional current velocity analysis and in situ sea level height measurements.

The results show that the major currents are well simulated by the model when compared with the analysis data from Copernicus (Fig. 2.6). The model captures well the major direction changes on the surface currents on both seasons (i.e. January and July).

Fig. 2.6 – Model comparison with Copernicus data analysis for the SrM site located at  $26^{\circ}13'52''\text{S}$   $-48^{\circ}25'03''\text{W}$ , for zonal (u) and meridional (v) oceanic current speed for January 2016 (A and B) and July 2016 (C and D). The statistics RMSE estimated for the currents are presented on the figure.

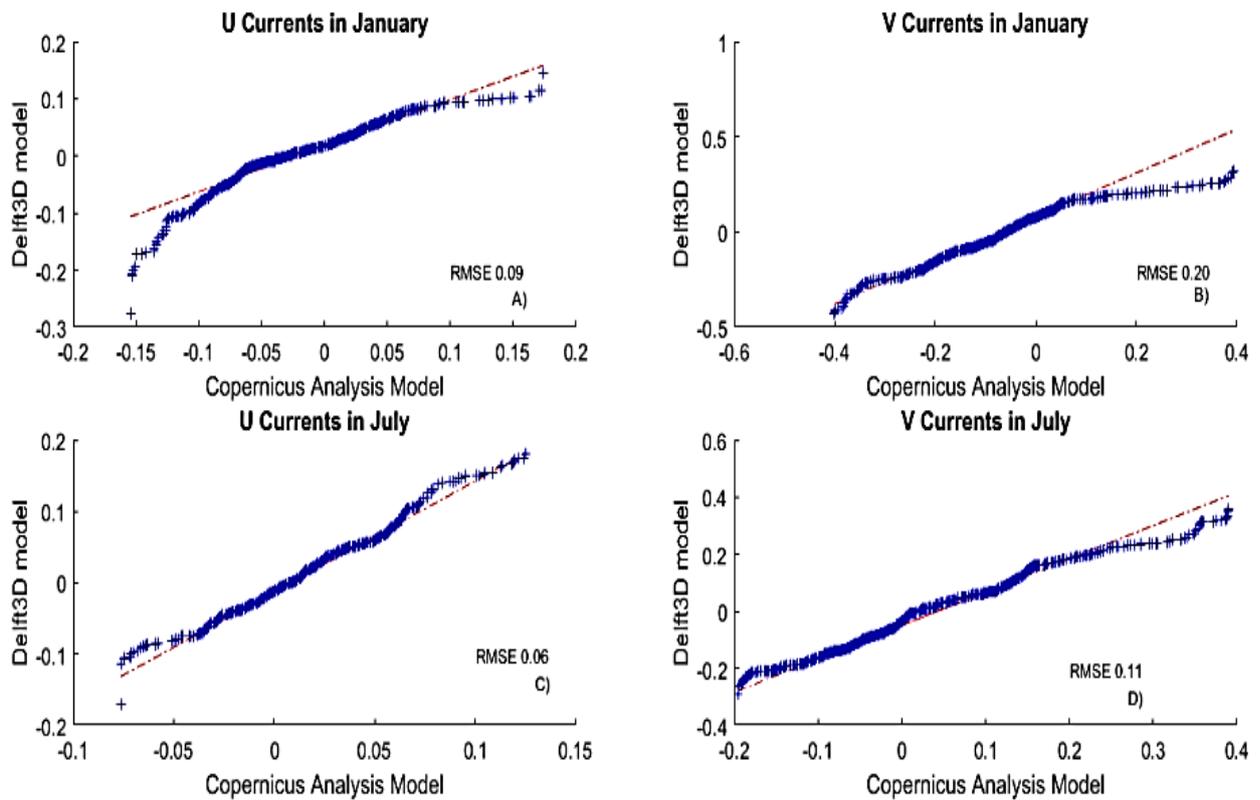


Figure 2.7 shows the model simulation results for the surface height as compared with the in-situ observations for July 2016. The results show that the model can capture the major sea level variability that includes the principal tide components. Although the statistical evaluation had a 30% of error for RMSE, and 18% of fit in the coefficient of determination ( $R^2$ ), a spectral analysis show that the model can represent the diurnal cycle and the semi-diurnal tidal dynamic variability (Figure 2.8). Thus, the results show that the model is able to represent the major hydrodynamic oceanic local conditions.

Figure 2.7- Spectral analysis between observed (orange line) and model sea level (blue line) in São Francisco do Sul for the winter of 2016.

