

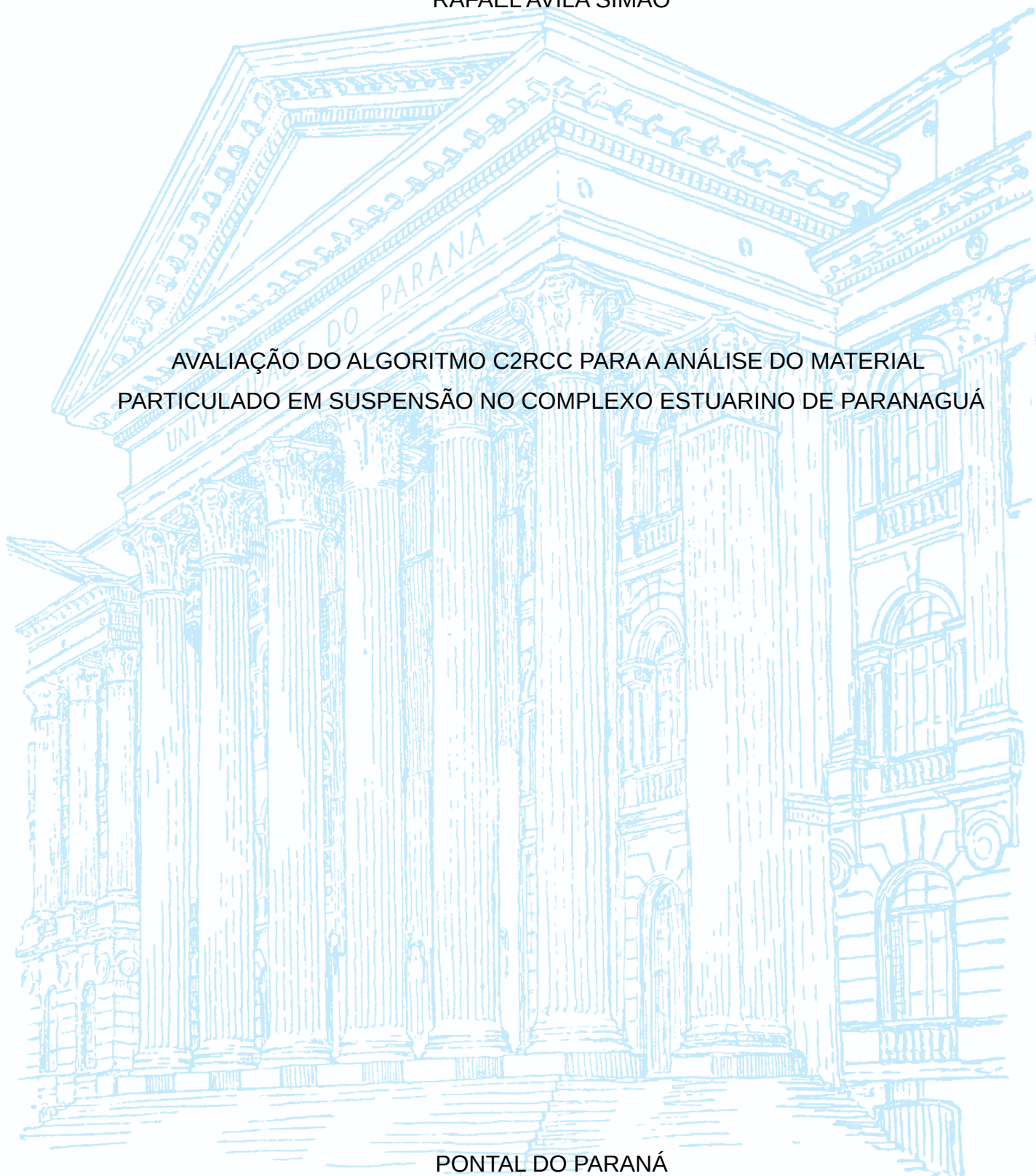
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RAFAEL AVILA SIMÃO

AVALIAÇÃO DO ALGORITMO C2RCC PARA A ANÁLISE DO MATERIAL
PARTICULADO EM SUSPENSÃO NO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ

PONTAL DO PARANÁ

2022



RAFAEL AVILA SIMÃO

AVALIAÇÃO DO ALGORITMO C2RCC PARA A ANÁLISE DO MATERIAL
PARTICULADO EM SUSPENSÃO NO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ

TCC apresentado ao Curso de Oceanografia,
Campus Pontal do Paraná – Centro de Estudos do
Mar, da Universidade Federal do Paraná, como re-
quisito parcial à obtenção do título de Bacharel em
Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Almeida Noernberg

PONTAL DO PARANÁ

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATA DE REUNIÃO

TERMO DE APROVAÇÃO

Rafael Avila Simão

“AVALIAÇÃO DO ALGORITMO C2RCC PARA A ANÁLISE DO MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO NO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ”

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos membros:

Prof. Dr. Maurício Almeida Noernberg
Orientador - CEM/UFPR

Prof. Dr. Elias Fernando Berra
Dpto. Geografia - UFPR

M.Sc. Rafaela Cristine Zem
Doutoranda PGSISCO - CEM/UFPR

Pontal do Paraná, 06 de maio de 2022



Documento assinado eletronicamente por **MAURICIO ALMEIDA NOERNBERG, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/05/2022, às 15:10, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **ELIAS FERNANDO BERRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/05/2022, às 14:13, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **RAFAELA CRISTINE ZEM, Usuário Externo**, em 13/05/2022, às 08:47, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **4475818** e o código CRC **FB42DE43**.

Dedico esta trabalho ao Jack, por me mostrar o amor pelos vegetais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Lorena, e ao meu pai, Antonio, por todo o amor e suporte, não só durante a graduação, mas durante todo meu caminho até aqui. Espero que eu lhes tenha dado, ao menos, um pouco do orgulho que tanto merecem. Agradeço, à minha irmã, Natália, pela paciência torturante durante as aulas de reforço de física, as quais certamente plantaram em mim um interesse por essa área. Agradeço, ainda, aos meus demais familiares, especialmente ao meu padrasto e aos meus “irmãos tortos”, que conviveram comigo durante a adolescência e fazem falta no convívio diário.

Agradeço ao meu orientador, Mauricio, não somente pelas orientações e pela oportunidade de fazer parte do LOCG, mas também pela pessoa que é e pela carreira a que se dedica. Espero que saiba que, desde as primeiras aulas em oceanografia descritiva, me inspiro e me espelho em você, professor.

Agradeço aos meus colegas e amigos de curso por tornarem a vida em Pontal do Sul mais leve, especialmente Gean, Gustavo e Maria Luiza, que, apesar das adversidades, continuam na graduação. Jamais esperaria ter a sorte de conhecer pessoas assim quando cheguei nessa cidade.

Por fim, agradeço à minha companheira de amores e de estudos (sobre os quais, ainda assim, compartilhamos nosso amor), Yasmym. Cada dia ao teu lado me enche de alegria, e minha única tristeza é de não termos nos aproximado antes – enfim, tudo tem seu tempo.

Deixo Sísifo no sopé da montanha! Sempre se reencontra seu fardo. Mas Sísifo ensina a fidelidade superior que nega os deuses e levanta os rochedos. Ele também acha que tudo está bem. Esse universo doravante sem senhor não lhe parece nem estéril nem fútil. Cada um dos grãos dessa pedra, cada clarão mineral dessa montanha cheia de noite, só para ele forma um mundo. A própria luta em direção aos cimos é suficiente para preencher um coração humano. É preciso imaginar Sísifo feliz.

(Albert Camus, 1942, p. 76)

RESUMO

O estudo do material particulado em suspensão (MPS) é de grande importância, já que este se relaciona com o balanço sedimentar de regiões costeiras, com a poluição marinha, com a saúde dos ecossistemas aquáticos e com obras de dragagem. O sensoriamento remoto figura como uma excelente ferramenta de estudo do MPS por possibilitar a cobertura de grandes áreas por um baixo custo. O presente trabalho teve como objetivo a análise do MPS por sensoriamento remoto no Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) - PR. Para tanto, foi utilizado o algoritmo C2RCC (Case 2 Regional CoastColour), que é baseado em redes neurais artificiais e foi desenvolvido para águas costeiras e estuarinas. O algoritmo foi aplicado a 50 imagens do satélite Sentinel-2 entre os anos de 2016 e 2021. O padrão de distribuição do MPS nos dois eixos do CEP (um no sentido L-O e outro no N-S) foi comparado com o observado em campo por dois trabalhos anteriores. A concentração média de MPS gerada pelo C2RCC foi de $26,68 \pm 10,71 \text{ g/m}^3$ (média \pm desvio padrão), mesmo valor que os dados de campo utilizados para a calibração dos parâmetros do algoritmo. Além disso, as concentrações de MPS obtidas pelo C2RCC estiveram na mesma ordem de grandeza que as obtidas *in situ*. A variabilidade sazonal do MPS obtido por sensoriamento remoto mostrou maiores concentrações no verão e menores no inverno, com tendência de diminuição em direção à desembocadura. Esse padrão de distribuição difere dos dados de campo utilizados para comparação, mas não há consenso na literatura sobre a sazonalidade do MPS na área de estudo. Ademais, a análise permitiu a identificação da zona de máxima turbidez no eixo N-S do CEP. A dificuldade para a identificação dessa feição no eixo L-O provavelmente se deve às diferenças conceituais entre MPS e turbidez e/ou à variabilidade espaçotemporal dessa feição. A pluma estuarina do CEP pode ser observada, com maior concentração no verão (estação chuvosa) e maior variabilidade no inverno (maior energia de ondas). Os baixios representaram um dos principais desafios ao presente estudo, criando picos ou vales na concentração observada. Entre os efeitos associados aos baixios, destacam-se a alta reflectância do fundo, uma possível falha na correção atmosférica e altos valores de absorção. Em relação às forçantes, a maré parece ser preponderante na dinâmica do MPS na área de estudo, em concordância com a literatura e corroborando com os resultados do algoritmo. Por fim, foram feitas algumas recomendações para futuros trabalhos, com base nas dificuldades e potencialidades aqui encontradas.

