



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
BACHARELADO EM OCEANOGRAFIA

AUGUSTO CESAR DE OLIVEIRA FREITAS

**AVALIAÇÃO DOS PRINCIPAIS FORÇANTES RESPONSÁVEIS PELA DINÂMICA DA
PLUMA DO RIO SÃO FRANCISCO**

FORTALEZA 2016

AUGUSTO CESAR DE OLIVEIRA FREITAS

AVALIAÇÃO DOS PRINCIPAIS FORÇANTES RESPONSÁVEIS PELA DINÂMICA DA
PLUMA DO RIO SÃO FRANCISCO

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres
Teixeira

FORTALEZA 2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Rui Simões de Menezes

F936a Freitas, Augusto Cesar de Oliveira.

Avaliação dos principais forçantes responsáveis pela dinâmica da pluma do Rio São Francisco / Augusto Cesar de Oliveira Freitas – 2016.
40 p. : il. color., enc. ; 30 cm.

Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso Bacharelado em Oceanografia, 2016.

Orientação: Prof^o. Dr^o. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

1. Rio São Francisco - Interação com atmosfera. 2. Modelagem numérica. I. Título.

CDD 551.524 8

AUGUSTO CESAR DE OLIVEIRA FREITAS

AVALIAÇÃO DOS PRINCIPAIS FORÇANTES RESPONSÁVEIS PELA DINÂMICA DA
PLUMA DO RIO SÃO FRANCISCO

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Aprovada em: ___/___/_____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Geraldo Ferreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

MSc. Samuel Soares Valentim
Universidade Federal do Ceará (UFC)

“Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível e de repente você estará fazendo o impossível”

(São Francisco de Assis)

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais, que desde sempre priorizaram a minha educação e confiaram em mim, estando ao meu lado em todas as minhas escolhas.

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira, pelos ensinamentos no laboratório e em sala de aula, pela paciência e excelente orientação, pela amizade e por estar sempre disponível e disposto a me ajudar mesmo com os problemas mais simples.

Aos meus amigos coloridos Michaela, Lia, Marcus Vinicius, Rhayan, Priscila e Ítalo, que estiveram presentes na minha vida desde o início do curso e com os quais compartilho tantas memórias felizes.

Aos meus amigos queridos, Marianna, Rafael Xavier, Yuri e Franklin, que me acolheram tão bem após o meu regresso do Ciência sem Fronteiras e me fizeram sentir integrado ao curso novamente.

Ao Wesley Linhares, que tanto me inspira e me motiva e com quem espero compartilhar tantos outros momentos de felicidade.

À Glacianne, que tanto me ensinou e me motivou durante grande parte do curso e que foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

À Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Sra. Presidente Dilma Rousseff, que apesar de tudo, permitiram-me a jamais sonhada oportunidade de estudar fora e adquirir experiências que levarei comigo para o resto da vida.

Aos membros participantes da banca examinadora, Samuel Soares Valentim e Antonio Geraldo Ferreira pelo tempo e pelas valiosas contribuições que serão feitas ao meu trabalho.

Obrigado a todos vocês.

“Aqui nessa pedra, alguém sentou para olhar o mar

O mar não parou para ser olhado

Foi mar para tudo que é lado.”

(Paulo Leminski)

RESUMO

O Rio São Francisco é um dos principais rios do país, nascendo na Serra da Canastra, em Minas Gerais, passando por seis estados e centenas de municípios até desaguar no oceano Atlântico, na divisa dos estados de Sergipe e Alagoas. É importante por transportar um grande volume de água pela região do semi-árido e também por seu alto potencial hidrelétrico. Por ter uma alta vazão, o Rio São Francisco transporta também grandes quantidades de material dissolvido e particulado da nascente até a plataforma continental, desaguando na forma de pluma, sendo responsável pelo aporte de sedimentos para a plataforma e regiões costeiras adjacentes à foz e pelo aporte de nutrientes, importantes para a produção primária. A vazão do Rio São Francisco atualmente está reduzida devido à construção de barragens ao longo do rio, que acabam por reter materiais que chegariam ao oceano. O monitoramento da pluma do São Francisco é importante para que se entenda melhor sua contribuição no transporte de materiais do continente para o oceano e isto pode ser feito através de um estudo detalhado dos forçantes hidrodinâmicos na região da foz e plataforma adjacente. Com o objetivo de identificar os principais forçantes responsáveis pela dispersão e pelo alcance da pluma do Rio São Francisco, foram criados seis cenários idealizados que foram simulados no Delft3D na tentativa de representar o regime de vazões do rio. Observou-se que o vento tem um papel importante no condicionamento da direção da pluma, fazendo com que esta se disperse em direção ao oceano nos meses de verão, quando os ventos sopram de NE, e fique retida à região costeira nos meses de inverno, quando os ventos sopram de SE. A vazão foi responsável pela extensão alcançada pela pluma. Por fim, verificou-se que a construção das barragens ao longo do Baixo São Francisco teve um impacto considerável no alcance da pluma sobre a plataforma, influenciando diretamente na quantidade de sedimentos e nutrientes que chegam do continente à região costeira.

Palavras-chave: Rio São Francisco, plumas, barragens, modelagem numérica, Delft3D-FLOW.

ABSTRACT

The São Francisco river is one of the main rivers in Brazil, originating in Serra da Canastra in the State of Minas Gerais, passing through six states and hundreds of towns until it reaches the Atlantic ocean, between the border of the States of Sergipe and Alagoas. It is an important river due to the fact that it transports a large volume of water through the semi-arid region of the country and has a large hydroelectric potential. Because the São Francisco river has a large discharge capacity, it also carries large amounts of dissolved and solid matter to the ocean as coastal plumes, being responsible for the input of sediments and nutrients to the continental shelf and adjacent coastal areas. Since the construction of hydroelectric power plants along the lower São Francisco, the river discharge has been reduced, as well as the amount of sediments and nutrients that would reach the ocean. Thus, the monitoring of the coastal plume generated by the São Francisco river should be conducted regularly so that it is possible to understand its contribution to the transport of dissolved and solid matter from the continent to the ocean; and this can be made through the analysis of the main hydrodynamic forcings controlling the plume dispersion over the continental shelf. Aiming to determine these hydrodynamic forcings, six scenarios were created and run in the numerical model Delft3D as an attempt to represent the discharge regime of the river. The results showed that the wind has an important role in the dispersion of the plume, pushing it towards the open ocean in the presence of northeasterly winds (summer) whereas the plume is confined to coast in the presence of southeasterly winds (winter). Finally, the results also showed that the construction of power plants along the river impacted directly on the extension of the coastal plume over the continental shelf, with consequences to the amount of sediments and nutrients transported to coastal areas.

Keywords: São Francisco river, coastal plumes, power plants, numerical modelling, Delft3D-FLOW.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, mostrando as divisas dos quatro setores, as principais municípios e os principais afluentes do rio.....10
- Figura 2 – Grade utilizada na modelagem para a dispersão do rio São Francisco contendo os pontos de observação.....15
- Figura 3 – Nível do mar obtidas pelo modelo e dados do IHO para o Porto de Maceió. A linha em vermelho representa a saída do modelo enquanto a linha azul representa as amplitudes que foram obtidas a partir do IHO.....21
- Figura 4 – Nível do mar obtidas através do modelo e dados do IHO Barra do RSF. A linha em vermelho representa a saída do modelo para as amplitudes de maré enquanto a linha azul representa as amplitudes que foram obtidas a partir do IHO.....22
- Figura 5 – Mapas de dispersão horizontal da pluma do Rio São Francisco sob diferentes condições de vento e vazão de 1408 m³/s. (a) Superior – O forçante vento não foi incluído. (b) Inferior à esquerda – Cenário com vento típico de verão. (c) Inferior à direita – Cenário com vento típico de inverno.....24
- Figura 6 – Foz do Rio São Francisco. TSS (g/cm³) estimado por meio de imagens do Landsat 5 (a, b).....25
- Figura 7 – Perfis verticais de salinidade para as seguintes situações. (a) Superior – condição com marés e sem ventos. (b) Inferior à esquerda – condição com marés e vento de NE. (c) Inferior à direita – condição com marés e vento de SE.....26
- Figura 8 – Mapas de dispersão horizontal da pluma do Rio São Francisco sob diferentes condições de vento e vazão de 1408 m³/s. (a) Superior – Cenário com maré sem o forçante vento. (b) Inferior à esquerda – Cenário com vento típico de verão. (c) Inferior à direita – Cenário com vento típico de inverno.....27
- Figura 9 – Mapa de vetores representando a velocidade e direção das correntes. (a) Situação com marés e vento de NE. (b) Situação com marés e vento de SE.....28
- Figura 10 – Seções verticais de salinidade feitas para os cenários representando o período chuvoso. (a) Superior - situação com marés e sem ventos. (b) Inferior à esquerda - situação com marés e vento vindo do quadrante NE. (c) Inferior à direita - situação com marés e vento vindo do quadrante SE.....29
- Figura 11 – Mapas de dispersão horizontal da pluma do Rio São Francisco sob vazão histórica de 14000 m³/s. (a) Esquerda – vazão máxima sob vento de NE a 2 m/s. (b) vazão máxima sob vento de Se a 2 m/s.....30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1 Área de estudo	9
2. OBJETIVOS	12
2.1 Geral	12
2.2 Específicos	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1 Delft3D	13
3.2 Delft Dashboard	14
3.3 Grade	14
3.4 Banco de dados	15
3.4.1 <i>Batimetria</i>	15
3.4.2 <i>Maré</i>	16
3.4.3 <i>Vazão</i>	16
3.4.4 <i>Vento</i>	16
3.5 Implementação do modelo	17
3.6 Cenários	18
3.6.1 <i>Descarga fluvial de verão + Regime de Marés ($Q_v + RM$)</i>	18
3.6.2 <i>Descarga fluvial de inverno + Regime de Marés ($Q_i + RM$)</i>	19
3.6.3 <i>Descarga fluvial de verão + Regime de Marés + Ventos</i>	19
3.6.4 <i>Descarga fluvial de inverno + Regime de Marés + Ventos</i>	19
3.6.5 <i>Descarga fluvial máxima + Regime de Marés + Ventos (Verão)</i>	19
3.6.6 <i>Descarga fluvial máxima + Regime de Marés + Ventos (Inverno)</i>	19
3.7 Avaliação dos dos forçantes	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1 Validação	21
4.2 Avaliação dos forçantes	23
4.2.1 <i>Análise da maré e dos ventos</i>	23
4.2.2 <i>Efeito da vazão</i>	26
4.2.3 <i>Efeito da construção das barragens</i>	29
5. CONCLUSÕES	32
REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

Os rios são as principais vias de materiais particulados e dissolvidos para os oceanos (MILLER *et al.*, 2004). O destino dos sedimentos de origem fluvial e o impacto que causam depende de processos de transporte e transformações que ocorrem nos rios, nos estuários e na região costeira. As plumas são os locais de rápida transformação dos materiais de origem continental que entram no oceano (DAGG *et al.*, 2004). Uma das etapas finais do transporte de água e matéria ao longo da interface continente-oceano ocorre através de plumas costeiras que se propagam a partir da desembocadura dos rios sobre a plataforma continental (WRIGHT, 1977).