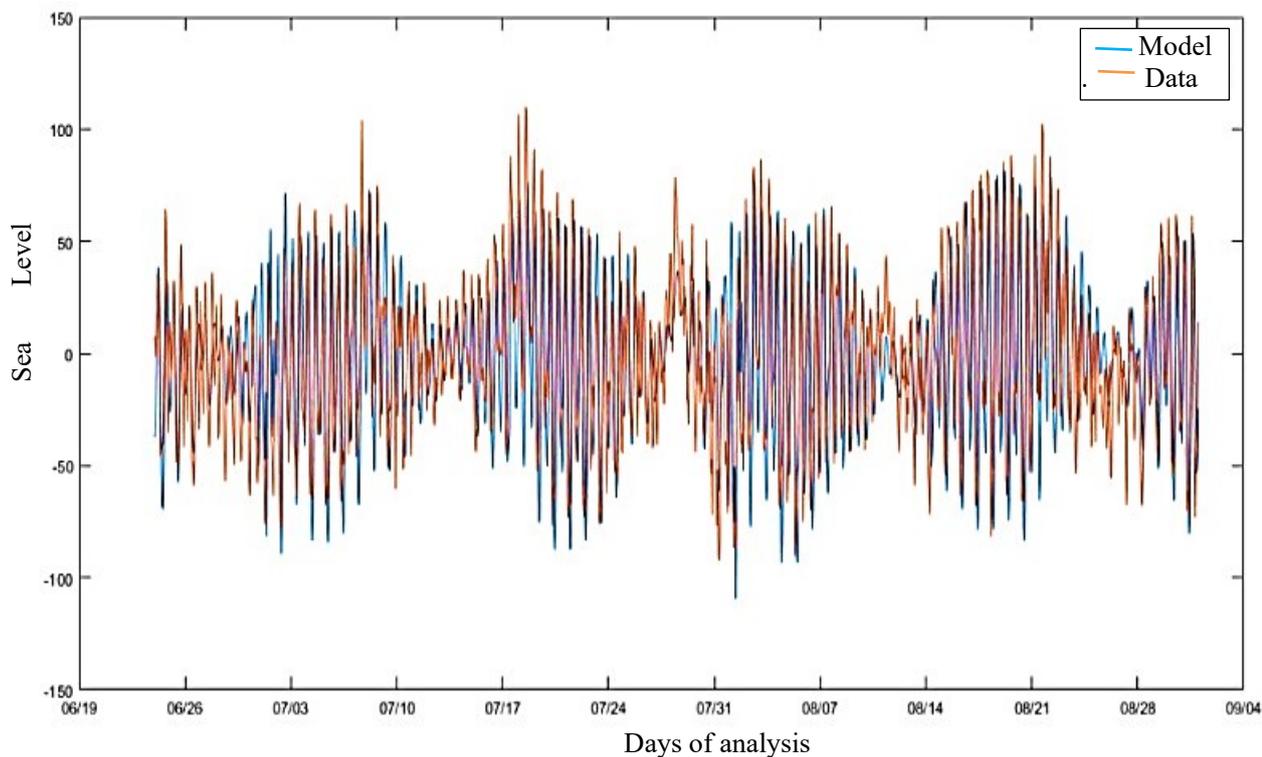
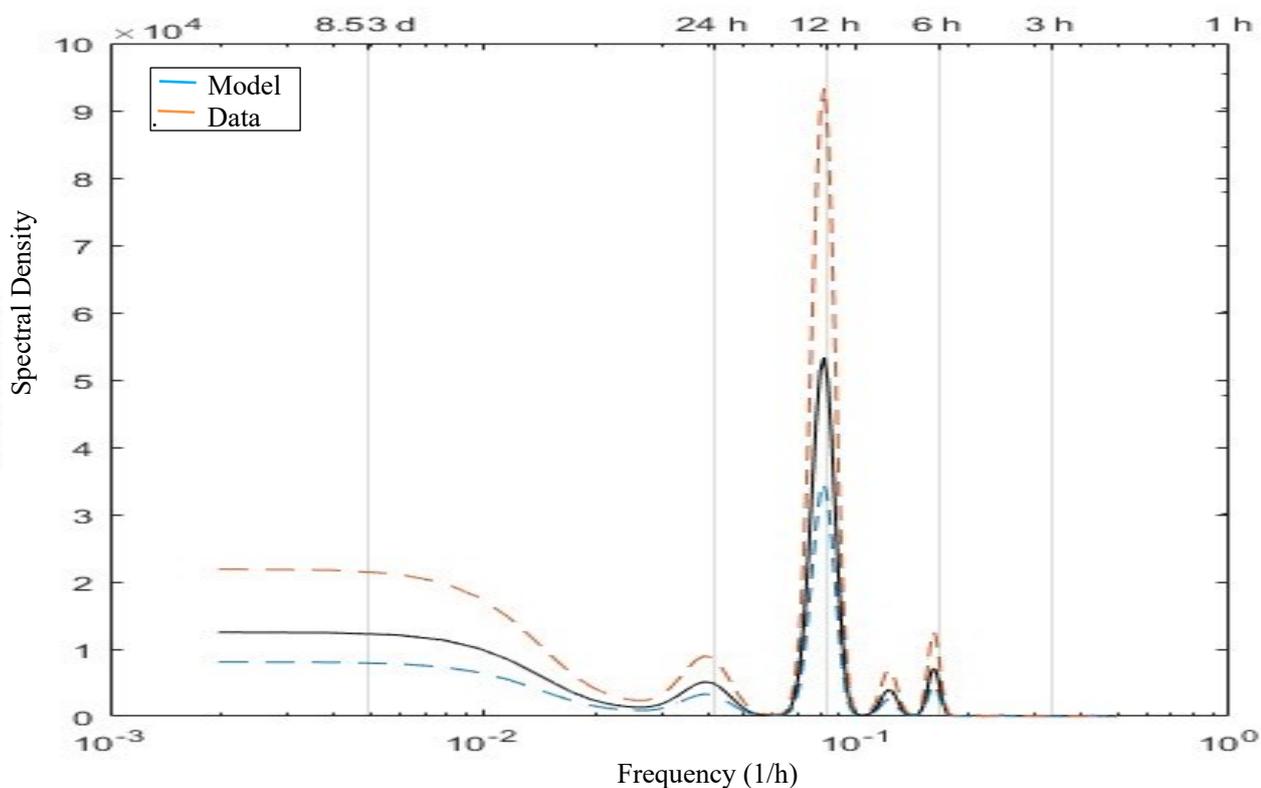


Figure 2.8- Spectral density between observed (orange line) and model sea level (blue line) in São Francisco do Sul for the winter of 2016.