Palavras-chave: cor da água do mar; material particulado em suspensão; oceanografia por satélite; sensoriamento remoto; Sentinel-2.

ABSTRACT

The study of suspended particulate matter (SPM) is of great importance, considering that it is related to sediment dynamics, marine pollution, aquatic ecosystems health, and dredging operations. Remote sensing is an excellent tool for studying SPM because it can monitor large areas at a low cost. The present work aimed to analyze the SPM on the Paranaguá Estuarine Complex (PEC) – PR using remote sensing. The C2RCC (Case 2 Regional CoastColour) algorithm was used to achieve this goal. This algorithm is based on artificial neural networks and was developed specifically for coastal and estuarine zones. The C2RCC was used to process 50 images from Sentinel-2 satellite between 2016 and 2021. SPM distribution along the two main axes of PEC (one E-W oriented, and the other N-S) was compared to *in situ* measurements of two previous works. The C2RCC SPM concentration was 26.68 ± 10.71 g/m³ (mean \pm standard deviation), the same as the calibration dataset. Moreover, the C2RCC concentrations were the same magnitude as the *in situ* data. Seasonal variability of remote sensing SPM showed higher values in summer, with a decrease towards PEC's mouth. This distribution pattern differs from the *in situ* data, but there is no agreement on literature about SPM seasonality in the study area. In addition, the analysis allowed the observation of the maximum turbidity zone in only one PEC axis. This is probably related to the conceptual differences between SPM and turbidity and/or to this feature's spatial and temporal variability. PEC's estuarine plume was also observed, with higher concentrations during summer (rainy period) and higher variability during winter (higher wave energy). Shallow waters (shoals) were one of the biggest challenges for the present work. These shallow areas had several effects on the remote sensing SPM, creating peaks and troughs in the observed concentrations. Among these effects, bottom reflectance, a possible failure of the algorithm's atmospheric correction, and the prevalence of absorption over scattering stand out. Regarding processes related to SPM dynamics, tides appear to be the most important, following the literature and confirming the algorithm results. At last, some recommendations for further works were made, considering the difficulties and potentials discussed here.

Keywords: ocean color; remote sensing; satellite oceanography; Sentinel-2; suspended particulate matter.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – AS DIFERENTES RADIÂNCIAS QUE CHEGAM AO SENSOR.....	16
FIGURA 2 – EFEITO DA SATURAÇÃO ÓPTICA.....	18
FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA RNA.....	20
FIGURA 4 – COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ (CEP).....	24
FIGURA 5 – FLUXOGRAMA DO PROCESSAMENTO PELO C2RCC.....	26
FIGURA 6 – BOXPLOT DOS DADOS MEDIDOS <i>IN SITU</i> E GERADOS PELO ALGORITMO C2RCC.....	33
FIGURA 7 – CONCENTRAÇÃO DE MPS NO EIXO L-O DO CEP.....	33
FIGURA 8 – CONCENTRAÇÃO DE MPS NO EIXO N-S DO CEP.....	35
FIGURA 9 – CONCENTRAÇÃO DE MPS NO EIXO L-O DO CEP NO VERÃO E NO INVERNO.....	36
FIGURA 10 – ANÁLISE DAS COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA).....	37
FIGURA 11 – MAPA DA CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE MPS NO CEP.....	38
FIGURA 12 – MAPA DO DESVIO PADRÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MPS NO CEP.....	40
FIGURA 13 – MAPA DA INCERTEZA DA CONCENTRAÇÃO DE MPS NO CEP.....	40
FIGURA 14 – MAPA DA ANOMALIA DA CONCENTRAÇÃO DE MPS NO CEP EM 04/06/2019.....	41
FIGURA 15 – MAPA DA ANOMALIA DA CONCENTRAÇÃO DE MPS NO CEP EM 09/02/2020.....	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	JUSTIFICATIVA.....	13
2	OBJETIVO.....	15
2.1	OBJETIVO GERAL.....	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	23
4.1	ÁREA DE ESTUDO.....	23
4.2	METODOLOGIA.....	26
4.2.1	O Algoritmo C2RCC.....	26
4.2.2	O Satélite Sentinel-2.....	28
4.2.3	Calibração dos Parâmetros e Validação do Algoritmo.....	28
4.2.4	Dados meteorológicos, fluviométricos e de maré.....	30
5	RESULTADOS.....	32
6	DISCUSSÃO.....	43
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
	REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, nota-se uma tendência de ocupação de regiões próximas ao litoral, o que se expressa no fato de a densidade populacional em até 100 km da linha de costa ser igual a cerca de três vezes a densidade populacional média global e contar com aproximadamente 60% das grandes cidades (HAFEEZ *et al.*, 2019; OUILLON, 2018). Além disso, os cerca de 440 000 km de linha de costa em todo o mundo estarão sujeitos a alterações em função das mudanças climáticas e do aumento da ocupação das zonas costeiras (OUILLON, 2018).

No Brasil, a zona costeira legalmente abrange o mar territorial (12 milhas náuticas a partir da linha de costa) e os municípios costeiros (dos quais fazem parte 13 das 27 capitais brasileiras) (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE — MMA, 2018). O país também apresenta tendência histórica de ocupação das áreas próximas ao litoral, com 26,58% de sua população em municípios litorâneos (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA — IBGE, 2011). Nesse cenário complexo, ecossistemas frágeis e de grande biodiversidade comumente encontram-se pressionados por um modelo desenvolvimentista e de ocupação intensa, além de ameaças futuras, como é o caso das mudanças climáticas (MMA, 2018). Boa parte das alterações que o Brasil e o mundo enfrentarão nas próximas décadas estará associada a mudanças na dinâmica dos sedimentos em ambientes costeiros, como os estuários. Essas alterações contrastam com as lacunas de conhecimento existentes sobre tal dinâmica (OUILLON, 2018).

Os estuários estão inseridos na zona costeira e servem, desde o início da civilização, como locais propícios à habitação e ao desenvolvimento de diversas atividades. Podem ser descritos pela definição clássica de Pritchard (1952) como ambientes semifechados, conectados livremente com o oceano, nos quais a água salgada do mar é diluída pela água doce proveniente da drenagem continental.

Sua subdivisão se dá em três porções (MARONE *et al.*, 2007): (i) zona de maré do rio, que corresponde à porção fluvial com influência da maré; (ii) zona de mistura, na qual a água salgada do mar se mistura com a água doce dos rios e; (iii) zona costeira, em que há maior influência marinha e na qual pode ser encontradas plumas estuarinas, formadas em grande parte por material particulado em suspensão (MPS).

Por sua vez, o MPS é um dos principais componentes das águas costeiras, estando relacionado aos fluxos de massa e aos padrões de erosão em rios, estuários e zonas costeiras em geral (TAVORA *et al.*, 2020). Sua composição envolve desde partículas orgânicas (como detritos e células fitoplanctônicas) até partículas inorgânicas (como sedimentos introduzidos pelos rios), que são capazes de absorver e espalhar a luz e, assim, alterar o comportamento óptico da água (BOWERS; BINDING, 2006; TAVORA *et al.*, 2020).

A alteração que o MPS causa no comportamento óptico das águas costeiras e oceânicas torna possível a medição da concentração dessa variável por sensoriamento remoto. Para tanto, existem dois tipos de algoritmos conceitualmente distintos: (i) os algoritmos empíricos, que se baseiam em relações empíricas (regressões uni ou multivariadas) entre a reflectância medida pelo sensor do satélite e a concentração medida *in situ* e; (ii) os algoritmos analíticos ou semi-analíticos, que se baseiam nas propriedades ópticas inerentes (POI), definidas em função da absorção e do espalhamento dos constituintes opticamente ativos da água do mar (MPS, matéria orgânica dissolvida colorida e a própria água do mar) (ACKER *et al.*, 2005; TAVORA *et al.*, 2020).

A utilização de algoritmos empíricos é mais frequente (MIKKELSEN, 2002), porém possui como ponto negativo sua dependência das características sedimentológicas e da amplitude de variação do MPS no local em que foram obtidos os dados de campo, o que limita sua aplicação (NECHAD; RUDDICK; PARK, 2010; TAVORA *et al.*, 2020). Por outro lado, os algoritmos semi-analíticos podem ser vistos como uma abordagem mais global, já que estão baseados no comportamento óptico dos constituintes para compreender a relação entre reflectância e concentração de MPS (NECHAD; RUDDICK; PARK, 2010). A diversidade de algoritmos (de ambos os tipos) criados para a medição de MPS por sensoriamento remoto, porém, explicita a dificuldade dessa tarefa (MIKKELSEN, 2002).

1.1 JUSTIFICATIVA

O MPS atua como importante meio de transporte de poluentes e contaminantes, devido aos processos de formação de agregados, adsorção e decantação (DROPO, 2001; MACHADO, 2011). Dessa forma, uma melhor compreensão de

sua dinâmica beneficia estudos relacionados à poluição marinha. Além disso, o MPS pode servir tanto como estimulador da produtividade primária, fornecendo nutrientes e matéria orgânica (DROPPA, 2001; MACHADO, 2011), quanto inibidor, limitando a penetração de luz na coluna d'água (KRATZER; KYRYLIUK; BROCKMANN, 2020) e afetando a saúde dos ecossistemas aquáticos (NEWCOMBE; MACDONALD, 1991).

