

3.1.2. Modelo $(k - \varepsilon)$

Processos turbulentos podem ser resolvidos por diferentes meios (modelos de turbulência). No presente estudo foi adotado o modelo K- ε , o qual é baseado no cálculo das quantidades físicas que representam a turbulência em um fluxo, neste aspecto o K e o ε são, respectivamente, a energia cinética turbulenta (Eq. 3.4) e sua dissipação (Eq. 3.5).

$$K = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} \quad (3.5)$$

Neste caso, u'_i é correspondente à flutuação da velocidade e a barra representa uma média. O modelo resultante do acoplamento das equações de balanço e dissipação para o fornecimento da viscosidade turbulenta, em geral, pode ser fornecida pelo usuário. A representação do modelo K- ε é dada pelas equações 3.6 e 3.7.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} + W \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P - G - \varepsilon \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + W \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} [P + (1 - C_{3\varepsilon})G] - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{K} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Neste contexto, P é o termo de produção de energia por turbulência (3.8) e G é um termo de fonte, devido às forças gravitacionais (3.9).

$$P = v_t \left(\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} \quad (3.8)$$

$$G = - \frac{v_t}{Pr_t} \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (3.9)$$

3.1.3. Equação de traçadores

O traçador representa a temperatura ou uma quantidade física presente na água, interagindo ou não com a hidrodinâmica do fluxo. Caso haja interação entre estes fatores o traçador é denominado ativo, caso contrário é comumente chamado passivo.

O traçadores ativos são representados principalmente pela temperatura e salinidade, em alguns casos sedimentos. Ambos os tipos de traçadores podem ser utilizados em diferentes estudos, no caso dos traçadores passivos, a sua principal aplicação está na avaliação de parâmetros físico-químicos da água, por exemplo, podem ser aplicados em estudos sobre variabilidade

temporal da qualidade da água. No presente estudo se adotou o uso de um traçador livre, para simulação do transporte de propriedades (sedimentos) sujeitos à diferentes forçantes, que representariam as condições da pluma proveniente do CSG e LP durante o período analisado, onde a evolução temporal depende dos processos difusivos e advectivos, controlados sobretudo por efeitos de correntes, ventos e processos turbulentos. A equação da evolução do traçador é formulada seguindo 3.10.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial t} \left(V_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(V_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(V_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (3.10)$$

Neste caso, T corresponde ao traçador passivo ou efetuando densidade; V_T é o coeficiente de difusão do traçador em (m^2/s); t corresponde ao tempo em segundos; x, y e z são os componentes espaciais em (m) e por fim, Q (em unidades do traçador) corresponde a uma fonte de localização.

3.1.4. Elaboração da malha de elementos finitos

Na elaboração da malha de elementos finitos foi utilizado o *software Blue Kenue*. O programa é bastante empregado para modelagem hidráulica, permitindo facilidade no manuseio de informações georreferenciadas e importação/exportação dos dados em diferentes formatos.

Foi construída a linha de costa da área de estudo e posteriormente o polígono integrando as regiões (lagoas e região oceânica), denotando o domínio computacional do estudo. No processo de criação da malha triangular, se buscou intensificar o refinamento (aumentar o número de nós) em regiões mais rasas, canais estreitos e locais com morfologia da linha de costa mais complexa, com uma redução gradativa deste refino nas porções mais profundas do domínio computacional. Ao final do processo a malha gerada no apresentou 159.155 nós (Fig. 3.2).

Para implementação dos dados batimétricos na malha, provenientes de cartas náuticas e informações da plataforma GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*), também se utilizou o *Blue Kenue*, gerando a malha batimétrica (Fig. 3.3).

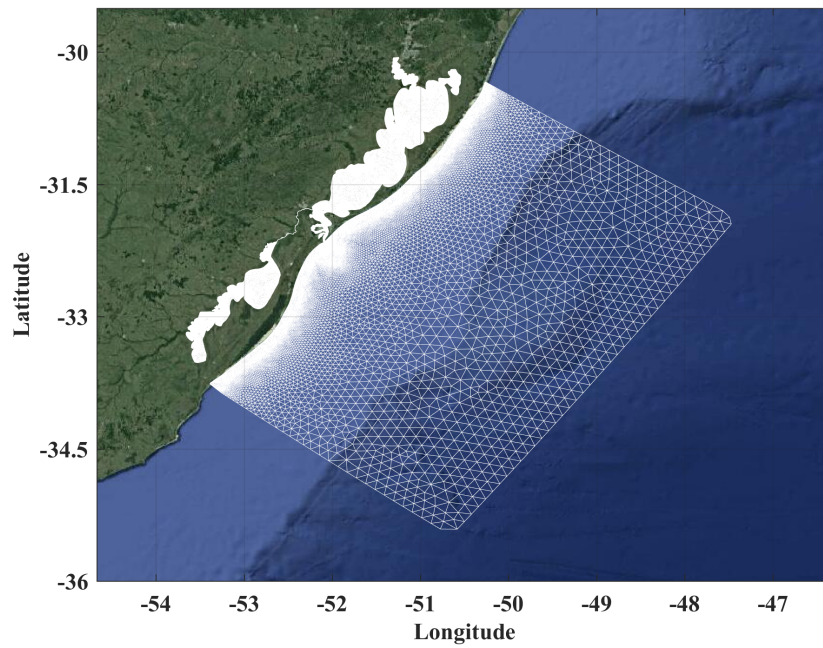


Figura 3.2 – Domínio numérico.

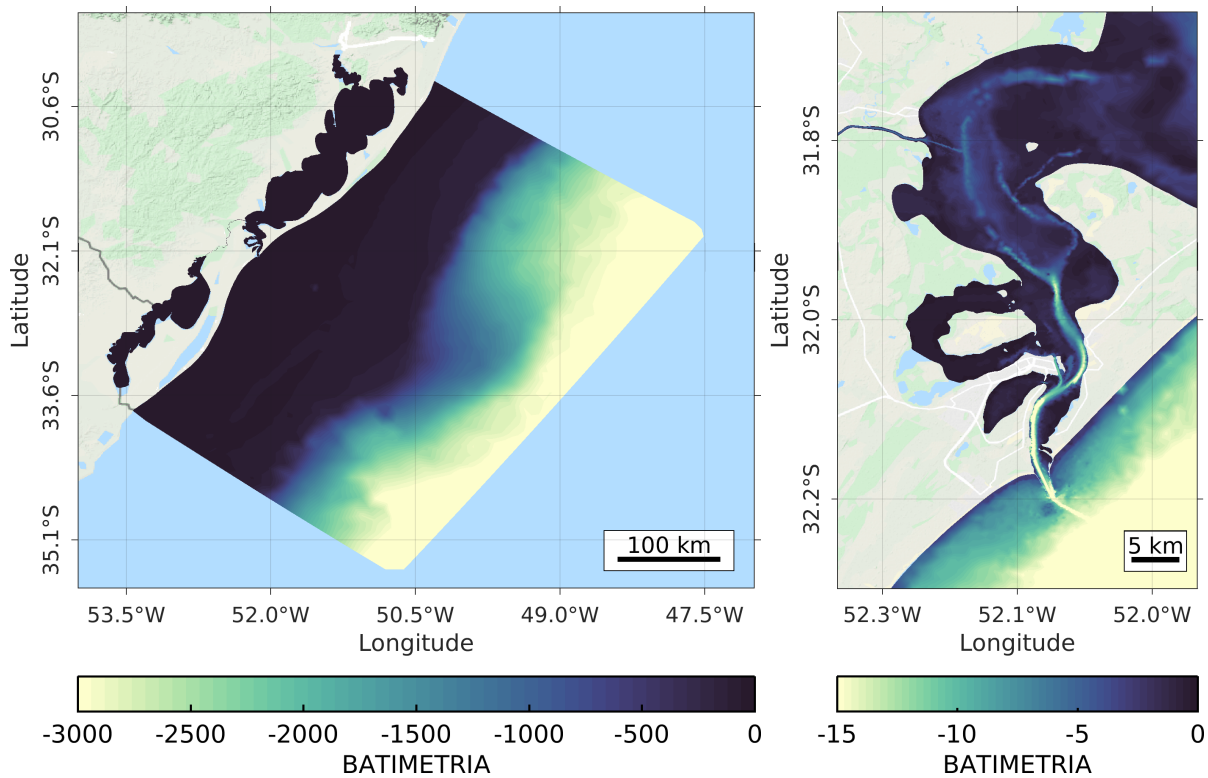


Figura 3.3 – Malha batimétrica

3.1.5. Condições iniciais e de contorno

No presente estudo foram utilizados como condições de contorno oceânicas informações diárias do HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*), disponível em (<https://hycom.org>) que fornece conjuntos de condições globais e regionais dos oceanos, e dados de reanálise atmosférica

do ERA-Interim (<http://www.ecmwf.int>), obtidos em nível de superfície.