### 2.3.2 Oil spill case

Figure 2.9 shows the simulation results for the surface oceanic currents and the dispersion of the oil spill plume. The results show that after the oil release, the plume is highly affected by the strong oceanic currents. After 14 hours of spill the plume's center are still near the local release (Figure 2.9A). Afterwards 38 hours, the plume's center moved south about 40 km, but a weaker spot moved faster near the south boundary (Figure 2.9B). After the third and fourth days, the plume's center moved south, remaining near the shore (Figure 2.9C, D).

Figure 2.9- Oil spill plume ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) and currents fields for January 2016.

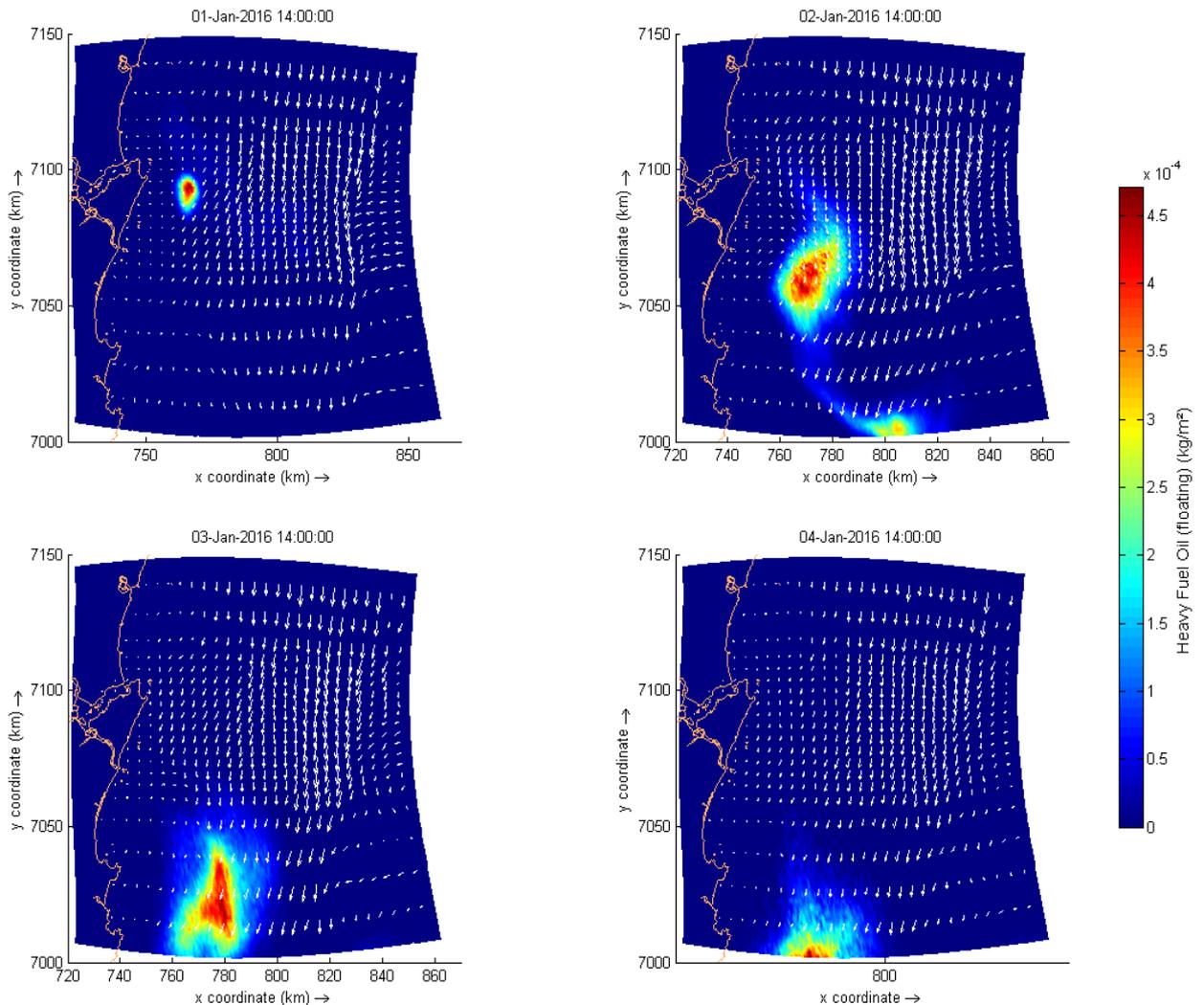


Figure 2.10 shows the simulation results for the oceanic currents and the plume dispersion for the winter time. The results show that the oil remains longer near the site of release and more concentrated, but still goes towards south. It only passes 50 km after the fourth day after the spill release (Figure 2.10D). Despite the currents showed an east influence, the plume moves away from the coastline (westerly), probably due the influence of the wind, how it is showed in figure 2.4B, the mean wind field in this time of year it is from west to east.