A dinâmica do MPS também se relaciona com o balanço sedimentar de regiões costeiras (OUIILLON, 2018) e é de especial interesse às atividades de dragagem, que buscam compensar a sedimentação sobre canais navegáveis em regiões estuarinas. Nesse aspecto, destaca-se a Resolução CONAMA nº 454, de 2012, que traz o limite de concentração de MPS permitido em atividades de dragagens. O monitoramento da pluma de MPS criada por essas atividades pode ser realizado por sensoriamento remoto, como em Caballero, Navarro e Ruiz (2018), que utilizou dados de 5 satélites distintos (Landsat-8, Sentinel-2A, WorldView-2, WorldView-3 e GeoEye-1).

Ademais, medições de MPS por sensoriamento remoto possuem algumas vantagens sobre abordagens tradicionais *in situ*, possibilitando a cobertura de grandes áreas, de maneira sinóptica, em intervalos regulares de tempo, em longos períodos e por um baixo custo. Em conjunto, algoritmos semi-analíticos possibilitam a análise de outros constituintes opticamente ativos, como a CDOM (*Colored Dissolved Organic Matter*, matéria orgânica dissolvida colorida) e a clorofila-a, que podem ser utilizadas em estudos futuros.

Deve-se ter em mente, contudo, que o sensoriamento remoto possui algumas limitações, como a presença de nuvens (que podem diminuir significativamente o número de imagens na área de estudo, como mostrou Noernberg (2001)), a baixa penetração da luz na coluna d'água em alguns comprimentos de onda (MOBLEY, 2020), a dificuldade em se separar a reflectância do fundo e a reflectância do MPS (KRUG; NOERNBERG, 2007) e o desafio de se obter dados de campo para a calibração e validação de algoritmos (GIANNINI; HARARI; CIOTTI, 2017).

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o desempenho do algoritmo semi-analítico C2RCC (*Case 2 Regional CoastColour*) no estudo da variabilidade do MPS no Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), utilizando imagens do satélite Sentinel-2.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir esse objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

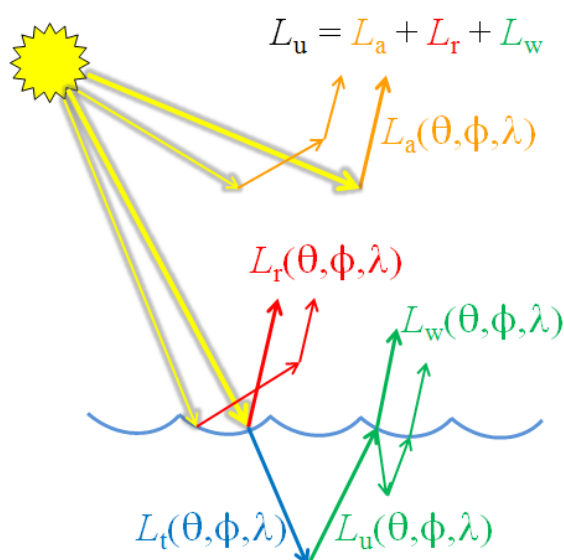
- Recuperar das imagens do satélite Sentinel-2 as concentrações de MPS da superfície do CEP no período de 2016 a 2021 a partir da aplicação do algoritmo C2RCC.
- Descrever e analisar a variabilidade espacial e sazonal das concentrações de MPS no CEP obtida pelo algoritmo e comparar com a obtida por dados *in situ*.
- Analisar a influência das marés e do aporte fluvial sobre as concentrações de MPS obtidos pelo algoritmo na área de estudo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

O estudo do MPS por sensoriamento remoto historicamente esbarra em dois grandes problemas (MOREL; PRIEUR, 1977). O primeiro, consiste em compreender a atenuação atmosférica e o comportamento da luz na interface ar-mar. O segundo, em relacionar a reflectância emergente da superfície do mar às POI e, posteriormente, à concentração de MPS.

O primeiro problema se deve ao fato da radiância que chega ao sensor ser o resultado da soma das contribuições dadas pela atmosfera, pela superfície do mar e pela coluna d'água (MOBLEY, 2020), como mostra a FIGURA 1. Como somente a contribuição dada pela coluna d'água traz informações sobre os constituintes opticamente ativos, realiza-se a correção atmosférica, tendo como produto a radiância emergente da superfície do mar (MOBLEY, 2020). A partir disso, calcula-se a reflectância emergente da superfície do mar, definida como a porção da radiância incidente que retorna para um ângulo específico (MOBLEY, 2020).

FIGURA 1 – AS DIFERENTES RADIÂNCIAS QUE CHEGAM AO SENSOR



FONTE: Mobley (2020).

LEGENDA: componentes da radiância total emergente acima da superfície do mar (L_u); setas amarelas mostram a luz solar que não foi espalhada; setas laranjas mostram a radiância espalhada pela atmosfera (L_a), setas vermelhas mostram a radiância refletida pela superfície (L_r) e setas verdes mostram a radiância proveniente da coluna d'água (L_w); L_t (em azul) mostra a luz que é transmitida na coluna d'água e L_u (em verde) mostra a luz que é espalhada em direção à superfície.

Já o segundo problema, refere-se às POI da água do mar. As POI são definidas pelas propriedades de absorção e espalhamento de um meio, dadas pelos seus respectivos coeficientes (MOBLEY, 2020). Matematicamente, o coeficiente de absorção (a) é definido pela fração da luz incidente que é absorvida por unidade de comprimento (MOBLEY, 2020). Da mesma forma, o coeficiente de espalhamento (b) é dado pela fração da luz incidente que é espalhada por unidade de comprimento (MOBLEY, 2020).

No caso do MPS, seu coeficiente de espalhamento está cerca de uma ordem de grandeza acima de seu coeficiente de absorção (Bowers; Binding, 2006). Por esse motivo, a concentração de MPS é comumente obtida a partir do coeficiente de espalhamento (ou de retroespalhamento) por partículas em suspensão. Tal coeficiente pode ser calculado com base na teoria de Mie, desde que conhecidas a distribuição de tamanhos e a composição química das partículas e feitas algumas simplificações (todas as partículas são tratadas como esféricas e como se possuíssem o mesmo índice refrativo em relação à água) (BABIN *et al.*, 2003).

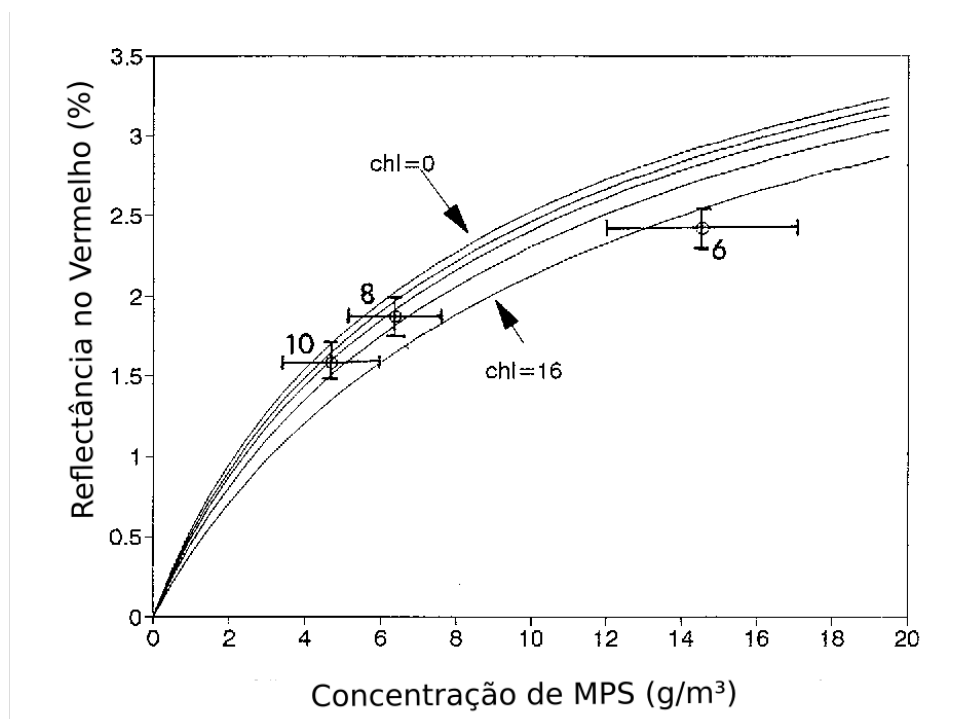
Apesar da definição matemática das POI ser simples, seu cálculo a partir de dados de sensoriamento remoto é complexo, especialmente em águas de Caso 2, nas quais o espalhamento por MPS é a principal característica óptica (MOREL; PRIEUR, 1977; ROBINSON, 2010). Isso se deve principalmente à natureza não-linear da relação entre reflectância e concentração de MPS.

Essa problemática pode ser vista no trabalho de Mikkelsen (2002), que mostrou ser realista esperar variações em torno de 3 a 10 vezes na reflectância de superfície para uma mesma concentração de MPS em regiões estuarinas, em função de alterações na densidade (associada à composição química) e tamanho (que altera a área superficial) das partículas. Um resultado similar foi encontrado por Binding, Bowers e Mitchelson-Jacob (2005), que concluíram que altos valores de reflectância no Mar da Irlanda não estavam necessariamente relacionados a altas concentrações de MPS.

Outro aspecto da relação não-linear entre concentração de MPS e reflectância encontra-se no fenômeno de saturação óptica, descrito por Bowers, Boudjelas e Harker (1998) e mostrado na FIGURA 2. Tal fenômeno faz com que, em elevadas concentrações de MPS, a reflectância tenda a um limite assintótico, a partir do qual a absorção se dá predominantemente pelo MPS (e não mais pela água) (NECHAD;

RUDDICK; PARK, 2010; TAVORA *et al.*, 2020). Nesses casos, a relação entre MPS e reflectância deixa de ser confiável, já que esta passa a responder somente ao tipo das partículas que compõem o MPS, e não mais à sua concentração (NECHAD; RUDDICK; PARK, 2010; TAVORA *et al.*, 2020).