As variáveis oceânicas provenientes do HYCOM utilizadas para alimentar o modelo foram salinidade, temperatura e correntes (componentes u e v). As condições de contorno atmosféricas extraídas do ERA-Interim foram temperatura do ar, pressão atmosférica e velocidade do vento (u e v), descritos na figura 3.4. Na fronteira líquida continental foram impostos dados de descargas constantes, obtidas da Agência Nacional das Águas (ANA) (<http://www3.ana.gov.br>), onde, para o rio Guaíba a média estipulada foi de $1000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, $400 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ para o Camaquã, e para os rios Jaguarão, Tacuarí e Cebolati as médias foram iguais a $100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, $150 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e $350 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, respectivamente.

Por fim, para realização dos cálculos de amplitude de maré, representados em fase pelos cinco principais componentes de marés astronômicas da região (K1, M2, N2, O1 e S2), foi utilizado modelo OSU TPXO.

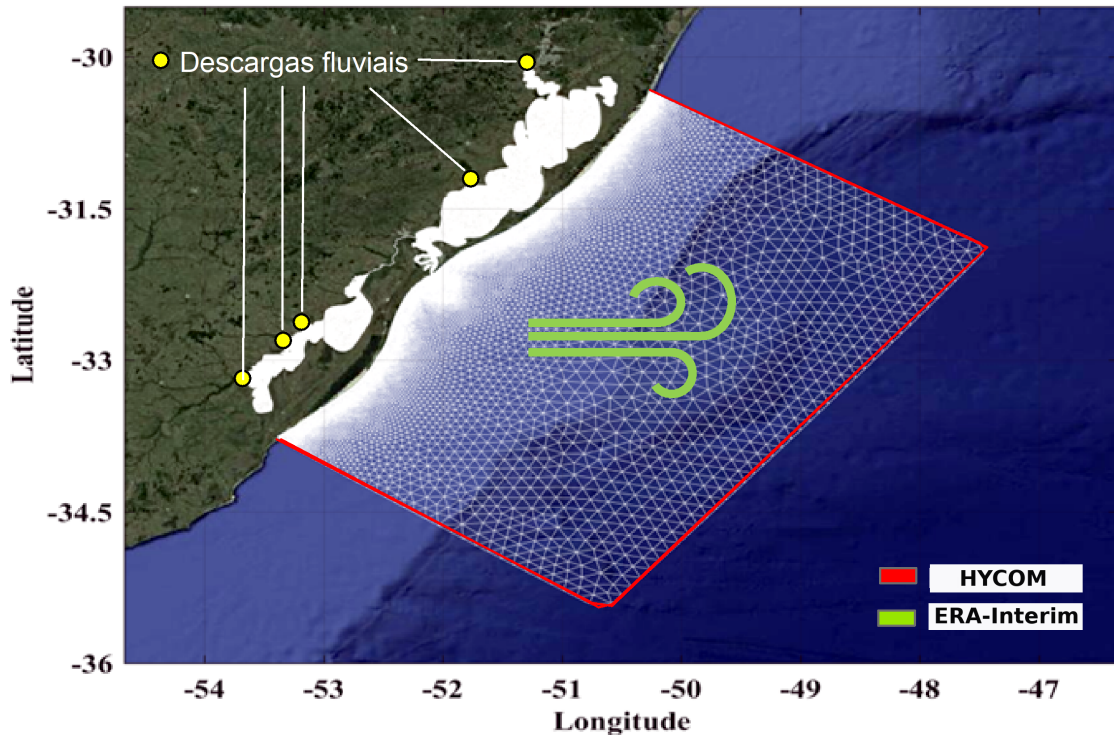


Figura 3.4 – Condições de contorno.

3.1.6. Estudos de caso

No estudo foram realizadas 04 simulações, onde as 03 primeiras (2009-2011) são descritas na tabela 3.1 e visavam analisar o transporte de propriedades na região da LP em comparação a um período de normal climatológica, as simulações ocorreram observando o índice SOI (*Southern Oscillation Index*), caracterizado por Ropelewski e Jones (1987) como um índice padronizado baseado nas diferenças de pressão do nível do mar registrados entre o Taiti e Darwin, na Austrália, os autores ainda reiteram que, o SOI é uma medida de oscilação de alta escala na pressão do ar ocorrendo entre o Pacífico oriental e ocidental durante os episódios de eventos extremos, nos quais o índice pode assumir valores positivos (*La Niña*) e negativos (*El Niño*),

onde a ocorrência de valores constantes por longos períodos (3 meses ou superiores) podem caracterizar anomalias atmosféricas.

As simulações realizadas consideraram os índices citados na tabela 3.2, onde os valores em vermelho correspondem a eventos de *El Niño* e valores em azul correspondem a *La Niña* registrados nas estações que coincidem com verão e outono. Nas simulações se adotaram dados de vazão fluvial constante durante todo o período, neste aspecto, os principais rios que abastecem o complexo foram forçados com descargas constantes durante o período da simulação, com informações de fronteira líquida estabelecidos pela ANA.

Indicador	2009	2010	2011
Período simulado	175 d.	175 d.	175 d.
Carac.climatológica	Normal	<i>El Niño</i>	<i>La Niña</i>
Período de anomalia	...	Jan-Mar	Jan-Abr
Tipo de anomalia	...	Negativa	Positiva

Tabela 3.1 – Condições atmosférico-oceânicas do período simulado.

O quarto estudo de caso ocorreu considerando o ano de 2011 como referência, e visava investigar o comportamento e destino final da pluma durante 365 dias de simulação, além de caracterizar estacionalmente os sedimentos em suspensão na LP, as parametrizações da simulação estão descritas na tabela 3.3 e seus ajustes de calibração foram organizados de acordo com estudos realizados por Marques et al. (2009) e Marques et al. (2012) na mesma região utilizando o TELEMAC-3D.

Mês	2009	2010	2011
JAN	1.1	-1.1	2.3
FEV	1.9	-1.5	2.7
MAR	0.4	-0.7	2.5
ABR	0.8	1.2	1.9
MAI	-0.1	0.9	0.4
JUN	0.1	0.4	0.2
JUL	0.2	1.8	1.0
AGO	-0.2	1.8	0.4

Tabela 3.2 – Índices SOI durante o período simulado (2009-2011).

Fonte: NOAA (2019).

Indicador	Parâmetro utilizado
Período de simulação	365 d
Passo de tempo	90s
Passo de salvamento	Diário
Paralelismo	24 núcleos
Níveis sigma	10
Lei de fricção de fundo	Manning
Coefficiente de Influência do vento	1.10^{-6}
Coefficiente de atrito com o fundo	4.10^{-2}
Coefficiente de Coriolis	-7.70735^{-5}

Tabela 3.3 – Parametros utilizados no estudo de caso do ano de 2011.

3.1.7. Validação do modelo hidrodinâmico

O processo de validação teve por objetivo avaliar a capacidade do modelo em representar as condições reais encontradas em campo. Deste modo, foram extraídas séries temporais de corrente resultantes do modelo hidrodinâmico gerado pelo TELEMAC-3D que posteriormente foram comparados a informações medidas *in loco* na estação da praticagem (Fig. 3.5) no período de 01/01/2011 a 30/06/2011.

Os indicadores de performance utilizados para quantificar a qualidade do modelo estão indicados na tabela 3.4, na qual (obs.) corresponde aos valores observados e (mod.) aos valores descritos pelo modelo. Estas medidas são descritas por Teegavarapu (2012) como importantes indicadores de comparação e qualificação de medidas estatísticas entre dados modelados e informações reais.

Indicador	Objetivo desejado
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (obs - mod)^2}{n}}$	↓ melhor estimacão entre obs e mod.
$MAE = \frac{\sum obs - mod }{n}$	↓ melhor concordância entre obs e mod.
$MSE = \frac{1}{n} * \sum (obs - mod)^2$	MSE=0 indica mod perfeito.
$IC = 1 - \frac{\sum (obs - mod)^2}{\sum mod - mod_{mean} + obs - obs_{mean} }$	IC=1 indica concordância perfeita.

Tabela 3.4 – indicadores estatísticos utilizados no processo de validação.