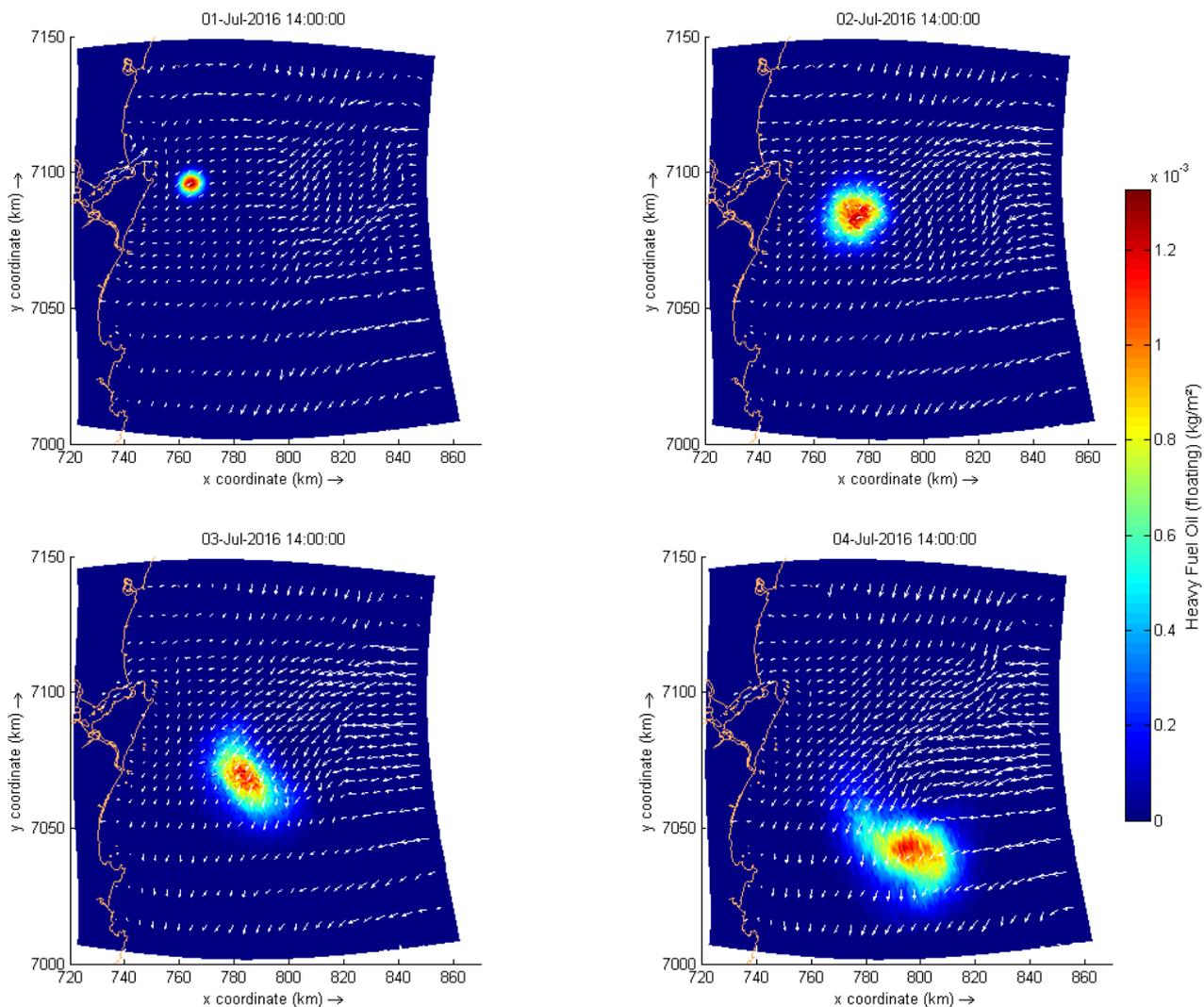
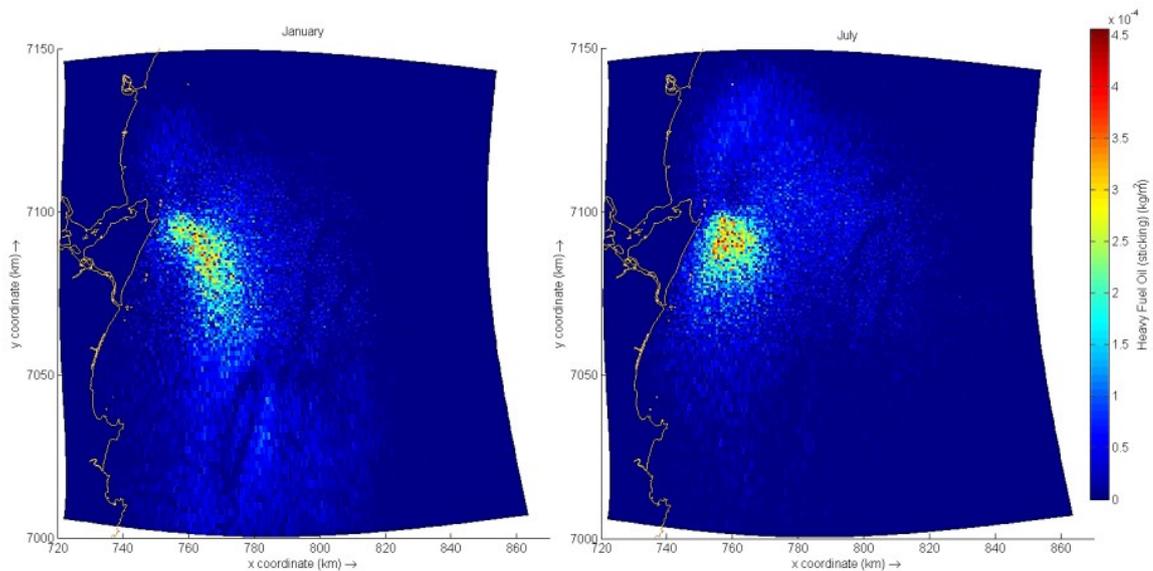
Figure 2.10- Oil spill plume (kg/m<sup>2</sup>) and currents fields for July 2016.