Diversas atividades antrópicas nas bacias de drenagem alteram a pulsação, magnitude, e a natureza do aporte de material transportado aos estuários e à zona costeira (HOPKINSON, 1995). Exemplos de atividades que causam grandes impactos são as obras de drenagem e barragens. Segundo Halim (1991), a canalização e dragagem de rios aumentam a amplitude e o aporte de água, sedimentos e nutrientes. Ao contrário, barragens retêm e transformam o material e modificam a pulsação natural do fluxo de água e material associado, alterando a capacidade de transporte dos mesmos e podendo ainda provocar erosão à jusante das barragens. Além disso, o metabolismo das comunidades estuarinas e o padrão de migração de diversas espécies que utilizam estuários como berçários, é sensivelmente alterado.

De acordo com Paiva (2015), o estuário do Rio São Francisco é um sistema de cunha salinha cuja vazão foi regularizada pela construção de nove barragens para a geração de energia elétrica. As barragens construídas ao longo do Rio São Francisco alteram as características hidrológicas do estuário, entre elas a vazão do rio e a concentração de material particulado em suspensão (MPS).

A pluma do Rio São Francisco se trata de uma pluma de ressuspensão onde a principal fonte que a alimenta é oriunda da ressuspensão causada pela alta energia de ondas e correntes agindo sobre o fundo marinho (MEDEIROS, 2003). Medeiros (2007) também constatou, nos meses de fevereiro e março, a influência do Rio São Francisco no enriquecimento de nutrientes do ambiente ocenânico adjacente e o aumento da produtividade primária.

O destino e o comportamento das plumas costeiras são controlados por processos lineares e não-lineares, e o estudo destas plumas pode ser feito através de coleta de dados *in situ*, sensoriamento remoto, e modelos numéricos e analíticos (MARQUES *et al.*, 2009). Uma

vez que águas residuais e grande carga de sedimentos são descarregadas nas águas de rios e estuários, é importante modelar o comportamento da pluma com a maior precisão possível. Os métodos mais utilizados consideram as plumas como um jato de água flutuante, sujeita à variação das marés, ondas, ventos, fluxo do rio e outros forçantes que contribuem com a dispersão da pluma. Segundo Dyke (2001), estes estudos são extremamente importantes principalmente em situações graves, tais como derrame de poluentes tóxicos, onde todas as características do ambiente, que ajudam nos mecanismos de dispersão, devem ser levadas em consideração.

Plumas costeiras são estudadas em um contexto global. Lazure e Jegou (1998), por exemplo, modelaram a dinâmica das plumas dos rios Loire e Gironde, na França, com o objetivo de entender a evolução das plumas destes dois rios e determinar qual era o forçante mais importante na dispersão das plumas quando estas chegavam à plataforma continental.

Na América do Sul, Pimenta (2014) também realizou um trabalho importante modelando a pluma do Rio da Prata. Ele utilizou o Princeton Ocean Model (POM) para investigar o grau de impacto que os ventos possuem na evolução da pluma do rio. Os resultados o auxiliaram na criação de uma classificação para o processo de ressurgência, que se baseia em dois parâmetros. O primeiro indica quando os ventos são capazes de exportar a pluma de forma eficiente na direção *offshore*, enquanto que o segundo parâmetro, indica quando os ventos não interferem no padrão de dispersão da pluma eficientemente, o que pode explicar o porquê de grandes vazões serem pouco suscetíveis ao processo de ressurgência.

Silva *et al.* (2009) conduziram estudos acerca do espalhamento sazonal e espacial da pluma de água amazônica utilizando dados coletados por campanhas oceanográficas e resultados do modelo numérico CLIPPER. Além do trabalho de Silva *et al.* (2009), outros estudos aplicando a modelagem numérica ao estudo de plumas costeiras também foram publicados. Poletto (2013), a exemplo, utilizou o modelo Delft3D para analisar a influência do Rio Itajaí-Açú sobre a circulação hidrodinâmica na área adjacente ao estuário deste rio, avaliando a estabilização do transporte de sal com o modelo. Em seu trabalho, verificou-se que o modelo representou de forma adequada a estratificação da coluna d'água quando comparado com os dados medidos. Pinheiro (2014), também utilizando o Delft3D, objetivou identificar o efeito de forçantes como maré, vento e vazão sobre a dispersão do Rio Doce, concluindo que, o vento tem um importante papel no condicionamento da direção da pluma, enquanto que a vazão se mostrou responsável pela extensão da pluma gerada pelo rio.

A modelagem hidrodinâmica tem diversas aplicações nas áreas de engenharia ambiental e recursos hídricos, principalmente no que tange a qualidade de água e transporte

de sedimentos. Segundo Estigoni (2013), a modelagem hidrodinâmica consiste em traduzir, por meio de equações matemáticas, o comportamento do escoamento de um fluido em um domínio computacional que representa a área de estudo.

Empresas de consultoria ambiental e portos têm utilizado o modelo Delft3D-FLOW para prever o padrão de dispersão de contaminantes em casos de acidentes com vazamentos, para prever o comportamento de plumas de águas residuárias que chegam ao mar através de rios e riachos e, em alguns casos, na tentativa de prever o comportamento de plumas de sedimentos geradas a partir da dragagem de portos. Cardno Ltda (2010), produziu um relatório para a Autoridade Portuária de Port Hedland (Austrália) cujo objetivo era produzir um estudo utilizando o modelo Delft3D-FLOW para monitorar o comportamento e a hidrodinâmica da pluma gerada pelas atividades de dragagem. Em um trabalho similar, a Coastal Planning & Engineering do Brasil (2010) foi solicitada pela empresa de consultoria ambiental Aquaplan para realizar um estudo de modelagem numérica de hidrodinâmica, propagação de ondas, transporte de sedimentos e mudanças morfológicas na Baía de Paranaguá, utilizadas para a estimativa da taxa de sedimentação nos canais de acesso aos portos de Paranaguá e Antonima.

1.1. Área de estudo

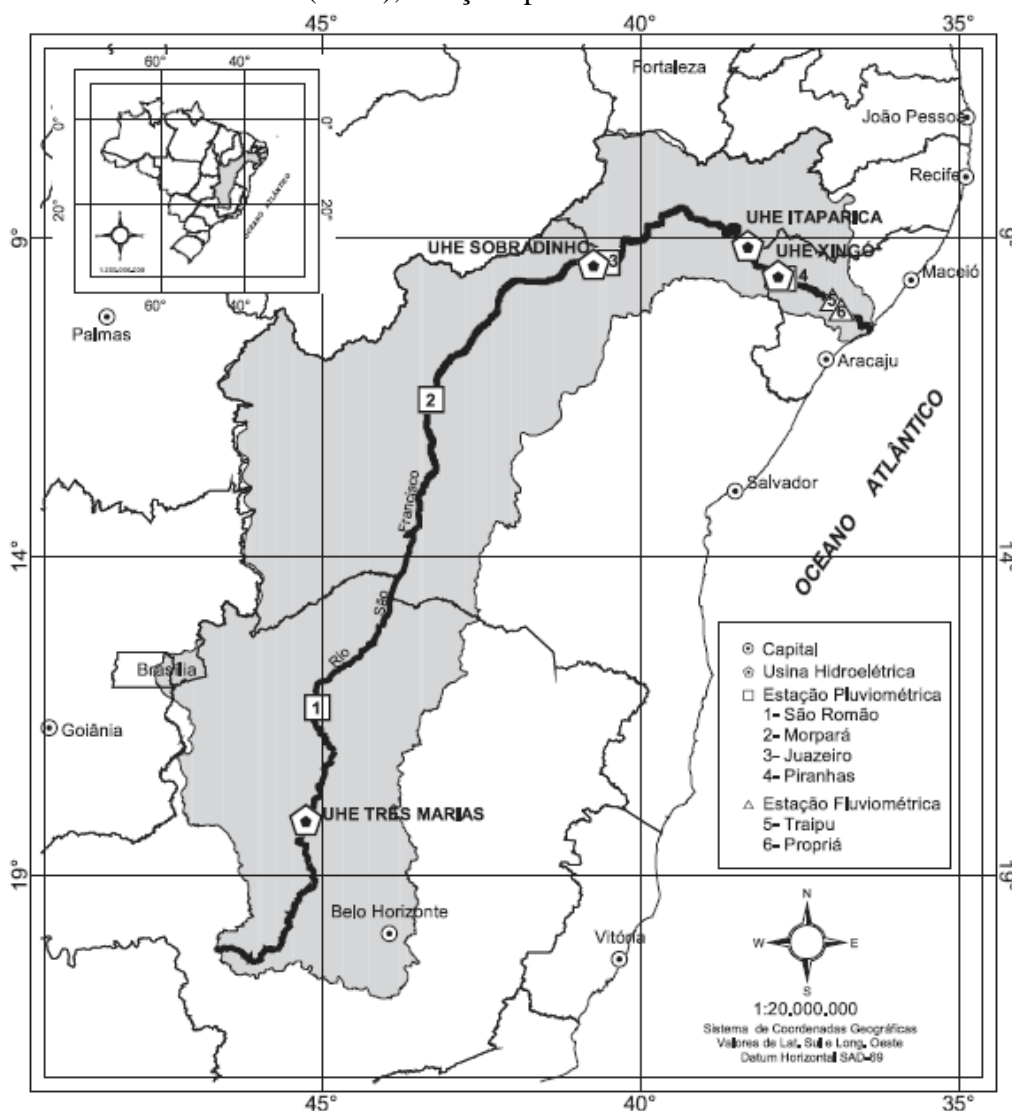
De acordo com o Caderno da Região Hidrográfica do Rio São Francisco (2006), A região hidrográfica do Rio São Francisco se situa entre as coordenadas 7°17' a 20°50' de latitude sul e 36°15' a 47°39' de longitude oeste e é formada por diversas sub-bacias que deságuam no rio São Francisco, e este por sua vez no oceano Atlântico, em divisa com os Estados de Alagoas e Sergipe. Apresenta 638.323 km² (8% do território nacional), abrange 503 Municípios (e parte do Distrito Federal) e sete Unidades da Federação: Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Goiás.

A dimensão territorial da bacia do Rio São Francisco levou a sua divisão por regiões, para fins de planejamento e para facilitar a localização das suas muitas e diversas populações e ambiências naturais.

A divisão se fez de acordo com o sentido do curso do rio e com a variação de altitudes. Assim, na parte inicial, tomando como referência a Serra da Canastra onde o rio nasce, ganhou a denominação de Alto São Francisco. Escoando no sentido sul-norte, no trecho seguinte o rio atravessa todo o oeste da Bahia, até o ponto onde se formou o lago represado de Sobradinho - nessa região, a bacia é denominada Médio São Francisco. Em

seguida, o rio inflexiona o seu curso para leste até alcançar o limite com Alagoas – onde é denominado Sub Médio São Francisco. Por fim, o rio segue na direção leste, formando a segunda divisa natural, dessa vez entre os estados de Alagoas e Sergipe. Esta região é denominada Baixo São Francisco (PROGRAMA DE REVITALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO, 2012) e nela que ocorre o desague do Rio São Francisco no Mar (Figura 1).