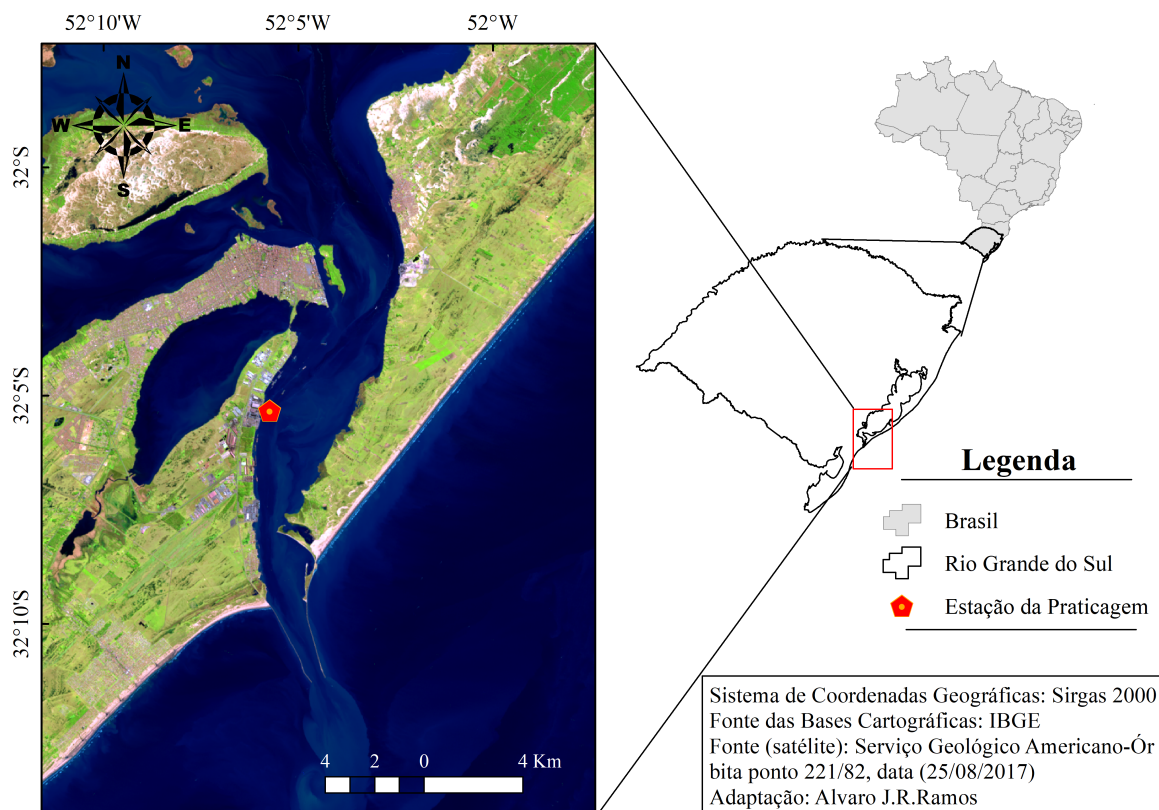


Figura 3.5 – Estação da praticagem.

3.2. Sensoriamento remoto para análise dos sedimentos em suspensão

3.2.1. Aquisição de dados espaciais-*Google Earth Engine*(GEE)

O *Google earth engine* consiste em um catálogo de informações associadas a um API (*Application Programming Interface*) acessível online a um ambiente de desenvolvimento interativo (IDE) para geração e visualização de resultados geoespaciais de escala global. O acesso à fonte de dados pode ser realizado pelo site <https://earthengine.google.com>, no qual é possível encontrar também a interface inicial, guia do usuário, termos de uso e tutoriais para iniciantes em *Javascript*.

O catálogo é composto por repositórios que compreendem um conjunto de informações geoespaciais disponibilizadas de forma pública, incluindo produtos processados provenientes de diferentes plataformas espaciais, imagens de satélite, variáveis ambientais, uso e cobertura do solo, topografia, etc. Os usuários possuem livre acesso para criar, processar e analisar as informações disponíveis globalmente através da biblioteca de operadores do *Earth Engine* (EE), acessando os dados privados de sua API de maneira interativa.

O GEE vem sendo amplamente utilizado em diferentes áreas, contudo apenas recentemente nos estudos em ambientes marinhos, costeiros e águas superficiais, sobretudo a partir de 2016, com destaque para pesquisas de Pekel et al. (2016), Coltin et al. (2016), Chen et al. (2017), Zhang et al. (2019), Vos et al. (2019) e Nguyen et al. (2019).

Objetivando analisar multitemporalmente a concentração de sólidos em suspensão na LP e regiões adjacentes o produto utilizado no estudo foi o MYD09GA V6 para o período de 2009-2011, onde 2009 é caracterizado como normal climatológica, e nos anos subsequentes existem registros de anomalias negativas e positivas, respectivamente. As informações estão presentes no catálogo de informações do GEE, proveniente do LP DAAC (*Land Processes Distributed Active Archive Center*), nas quais as imagens fornecem estimativas da reflectância espectral superficial diárias para as bandas 1-7 do MODIS-AQUA, com resolução espacial de 500 m. Neste produto, as imagens são obtidas de maneira diária e posteriormente são devidamente corrigidas para condições atmosféricas como gases, aerossóis e espalhamento de *Rayleigh*. Também foram utilizados produtos em escala de processamento nível 3 SST (*Sea Surface temperature*) provenientes do MODIS para identificação de possíveis anomalias em escala global.

3.2.2. Aplicação do NDWI (*Normalized Difference Water Index*)

O uso do NDWI permite ressaltar feições de água, extração de linhas de costa de maneira eficiente e minimizar o restante dos alvos. Para Mc Feeters (1996), este índice acompanha um raciocínio semelhante ao índice de diferença normalizada da vegetação, no que permeia a operação de bandas. A concepção de um índice espectral de água foi baseada no fato de que a água absorve energia em comprimentos de onda do infravermelho próximo (NIR) e ondas curtas de infravermelho (SWIR).

O NDWI é obtido por meio das bandas do verde (V) e do infravermelho médio (IV). O índice de diferença normalizada da água tem como objetivo neste estudo delinear ambientes de águas abertas, passando a determinar o limiar presente entre água e terra (vegetação aparente no ambiente terrestre e solos). Isto permite realizar a maximização da reflectância comum da água, utilizando o comprimento de onda do verde, tentando diminuir a baixa reflectância dos corpos de água no infravermelho próximo, e realçando o contraste entre a água e a cobertura vegetal, proporcionada pelo infravermelho próximo. O índice geral de NDWI é obtido segundo a equação (3.11).

$$NDWI = (YV2 - YIV4)/(YV2 + YIV4) \quad (3.11)$$

Onde, YV2 corresponde ao comprimento de onda do verde (0.545-0.565 μm), e YIV4 ao infravermelho médio (1.62-1.65 μm). O estudo utilizou as definições descritas por Gao (1996), no qual se definiu que os valores de NDWI variam de -1 a 1, e o número 0 como limiar. Sendo assim, a cobertura encontrada é considerada água se NDWI apresentar-se em intervalos inferiores a zero, para valores de índice superiores ao limiar zero, a respectiva cobertura não é considerada água.

3.2.3. Geração e validação do algoritmo regional

Para análise do material em suspensão na região costeira da LP foi elaborado um polinômio que relacionava as informações medidas em campo e a reflectância diária proveniente

do sensor MODIS (MYD01) em formato HDF e nível de processamento 1A (nível que apresenta informações subsidiárias, incluindo coeficientes de calibração geométricas e radiométricas, além da geolocalização), posteriormente as informações foram pós-processadas dentro da plataforma do GEE, onde foram vetorizadas e tiveram as informações de reflectância foram extraídas para aplicação do polinômio regional.

As informações *in loco* foram retirados do relatório anual do porto de Rio Grande, publicado no ano de 2018 e disponibilizado no endereço <http://www.portosrs.com.br>. No relatório constam 43 amostras de água coletadas na região do médio e alto estuário da LP nos dias 11,12 e 13 de Dezembro de 2017, para geração do algoritmo se utilizou apenas as coletas de material em suspensão superficial (Fig.3.6).