Figure 2.11 shows the results of oil sticking at the seabed after 08 days of release for the two periods, summer (Figure 2.11A) and winter (Figure 2.11B). The major sticking occurs over the marine floor having low sticking over the coastal interfaces. At summer results, it is noted that the stick site is more spread and with the shape of the plume route during the days. In the winter, the result shows that the stick site is more concentrated around the release spot, and near the shore.

Figure 2.11- Sticking oil after 8 days of release in January and July of 2016.



## 2.4 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Results of the simulation of oil spill in the region of São Francisco do Sul port showed that environmental conditions at different times of the year have different consequences. The results for the summer time when temperatures are higher and the currents to the south are stronger have a faster dispersion and consequently affect a larger area. In winter, although the plume also has dispersion towards the south due to coastal currents, however, post-frontal winds of the SW quadrant and a higher frequency of eddies near the coast may cause a local dynamic influence (PEREIRA; SCHETTINI; OMACHI, 2009; TRUCCOLO, 2011). These conditions maintained the plume longer at the local point of release.

Most weathering processes are extremely temperature dependent. Low temperatures reduce the efficiency of these processes. For example, the oil spreading is weaker with a colder environment due to the increase of its viscosity at these temperatures (FINGAS, 2017; ZHU et al., 2001). This may explain the difference between the spread of the plume in summer being greater than the winter. Other temperature influences along with the salinity are the currents generated by the density. Wang et al. (2017) showed in their work the difference between a drift of oil spilled with a constant temperature and salinity and a drift with temperature and salinity varied in sheltered waters. Although the study area is not a sheltered place, it is strongly influenced by the waters of Babitonga Bay that has lower salinity.

These results show that in a possible oil spill disaster, the execution of a containment activity should prioritize the south flank where the plume disperses. On the other hand, this containment activity should be faster in the summer period because the plume disperses with greater speed due to the high temperature and in function of the strong local currents.

Delft3D-Part calculates the oil's sticking phase when it reaches the shore or sinks in the bed (DELTARES, 2018). As shown in Figure 2.11, the oil sank into the seabed and only a few particles were trapped on the coast. However, for this to happen, the oil density must be higher than that of the water surface (FINGAS, 2017). It may be the effect of water from Babitonga Bay. This deposition of oil in the bottom can have many consequences for the local ecosystems. Therefore, remediation activities and more studies will be necessary to be designed for these regions.

These results show that, the present model system can be used as a predictive tool for a possible local oil spill disaster. To achieve this goal, oceanic and atmospheric prediction models

should be used as boundary conditions to feed a high-resolution model such as done with the Delft model in this study.

The present study sought to simulate the hydrodynamics and the dispersion of a hypothetical release of oil. Other future studies should be performed accounting for other case studies including evaluation of possible remediation activities processes.

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Resultados da simulação de derramamento de óleo na região do porto de São Francisco do Sul mostraram que as condições ambientais em diferentes épocas do ano têm diferentes consequências. Os resultados para o período de verão, quando as temperaturas são mais altas e as correntes ao sul são mais fortes, têm uma dispersão mais rápida e, conseqüentemente, afetam uma área maior. No inverno, embora a pluma também tenha dispersão para o sul devido às correntes, os ventos pós-frontais do quadrante SW e uma maior frequência de vórtices próximos ao litoral podem causar uma influência na hidrodinâmica local. Essas condições fizeram com que a pluma permanecesse por mais tempo na região do ponto de lançamento.

A maioria dos processos de intemperismo é extremamente dependente da temperatura. Baixas temperaturas reduzem a eficiência desses processos. Por exemplo, o espalhamento de óleo é menor com um ambiente mais frio devido ao aumento de sua viscosidade nessas temperaturas. Isso pode explicar a diferença entre a propagação da pluma no verão ser maior que no inverno. Outra influência da temperatura, juntamente com a salinidade, são as correntes geradas pela densidade. Nos Apêndices A e B são apresentados campos de temperaturas e salinidade que mostram a variabilidade destes campos nos dois períodos de estudo. Wang *et al.* (2017) mostraram em seu trabalho que a diferença entre a deriva de óleo derramado com uma temperatura e salinidade constantes e à deriva com temperatura e salinidade variantes em águas abrigadas. Embora a área de estudo não seja um lugar abrigado, ela é influenciada pelas águas da Baía de Babitonga.

Esses resultados mostram que, em um possível desastre de derramamento de óleo, ao executar uma atividade de contenção, a equipe de resposta a derrames de óleo deve priorizar o flanco sul, por onde a pluma se dispersa. Além disso, essa atividade de contenção deve ser executada mais rápido no período de verão, já que a pluma se dispersa com maior velocidade devido a maiores temperaturas e em função das fortes correntes locais.

Delft3D-Part calcula a fase de aderência do óleo quando atinge a costa ou o fundo marinho (Deltares, 2018). Como mostrado na Figura 9, o óleo sedimentou para o fundo do mar e apenas algumas partículas ficaram presas na costa. No entanto, para que isso aconteça, a densidade do óleo deve ser maior do que a da superfície da água (Fingas, 2017). E apesar do óleo ser considerado pesado (densidade  $990 \text{ kg/m}^3$ ) pela indústria, a água do mar possui densidade de  $1025 \text{ kg/m}^3$ , sendo ainda mais densa que o óleo apresentado. Essa deposição de óleo no fundo pode ter muitas consequências para os ecossistemas locais. Portanto, mais estudos serão necessários para essa região para que a tomada de decisão de atividades de remediação seja tomada.