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, contendo as principais usinas hidroelétricas (UHE), estações pluviométricas e fluviométricas.



Fonte: Medeiros *et al.* (2011).

De acordo com o Programa de Revitalização da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (2012), a temperatura média anual na região do Baixo Rio São Francisco é de 25°C, a evaporação média é de 1500 mm anuais, e a precipitação anual varia de 500 a 1300 mm. Nessa região acontece também uma nítida mudança na distribuição das chuvas que, nas proximidades do oceano, se distribuem por todo o ano, embora mais concentradas no outono e inverno, enquanto que, no interior os meses chuvosos são os de verão. O período de chuvas nessa região ocorre de março a setembro, ou seja, no inverno, enquanto que no restante da bacia as chuvas ocorrem no verão.

De acordo com Oliveira (2009), o padrão de ventos estabelecido na costa nordeste do litoral brasileiro está relacionado à migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e à Zona de Divergência (ZD) dos ventos alísios. A ZCIT é o resultado da convergência dos ventos alísios, que provêm das altas pressões subtropicais dos dois hemisférios, para a região equatorial das baixas pressões. Em julho a ZCIT atinge a posição mais ao norte, cerca de 10° N, e janeiro migra mais para o sul. Os ventos alísios que alcançam a costa leste/nordeste do Brasil procedem de duas direções principais: E-SE (alísios) e NE (alísios de retorno).

O regime de maré na região é considerado semi-diurno e varia entre micro e meso-maré. A máxima altura de maré observada é de 2,6 m, em condições de maré de sizígia equinocial (BITTENCOURT *et al.*, 2007). A direção predominante da corrente ao longo da costa é de NE para SO (COLEMAN & WRIGHT, 1972; DOMINGUEZ, 1996).

Com 98% da bacia controlada por barragens, o Rio São Francisco foi drasticamente alterado em função da série de barragens instalada em seu leito, reduzindo o potencial de transporte de matéria e o padrão de sazonalidade de descarga fluvial (OLIVEIRA, 2009). Segundo Knoppers *et al* (2006), a redução da vazão média anual é de 35% ao longo das últimas três décadas do século XX, com danos consideráveis no potencial cíclico do rio no seu baixo curso. No período pré construção das barragens (1938-1973), a vazão média era de $3010 \pm 50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, oscilando entre 800 a $8000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (com picos da ordem de $15.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) entre a estação seca e chuvosa, respectivamente (OLIVEIRA, 2009). A partir de 1994, a vazão média anual encontra-se normalizada em $1760 \pm 235 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (SANTOS, 2007 apud OLIVEIRA, 2009, p. 50).

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar os principais processos físicos controladores da dispersão da pluma do rio São Francisco.

2.2 Específicos

- Avaliar se diferentes valores de vazão (e.g. 1.000 e 10.000 m³/s) alteram a extensão da pluma costeira;
- Avaliar o grau de impacto das barragens (i.e. se de fato é negativo) na extensão da pluma;
- Avaliar se o modelo Delft3D foi eficiente na modelagem proposta.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Delft3D

O Delft3D, desenvolvido pela *WjDelft Hydraulics* em parceria com a *Delft University of Technology*, é um avançado sistema de modelos numéricos 2D/3D que funciona de uma forma multidisciplinar, no qual o modelo principal possui módulos de simulações de fluxos, ondas, transporte de sedimentos, qualidade da água, morfodinâmica entre outros. Estes módulos trabalham ao redor de uma mesma interface interagindo entre si através de “arquivos de comunicação”. Os resultados gerados podem prontamente ser utilizados dentro do próprio programa.

Segundo Deltares (2013), o Delft3D-FLOW é um dos módulos do Delft3D, e corresponde a um programa de simulações hidrodinâmicas multidimensionais (2D/3D) que pode ser utilizado para previsões de fluxos sobre a plataforma continental, áreas costeiras, estuários, lagoas e rios. De acordo com a Coastal Planning & Engineering do Brasil (2010), o Delft3D-FLOW resolve um sistema de equações de águas rasas em modo bidimensional (ou integrado na vertical) e tridimensional. O sistema de equações consiste nas equações horizontais de movimento (*momentum*), na equação de continuidade, equações de difusão-adevcção tratando concentrações de sedimento em suspensão (*suspended transport*) para constituintes conservativos, uma equação separada para transporte de sedimentos de fundo (*bed-load transport*) além de um modelo de fechamento turbulento. A equação vertical de *momentum* é reduzida à relação de pressão hidrostática e as acelerações verticais são assumidas como sendo pequenas em relação à aceleração da gravidade. Isso faz com que o Delft3D-FLOW seja adequado para a predição de fluxos em regiões rasas, áreas costeiras, estuário, lagos, rios e lagoas.

Falconer (1996) afirma que este conjunto de equações é resolvido através da discretização da região de interesse em uma malha retangular retilínea ou curvilínea utilizando o método de diferenças finitas. Este método aproxima as equações por séries de Taylor e as resolve para cada ponto da grade e para cada passo de tempo, ou seja, cada célula computacional que compõem a grade contém um ponto de nível d'água no centro da célula e de profundidade nos vórtices, e pontos para velocidades nas direções x e y na face das células.

3.2 Delft Dashboard

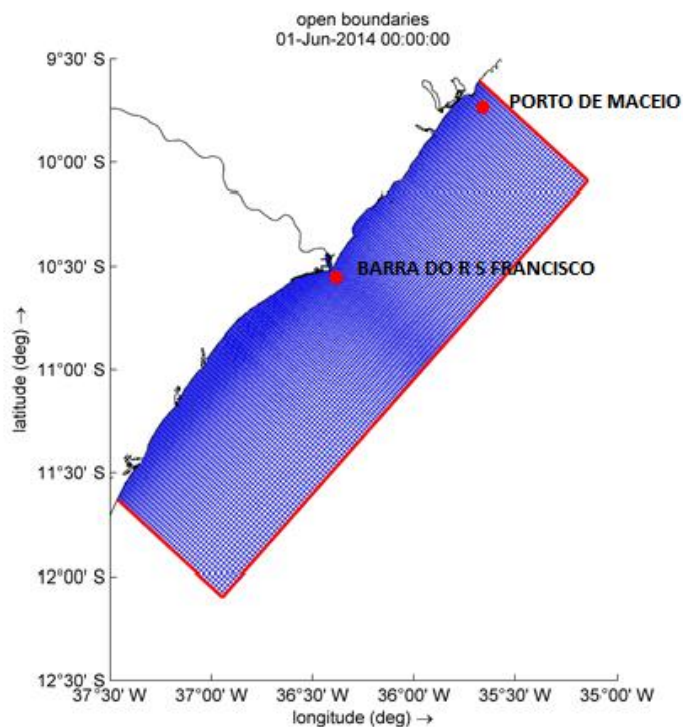
O Delft Dashboard é um programa cuja interface gráfica é baseada no software Matlab e tem o objetivo de auxiliar na criação de modelos numéricos ou na configuração de modelos pré-existentes. O Delft Dashboard está integrado ao pacote de modelos Delft3D, que permite simulações de hidrodinâmica, ondas, morfodinâmica e qualidade da água (DELFT3D, 2013). No Delft Dashboard foram obtidos para este trabalho os dados batimétricos, os contornos, as condições de contorno, os pontos de observação e a grade.

3.3 Grade

As grades numéricas determinam os limites e delimitam as células de cálculo do modelo. As propriedades e características variam de acordo com o objetivo proposto, tipo de modelagem aplicada e com a área de estudo (COASTAL PLANNING & ENGINEERING DO BRASIL, 2010). Além disso, as equações hidrodinâmicas do modelo podem ser resolvidas em grades cartesianas retangulares, ortogonais curvilíneas ou grades esféricas (LESSER, 2004). Em modelagens hidrodinâmicas de áreas costeiras, costuma-se utilizar grades curvilíneas, que permitem o uso de maiores resoluções nas áreas de interesse da grade e menores resoluções nas áreas mais afastadas (DYKES *et al*, 2013).

Para o presente trabalho, foi criada uma grade retangular no programa Delft Dashboard que, posteriormente, foi transformada em uma grade curvilínea utilizando o programa RGFGRID, um dos módulos do Delft3D, representada pela Figura 2. O domínio da área modelada compreende o litoral entre os estados de Sergipe e Alagoas, estendendo-se das coordenadas -9.9575 S, -35.674 W a -11.6335 S, -37.471 W, ao longo da linha de costa, com aproximadamente 317 km de extensão e 72,5 km de largura, da foz do rio até o limite sudeste da grade. A área modelada possui 25.552 km² de área total, e possui 169 células no sentido norte-sul e 80 no sentido leste-oeste, totalizando 13.520 elementos.

Figura 2 – Grade utilizada na modelagem para a dispersão do Rio São Francisco contendo os pontos de observação.



Fonte: o autor.

3.4 Banco de dados

A seguir, serão descritos os métodos utilizados para a obtenção dos dados utilizados na configuração dos cenários utilizados neste trabalho.

3.4.1 Batimetria

Os dados de batimetria da região foram obtidos através do Delft Dashboard, onde é possível ter acesso ao banco de dados batimétricos do GEBCO 08 (*General Bathymetric Chart of the Oceans*), uma organização sem fins lucrativos que opera sob o comando do IOC (*International Oceanographic Commission*) e do IHO (*International Hydrographic Organization*). Os dados fornecidos pelo GEBCO 08 são de baixa resolução para regiões costeiras e estuarinas, no entanto os dados foram comparados com as cartas batimétricas locais e considerados adequados para o objetivo deste trabalho.

3.4.2 Maré

Utilizou-se o programa Delft Dashboard para gerar os forçantes de maré do modelo. As condições de maré no Delft Dashboard são determinadas pelo modelo global de maré TPXO 7.2 e as saídas do modelo foram comparadas com a base de dados do IHO (*International Hydrographic Organization*), de duas estações localizada na foz do Rio São Francisco, para fins de validação. As marés são introduzidas no modelo através dos contornos laterais livres utilizando a condição de contorno de nível do mar disponível no modelo Delft3D. Para todos os cenários idealizados, optou-se por criar simulações de aproximadamente 30 dias para que se observasse um ciclo completo de marés, com as duas marés de sizígia e de quadratura. Os pontos de observação escolhidos foram os pontos de Barra do Rio São Francisco e Porto de Maceió (Figura 2).