FIGURA 2 – EFEITO DA SATURAÇÃO ÓPTICA



FONTE: adaptado de Bowers, Boudjelas e Harker (1998).

LEGENDA: relação entre a reflectância no vermelho (banda 1 do sensor *Advanced Very-High-Resolution Radiometer* - AVHRR) e a concentração de MPS. As diferentes curvas correspondem a diferentes concentrações de clorofila e os pontos representam médias de reflectância e MPS para uma região no Mar da Irlanda. As barras de erro sobre os pontos representam um desvio padrão.

O valor de concentração a partir do qual o fenômeno de saturação óptica ocorre varia para cada comprimento de onda, sendo menor para menores comprimentos (já que estes apresentam baixa absorção pela água) e maior para maiores comprimentos (já que possuem maior absorção pela água) (NECHAD; RUDDICK; PARK, 2010; TAVORA *et al.*, 2020).

Para minimizar esse efeito, algoritmos utilizados em águas com elevada concentração de MPS comumente se baseiam em comprimentos de onda no final do espectro visível e no início do infravermelho próximo, como nos algoritmos de Ne-

chad, Ruddick e Park (2010) e Tavora *et al.* (2020). Outra possibilidade é a utilização de razões do logaritmo da reflectância medida em diferentes bandas, como no algoritmo de Chen *et al.* (2015), aplicado a zonas costeiras e estuarinas da China.

Ademais, a utilização de algoritmos semi-analíticos geralmente traz consigo algumas considerações (NECHAD; RUDDICK; PARK, 2010): (i) a relação entre concentração de MPS e sua POI de retroespalhamento é linear e dada por uma constante ($MPS = b_m^p * b_b$, em que b_m^p é o coeficiente de espalhamento massa específico e b_b é o coeficiente de retroespalhamento); (ii) o espalhamento por material não-particulado é considerado desprezível; (iii) não há reflectância do fundo.

A primeira e a última dessas considerações merecem atenção especial quando tratamos de regiões costeiras. Babin *et al.* (2003) avaliaram a relação entre a concentração de MPS e o retroespalhamento por partículas em diferentes regiões da Europa, encontrando variações de até três ordens de grandeza no coeficiente de espalhamento massa específico entre e dentro regiões. Esse coeficiente, conforme Babin e colaboradores, varia com a densidade (e, por consequência, composição química) das partículas.

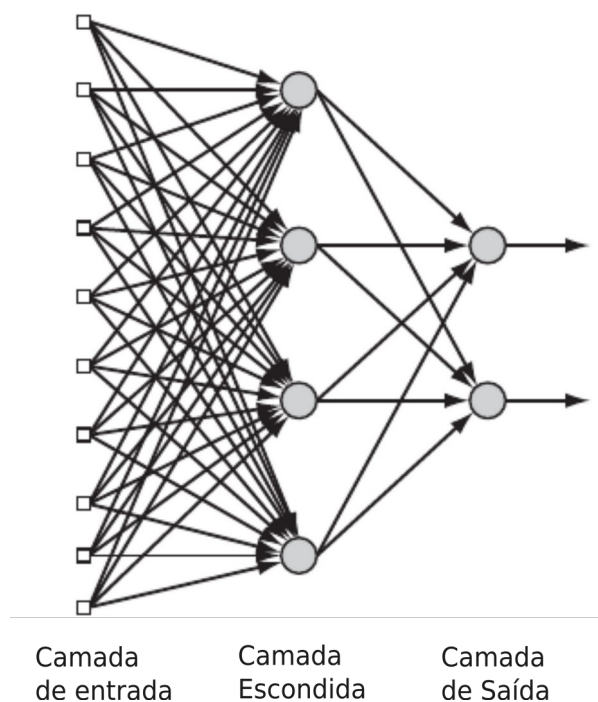
Como exemplo das variações de b_m^p na prática, tem-se o trabalho de Bowers e Binding (2006), no Mar da Irlanda. Os autores encontraram um padrão na distribuição, com valores altos do coeficiente em mar aberto, baixos em regiões intermediárias e novamente altos em regiões mais turbulentas. Isso se deve, conforme o trabalho, às variações no tamanho das partículas, causadas pelos efeitos de decantação de partículas maiores em águas oceânicas, formação de flocos nas porções intermediárias e ressuspensão e destruição desses flocos devido à turbulência nas regiões interiores.

Já em relação à reflectância do fundo, tem-se que esta corresponde à contribuição do leito para a reflectância emergente da superfície do mar (Casal *et al.*, 2020). A consideração de que não há reflectância do fundo pode não ser realista em regiões rasas (como em zonas costeiras e estuarinas), nas quais essa contribuição é relevante e pode ser confundida com a reflectância do MPS presente na coluna d'água (KRUG; NOERNBERG, 2007). Como exemplo de estudo da reflectância do fundo, tem-se o trabalho de Casal *et al.* (2020), que obtiveram a batimetria de áreas rasas na costa da Irlanda a partir de dados de sensoriamento remoto.

Diante de todos os desafios aqui apontados para a obtenção da concentração de MPS por sensoriamento remoto, a utilização de algoritmos semi-analíticos baseados em técnicas de aprendizado de máquina (*machine learning*) tem emergido recentemente, mostrando resultados superiores aos algoritmos empíricos em ambientes opticamente complexos (HAFEEZ *et al.*, 2019).

Dentre esses algoritmos emergentes, alguns utilizam redes neurais artificiais (RNAs), que podem ser compreendidas como uma versão computadorizada do cérebro humano (HAYKIN, 2009). As RNAs são divididas em camadas (ao menos uma de entrada e uma de saída, com uma ou mais camadas “escondidas”), cada qual com um número definido de neurônios (HAYKIN, 2009), como mostra a FIGURA 3. O valor de cada neurônio é calculado com base nos valores dos neurônios da camada anterior multiplicados por seus respectivos pesos, de forma análoga às sinapses do cérebro biológico (HAYKIN, 2009). Como vantagens dessa abordagem, tem-se a capacidade de “aprender”, ajustando os pesos que calculam o valor de cada neurônio, e de modelar relações não-lineares (HAYKIN, 2009).

FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA RNA



FONTE: adaptado de Haykin (2009).

Como exemplo da utilização desse tipo de algoritmo, tem-se o estudo de Teodoro, Veloso-Gomes e Gonçalves (2007), que aplicaram com sucesso RNAs em uma zona de arrebentação da costa portuguesa, demonstrando a capacidade desse algoritmo em modelar a relação não-linear entre reflectância e concentração de MPS.

O algoritmo utilizado no presente trabalho, o C2RCC, é semi-analítico e se baseia em RNAs para obter a POI da água do mar, posteriormente convertidas em concentração de MPS. Alguns trabalhos anteriores já buscaram validar o C2RCC em diferentes regiões do mundo.

Toming *et al.* (2017) avaliaram os produtos do processamento do C2RCC, por meio de comparações com dados *in situ*. A reflectância emergente da superfície do mar dada pelo C2RCC mostrou-se realista em situações sem florações de algas, o que indica boa qualidade da correção atmosférica. Por outro lado, as POI e concentrações de MPS, na maioria dos casos, não apresentaram correlação significativa com os dados *in situ* ($R^2 = 0,003$ para o coeficiente de espalhamento e $R^2 = 0,11$ para o MPS). Segundo os autores, esse resultado se deve ao treinamento do C2RCC ser voltado a regiões costeiras em que o espalhamento é predominante, enquanto que a área de estudo (Mar Báltico) apresenta elevada absorção por CDOM.

Já o trabalho de Hafeez *et al.* (2019) comparou o C2RCC com diversas técnicas de aprendizado de máquina para a obtenção de indicadores de qualidade da água (incluindo o MPS) em regiões costeiras de Hong Kong. A rede neural desenvolvida pelos autores alcançou desempenho superior ao C2RCC, mostrando melhor correlação com os dados coletados em campo e menor RMSE (*Root Mean Square Error*). Destacam-se no trabalho os altos valores de RMSE do C2RCC para MPS (31,1 g/m³, com concentração *in situ* variando entre cerca de 1 e 30 g/m³).

Kratzer, Kyryliuk e Brockmann (2020) analisaram a performance do C2RCC na medição da componente inorgânica do MPS no mar Báltico, utilizando o produto de espalhamento por partículas não-algais dado pelo algoritmo. Um algoritmo empírico desenvolvido pelos autores foi utilizado para converter o espalhamento dado pelo C2RCC em valores de MPS inorgânico. Como resultado, obtiveram um erro de padrão 9%, o que está dentro das recomendações de qualidade desejáveis dadas para o satélite utilizado (Sentinel-3).

Mais recentemente Nazirova *et al.* (2021) avaliou a performance do C2RCC e outros dois algoritmos em obter dados de MPS para uma pluma de sedimentos no Mar Negro. O C2RCC apresentou o melhor resultado dentre os algoritmos, com alta correlação com os dados *in situ* ($R^2 = 0,989$). Como pontos fracos do algoritmo, porém, o estudo aponta ruídos em casos com baixa concentração de MPS, valores superestimados e pouca clareza na delimitação das bordas da pluma estudada.

No Brasil, alguns trabalhos já utilizaram o algoritmo C2RCC, mas estiveram basicamente voltados à obtenção de dados de qualidade da água em reservatório, como em Alcantara *et al.* (2018). Nesse contexto e de acordo com o conhecimento do autor, o presente trabalho figura como um dos pioneiros da aplicação do C2RCC para o estudo do MPS nas águas costeiras do país.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

O litoral paranaense é limitado ao Norte pela Barra do Ararapira e ao Sul pela Barra do Saí, apresentando uma ampla planície costeira, de largura entre 10 e 50 km, poucos pontais rochosos e relevo plano. Nessa planície, destaca-se um grande embaiamento: o Complexo Estuarino de Paranaguá (BIGARELLA, 2001).