Estes resultados mostram que o sistema do modelo atual pode ser usado como uma ferramenta de previsão para um possível desastre local de derramamento de óleo. Para atingir este objetivo, os modelos de previsão oceânica e atmosférica devem ser usados como condições de contorno para alimentar um modelo de alta resolução, como feito com o modelo de Delft neste estudo. Além disso, sempre que possível, obter dados *in situ*, juntamente com dados remotos para melhorar a capacidade de previsão destes modelos.

O presente estudo procurou simular a hidrodinâmica e a dispersão de uma liberação hipotética de óleo. Outros estudos de caso futuros devem ser realizados, incluindo a avaliação de possíveis processos de atividades de remediação para que a resposta ao derrame na região seja mitigada da melhor forma possível.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABASCAL, A. J. et al. A high-resolution operational forecast system for oil spill response in Belfast Lough. **Marine Pollution Bulletin**, v. 114, n. 1, p. 302–314, 2017.
- ALVES, E. S. et al. Características Morfodinâmicas No Litoral Characteristics in the Center-Northern Littoral of Santa. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 8, n. 1, p. 1–24, 2004.
- ANP, A. N. DO P. G. N. E B. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível**, 2018.
- ASCE. STATE-OF-THE-ART REVIEW OF MODELING TRANSPORT AND FATE OF OIL SPILLS. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 122, p. 594–609, 1996.
- BP. **BP Statistical Review of World Energy, 2018**. Londres: [s.n.].
- BRASIL. **Lei Federal n. 7.735, de 22 de fevereiro de 1989. Dispõe sobre a extinção de órgão e de entidade autárquica, cria o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis e dá outras providências.**Casa Civil, , 1989.
- BRASIL. **Lei Federal n. 9478, de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências.**Ministério das Minas e Energia - MME, , 1997.
- BRASIL. **Lei Federal n. 9966, de 29 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.**Ministério das Minas e Energia - MME, , 2000.
- CAMARGO, R. DE; HARARI, J. Tides and Wind-Driven Circulation in the Tropical and Southern Atlantic Ocean : The BRAZCOAST System Tides and Wind-Driven Circulation in the Tropical and Southern Atlantic Ocean : The BRAZCOAST System. **Atmospheric and Ocean Science Letters**, v. 7, n. 5, p. 476–480, 2014.
- CARVALHO, J. L. B.; SCHETTINI, C. A. F.; RIBAS, T. M. Estrutura Termohalina Do Litoral Centro-Norte Catarinense. **Notas Téc. Facimar**, v. 2, p. 181–197, 1998.
- CASEIRO, A. M. **Simulação de um eventual vazamento de óleo no oleoduto da Baía da Babitonga - SC**. [s.l.] Universidade do Vale do Itajaí, 2011.
- CHASSIGNET, E. P.; MARSHALL, D. P. Gulf Stream Separation in Numerical Ocean Models. **Geophysical Monograph Series**, v. 177, p. 39–61, 2008.
- CONAMA. Resolução CONAMA nº 1,. p. 636–639, 1986.
- CONAMA. **Resolução CONAMA n. 273, de 29 de novembro de 2000.**Ministério do Meio Ambiente- MMA, , 2000.
- CONAMA. **Resolução CONAMA n. 293, de 5 de dezembro de 2007.**Ministério do Meio Ambiente- MMA, , 2007.
- CONAMA. **Resolução CONAMA n.420, de 28 de dezembro de 2000.**CONAMA, , 2009.
- CRONE, T. J.; TOLSTOY, M. Magnitude of the 2010 Gulf of Mexico Oil Leak. v. 330, p. 634, 2010.
- DELTARES. **Delft 3D**. Disponível em: <<https://oss.deltares.nl/web/delft3d/about>>.
- DELTARES. **User Manual - Particle Tracking Deltares Systems**, 2018. Disponível em: <<https://svn.oss.deltares.nl/>>
- EBC, E. B. DE C. E. Relembre os principais desastres ambientais ocorridos no Brasil. **Portal EBC**, p. 1–8, 2015.
- ELADAWY, A. et al. Estimating the Mean Circulation and Water Exchange of the Gulf of Suez-Red Sea via a Validated One-Way Atmospheric-Hydrodynamic Coupled Model. **Earth Systems and Environment**, p. 1–19, 2018.
- FEISTER, V. A. **Cinética da Biodegradação dos Compostos Benzeno, Tolueno e Xileno em Lodo Aeróbio utilizando Biofilme**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

FINGAS, M. Introduction to Spill Modeling. In: **Oil Spill Science and Technology: Second Edition**. 1st ed ed. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2017. p. 419–453.

HARARI, J. et al. Numerical modeling of the hydrodynamics in the coastal area of Sao Paulo state Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. SI 39, n. 39, p. 1560–1563, 2004.

HARARI, J. **Fundamentos de Modelagem Numérica em Oceanografia**. 1. ed. São Paulo: Salt Sea e Limno Technology, 2015.

HAUTEVELLE, Y. **Geochimie organique - Origine, nature et évolution de la matière organique préservée dans les dépôts sédimentaires**, 2016. Disponível em: <[http://yann.hautevelle.perso.sfr.fr/Geochimie\\_organique/Partie\\_2.html](http://yann.hautevelle.perso.sfr.fr/Geochimie_organique/Partie_2.html)>

IТОPF, I. T. O. P. F. **Oil Tanker Spill Statistics 2015**. Londres: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.itopf.com/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>>.