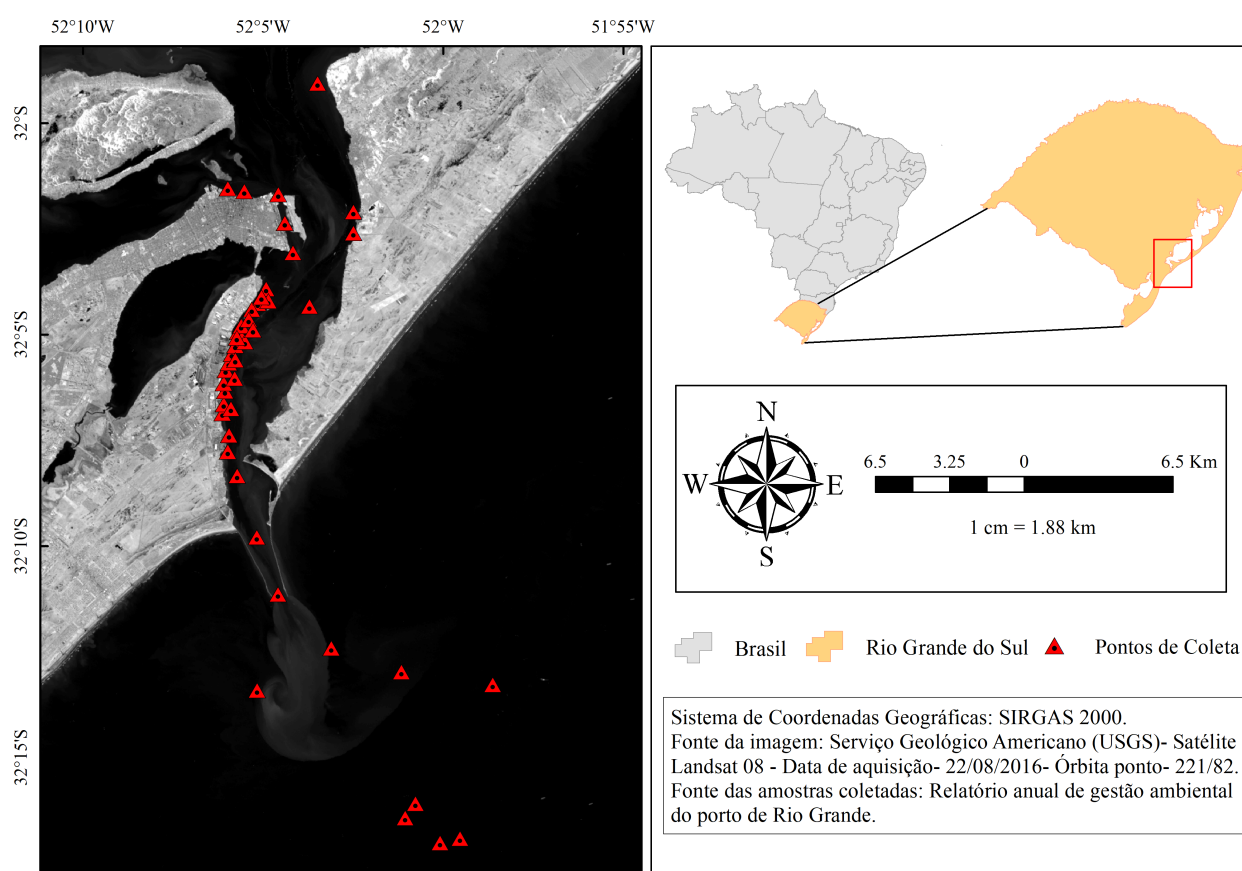


Figura 3.6 – Pontos de coleta para geração do algoritmo regional.

O algoritmo ajustado relacionava os dados de material em suspensão (kg/m^3) medidos *in loco* e informações de reflectância na faixa espectral do intervalo 620 - 670 nm do sensor MODIS, a escolha da banda presente no referido intervalo ocorreu pela boa correlação entre reflectância e material em suspensão, justificadas em estudos como os realizados por Jensen (2000), Shi e Wang (2009), Marques et al. (2009), Petus et al. (2010) e mais recentemente Costi et al. (2017), este último aplicando informações do sensor MODIS em diferentes faixas para caracterização da pluma sedimentar na região da LP. A análise de regressão se baseou no método dos mínimos quadrados ordinários, que estimou a melhor relação linear entre as variáveis,

e objetivou encontrar uma relação da variável resposta (dependente) em função da variável explicativa (independente), onde polinômio de primeira ordem para as amostras analisadas pode ser descrito na equação(3.12).

$$MS = b + b1 + \varepsilon \quad (3.12)$$

Onde MS é o material em suspensão, b e b1 são os coeficientes de ajuste e ε o erro aleatório.

No processo de validação do polinômio, para avaliar a qualidade do algoritmo produzido, foram empregadas informações de concentração de sólidos em suspensão obtidas em campo, no período de 2006-2008, totalizando 21 amostras (tabela 3.5), posteriormente foram obtidas informações de reflectância para a mesma data de aquisição das amostras e estimadas as concentrações sedimentares. Na análise de similaridade e fidedignidade entre as informações reais e as concentrações geradas pelo polinômio, se aplicaram indicadores estatísticos de qualificação de medidas, descritos na tabela 3.6.

Lat	Lon	Data	Concentração(mg/L)
-32.2032	-52.0542	27/04/2006	20,21
-32,2378	-51,9678	27/04/2006	21,80
-32,42	-52,2061	23/02/2007	20,80
-32,31	-52,126	23/02/2007	9,2
-32,1937	-52,0642	20/03/2007	17,63
-32,202	-52,0513	20/03/2007	14,9
-32,1871	-52,0718	17/04/2007	20,4
-32,1838	-52,011	17/04/2007	8,2
-32,1786	-51,9453	17/04/2007	11,2
-32,2	-52,055	08/05/2007	96
-32,203	-52,055	08/05/2007	81,6
-32,19	-52,0673	12/07/2007	62
-32,1922	-52,0628	12/07/2007	62
-32,197	-52,061	25/06/2008	52,8
-32,2012	-52,0533	06/07/2008	41,2
-32,1883	-52,0361	09/07/2008	16,4
-32,2213	-52,0365	17/07/2008	32,4
-32,2089	-52,0501	17/07/2008	13
-32,192	-52,0686	06/08/2008	50,4
-32,1973	-52,0605	06/08/2008	72,8

Tabela 3.5 – Informações utilizadas no processo de validação do algoritmo regional.

Indicador	Objetivo
IC	Coeficiente de qualidade dos resultados estimados.
RMSE	Capacidade do modelo em reproduzir informações de campo.
MAE	Valor numérico de diferença observados e estimados.
p-valor	Verificar existência de diferenças significativas.

Tabela 3.6 – Indicadores estatísticos utilizados no processo de validação.

3.2.4. Caracterização das plumas

No processo de caracterização morfológica da pluma, foram adotados critérios estabelecidos por Horner-Devine et al. (2015), o qual classifica as plumas de acordo com a sua disposição ao longo dos cursos de água em 6 ordens (Fig.3.7). Para avaliação das zonas de mistura superficial entre plumas, foram utilizadas inferências descritas em Klinker et al. (1988), que descreve as diferentes zonas de uma imagem a partir dos pixels semelhantes e classifica em intervalos de cores (*spectral slice*), organizando pixels homólogos dispostos em um determinado intervalo determinado pela seleção de *endmembers* (pixels puros ou de interesse), neste caso, selecionados nas regiões determinadas como áreas de mistura de plumas.

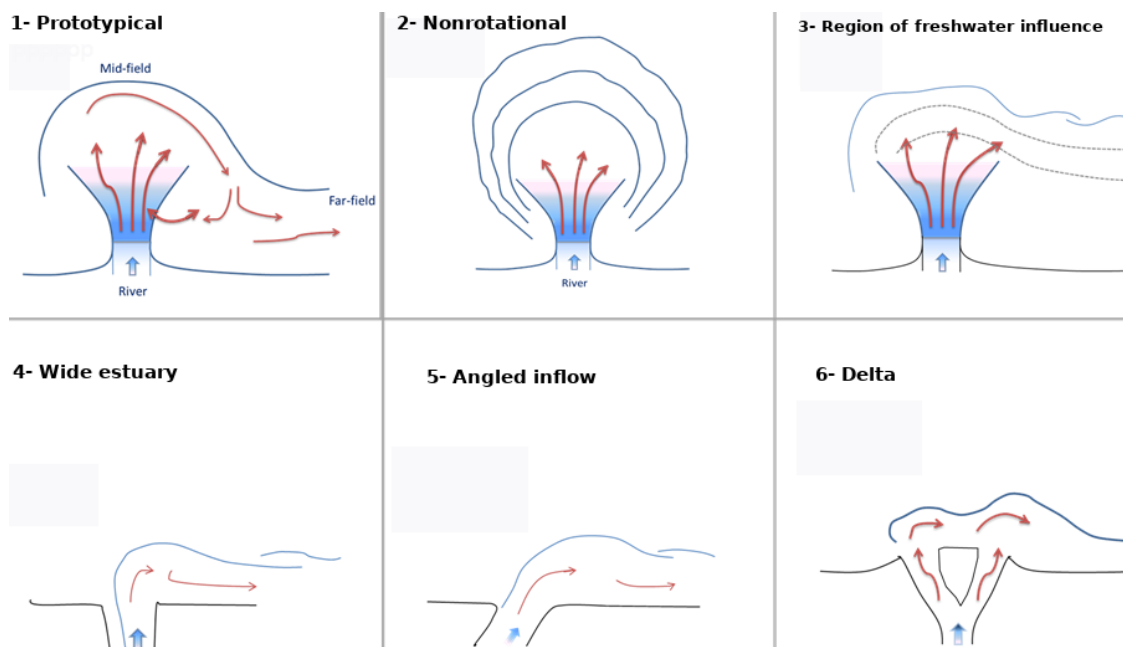


Figura 3.7 – Classificação morfológica das plumas.

4. RESULTADOS

4.1. SENSORIAMENTO REMOTO

No período analisado foi possível observar a distribuição da pluma superficial partir de imagens orbitais e a variação nas zonas de mistura ao longo do estuário da LP. O estudo compreendeu duas regiões dinamicamente distintas (rio e estuário), e verificou padrões comportamentais das regiões de influência de água doce provenientes do CSG ao longo do ano, onde as alterações na advecção horizontal do rio determinam a forma e características da pluma fluvial.

4.1.1. Uso do índice de água para discretização das linhas de costa

De maneira geral, a máscara de linha costeira utilizada para delimitação da área de estudo através do NDWI apresentou bons resultados, representando bem os corpos hídricos do ambiente lagunar em diferentes períodos (Fig.4.1). O uso do produto MYD09GA permitiu a obtenção de imagens com alta qualidade, reduzindo significativamente a influência de nuvens na aplicação do polinômio regional. É importante ressaltar que os valores positivos do índice de água consideraram também áreas sujeitas à inundação, locais úmidos e terrenos alagados. Sendo assim, as porções do território que apresentam elevada variação nos índices de precipitação ou locais que estão sujeitos a constantes irrigações e trocas de água, a exemplo dos cultivos de arroz e projetos aquícolas com espelho d'água superiores a 2 ha, também passam a ser registrados pelo índice, contudo, estes locais foram retirados de maneira automática, utilizando fatores condicionais para tamanho de polígonos, da área de interesse durante o processo de conversão do *raster* gerado pelo NDWI para o formato *shapefile* a ser trabalhado como área limite para obtenção das concentrações de sedimentos suspensos.