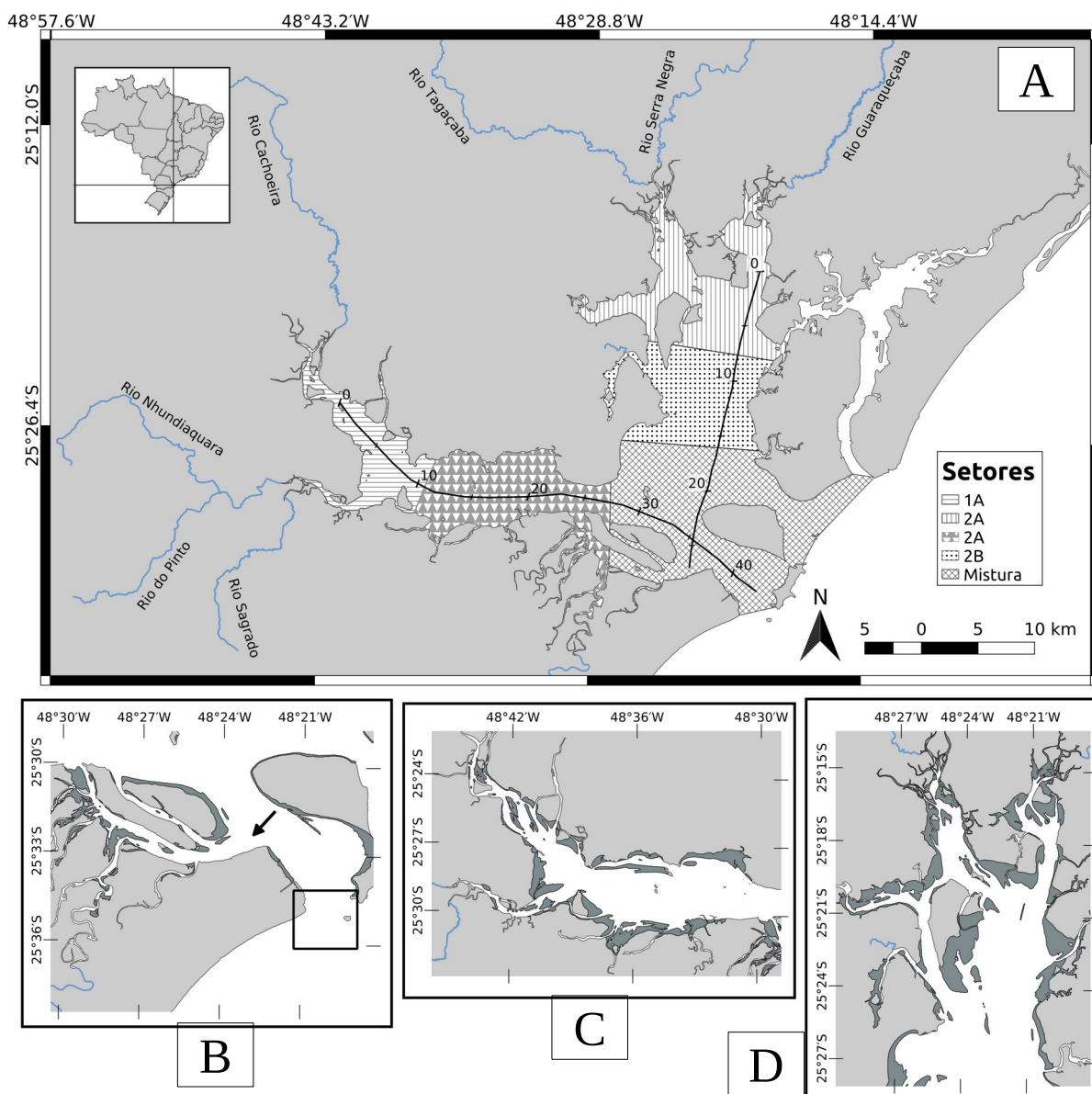
O Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP; FIGURA 4) se localiza em torno das coordenadas 48°25' O e 25°30' S. Seu corpo aquoso possui área de 551,8 km² (NOERNBERG *et al.*, 2006) e pode ser subdividido em dois grandes eixos: um no sentido L-O (em que se encontram as baías de Paranaguá e Antonina), com extensão de 56 km, e um no sentido N-S (em que se encontram as baías de Laranjeiras e Guaraqueçaba), com extensão de 30 km (LAMOUR; SOARES; CARRILHO, 2004).

Os principais afluentes no eixo L-O do CEP são os rios Guaraguaçu, Nhundi-aquara e Cachoeira, enquanto que no eixo N-S destacam-se os rios Guaraqueçaba, Serra Negra e Tagaçaba (ANGULO, 1992). Além disso, os dois eixos são unidos por uma zona de mistura e, no extremo nordeste do complexo, encontra-se a baía de Pinheiros (ANGULO, 1992; NOERNBERG *et al.*, 2006).

O clima na região é do tipo Cfa (Clima Subtropical Úmido – Mesotérmico), segundo a classificação de Koeppen, e é controlado pelo Anticiclone do Atlântico Sul (VANHONI; MENDONÇA, 2008). A temperatura média no mês mais quente (fevereiro) é superior a 22°C e inferior a 18°C no mês mais frio (julho). A precipitação anual média é de cerca de 2400 mm, sendo o verão a estação mais chuvosa (VANHONI; MENDONÇA, 2008).

As ondas na plataforma interna paranaense possuem predominância de sentido SSE e são formadas em sua maioria por fenômenos locais (NEMES; MARONE, 2013), com atuação de sistemas frontais na formação de ondas de maior energia (NEMES; MARONE, 2013). As estações do ano com maiores energias de ondas são a primavera e o outono (NEMES; MARONE, 2013). A atuação das ondas no CEP, em geral, se restringe à desembocadura do Complexo, com altura média de 0,5 m (LANA *et al.*, 2001).

FIGURA 4 – COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ (CEP)



FONTE: O autor (2021); *shapefiles* do CEP e do Brasil modificados do Observatório do Litoral Paranaense (2021) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2021).

LEGENDA: (A) o CEP, separado por setores; os números ao longo dos transectos correspondem à distância em quilômetros a partir da cabeceira de cada eixo. (B) porção da zona de mistura e da desembocadura sul; o retângulo mostra a região do Banco da Galheta e a seta indica a entrada do Canal da Cotinga. (C) eixo L-O do CEP. (D) eixo N-S do CEP. As regiões de cinza escuro nas FIGURAS B, C e D correspondem a regiões de baixos.

As marés são semidiurnas e, em sizígia, possuem amplitude de 1,7 m na boca do estuário, sendo amplificadas para 2,7 nas porções mais interiores (CAMARGO; HARARI, 2003; LANA *et al.*, 2001; MARONE *et al.*, 2007). Ocorrem correntes

residuais de vazante, que correspondem de 10% a 15% do fluxo total de maré e são importantes no transporte de sedimentos e na dispersão de poluentes (CAMARGO; HARARI, 2003; LANA *et al.*, 2001; MARONE *et al.*, 2007). Efeitos meteorológicos são relevantes e podem elevar a maré a até 0,8 m do esperado pela componente astronômica (MARONE; CAMARGO, 1994).

Os sedimentos do CEP mostram grande variabilidade de tamanho, desde argilas finas, a montante do eixo L-O, até areias muito grossas, ao Norte da desembocadura (LAMOUR; SOARES; CARRILHO, 2004). Em média, o diâmetro pode ser classificado entre silte fino e areia fina (LAMOUR; SOARES; CARRILHO, 2004). O grau de seleção destes sedimentos é geralmente baixo, variando entre muito pobremente selecionados e pobremente selecionados no interior do CEP e entre muito bem selecionado e muito pobremente selecionado na desembocadura (LAMOUR; SOARES; CARRILHO, 2004).

A concentração de MPS no CEP é, em geral, inferior a 50 g/m^3 e varia com a estação do ano e com o ciclo das marés (NOERNBERG, 2001; MANTOVANELLI, 1999). As maiores concentrações são encontradas no verão (período chuvoso da região) e em sizígia (já que as correntes de maré geram ressuspensão de sedimentos) (MANTOVANELLI, 1999). Em geral, a maré figura como principal forçante na dinâmica do MPS na área de estudo (MACHADO, 2011).

Concentrações de MPS de mais de 200 g/m^3 podem ser encontradas nas zonas de máxima turbidez do CEP (MACHADO, 2011). Essa feição pode ser identificada pela ocorrência de concentrações de MPS superiores às de jusante e de montante, com composição principalmente de sedimentos finos, que são provenientes tanto dos rios quanto do mar (DYER, 2001). No eixo L-O do CEP, essa feição se localiza entre os quilômetros 15 e 20 da FIGURA 4, enquanto que, no eixo N-S, encontra-se próxima do quilômetro 10 (NOERNBERG, 2001).

Ademais, as águas do CEP são tidas como opticamente complexas, devido à influência conjunta de matéria orgânica dissolvida, pigmentos fitoplânctônicos e MPS (NOERNBERG, 2001; NOERNBERG *et al.*, 2020). A grande variabilidade na dinâmica dessas variáveis, os efeitos de reflectância do fundo em locais rasos e a frequente cobertura de nuvens são algumas das dificuldades encontradas para o sensoriamento remoto da região (NOERNBERG, 2001).