IТОPF, I. T. O. P. F. **Oil Spill Modelling**. Disponível em: <<http://www.itopf.com/knowledge-resources/documents-guides/fate-of-oil-spills/oil-spill-modelling/>>. Acesso em: 5 jan. 2017.

IТОPF, I. T. O. P. F. **Oil Tanker Spill Statistics 2018**. Londres: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.itopf.com/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>>.

JONES, H. F. E. et al. Oil dispersal modelling: reanalysis of the Rena oil spill using open-source modelling tools. **New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research**, v. 50, n. 1, p. 10–27, 2016.

KANAMITSU, M. et al. NCEP-DOE AMIP-II Renalalysys (R-2). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, n. 11, p. 1631–1643, 2002.

KLEISSEN, F. et al. **Contents :Safety at Sea, Marine Environmental Risk Assessment System: Conceptual design and preliminary demonstration for the Dutch Continental Shelf**. Deltares: [s.n.].

KNIE, J. **Atlas ambiental da região de Joinville [Atlas] : complexo hídrico da Baía da Babitonga**. 1st ed ed. Florianópolis: FATMA, 2002.

KREIDLOW, R. Empresa deve pagar R \$ 8 , 95 milhões de multa por dano à baía da Babitonga , em São Francisco do Sul. **A Notícia**, p. 3–5, 2013.

LESSER, G. R. **An Approach to Medium-term Coastal Morphological Modelling**. [s.l.] UNESCO-IHE & Delft University of Technology, 2009.

MADEC, G. NEMO ocean engine. **Notes du Pôle de modélisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)**, n. 27, 2016.

MARTA-ALMEIDA, M. et al. Efficient tools for marine operational forecast and oil spill tracking. **Marine Pollution Bulletin**, v. 71, p. 139–151, 2013.

MMA, M. DO M. A. **Cartas de Sensibilidade ao Óleo**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/seguranca?quimica/cartas?de?sensibilidade?ao?oleo?tmpl=component&print=1>>. Acesso em: 20 maio. 2016.

NOAA, N. O. AND A. A. **GNOME Suite: Components and Uses**, 2019. Disponível em: <<https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/response-tools/gnome-suite-components-and-uses.html>>

PALADINO, E. E.; MALISKA, C. R. An Hydrodynamic Model for the Calculation of Oil Spills Trajectories. 2000.

PEREIRA, M. D.; SCHETTINI, C. A. F.; OMACHI, C. Y. Caracterização de feições oceanográficas na plataforma de Santa Catarina através de imagens orbitais. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 1, p. 81–93, 2009.

PETROBRAS. PORT INFORMATION TEFTRAN - TERMINAL DE SÃO FRANCISCO DO SUL. p. 1–51, 2016.

PGT, P. G. T. **Geologia do Petróleo**. Rio de Janeiro: [s.n.].

SHEN, H. T.; YAPA, P. D. Oil Dlick Transport in Rivers. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 114, n. 1, p. 529–543, 1988.

TRUCCOLO, E. C. **Maré Meteorológica e Forçantes Atmosféricas Locais em São Francisco do Sul- SC**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.

TRUCCOLO, E. C. ASSESSMENT OF THE WIND BEHAVIOR IN THE NORTHERN

COAST OF SANTA CATARINA ELIANE CRISTINA TRUCCOLO Universidade Federal do Ceará , Instituto de Ciências do Mar , Laboratório de Oceanografia Física ( UFC , Labomar ), Fortaleza , CE , Brasil Received April 20. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 3, p. 451–460, 2011.

VENOSA, A. D.; ZHU, X. Biodegradation of crude oil contaminating marine shorelines and freshwater wetlands. **Spill Science and Technology Bulletin**, v. 8, n. 2, p. 163–178, 2003.

VON SCHUCKMANN, K. et al. The Copernicus Marine Environment Monitoring Service Ocean State Report. **Journal of Operational Oceanography**, v. 9, p. s235–s320, 2016.

WANG, Y. et al. Temperature and salinity effects in modeling the trajectory of the 2011 Penglai 19-3 oil spill. **Marine Georesources and Geotechnology**, v. 35, n. 7, p. 946–953, 2017.

WORD, J. Q. Environmental Impacts of Arctic Oil Spills and Arctic Spill Response Technologies Literature Review and Recommendations. Arctic Oil Spill Response Technology Joint Industry Programme. Literature review and Recommendations. 2014.