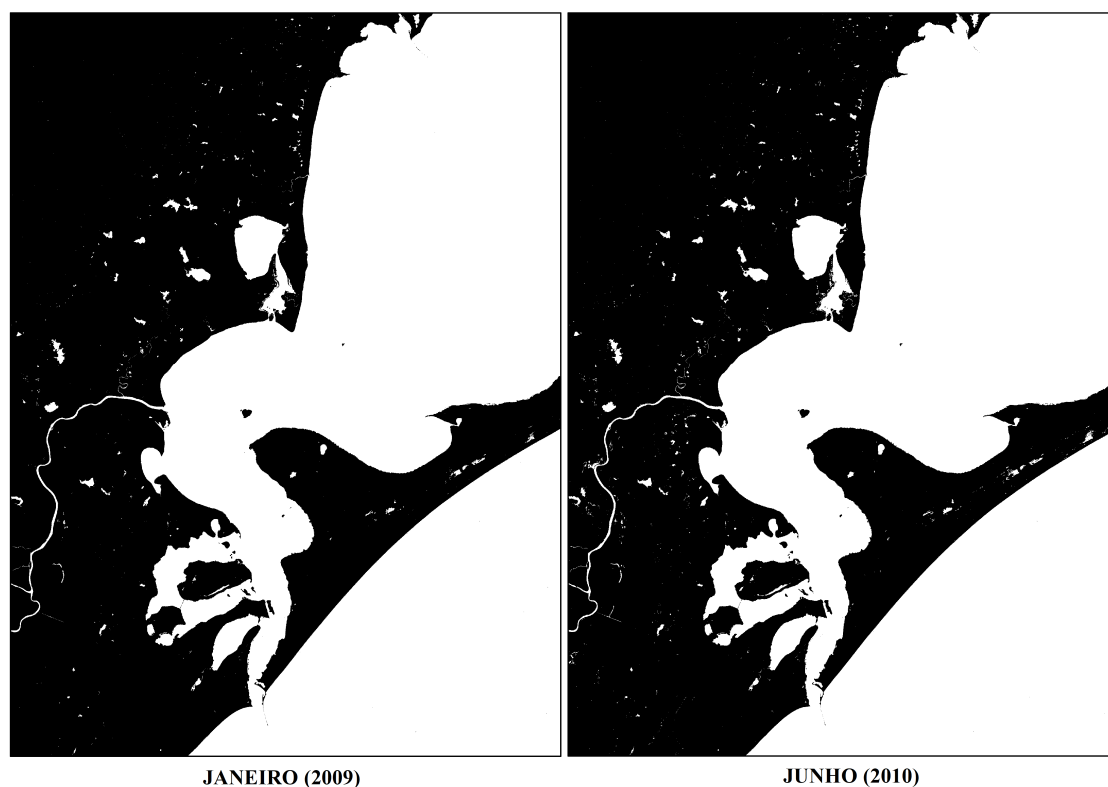


Figura 4.1 – Resultado das máscaras de água criadas para a região costeira adjacente.

4.1.2. Configurações atmosféricas no Pacífico

Relacionado às condições atmosféricas, após processamento e análise dos produtos SST (*Sea Surface Temperature*) provenientes do sensor MODIS, foi possível identificar variações de temperatura na região do Pacífico, que caracterizam anomalias positivas e negativas, indicadas nos anos de 2010 e 2011 (Fig.4.2).

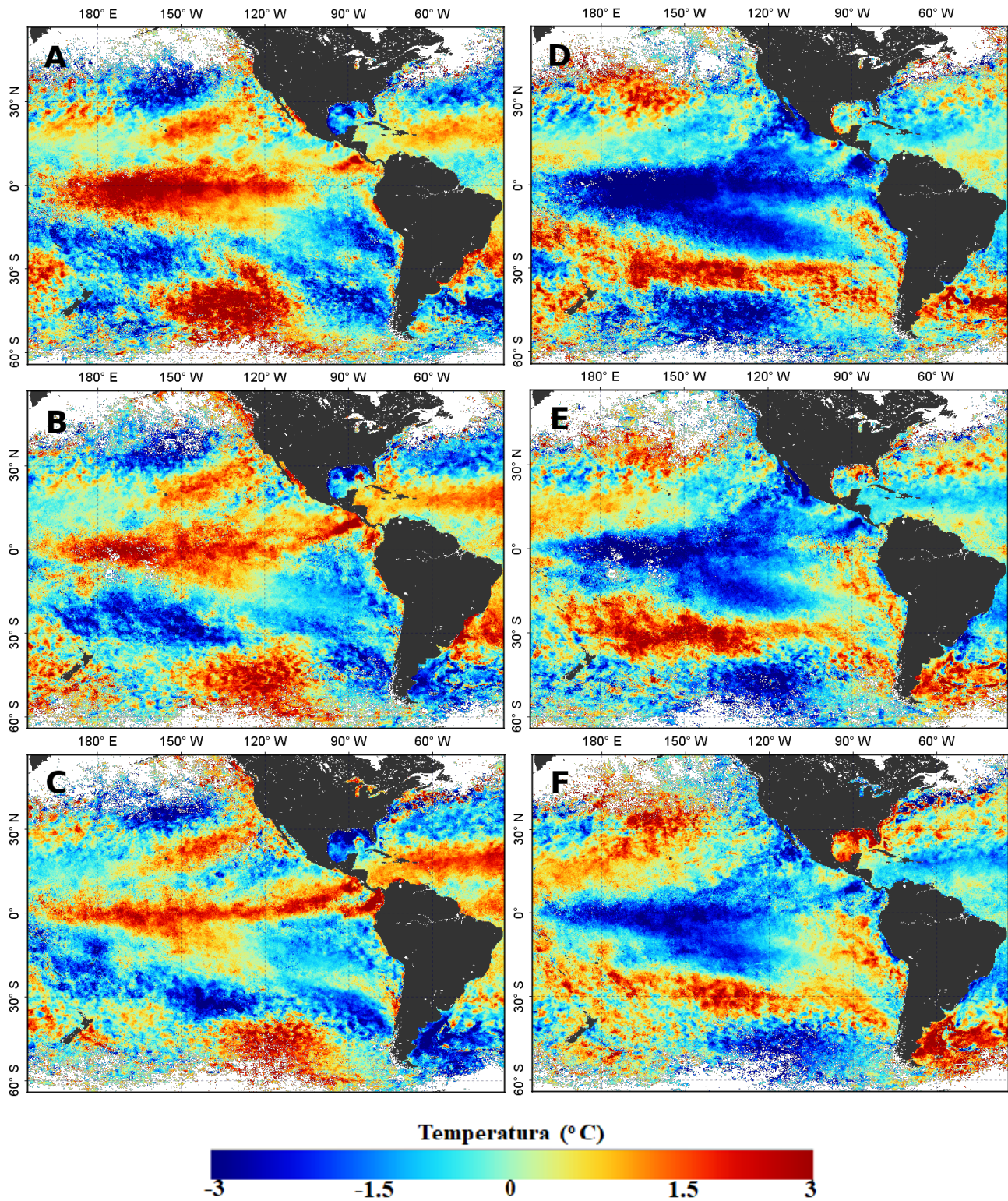


Figura 4.2 – Diferenças da temperatura da superfície do mar (2009-2011). Onde: A, B, e C- Correspondem à diferença da média de temperatura entre 2009-2010 para Jan(A), Fev(B) e Mar(C), respectivamente, e denotam *El Niño*. D, E e F- Correspondem à diferença da média de temperatura entre 2009-2011 para Jan(D), Fev(E) e Mar(F), respectivamente, e denotam condições de *La Niña*.

A leitura dos dados presentes na figura 4.2 indicam modificações no gradiente de temperatura superficial do mar quando se comparam períodos sem ocorrência de eventos (2009)

e intervalos onde existem incidências do fenômeno. Ainda é possível observar características comumente decorrentes nos eventos nas zonas de convergência, onde o *La Niña* se caracteriza na redução acentuada da temperatura da superfície das águas do Oceano Pacífico Tropical Central e Oriental, e o *El Niño* pela elevação do gradiente na mesma região. Estas modificações podem gerar alterações significativas nos padrões de precipitação e temperatura e seus efeitos podem ser diversos nas regiões de costa, sobretudo na hidrodinâmica. As alterações na temperatura média da superfície do mar na região são visíveis principalmente durante os primeiros trimestres de 2010 e 2011. Para o ano de 2010 existe redução acentuada da diferença de temperatura com elevação da intensidade em direção às baixas latitudes, o efeito contrário é visto no ano seguinte, resultando no aquecimento das águas na porção sul do Brasil e redução da temperatura na costa em direção ao equador.