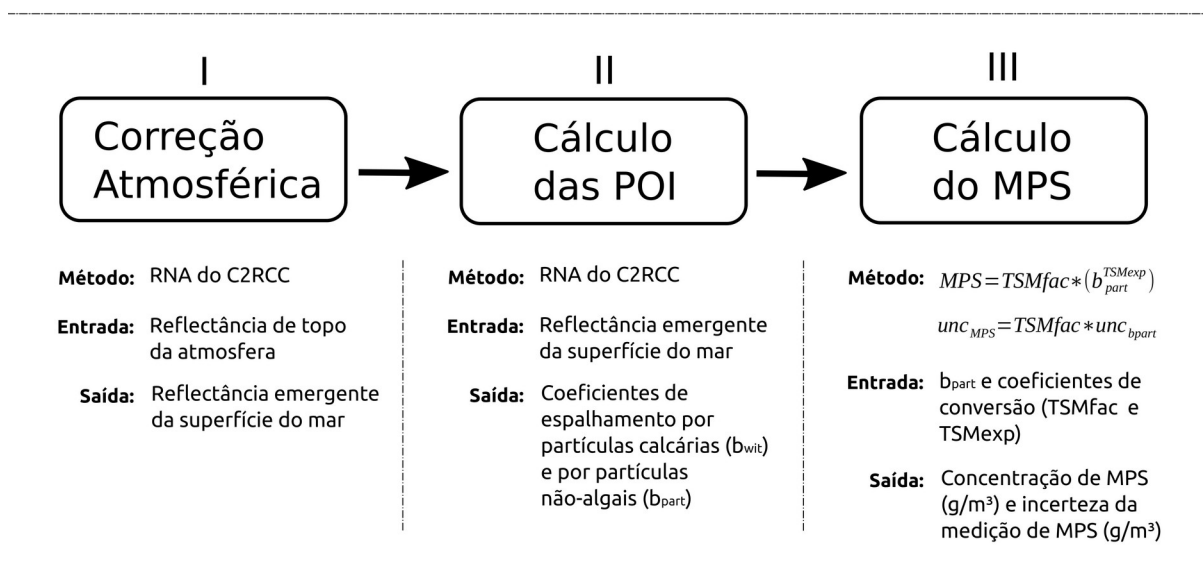
Para o presente trabalho, foram definidos dois transectos (um para cada eixo) e o CEP foi dividido em 4 setores (FIGURA 4). No eixo L-O, tem-se os setores 1A, 2A e Mistura, que correspondem às baías de Antonina e Paranaguá e zona de mistura, respectivamente (Noernberg *et al.*, 2006). No eixo N-S, tem-se os setores 1B, 2B e Mistura, que correspondem às porções interna e externa da Baía das Laranjeiras e à zona de mistura, respectivamente (Noernberg *et al.*, 2006). Com isso, buscou-se avaliar o desempenho do C2RCC nas diferentes porções do CEP.

4.2 METODOLOGIA

4.2.1 O Algoritmo C2RCC

O algoritmo C2RCC é voltado a águas costeiras de Caso 2 e utiliza redes neurais artificiais (RNAs) para obter as POI e as concentrações de clorofila e MPS a partir de imagens de satélites de diversos satélites/sensores (como o Sentinel-2 MSI, Sentinel-3 OLCI e Landsat-8 OLI). As RNAs do C2RCC foram treinadas pela ESA (*European Space Agency*) utilizando mais de 5 milhões de dados de reflectância simulada pelo modelo *Hydrolight*.

FIGURA 5 – FLUXOGRAMA DO PROCESSAMENTO PELO C2RCC



FONTE: O autor (2022).

O processamento pelo C2RCC pode se dividido em três etapas (FIGURA 5): (i) correção atmosférica, com inversão dos dados de topo da atmosfera para dados de reflectância emergente da superfície do mar; (ii) análise dentro da água, com obtenção das POI (para o comprimento de onda de 442 nm) a partir da reflectância emergente da superfície do mar e; (iii) conversão das POI em concentrações de clorofila-a e MPS.

A concentração de MPS é obtida com base no espalhamento total por partículas, que é calculado pela soma entre o espalhamento por partículas calcárias (coccolitoforídeos, principalmente) e por partículas não-algais. Para o presente trabalho, porém, somente o espalhamento por partículas não-algais foi considerado, pois a área de estudo não apresenta coccolitoforídeos. A equação utilizada está representada abaixo:

$$MPS = TSMfac * (b_{part}^{TSMexp}) \quad (1)$$

Na qual $TSMfac$ e $TSMexp$ são fatores de conversão, que podem ser definidos pelo usuário a fim de um melhor ajuste às condições locais, e b_{part} é a POI de espalhamento por partículas não-algais calculada pelo C2RCC.

Ademais, dois testes são realizados para assegurar a validade do processo de inversão. O primeiro verifica, banda por banda, se os valores estão contidos no intervalo (máximo e mínimo) utilizado durante o treinamento das redes neurais (*out-of-range test*). O segundo analisa o espectro como um todo, avaliando se algum espectro semelhante esteve presente no treinamento (*out-of-scope test*). As incertezas associadas, que são avaliadas para cada POI por outra rede neural, também são incluídas no produto final. A incerteza da concentração de MPS para os coeficientes calibrados foi calculada conforme a equação abaixo:

$$unc_{MPS} = TSMfac * unc_{bpart} \quad (2)$$

Na qual unc_{MPS} é a incerteza da concentração de MPS, unc_{bpart} é a incerteza de b_{part} dada pelo C2RCC e $TSMfac$ é o mesmo coeficiente de conversão utilizado na EQUAÇÃO 1.

O C2RCC pode ser utilizado pela plataforma SNAP, da ESA, e mais informações sobre seu funcionamento e histórico podem ser encontradas em Brockmann *et al.* (2016) e Doerffer e Schiller (2007).

4.2.2 O Satélite Sentinel-2

A missão Sentinel-2 inicialmente esteve voltada para a obtenção de dados terrestres, mas aos poucos foi ganhando espaço nos estudos marinhos e atualmente possibilita (em conjunto com outros satélites) a obtenção de dados sobre a dinâmica do MPS em estuários e regiões costeiras (LAVROVA *et al.*, 2016).

A missão conta com os satélites idênticos Sentinel-2A e Sentinel-2B, que possuem órbitas polares e heliossíncronas (com uma defasagem de 180° entre si) e estão equipados com o sensor MSI (*MultiSpectral Instrument*). O sensor possui 13 bandas entre 490 nm e 2190 nm (cobrindo o espectro visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas). Sua resolução espacial varia entre 10 e 60 m, dependendo da banda utilizada. O sensor possui campo de visada de 290 km, gerando imagens na área de estudo que cobrem o CEP, a Baía de Guaratuba e a Baía da Babitonga (estas duas últimas localizadas ao sul do CEP). Utilizando os dois satélites em conjunto, a resolução temporal para a área de estudo é de cerca de 5 dias (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2015).

4.2.3 Calibração dos Parâmetros e Validação do Algoritmo

As imagens do Sentinel-2 foram filtradas e baixadas por meio de uma API (*Application Programming Interface*, Interface de Programação de Aplicações) da ESA. Os filtros utilizados foram de cobertura de nuvens (máximo de 20%) e área de interesse (CEP). Ao todo, foram encontradas 86 imagens, sendo que 6 foram descartadas por problemas na plataforma da ESA e 30 foram descartadas após análise visual, por possuírem nuvens sobre o CEP. As 50 imagens restantes foram processadas pelo C2RCC, utilizando o *software* SNAP (versão 8.0).

Os parâmetros de temperatura e salinidade do C2RCC foram definidos em 24°C e 23, respectivamente, valores médios dessas variáveis para a área de estudo (Lana *et al.*, 2001). Os coeficientes de conversão do MPS foram calculados com

base nos dados de Noernberg (2001), que realizou coletas nos dois eixos do CEP entre janeiro de 1998 e março de 2000 (total de 30 campanhas) e efetuou análise gravimétrica conforme descrito por Strickland e Parsons (1972). Com base nessa calibração, chegou-se aos valores de 15,553 para TSM_{fac} e de 0,492 para TSM_{exp} como mostra a EQUAÇÃO 3.

$$MPS = 15,553 * (b_{part}^{0,492}) \quad (3)$$

Os valores de concentração de MPS de cada *pixel* ao longo dos transectos mostrados na FIGURA 4 foram extraídos pela função “*Pixel Extraction*”, do SNAP. Ao todo, foram extraídos cerca de 600 pontos no eixo L-O e cerca de 400 no eixo N-S para cada imagem, totalizando mais 50000 *pixels*. Destes, 216 *pixels* foram descartados com base na *flag* de qualidade do C2RCC (*pixels* inválidos, segundo o algoritmo), 2689 *pixels* com base na *flag* de risco de nuvens (*Cloud risk*) e 943 *pixels* com base no NDWI (*Normalized Difference Water Index*).

O NDWI (EQUAÇÃO 4) foi utilizado por possibilitar a identificação de áreas rasas (como mostrado por Krug e Noernberg, 2007), que podem gerar reflectância de fundo e afetar as concentrações de MPS obtidas por sensoriamento remoto. Os *pixels* da imagem na data com menor altura de maré que apresentassem NDWI menor que 0,4 (valor escolhido após análise visual das imagens) foram excluídos em todas as 50 imagens. Além disso, áreas de baixios foram delimitadas nas imagens utilizando os dados (*shapefile*) obtidos por sensoriamento remoto por Noernberg *et al.* (2006).

$$NDWI = \frac{Rtoa_{B3} - Rtoa_{B8}}{Rtoa_{B3} + Rtoa_{B8}} \quad (4)$$

Em que $Rtoa_{B3}$ e $Rtoa_{B8}$ são as reflectâncias de topo da atmosfera nas bandas B3 (560 nm) e B8 (842 nm), respectivamente. A reflectância de topo de atmosfera foi utilizada no lugar da reflectância emergente da superfície devido a uma possível falha na correção atmosférica do algoritmo, detalhada mais adiante na seção de discussão.