3.4.3 Vazão

Para o presente trabalho, foram obtidos dados de vazão disponibilizados *online* pela Agência Nacional de Águas (ANA) para a estação de Propriá (10°12'50"S e 36°49'26"W), localizada a 80 km da foz do rio e à jusante das barragens. Os valores de vazão utilizados eram diário e correspondem ao período de 2011 a 2014, a partir dos quais foram criadas médias para cada mês com o objetivo de identificar os meses com maiores e menores vazões. Foi considerada também a inclusão de um valor de vazão correspondente ao período pré construção das barragens, obtido de Santos (2007). Os valores de vazão utilizados nos cenários pós-barragens são de 1408 m³/s, correspondente ao mês de junho (período seco), e 2340 m³/s, correspondente ao mês de dezembro (período chuvoso), no setor do Baixo Rio São Francisco. Para os cenários pré-barragens, utilizou-se o valor de 15000 m³/s, correspondente ao pico de vazão histórico.

3.4.4 Vento

Para os cenários onde o vento era um dos forçantes, foram utilizados dados do Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco (2003), que caracterizaram os ventos da região do Baixo São Francisco. Segundo os autores, os ventos na região costeira predominam da direção nordeste, entre outubro e março, e da direção sudeste entre abril e setembro, com velocidade média de 2 m/s. Deste modo,

durante as configurações dos cenários para este trabalho, foram utilizados ventos vindos de NE com velocidade de 2 m/s para representar um padrão de ventos característico do verão, enquanto que o padrão de ventos de inverno foi representado por ventos vindos de SE com velocidade de 2 m/s. É importante ressaltar que, durante todo o tempo de simulação dos cenários, estes dados foram considerados constantes.

3.5 Implementação do modelo

Para resolver o sistema de equações do Delft3D-FLOW, é necessário determinar as condições de contorno laterais e de fundo. Ao longo dos contornos laterais fechados, as componentes de velocidade perpendiculares ao contorno são consideradas zero (condição *free-slip*), enquanto que em contornos laterais abertos, pelo menos uma das condições de contorno a seguir devem ser definidas: nível d'água, velocidade na direção normal ao contorno, descarga ou a invariante de Riemann linearizada (LESSER, 2004).

Deste modo, durante a criação da grade para a área de estudo, foram utilizados dois tipos de contornos laterais: três contornos abertos (Norte, Leste e Sul) e um contorno fechado representado pela descarga do rio São Francisco (Oeste). A salinidade imposta nos contornos abertos e usada como condição inicial foi de 35 com distribuição uniforme. Enquanto que na descarga do rio, a salinidade foi considerada 0 pois, assim, valores diferentes dos que foram definidos para as condições iniciais pudessem ser facilmente observados.

O tipo de atrito de fundo utilizado nas configurações do modelo foi o do tipo Manning, cujos valores dos coeficientes eram de 0.02 nas componentes U e V. Decidiu-se também por não adicionar um fluxo de calor à superfície do rio e a temperatura da água foi mantida a 25°C em todos os cenários, durante todo o tempo de simulação. Foram utilizados 10 níveis verticais cuja espessura das camadas foi dividida igualmente em 10%, para fins de simplificação dos cálculos. A parametrização a mistura vertical foi a *Generic Length Scale* (GLS) do tipo K-epsilon (WARNER *et al.*, 2005).

Para fins de validação dos resultados gerados pelo modelo, foram criados dois pontos de observação na área modelada, apresentados na Figura 2. Os pontos foram denominados Barra do Rio São Francisco cuja localização é -10.524 S, -36.682 W, e Porto de Maceió, localizado em -9.694 S, -35.721 W.

Devido a proximidade entre os pontos de descarga dentro da área de estudo, todos os pontos estão localizados nas coordenadas -10.438 S, -36.428 W. Os valores de descarga deste ponto foram configurados no modelo de forma que fosse possível representar as

variações de vazão entre o período seco e chuvoso. Deste modo, para os cenários simulados que representavam o período seco, foram criados cinco pontos de descarga e a cada um deles foi associado um valor de 281 m³/s, totalizando aproximadamente 1408 m³/s. Para as simulações do período chuvoso, foram utilizados os mesmos cinco pontos de descarga, com valores de 468 m³/s, totalizando 2340 m³/s de vazão. A salinidade escolhida para os pontos de descarga foi um valor idealizado de 0, que se manteve constante durante todo o tempo de simulação.

3.6 Cenários

Com o intuito de simular a dispersão da pluma do Rio São Francisco e visando o cumprimento dos objetivos propostos no item 3 deste trabalho, foram criados seis cenários distintos, com diferentes valores de descarga fluvial e diferentes valores de velocidade e direção dos ventos, sintetizados na Tabela 1. Todos os cenários são forçados por marés.

Tabela 1 – Cenários idealizados com os respectivos valores de vazão e ventos.

Cenários	Vazão	Vento (Direção)	Vento (Velocidade)
#1 (pós-barragem)	1.408 m ³ /s	-	-
#2 (pós-barragem)	2.340 m ³ /s	-	-
#3 (pós-barragem)	1.408 m ³ /s	SE	2 m/s
#4 (pós-barragem)	2.340 m ³ /s	NE	2 m/s
#5 (pré-barragem)	15.000 m ³ /s	SE	2 m/s
#6 (pré-barragem)	15.000 m ³ /s	NE	2 m/s

Fonte: o autor.

3.6.1 Cenário #1: Descarga Fluvial de Verão + Regime de Marés (Qv +RM)

Neste cenário, o modelo simulou 30 dias de descarga fluvial referentes ao mês de junho, sobre a plataforma continental, em uma situação idealizada com vazão média de 1408 m³/s, correspondente ao período de estiagem na região, e ausência de ventos durante o período simulado. Este cenário visa determinar a dispersão da pluma de uma situação de estiagem sob a influência apenas das marés.

3.6.2 Cenário #2: Descarga Fluvial de Inverno + Regime de Marés (Qi + RM)

No segundo cenário, o modelo simulou 31 dias de descarga sobre a plataforma, referentes ao mês de dezembro, sob uma vazão média de 2340 m³/s que corresponde ao período chuvoso da região do Baixo São Francisco. Novamente, o forçante vento não foi utilizado. Este cenário visa determinar a dispersão da pluma sob vazão correspondente ao período chuvoso e com influência apenas das marés.

4.6.3 Cenário #3: Descarga Fluvial de Verão + Regime de Marés + Ventos

O terceiro cenário se difere dos dois primeiros cenários pois nele, foi incluído a forçante vento, com 2 m/s oriundo de SE, constante durante todo o tempo de simulação. A vazão média do rio neste cenário foi de 1408 m³/s . Este é o primeiro cenário contendo os principais forçantes observados em situações reais durante o período seco.

4.6.4 Cenário #4: Descarga Fluvial de Inverno + Regime de Marés + Ventos

O quarto cenário se assemelha ao cenário anterior no que se refere aos forçantes utilizados, com o objetivo de tornar as simulações mais próximas de uma situação real. O modelo simulou 31 dias de descarga do rio referentes ao mês de dezembro, com vento oriundo de NE e velocidade constante de 2 m/s. A vazão correspondente ao período chuvoso foi de 2340 m³/s. Este cenário visa demonstrar a influência do vento sobre a dispersão da pluma durante o período chuvoso.

4.6.5 Cenário #5: Descarga Fluvial Máxima + Regime de Marés + Ventos (Verão)

Para o quinto cenário, o modelo simulou 30 dias de descarga sobre a plataforma sob uma vazão de 15000 m³/s, que corresponde à vazão máxima histórica registrada anteriormente à construção das principais barragens. Este cenário tem como objetivo determinar a importância dos ventos sobre a dispersão da pluma no período anterior à construção das barragens.

4.6.6 Cenário #6: Descarga Fluvial Máxima + Regime de Marés + Ventos (Inverno)

Para o sexto e último cenário, utilizou-se o mesmo valor de vazão do cenário anterior, porém com um padrão de ventos característico do período de inverno durante toda a simulação. Com a construção das barragens ao longo do baixo São Francisco no último século, e a normalização da vazão, a possibilidade de termos picos de vazão da ordem de

15000 m³/s atualmente é muito baixa. Por este motivo, a criação dos cenários #5 e #6 objetiva comparar a extensão da pluma sobre a plataforma em situações pré e pós barragens. Este cenário tem o intuito de mostrar como a pluma do rio se comporta sob a influência de um vento de SE característico de inverno.

3.7 Avaliação dos Forçantes

Para identificar a real importância da maré, dos ventos e da descarga fluvial na dispersão do rio, foram criados mapas de dispersão horizontal para todos os cenários tendo como referência, o gradiente de salinidade entre o estuário e o mar aberto, uma vez que, em alguns cenários, o vento se mostrou importante na dispersão da pluma enquanto que em outros, não. Para validar os mapas de dispersão, estes foram comparadas à imagens do satélite Landsat 5, obtidas de Oliveira (2009) Foram também criados mapas de vetores para alguns cenários e seções verticais da pluma obtidas a partir do ponto -10.519 S, -36.421 W.

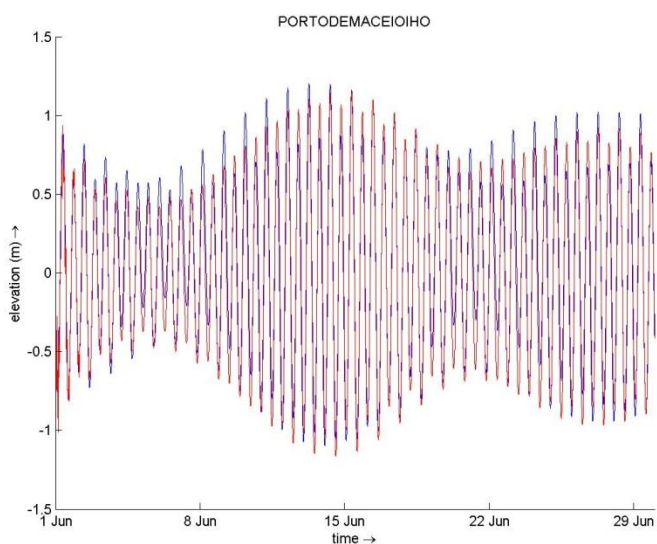
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Validação

Para a validação da maré no modelo, foram utilizados dados de nível do mar obtidos do banco de dados IHO. O resultados são apresentados nas figuras abaixo, nas quais as elevações de maré produzidas pelas simulações do modelo foram sobrepostas aos dados do IHO (*International Hydrographic Organization*) para os pontos de Porto de Maceió e Barra do Rio São Francisco.

Na Figura 3, são apresentados os resultados para o Porto de Maceió. Percebe-se que os resultados do modelo, em vermelho, são muito similares aos dos dados dos IHO ao longo dos 30 dias de simulação. Ao longo do período de modelagem, foram observadas subestimações durante situações de maré alta e superestimações durante marés baixas em geral menores que 10 cm. Esta diferenças são menores que 10 % da amplitude local.

Figura 3 – Nível do mar obtidas pelo modelo e dados do IHO para o Porto de Maceió. A linha em vermelho representa a saída do modelo enquanto a linha azul representa as amplitudes que foram obtidas a partir do IHO.