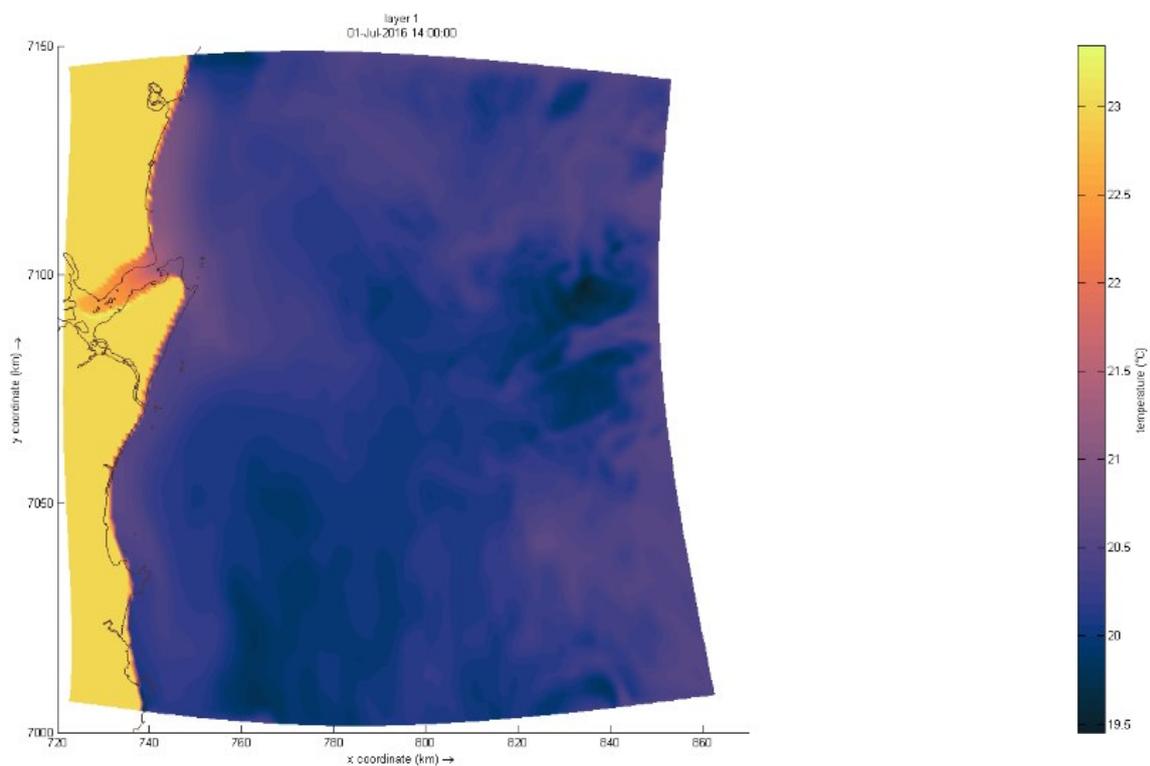
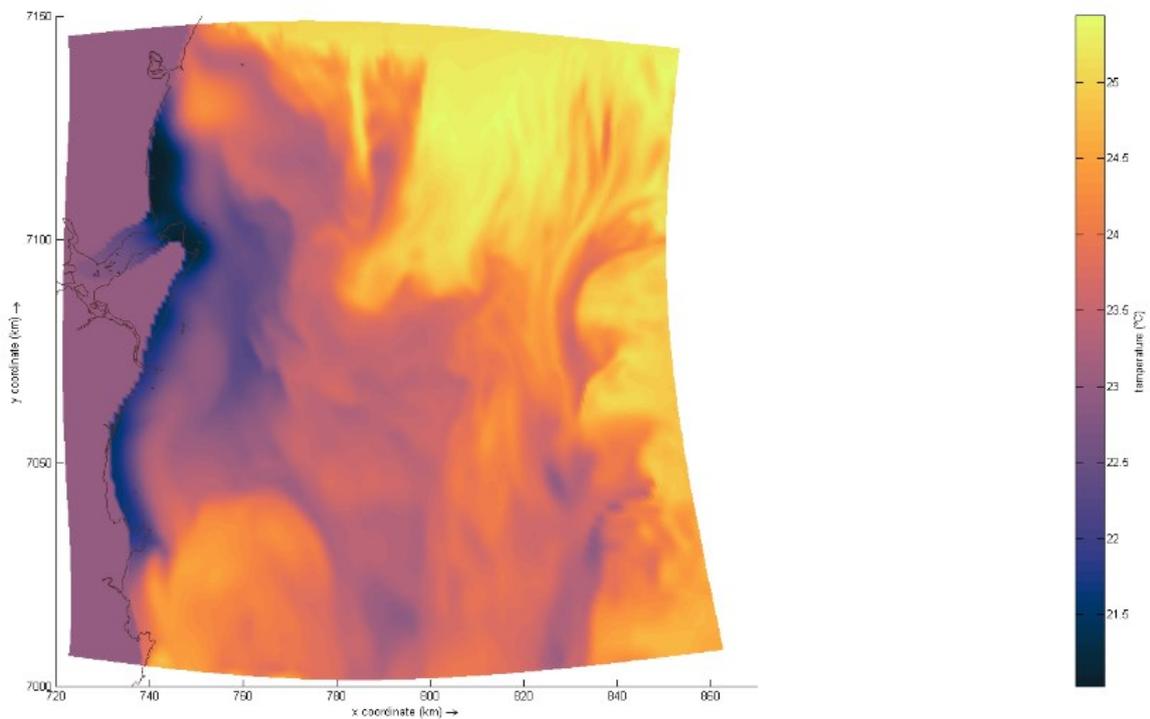
YANG, S. H. **ANÁLISE DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS E DA DISPERSÃO DE PLUMAS DE EFLUENTES NA REGIÃO COSTEIRA CENTRO-SUL DO ESTADO DE SÃO PAULO COM USO DA MODELAGEM NUMÉRICA**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2016.

YASSUDA, E. A. et al. Computational Tools for Contingency Planning in Brazil. **Framework**, n. 478, p. 1–13, 2004.

ZHU, X. et al. Guidelines for the Bioremediation of Marine Shorelines and Freshwater Wetlands. **Environmental Protection**, p. 163, 2001.

## APÊNDICE A

Figura 3.1- Temperatura para os dias (A) 1 de janeiro de 2016 e (B) 1 de julho de 2016, ambas as 14 horas.



## APÊNDICE B

Figura 3.2- Salinidade para os dias (A) 1 de janeiro de 2016 e (B) 1 de julho de 2016, ambas as 14 horas.