4.1.3. Algoritmo regional e validação

As 43 medições obtidas em campo foram correlacionadas com valores de reflectância do produto MODIS no intervalo de 620-670 nm, o gráfico do polinômio que relaciona as concentrações de sedimentos em suspensão (kg/m^3) e a reflectância (μm) está presente na figura 4.3. Analisando a figura é possível descrever que a reflectância e a concentração sedimentar apresentam correlação positiva.

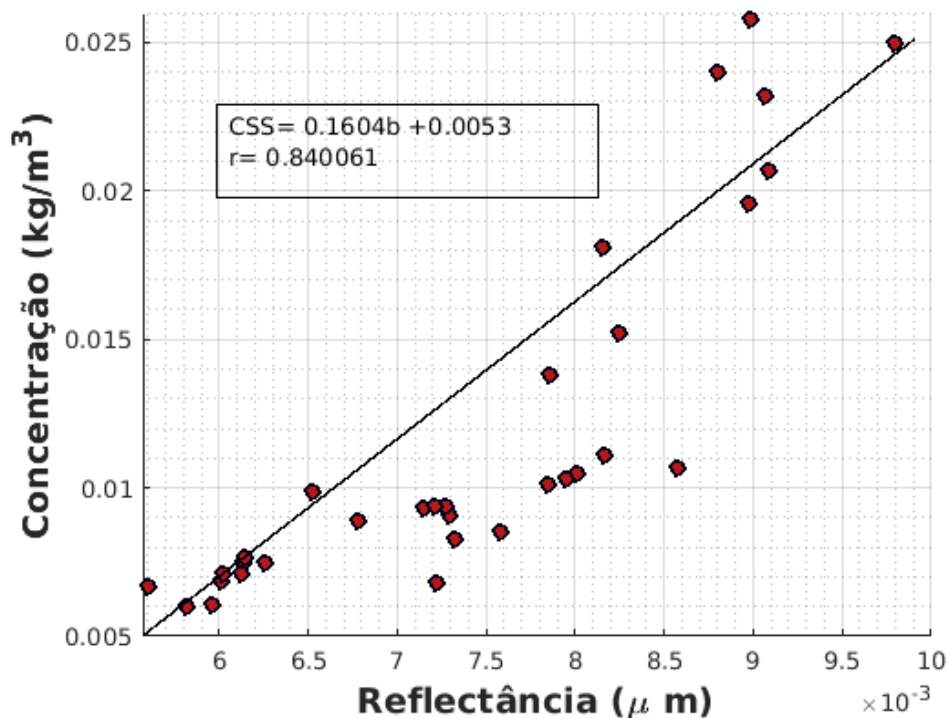


Figura 4.3 – Regressão- CSS/Reflectância.

O coeficiente de correlação de Pearson entre a banda e a concentração foi 0.850061, com coeficiente de determinação $r^2 = 0.723$ a um nível de significância de 5%. Os valores de r mostraram que a reflectância se correlaciona linearmente com os dados de concentração em

suspensão com 95% de confiança, relacionada à faixa espectral utilizada. O valor de p que relaciona as medidas reais e o valor obtido com o polinômio para o mesmo ponto amostrado foi 0.075, demonstrando que não existem diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos valores reais e os medidos em função da reflectância (Fig. 4.4).

O erro quadrático médio calculado entre os valores de campo e as informações do algoritmo foi 0.0020, demonstrando um erro de aproximadamente 2 g/m³, valor considerado relativamente baixo por estar próximo aos encontrados em Tavora et al. (2019) para regiões de mistura em mar aberto que sofrem influência da pluma da LP. O erro médio absoluto (0.0015) reflete as tendências demonstradas pelo RMSE, e o índice de concordância (IC) de 0.8965 comprova a alta capacidade do modelo regional em reproduzir as condições de concentração observadas.

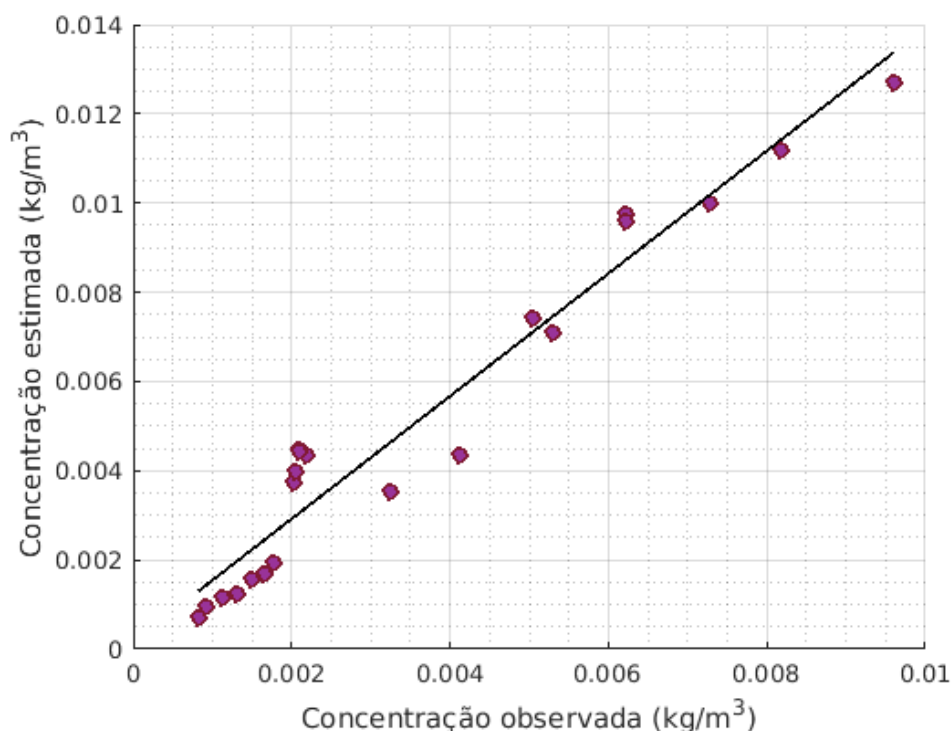


Figura 4.4 – Relação entre os valores medidos e concentração estimada.

4.1.4. Concentração de sedimentos em suspensão no complexo Patos-Mirim

A figura 4.5 demonstra os locais delimitados como baixo (4.5 A), médio (4.5 B) e alto (4.5 C) estuários da LP, fundamentado em estudos realizados por Tagliani et al. (2003), Dias e Fernandes (2006) e Marques et al. (2012), que definiram estes locais essencialmente adotando critérios de salobridade do ambiente lagunar. Em todos os casos, se ressalta que estas áreas adotam critérios genéricos, pois o ambiente apresenta elevada dinâmica em função de alterações no regime atmosférico, descargas, correntes e outras forçantes que interagem com a laguna.

Para a jusante do CSG, o registro dos índices de reflectância obtidas a partir do sensor MODIS-AQUA nos três anos de análise são maiores no período do Inverno e Primavera, e

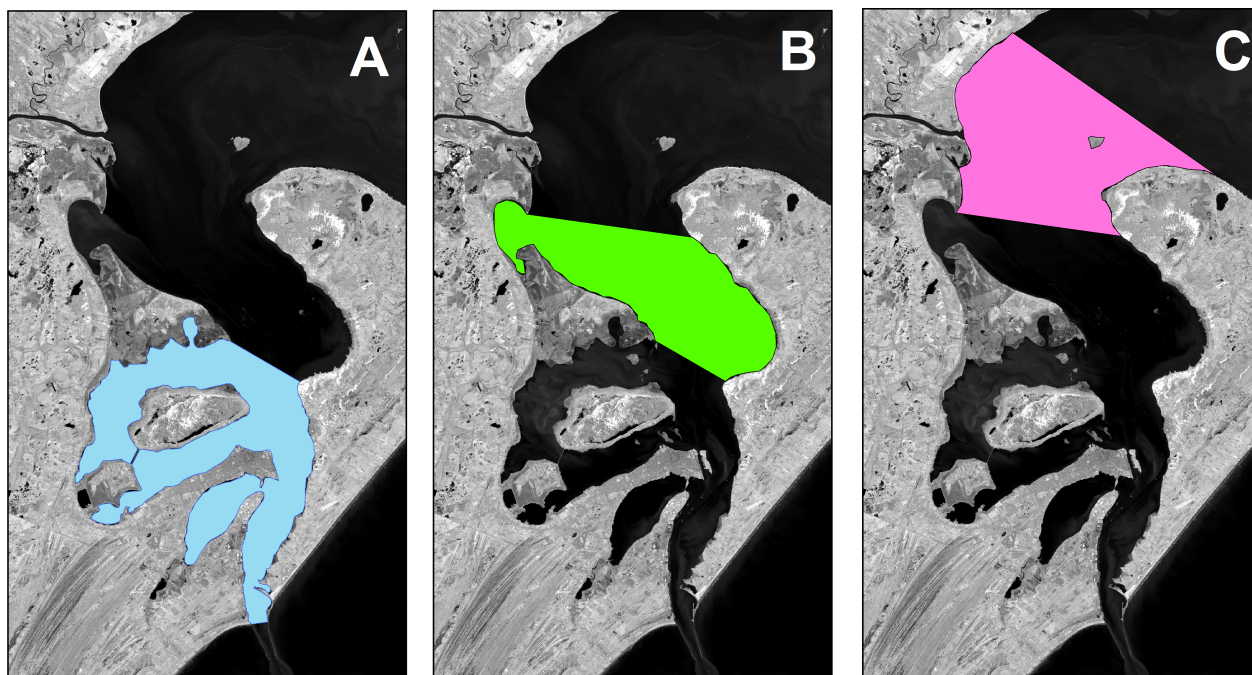


Figura 4.5 – Definição das áreas de alto, médio e baixo estuários da LP.

a concentração sedimentar foi superior nestas mesmas estações (Fig.4.6). Contudo, o canal contribui de maneira pouco significativa nas demais estações do ano (Verão e Outono) em comparação à outras porções da LP. As informações encontradas demonstram a existência de alterações estacionais no gradiente de concentração de sedimentos suspensos interferindo na dinâmica da pluma costeira da LP, demonstrando que a hidrodinâmica regional é influenciada pela circulação atmosférica global e esta interage com a descarga sólida no estuário da LP.