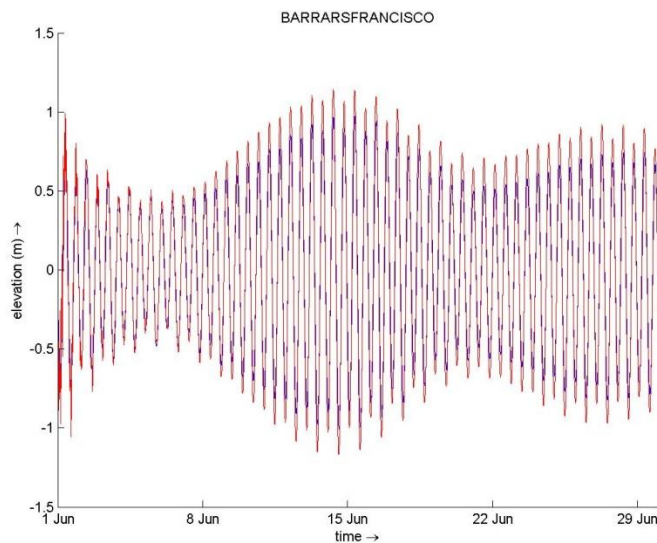


Fonte: o autor.

Assim como para a região do Porto de Maceió, também foi feita uma comparação entre a saída do modelo de maré e os dados do IHO para a região da Barra do Rio São Francisco e os resultados são apresentados na Figura 4.

Da mesma forma que na situação anterior, há uma boa consistência entre a variação do nível do mar prevista pelo modelo e a observada pelo IHO, embora ainda se observem algumas diferenças no nível do mar. Percebe-se que as duas séries estão em fase. No porto de Maceio, o modelo super-estima os dados de nível do mar em aproximadamente 15 cm.

Figura 4 – Nível do mar obtidas através do modelo e dados do IHO Barra do RSF. A linha em vermelho representa a saída do modelo para as amplitudes de maré enquanto a linha azul representa as amplitudes que foram obtidas a partir do IHO.



Fonte: o autor.

Apesar das previsões de maré produzidas pelo modelo terem sido validadas utilizando o banco de dados globais do IHO, é importante ressaltar que este banco de dados pode conter falhas em algumas estações de marégrafos. Simões *et al.* (2014) observaram maiores valores de amplitude nos harmônicos de maré obtidos com base nos dados de elevação fornecidos pelo IBGE comparados aos harmônicos fornecidos pelo IHO para o Porto do Mucuripe, sugerindo que o banco de dados do IHO pode subestimar os valores reais de marés da costa brasileira.

É importante ressaltar, que não existem dados de correntes disponíveis para validação das simulações na área de estudo. Devido ao caráter idealizado das simulações nas quais o objetivo é compreender a resposta da pluma a variações dos diferentes forçantes, o problema da falta de dados de correntes para uma validação quantitativa dos resultados é minimizado.

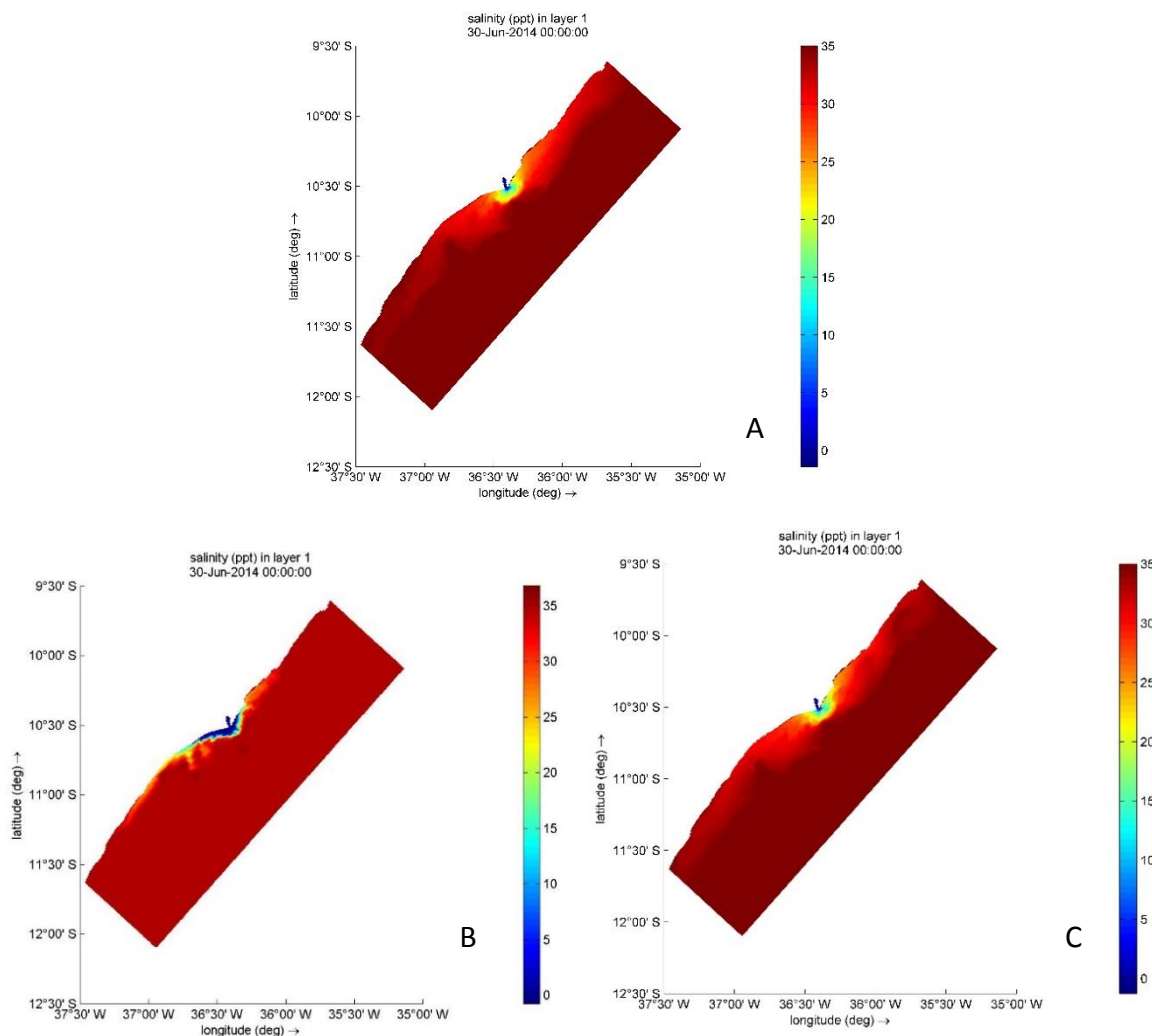
4.2 Análise dos Forçantes

4.2.1 Efeito da Maré e dos Ventos

Para analisar o efeito dos ventos e da maré sobre a dispersão da pluma do Rio São Francisco e determinar qual forçante foi o mais atuante na dispersão. Foram gerados três mapas de salinidade superficial para observar a dispersão horizontal da pluma (Figura 5). O primeiro mapa (Figura 5a) representa uma situação hipotética onde a vazão do rio foi de 1408 m³/s, correspondente ao período seco, e o forçante vento não foi utilizado. No segundo mapa, utilizou-se o mesmo valor de vazão com um vento constante de NE e velocidade de 2 m/s (Figura 5b). Na terceira situação, utilizou-se um vento vindo da direção SE a 2 m/s (Figura 5c). De maneira geral, podemos observar algumas diferenças quando comparamos o cenário correspondente ao período seco e sem ventos com os cenários com ventos de NE e de SE, e observa-se que o vento exerce maior influência na dispersão da pluma sobre a plataforma do que a maré.

Ao compararmos o primeiro cenário (Figura 5a), onde a maré foi o único forçante, com a situação representada pela Figura 5b onde, além da maré, foi incluído um vento de verão de 45° (NE), observamos que a pluma evolui e se propaga de forma paralela à linha de costa, seguindo a direção do vento, enquanto se estende por uma distância nitidamente maior quando a comparamos com o primeiro cenário. Em seguida, ao analisarmos o terceiro cenário (Figura 5c), onde o modelo foi forçado com um vento de inverno de 135° (SE) e com mesma velocidade do cenário anterior, observamos que a pluma se propagou ao longo da linha de costa por uma distância consideravelmente menor, ficando visivelmente mais retida ao estuário. Acredita-se que os diferentes padrões de dispersão observados nos mapas de dispersão da Figura 5b e 5c estão associados às mudanças na direção dos ventos e, conseqüentemente, ao transporte de Ekman que ocorre em direção à costa na situação de ventos verão e na direção offshore na situação de ventos de inverno.

Figura 5 – Mapas de dispersão horizontal da pluma do Rio São Francisco sob diferentes condições de vento e vazão de $1408 \text{ m}^3/\text{s}$. (a) Superior – O forçante vento não foi incluído. (b) Inferior à esquerda – Cenário com vento típico de verão. (c) Inferior à direita – Cenário com vento típico de inverno.



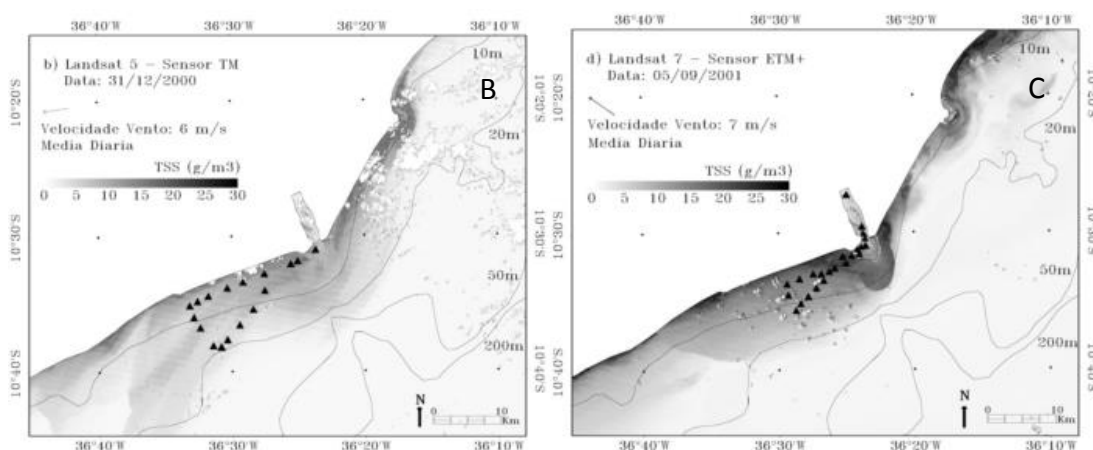
Fonte: o autor.