Dados de concentração de MPS *in situ* não estavam disponíveis em datas coincidentes com as de obtenção das imagens pelo satélite. Por esse motivo, o padrão de distribuição do MPS obtido por sensoriamento remoto foi comparado com aquele observado *in situ* por Noernberg (2001) e Mantovanelli (1999). Essa análise buscou avaliar a capacidade do algoritmo em revelar a distribuição do MPS nos dois eixos do CEP, bem como sua variação entre inverno e verão.

Os dados de MPS de Mantovanelli (1999) foram obtidos por meio de coletas realizadas ao longo do eixo L-O do CEP (20 pontos) no inverno de 1997 (8 medições) e no verão de 1998 (12 medições) em diferentes condições de maré. A análise gravimétrica se deu conforme Strickland e Parsons (1972) e dados faltantes foram calculados por Mantovanelli (1999) utilizando uma regressão linear entre MPS, turbidez e salinidade.

4.2.4 Dados meteorológicos, fluviométricos e de maré

Dados diários de precipitação foram obtidos de estações ao redor do CEP (quatro estações em Morretes, duas em Antonina, uma em Paranaguá e uma em Guaraqueçaba), por meio do *site* do SIH (Sistema de Informações Hidrográficas, do Instituto das Águas do Paraná). Somente foram consideradas as estações com dados de precipitação em todas as datas das 50 imagens obtidas por satélite. Com base nesses dados, foi calculada a precipitação acumulada média (período de 7 dias) entre todas as estações.

Dados de vazão fluviométrica também foram obtidos do SIH para estações ao redor do CEP (duas em Guaraqueçaba, nos rios Guaraqueçaba e Tagaçaba, e duas em Morretes, nos rios Sagrado e do Pinto). Somente foram consideradas as estações que possuísem dados de vazão em ao menos 45 das 50 datas das imagens, já que nenhuma estação possuía dados em todas as datas. A vazão fluviométrica média foi calculada com base nos dados dessas estações.

Em conjunto, foram utilizados dados de altura de maré do marégrafo da Ilha da Galheta, localizada na desembocadura do sul do CEP. Valores extremos de altura de maré foram excluídos com base em um filtro de $média \pm 3 * desvio\ padrão$. O ciclo de maré (sizígia ou quadratura) nas datas das imagens foram obtidos com base nas

fases da lua fornecidas pelo DIDAS (Departamento de Astrofísica), no *site* do CP-TEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos).

A análise das componentes principais (*principal component analysis*, PCA) foi utilizada para analisar essas variáveis (maré, vazão fluviométrica e precipitação) em conjunto com os dados de MPS gerados pelo C2RCC. A PCA é uma análise exploratória e foi empregada por possibilitar a redução da dimensionalidade dos dados, assim como uma melhor compreensão da relação entre variáveis e observações (JAMES *et al.*, 2021).

5 RESULTADOS

Uma síntese dos resultados obtidos no presente trabalho e do observado em campo por Noernberg (2001) é apresentada na TABELA 1. Os dados do CEP para todas as imagens, assim como em verão e inverno, correspondem à área de estudo como um todo (região mostrada na FIGURA 11). Já os valores para o eixo L-O e N-S correspondem aos transectos mostrados na FIGURA 4A.

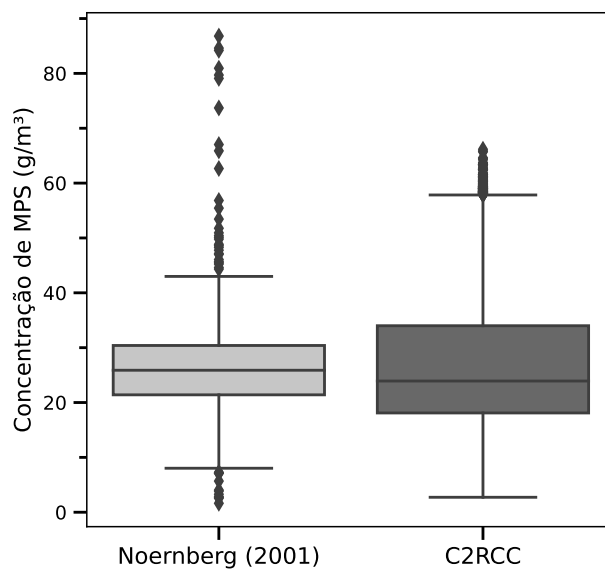
Em geral, a concentração de MPS no CEP foi de $24,36 \pm 12,00$ g/m³ (média \pm desvio padrão), com máximo de 86,57 g/m³. Em relação à variação sazonal, o verão apresentou maior média e desvio padrão que o inverno. Além disso, os dados do C2RCC apresentaram maiores concentrações no eixo N-S que no eixo L-O, mas o contrário foi observado em campo por Noernberg (2001). O desvio padrão, porém, foi semelhante nos dados obtidos por sensoriamento remoto e medidos *in situ* em ambos os eixos.

TABELA 1 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO MPS NO CEP

Dado - Fonte	n	Média (g/m ³)	Desvio Padrão (g/m ³)	Máximo (g/m ³)	Mínimo (g/m ³)
CEP - C2RCC	50	24,36	12,00	86,57	0,53
Verão - C2RCC	15	25,37	13,46	85,97	0,53
Inverno - C2RCC	10	22,14	9,95	84,34	0,53
L-O - C2RCC	50	28,33	11,17	65,85	2,73
N-S - C2RCC	50	24,41	9,58	66,18	7,12
L-O - Noernberg (2001)	27	25,61	11,71	84,61	2,57
N-S - Noernberg (2001)	24	28,05	9,13	86,80	1,63

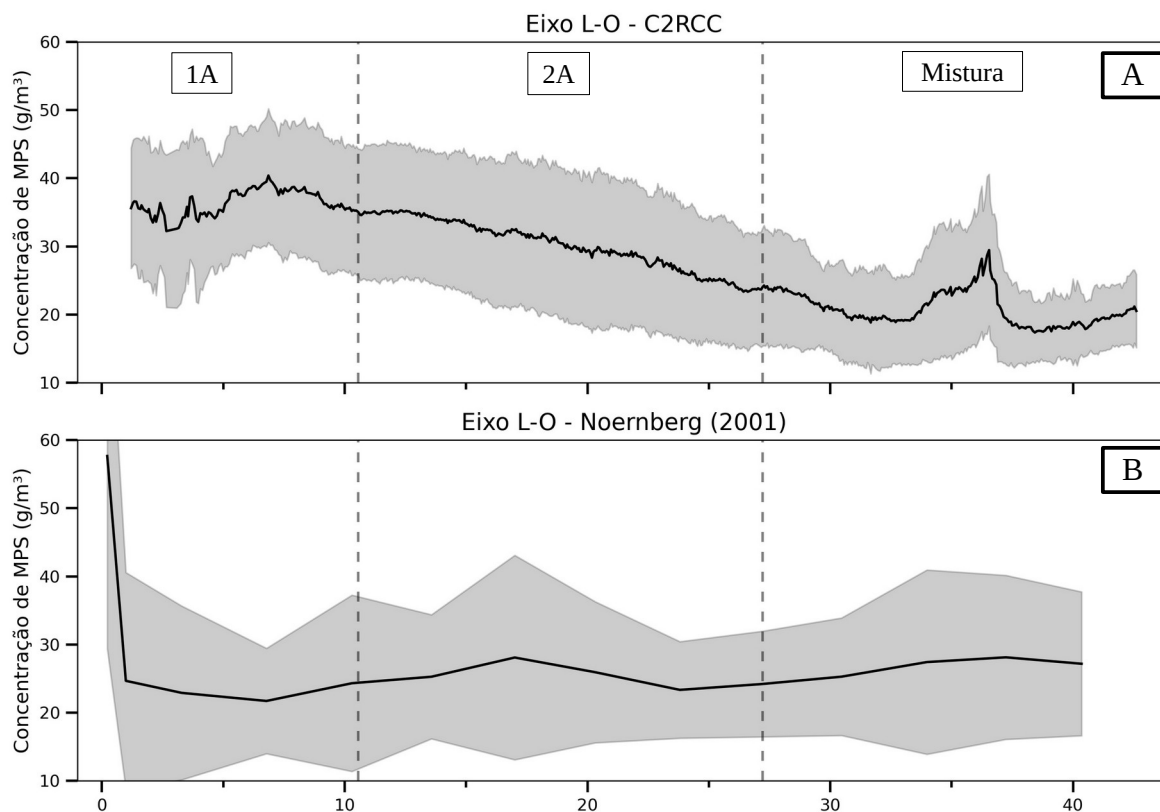
FONTE: Noernberg (2001); O autor (2022).

A FIGURA 6 compara as concentrações de MPS medidas *in situ* por Noernberg (2001) e geradas pelo algoritmo C2RCC, ao longo dos dois eixos do CEP. Os dados gerados pelo algoritmo se encaixam na mesma ordem de grandeza que aqueles medidos por Noernberg (2001) e apresentam distribuição de quartis semelhante, com a maioria dos valores entre 20 g/m³ e 40 g/m³. Como diferença, nota-se que as concentrações geradas pelo C2RCC possuem maior amplitude (na caixa e, principalmente, nos *whiskers*) e que os valores extremos medidos por Noernberg (2001) são mais elevados, chegando a quase 90 g/m³.

FIGURA 6 – BOXPLOT DOS DADOS MEDIDOS *IN SITU* E GERADOS PELO ALGORITMO C2RCC

FONTE: dados modificados de Noernberg (2001); O autor (2022).