Ao longo da região adjacente, as taxas de concentração sedimentar apresentaram uma média igual a 0.0161 Kg/m^3 no CSG, 0.0162 Kg/m^3 na região do médio estuário da LP e 0.0170 Kg/m^3 no baixo estuário da LP. As médias de concentração para os 3 anos estão descritas na tabela 4.1. Não foram observadas grandes diferenças entre as diferentes áreas do complexo estuarino, onde o valor máximo de CSS registrado para o médio estuário foi 0.0326 (Fig.4.7) e para o baixo estuário foi 0.0451 (Fig.4.8).

Para o ano de 2010 são encontradas as maiores taxas de CSS, possivelmente explicadas pela elevada descarga, resultante de mudanças na configuração atmosférica em períodos de anomalias.

Local	2009	2010	2011
Canal São Gonçalo	0.0144 Kg/m^3	0.0176 Kg/m^3	0.0164 Kg/m^3
Médio estuário	0.0133 Kg/m^3	0.0189 Kg/m^3	0.0164 Kg/m^3
Baixo estuário	0.0159 Kg/m^3	0.0190 Kg/m^3	0.0163 Kg/m^3

Tabela 4.1 – Média de CSS anuais em diferentes regiões da LP.

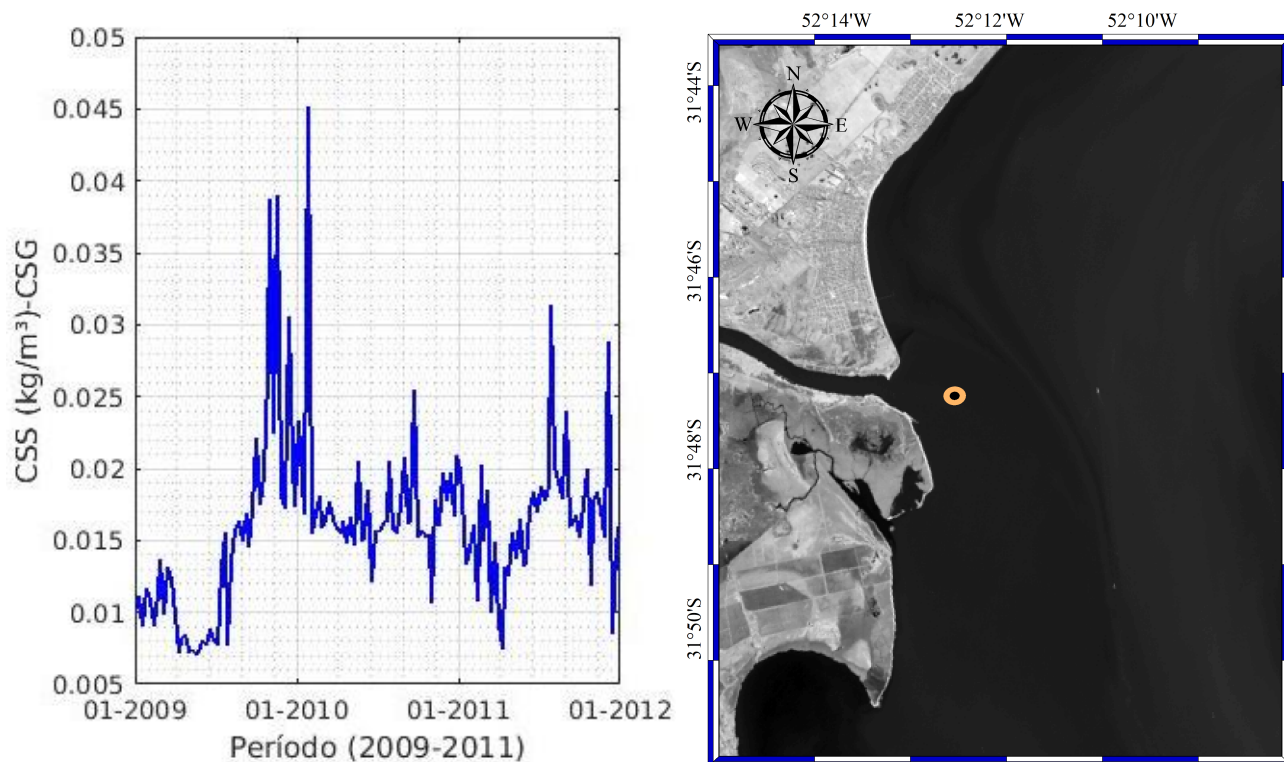


Figura 4.6 – CSS no Canal São Gonçalo (2009-2011)

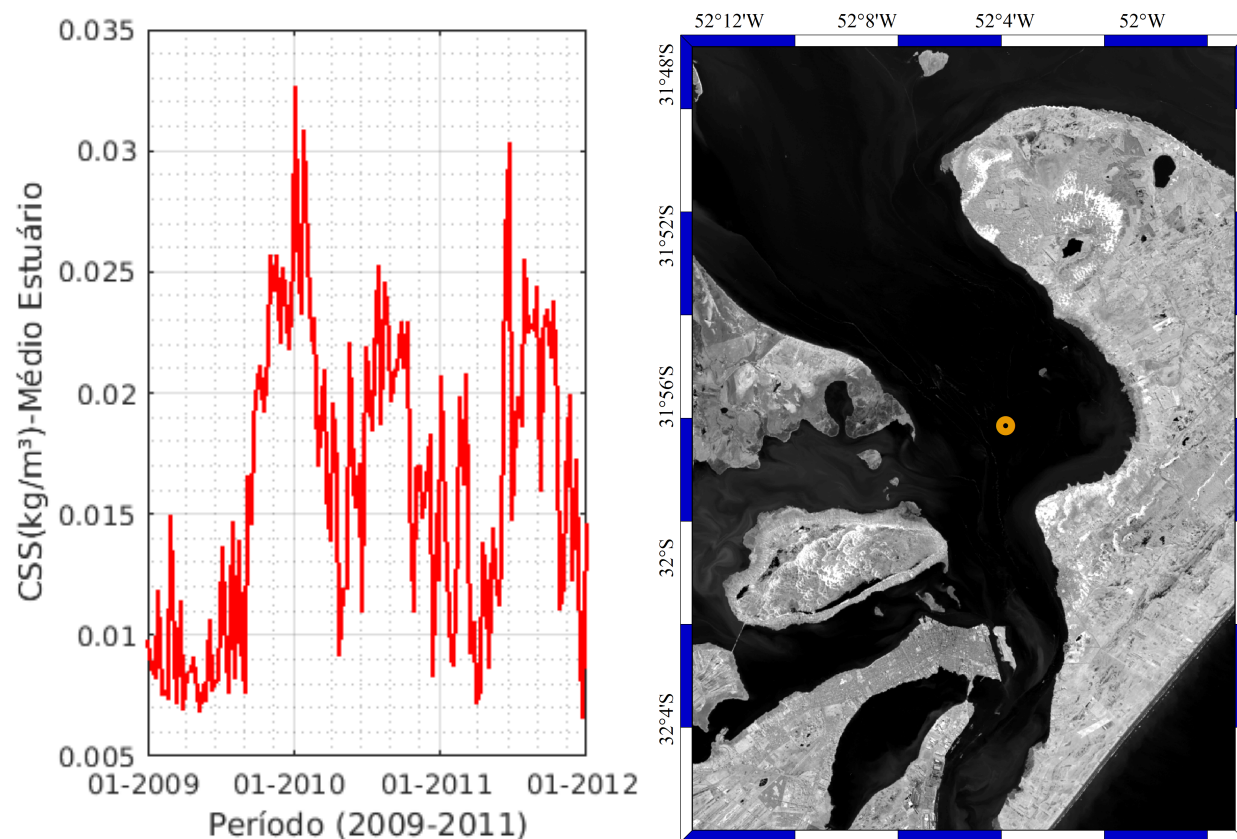


Figura 4.7 – CSS no Médio estuário (2009-2011)