Oliveira (2009), ao estimar a quantidade total de sólidos em suspensão (TSS) na pluma do rio utilizando imagens do Landsat 5, observou quatro situações distintas com diferentes valores de vazão e direções do vento que representam, de forma simplificada, o panorama dos padrões de TSS encontrados na pluma de sedimentos e nutrientes que se estabelecem na foz do Rio São Francisco. Das imagens obtidas, duas se assemelham bastante aos resultados gerados neste trabalho (Figura 6). Na primeira (Figura 6b), obtida durante uma condição de normalidade onde a vazão do rio era de $1900 \text{ m}^3/\text{s}$ com um vento característico de verão vindo de NE a 10 m/s , paralelo à linha de costa, a pluma de sedimentos que deixa o rio está pouco confinada à região costeira e mais afastada na sentido *offshore*, padrão este

similar ao que foi observado nos resultados do modelo para o cenário representando o período seco com ventos de NE. Nas simulações deste trabalho, no entanto, a vazão era de $1408 \text{ m}^3/\text{s}$ e o vento, relativamente menos intenso, com valor de 2 m/s , fazendo com que o transporte de Ekman deslocasse a pluma à esquerda do vento a uma distância menor.

Já na segunda imagem obtida pelo autor (Figura 6d) durante o mês setembro, há uma menor vazão enquanto que o vento sopra de SE a 7 m/s , valor ainda superior ao utilizado nas simulações deste trabalho, porém com mesma direção. Comparando a imagem de satélite com o mapa de dispersão da pluma produzido pelo modelo (Figura 5c), observamos que, em ambas, há um confinamento da pluma sobre a plataforma interna adjacente ao estuário também explicado pelo descolamento da água à esquerda do vento causado pelo transporte de Ekman.

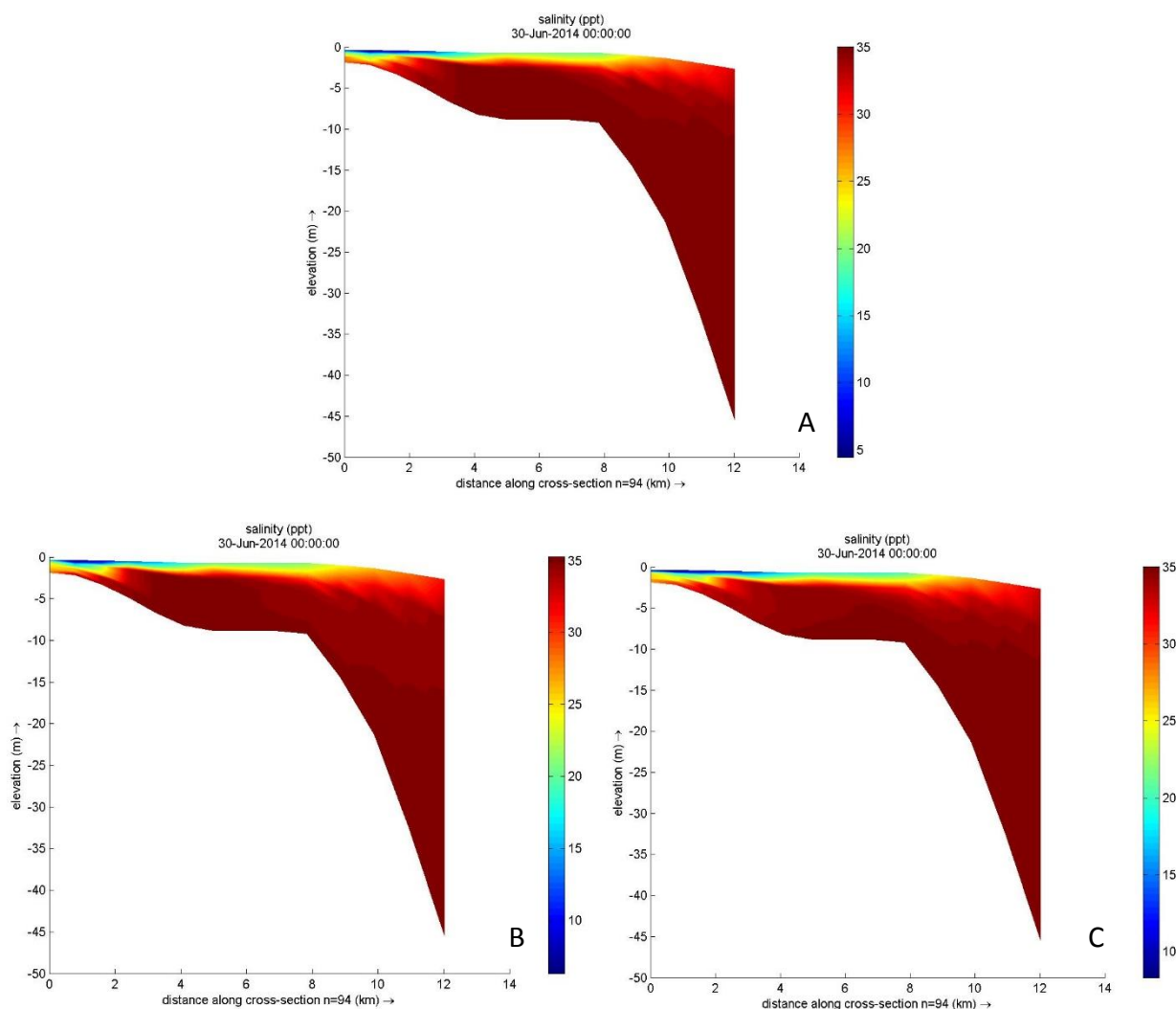
Figura 6 – Foz do Rio São Francisco. TSS (g/cm^3) estimado por meio de imagens do Landsat 5 (b, d).



Fonte: Oliveira (2009).

Ao analisar os perfis verticais (Figura 7) de seções feitas na desembocadura do rio durante as mesmas condições utilizadas para produzir os mapas de dispersão horizontal, observamos que a pluma é observada até profundidades próximas a 20 m. Como esperado é observado uma maior mistura vertical quando o vento está presente, que devido a constrição próxima a costa em eventos de mantém suas características de transporte nas situações com ventos de inverno e verão mesmo em camadas mais profundas e à distâncias mais afastadas do estuário.

Figura 7 – Perfis verticais de salinidade para as seguintes situações. (a) Superior – condição com marés e sem ventos. (b) Inferior à esquerda – condição com marés e vento de NE. (c) Inferior à direita – condição com marés e vento de SE.



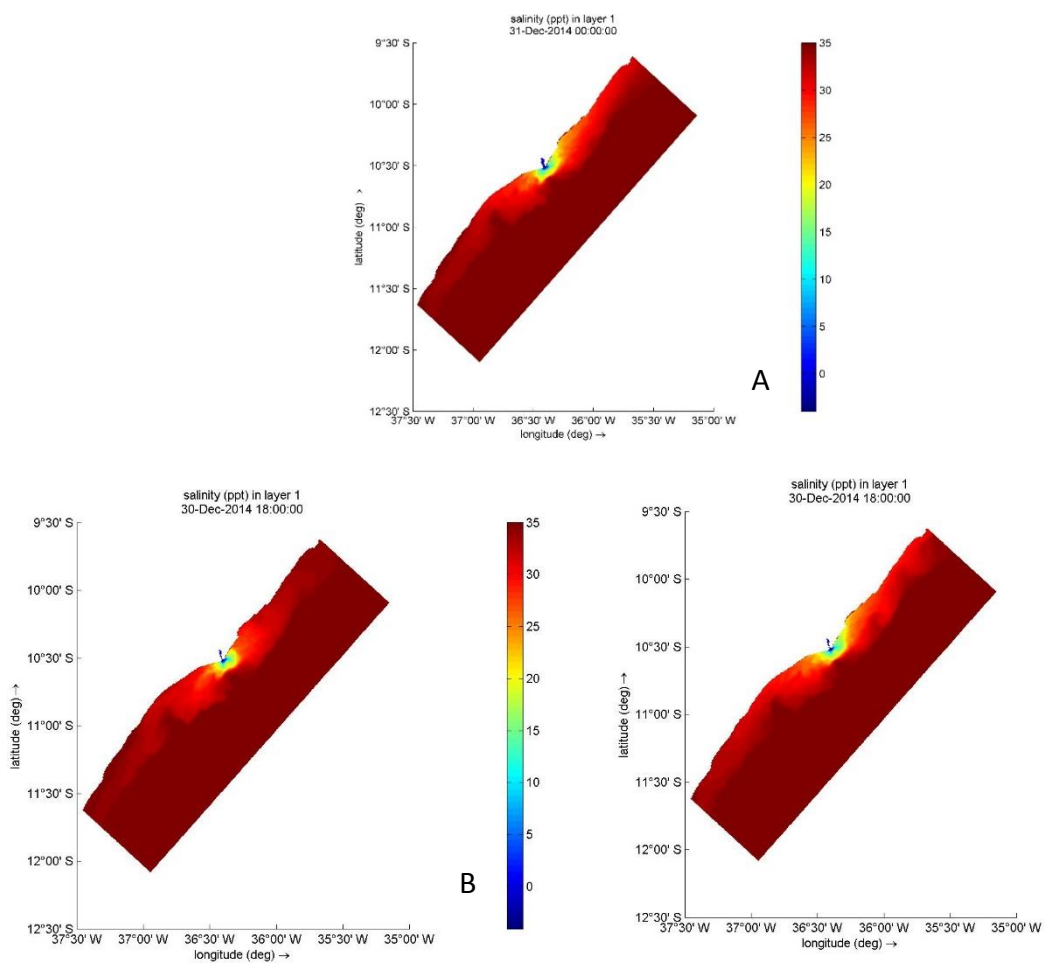
Fonte: o autor.

4.2.2 Efeito da Vazão

Para que a influência da vazão na dispersão do Rio São Francisco fosse avaliada, foram criados outros três cenários que correspondem ao período chuvoso na região e foram produzidos três mapas de salinidade superficial que mostram a dispersão horizontal da pluma (Figura 8). O primeiro cenário (Figura 8a) representa uma situação hipotética onde a vazão utilizada foi de 2340 m³/s durante todo o período de simulação e sem qualquer influência do vento. O segundo cenário (Figura 8b) foi simulado sob o mesmo valor de vazão, porém com um vento característico de verão vindo de NE a 2 m/s, enquanto que o terceiro cenário

representa uma situação onde a vazão era a mesma do cenário anterior e o vento, característico de inverno vindo de SE a 2 m/s (Figura 8c).