Os menores índices de concentração obtidos pela reflectância de CSS são observados no período de Dezembro a Fevereiro se comparados aos meses que compõem o inverno e a

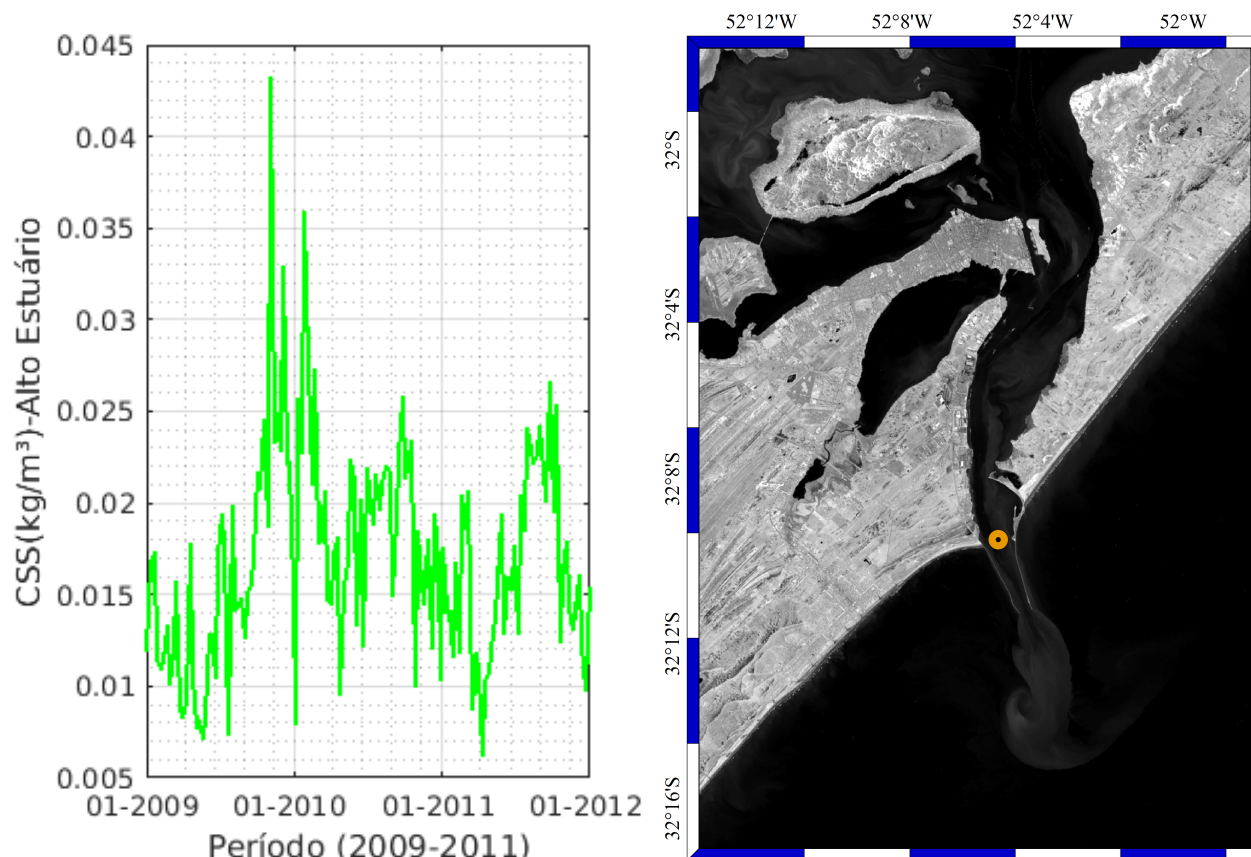


Figura 4.8 – CSS no Baixo estuário (2009-2011)

primavera. Este comportamento está possivelmente associado à quedas nas taxas de vazão que, por sua vez, reduzem a entrada de sólidos no sistema. A redução de sólidos suspensos aproxima os números digitais dos pixels das imagens de zero, favorecendo também o decaimento nos valores de reflectância. As reflectâncias observadas no estudo são mais intensas nas regiões pertencentes à faixa do vermelho e infravermelho próximo, tornando mais fácil a identificação da variabilidade nos fluxos aparentes de sedimentos. A influência dos ventos é observada como a principal causa de variação nas plumas fluviais oriundas do CSG em direção ao médio e baixo estuário, aliadas à vazão local.

Apesar de o CSG apresentar baixa contribuição quando comparado ao complexo inteiro, especificamente para o estuário da LP, sua importância é fundamental, sendo inclusive o principal emissário sedimentar para o ecótono, em função de sua proximidade junto à desembocadura do estuário da laguna, fato que o classifica como elemento vital para as trocas de fluxos com o oceano. Estas colocações são exemplificadas na figura 4.9, onde é possível identificar a contribuição sólida da pluma do CSG para o dia 26 de Junho de 2010 e a redução da concentração à medida em que se alcança a frente de pluma e os campos distantes.

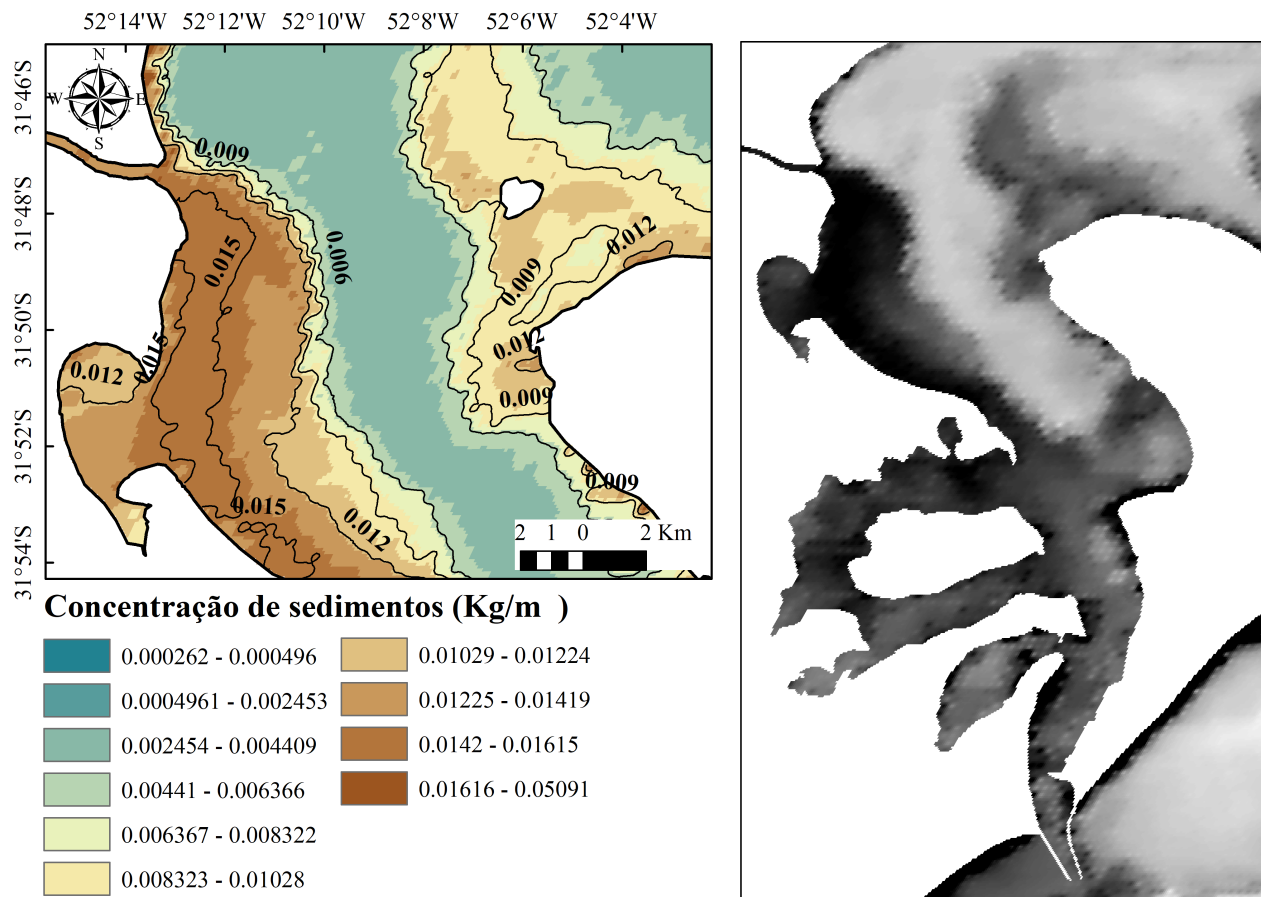


Figura 4.9 – Plumas do CSG- 26 de Junho de 2010.

Também se observou variação na concentração proveniente do baixo estuário em direção ao oceano, o qual é resultante da mistura de águas dentro do complexo, e obedece ao mesmo critério de redução da intensidade em direção aos campos distantes visto na pluma do CSG, a exemplo do que é mostrado na figura 4.10.