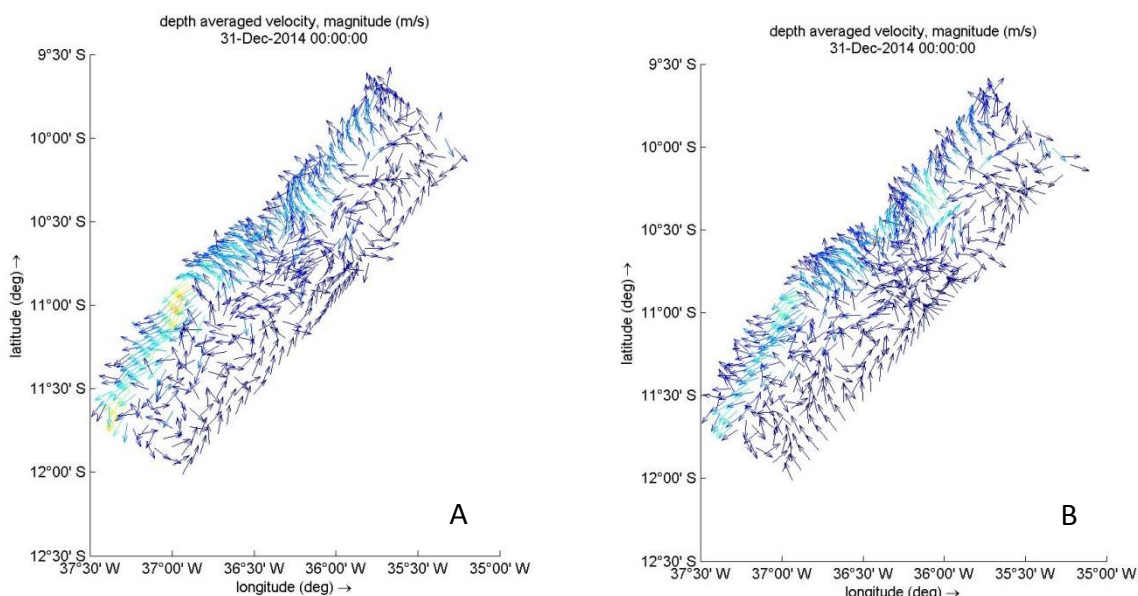
Figura 8 – Mapas de dispersão horizontal da pluma do Rio São Francisco sob diferentes condições de vento e vazão de $1408 \text{ m}^3/\text{s}$. (a) Superior – Cenário com maré sem o forçante vento. (b) Inferior à esquerda – Cenário com vento típico de verão. (c) Inferior à direita – Cenário com vento típico de inverno.



Fonte: o autor.

Observamos que o padrão de dispersão da pluma nos cenários onde foi introduzido o vento praticamente não se altera, exceto quando analisamos a Figura 9, que mostra a velocidade das correntes através de vetores. Observa-se na Figura 9a, representando uma situação com ventos de NE, que a corrente na direção SO é mais intensa que na Figura 9b, que representa um condição com ventos de SE.

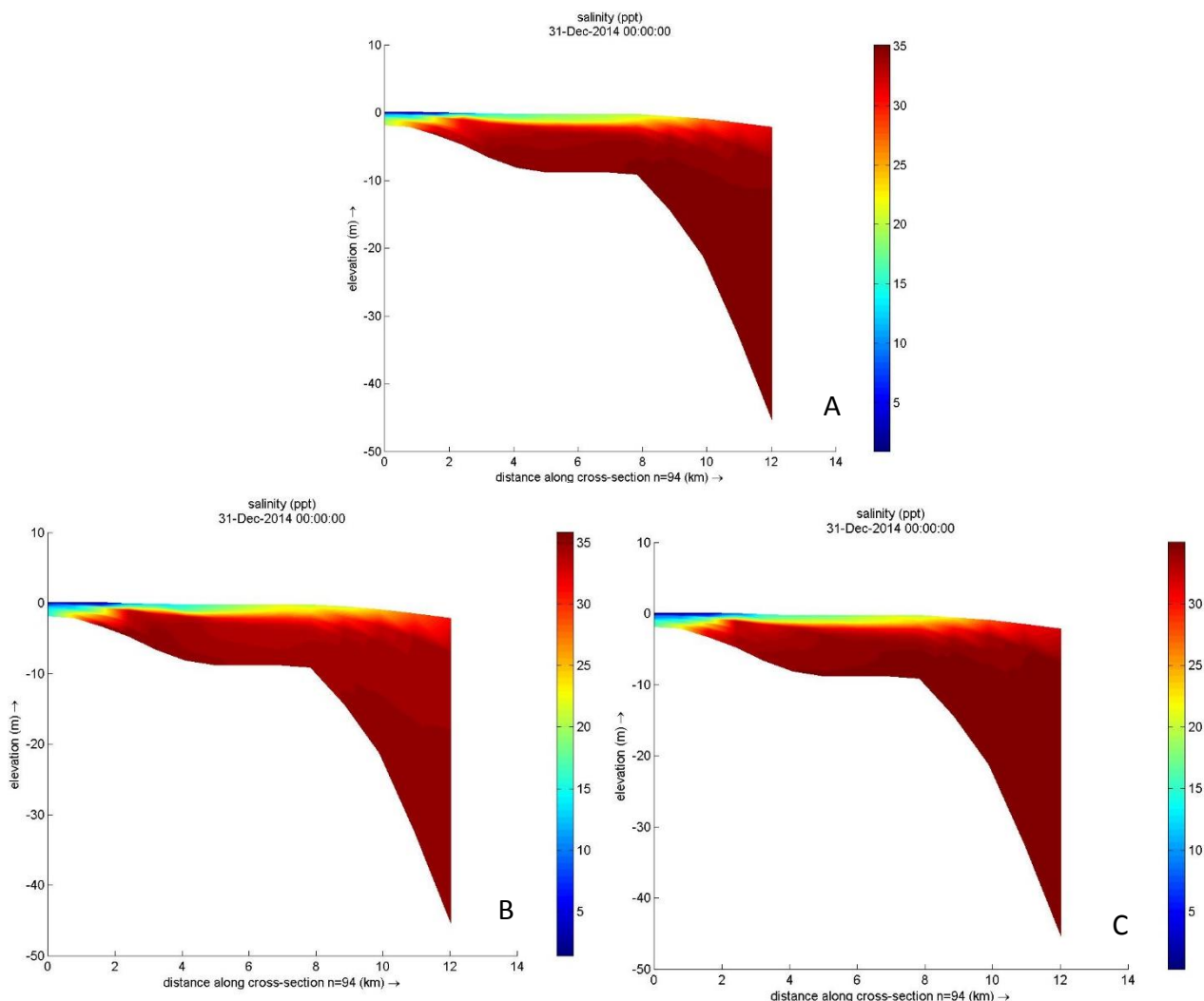
Figura 9 – Mapa de vetores representando a velocidade e direção das correntes. (a) Situação com marés e vento de NE. (b) Situação com marés e vento de SE.



Fonte: o autor.

Os resultados observados neste trabalho estão de acordo com o que foi descrito por Pimenta (2014), que ao estudar a dispersão da pluma do Rio da Prata usando o modelo POM, observou que quanto maior o volume de água que deságua sobre a plataforma, mais resistente será a pluma a processos de mistura, ou seja, o tempo para se observar a redução do efeito da salinidade causado por essa descarga será maior. Essa resistência da pluma faz com que ela seja transportada para regiões mais distantes da zona estuarina e resulte em uma maior dispersão. Através da interpretação gráfica dos mapas de dispersão horizontal e da Figura 10, que representa três perfis verticais correspondentes aos mapas da Figura 8, pode-se identificar o padrão de resistência da pluma à mistura gerada pelos ventos de verão e de inverno, com o efeito da pluma deslocado para regiões mais *offshore* quando se compara à situações onde a vazão do rio era mais baixa. O resultado observado neste estudo corrobora com os resultados obtidos por Pimenta (2014) para o comportamento do Rio da Prata em diferentes condições de vazão, já que o padrão percebido pela pluma do Rio São Francisco é bastante semelhante ao identificado por ele em seu trabalho.

Figura 10 – Seções verticais de salinidade feitas para os cenários representando o período chuvoso. (a) Superior - situação com marés e sem ventos. (b) Inferior à esquerda - situação com marés e vento vindo do quadrante NE. (c) Inferior à direita - situação com marés e vento vindo do quadrante SE.



Fonte: o autor.

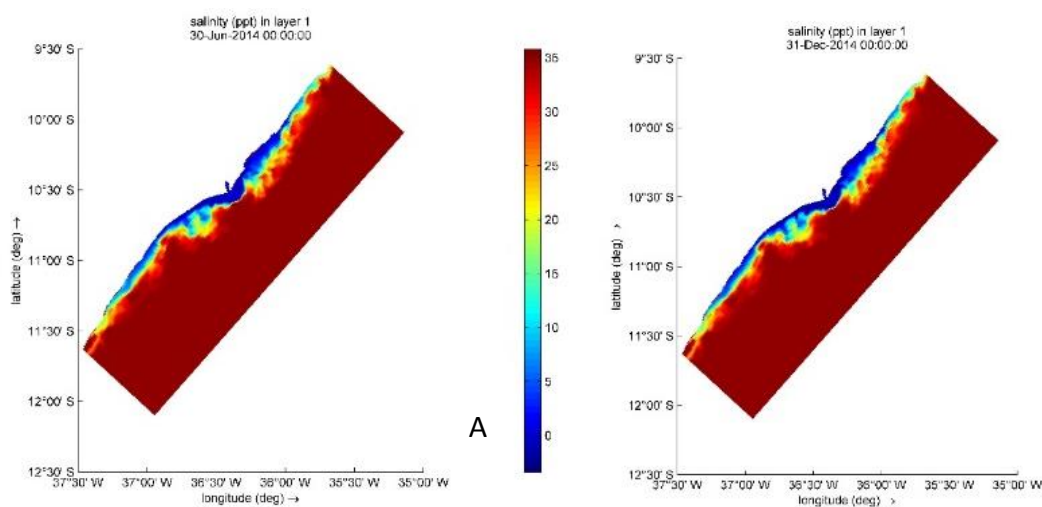
4.2.3 Impacto da Construção das Barragens

Barragens retêm e transformam o material em suspensão de fluxos de água e modificam a sua variabilidade natural. Segundo Oliveira (2009), vazões médias mensais próximas a $8000 \text{ m}^3/\text{s}$ nas estações de verão e outono (dezembro a maio) eram eventos frequentes que marcavam a sazonalidade natural do Rio São Francisco durante o período de 1940 a 1986, anterior à construção das barragens. Após esse período, vazões médias mensais próximas a $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ eram associadas a condições atípicas para o regime de vazão regularizada que vigora atualmente. Ainda segundo Oliveira (2009), os anos de 1946, 1949,

1979, 1992, 2004 e 2007 apresentam, nas estações de verão e/ou outono, vazões médias mensais muito maiores quando comparadas aos anos anteriores a estes eventos. Em particular, os eventos de alta vazão de 1979 e 1992 atingiram valores de 14.000 m³/s e 10.000 m³/s, respectivamente, registradas no município de Propriá (80 km da foz do rio).

Deste modo, foram criados dois cenários adicionais com o objetivo de demonstrar o impacto causado pelas barragens no padrão de dispersão da pluma de sedimentos do rio (Figura 11). Para ambos os cenários simulados, foi utilizado um valor de vazão de 15.000 m³/s, representando a maior vazão já registrada na região. Para melhor comparar a extensão da pluma nestes cenários com as plumas geradas em cenários de baixa vazão (pós período de construção das barragens), utilizou-se as mesmas situações de ventos de NE a 2 m/s no primeiro cenário (condição de verão) (Figura 11a), e de ventos de SE a 2 m/s (Figura 11b) durante o segundo cenário (condição de inverno).

Figura 11 – Mapas de dispersão horizontal da pluma do Rio São Francisco sob vazão histórica de 15000 m³/s. (a) Esquerda – vazão máxima sob vento de NE a 2 m/s. (b) vazão máxima sob vento de SE a 2 m/s.



Fonte: o autor.

Ao comparar os resultados dos valores extremos de vazão pré-barragem (Figura 11) com os valores atuais pós barragens (Figuras 7b e 7c), podemos concluir, primeiramente, que nos cenários com vazão máxima, a pluma se estende sobre a plataforma por uma distância consideravelmente maior que as plumas pré-barragem, tanto na direção paralela à costa como na direção perpendicular. Observa-se ainda que sobre a influência destas grandes vazões não existem diferenças significativas nos cenários de verão (ventos NE) e de inverno (ventos SE).

Picos de vazão como este (porém de menor intensidade) eram frequentes antes do represamento das águas do Rio São Francisco e eram responsáveis por carrear um excedente de matéria orgânica e inorgânica do continente que, em seguida, era transportada pelo fluxo do rio para a plataforma continental.

Segundo Paiva (2015), é provável que a erosão observada na margem oeste (Sergipe) do estuário seja resultado direto da retenção de sedimentos pelas barragens. Bittencourt et al. (2007) também sugeriram que a redução permanente do aporte continental ocasionará aumento da erosão da margem oeste e deflexão progressiva da foz do estuário na mesma direção.

Os resultados das simulações sugerem que a área de influência da pluma em condições atuais também é significativamente menor do que as condições pré-barragem. Este represamento tende a gerar um impacto direto na cadeia alimentar e no balanço sedimentar da região costeira, fato este ainda não reportado na literatura.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho, simulou-se de forma idealizada a dispersão da pluma do Rio São Francisco sobre a ação de diferentes forçantes. As simulações reproduziram de forma adequada o padrão de marés da região e de forma qualitativa os padrões de dispersão da pluma.

Comparando-se os efeitos das marés, ventos e variações de vazão, a última foi o principal forçante responsável pela maior extensão da pluma do Rio São Francisco. O regime de ventos na região atua como o principal forçante controlador da direção de propagação da pluma sobre baixas vazões. Sobre altas vazões a direção do vento não modifica significativamente a propagação da pluma. Como esperado os ventos geram uma maior mistura vertical da pluma.

As barragens construídas ao longo das últimas décadas foram responsáveis por uma redução considerável do aporte de água do rio para o oceano, gerando conseqüentemente, uma diminuição na extensão da pluma. Esta diminuição gera um menor aporte de sedimentos e nutrientes do continente para a plataforma continental adjacente ao rio.

O presente trabalho apresenta a aplicabilidade e a importância do uso de modelos numéricos na análise dos impactos de obras de infra-estrutura. Em trabalhos futuros, propõem-se se utilizar dados de batimetria com maior resolução para a região do estuário do Rio São Francisco e que o processo de calibração das simulações seja aperfeiçoado através do uso de imagens de satélite e de dados de correntes *in situ*.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA); **Sistema de Monitoramento Hidrológico**. Disponível em: <<http://mapas-hidro.ana.gov.br/Usuario/mapa.aspx>>. Acesso em: 29 fev. 2016.
- BITTENCOURT, A.C.D.S.P.; DOMINGUEZ, J.M.L.; FONTES, L.C.S.; SOUSA, D.L.; SILVA, I.R.; DA SILVA, F.R. **Wave Refraction, River Damming, and Episodes of Severe Shoreline Erosion: The São Francisco River Mouth, Northeastern Brazil**. *Journal of Coastal Research*, pp.930- 938, 2007.
- CADERNO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos, 2006. 148p.
- CARDNO Pty Ltd. **Port Hedland South-West Creek Dredge Plume Modelling**. Final Report Version 4. Subiaco (Austrália), 2010. 41 p.
- COASTAL PLANNING & ENGINEERING DO BRASIL. **Modelagem Numérica dos Processos de Transporte de Sedimentos e Mudanças Morfológicas como Ferramenta para a Estimativa da Taxa de Sedimentação do Canal de Acesso aos Portos de Paraguá e Antonina**. Florianópolis, SC, 2010. 62 p.
- COLEMAN, J.M. & WRIGHT, L.D. **Delta morphology in relation to the discharge/wave power climate**. In: Anais XXVI Congresso Brasileiro de Geologia (Belém, Brazil), pp.145–155, 1972.
- DAGG, M., BENNER, R., LOHRENZ, S., LAWRENCE, D.; **Transformation of dissolved and particulate materials on continental shelves influenced by large rivers: plume processes**. *Continental Shelf Research*, v.24, p. 833-858, 2004.
- DELTARES, Manual do Usuário Delft3D, v. 3.15.26466, Holanda, 2013.
- DOMINGUEZ, J.M.L. The São Francisco strandplain: a paradigm for wave-dominated deltas? In: de Baptist, M. & Jacobs, P. (eds.), *Geology of Siliciclastic Shelf Seas*. London: Geological Society of London Special Publication, v.117, 1996. pp.217–231.
- DYKES, J. D., HSU, Y. L., KAIHATU, J. M.; **Application of Delft3D in the nearshore zone**. Fifth Conference on Coastal Atmospheric and Oceanic Prediction Processes. 2013, 5 p.
- ESTIGNOI, M. V., MAUAD, F. F.; **Uso de modelagem hidrodinâmica como ferramenta no suporte a definição de locais de parques aquícolas em reservatórios**. *XI Reunião Científica do Instituto de Pesca*. São Paulo, SP, 2013. 3 p.
- FALCONER, R.; LIN, B.; **Three-dimensional modelling of water quality in the Humber Estuary**. *Water Resources*, v. 31, n. 5, p. 1092-1102, 1996.
- HALIM, Y., **The impact of human alterations of the hydrological cycle on ocean margins**. In: MANTOURA, R. F. C., *Ocean Margin Processes in Global Change*, Dahlem

Workshop Reports: Physical, Chemical and Earth Sci. Res., Rept. 9. John Wiley & Sons, New York, 1991.

HOPKINSON, C. S. Jr., VALLINO, J. J., **The relationships among man's activities in watersheds and estuaries: a model of runoff effects on patterns of estuarine community metabolism.** *Estuaries*, v. 18, n. 4, p. 598-621, 1995.

KNOPPERS, B.; MEDEIROS, P.R.P.; SOUZA, W.F.L. de; JENNERJAHN, T. **The São Francisco estuary, Brazil.** In : *Handbook of Environmental Chemistry*, Vol.5, p. 51-70, 2006.

LAZURE, P.; JEGOU, A. **3D modelling of seasonal evolution of Loire and Gironde plumes on Biscay Bay continental shelf.** *Oceanologica Acta*. Plouzané, França. v. 21, n. 2. P. 165-177, 1998.

LESSER, G. R.; ROELVINK, J. A.; van KESTER, J. A. T. M.; STELLING, G. S. **Development and validation of a three-dimensional morphological model.** *Coastal Engineering*. Vol. 51. P. 883-915, 2004.

MARQUES, W.C., FERNANDES, E.H., MONTEIRO, I.O., MOLLER, O.O.; **Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume.** Brazil. *Continental Shelf Research* 29 (1), p. 556-571, 2009.

MEDEIROS, P.R.P.; **Aporte Fluvial, Transformação e Dispersão do Material Biogênico no Estuário do Rio São Francisco, Após a Construção da Usina Hidroelétrica do Xingo (AL/SE).** Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências. Universidade Federal Fluminense, 145p., 2003.

MEDEIROS, P.R.P.; KNOPPERS, B.A.; SANTOS JUNIOR, R.C.; SOUZA, W.F.L.; **Aporte fluvial e dispersão de matéria particulada em suspensão na zona costeira do Rio São Francisco (SE/AL).** *Geochimica Brasiliensis*, v.21, n.2, p.209-228, 2007.

MEDEIROS, P. R. P., KNOPPERS, B., SOUZA, W. F. L., OLIVEIRA, E. N.; **Aporte de material em suspensão no Baixo Rio São Francisco (SE/AL), em diferentes condições hidrológicas.** *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, Itajaí, v. 5, n. 1, p. 42-53, 2011.

MILLER, R. L.; MCKEE B. A., **Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters.** *Remote Sensing of Environment*, 93, p. 259-266, 2004.

OLIVEIRA, Eduardo Negri de. **Impacto de barragens sobre a dispersão de matéria e a sustentabilidade da pluma costeira do rio São Francisco (AL/SE): análise espacial e temporal por sensoriamento remoto.** 2015. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Química, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2009.

PAIVA, Bárbara Pereira. **Variabilidade espaço-temporal da estrutura de salinidade e de correntes em um estuário altamente estratificado.** 2015. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-

graduação em Oceanografia, Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

PIMENTA, F. M.; KIRWAN Jr. A. D. **The response of large outflows to windforcings.** *Continental Shelf Research*, v. 89, p. 24-37, 2014.

PINHEIRO, Marcus Vinicius Alves. **Principais forçantes da evolução e dispersão da pluma do Rio Doce - ES - Brasil.** 2014. 44 f. Monografia - Curso de Bacharelado em Oceanografia, Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

POLETTO, F. M., HORITA, C. O., BLENINGER, T., 20., 2013, Bento Gonçalves. **Modelagem hidrodinâmica da área costeira sob influência do Rio Itajaí-Açú: resultados preliminares.** XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves, RS: 2013. 8 p

PROGRAMA DE REVITALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO (Brasília). Tribunal de Contas da União. 2012, 68 p.

PROJETO DE GERENCIAMENTO INTEGRADO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS EM TERRA NA BACIA DO SÃO FRANCISCO; **Determinação da carga de nutrientes do Rio São Francisco na região de sua foz.** 2013. 59 p.

SANTOS, E.S.; **Aplicação de marcadores geoquímicos para avaliação dos impactos nas barragens nos sedimentos do estuário do Rio São Francisco (SE/AL).** Tese (Doutorado em Geoquímica). Instituto de Geociências. Universidade Federal Fluminense, 2007, 139p.

SILVA, A. C., SANTOS, M. L. S., ARAUJO, M. C., BOURLÈS, B., **Observações hidrológicas e resultados de modelagem no espalhamento sazonal e espacial da pluma de água Amazônica.** *Acta Amazonica*. v. 39, n. 2, p. 361-370, 2009.

SIMÕES, I. T., TEIXEIRA, C. E. P., FREITAS, A. C. O., **Análise da qualidade dos dados harmônicos de maré do International Hydrographic Station (IHO) na costa brasileira.** VI Congresso Brasileiro de Oceanografia. Itajaí, SC, 2014.

WARNER, J. C., SHERWOOD, C. R., ARANGO, H. G., SIGNELL, R.; **Performance of four turbulence closure models implemented using a generic length scale method.** *Ocean Modelling*, 8, p. 81-113, 2005.

WRIGHT, L.D., **Sediment transport and deposition at river mouths: a synthesis.** *Bulletin of the American Geological Society*, 88, p. 857-868, 1977.