FIGURA 7 – CONCENTRAÇÃO DE MPS NO EIXO L-O DO CEP



FONTE: (A) O autor (2022); (B) Dados modificados de Noernberg (2001).

LEGENDA: (A) Dados gerados pelo algoritmo C2RCC. (B) Dados medidos *in situ* por Noernberg (2001). As linhas pretas representam os valores médios de concentração de MPS para cada pixel da imagem. Os sombreados representam o desvio padrão dos dados. As linhas tracejadas indicam o limite entre os setores do CEP, conforme mostrado na FIGURA 4A.

Ademais, tem-se que a média \pm desvio padrão para as concentrações medidas *in situ* e geradas pelo algoritmo ao longo dos eixos foi de $26,68 \pm 10,71 \text{ g/m}^3$, em ambos os casos, indicando sucesso na calibração dos coeficientes de conversão da EQUAÇÃO 3.

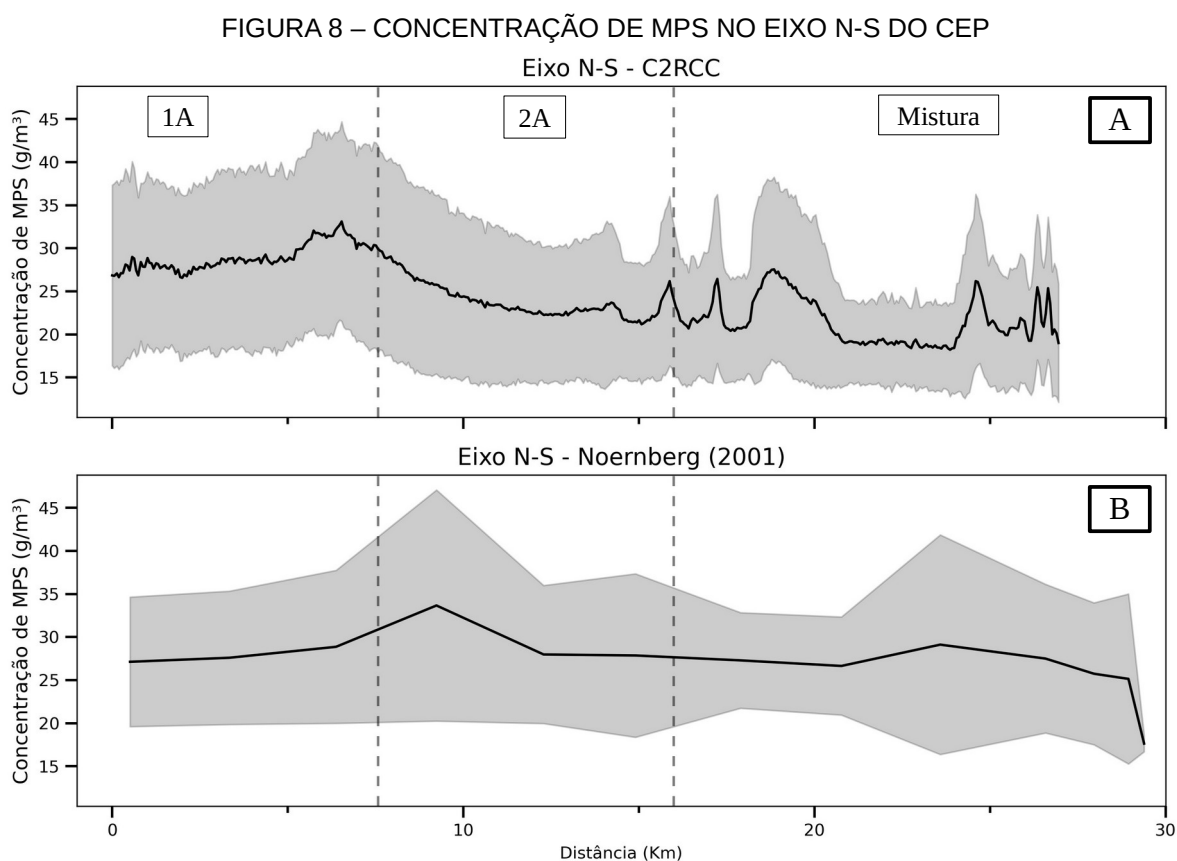
A FIGURA 7 mostra a distribuição da concentração de MPS ao longo do eixo L-O do CEP. No perfil com os dados gerados pelo C2RCC (FIGURA 7A), nota-se uma tendência de diminuição da concentração em direção à desembocadura do CEP, com valores entre 30 e 40 g/m^3 no setor 1A, entre 35 e 25 g/m^3 no setor 2A e entre 15 e 30 g/m^3 no setor Mistura. Além disso, o setor Mistura possui um pico de concentração de cerca de 30 g/m^3 , entre os quilômetros 30 e 40, e o setor 1A apresenta um leve aumento da concentração, entre os quilômetros 5 e 10.

Nos dados obtidos *in situ* por Noernberg (2001) (FIGURA 7B), notam-se concentrações praticamente constantes ao longo do eixo L-O, com valores entre 20 e 30 g/m^3 . Apesar disso, o desvio padrão (área sombreada) mostra um aumento entre 0 e 20 km e entre 30 e 40 km. Segundo Noernberg (2001), essas variações se devem à influência da zona de máxima turbidez e à influência marinha (biomassa zooplancônica), respectivamente. Entre essas duas regiões (quilômetro 20 ao 30), ocorre uma região mais profunda e com menores concentrações de MPS.

A FIGURA 8 mostra a distribuição da concentração de MPS ao longo do eixo N-S do CEP. No perfil com os dados gerados pelo C2RCC (FIGURA 8A), novamente nota-se uma tendência de diminuição da concentração em direção à desembocadura do CEP, com valores entre 25 e 35 g/m^3 no setor 1B, entre 30 e 20 g/m^3 no setor 2B e entre 20 e 25 g/m^3 no setor Mistura. É possível perceber, ainda, uma maior variabilidade no setor mistura, com ao menos 4 picos de concentração.

De maneira similar ao que foi visto no eixo L-O, os dados obtidos *in situ* por Noernberg (2001) no eixo N-S (FIGURA 8B) mostram concentrações praticamente constantes, com valores entre 25 e 30 g/m^3 . Picos de concentração (associados a um aumento no desvio padrão) são vistos entre 5 e 15 km e entre 20 e 30 km. Uma leve diminuição da concentração de MPS pode ser vista na cabeceira do estuário (quilômetro 0), o que indica, conforme Noernberg (2001), uma menor influência fluvial nesse eixo do CEP.

Em ambos os eixos do CEP (FIGURAS 7 e 8), a média e o desvio padrão dos dados gerados pelo algoritmo são semelhantes aos medidos *in situ* por Noernberg, confirmando o que foi visto na FIGURA 6.



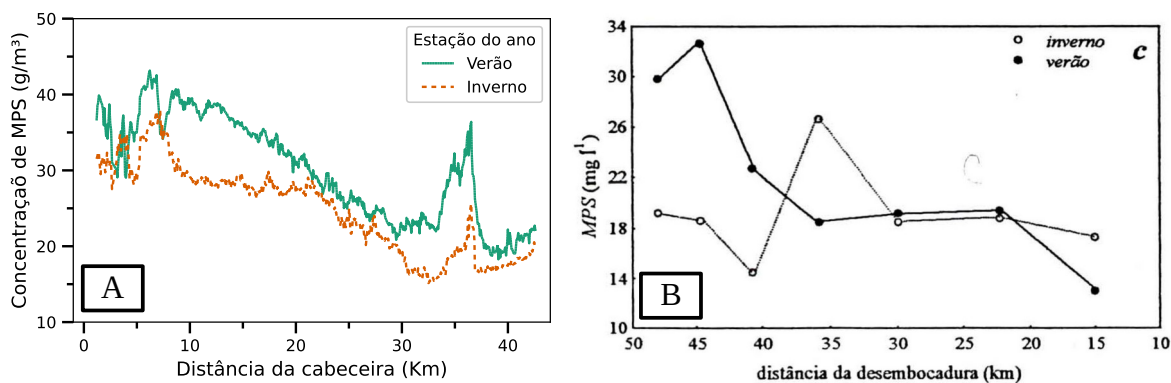
FONTE: (A) O autor (2022); (B) Dados modificados de Noernberg (2001).

LEGENDA: (A) Dados gerados pelo algoritmo C2RCC. (B) Dados medidos *in situ* por Noernberg (2001). As linhas pretas representam os valores médios de concentração de MPS para cada pixel da imagem. Os sombreados representam o desvio padrão dos dados. As linhas tracejadas indicam o limite entre os setores do CEP, conforme mostrado na FIGURA 4.

A FIGURA 9 mostra o perfil longitudinal de MPS na superfície da água ao longo do eixo L-O para dados medidos *in situ* por Mantovanelli (1999) e para dados gerados pelo algoritmo C2RCC. Os dados de Mantovanelli (1999) (FIGURA 9B) mostram a variação sazonal da distribuição de MPS. O verão possui forte gradiente, com diminuição da concentração de cerca de 30 g/m³ na cabeceira para cerca de 15 g/m³ na desembocadura do eixo. Por outro lado, o inverno apresenta concentrações mais constantes ao longo do eixo, em um perfil mais semelhante ao encontrado por Noernberg (2001) (FIGURA 7B). O pico visto no inverno entre 30 e 40 km à montan-

te da desembocadura se deve, conforme Mantovanelli (1999), a uma única medição com concentrações bastante elevadas de MPS, possivelmente devido à influência da descarga da bacia do rio Nhundiaquara.

FIGURA 9 – CONCENTRAÇÃO DE MPS NO EIXO L-O DO CEP NO VERÃO E NO INVERNO



FONTE: (A) O autor (2022); (B) Mantovanelli (1999).

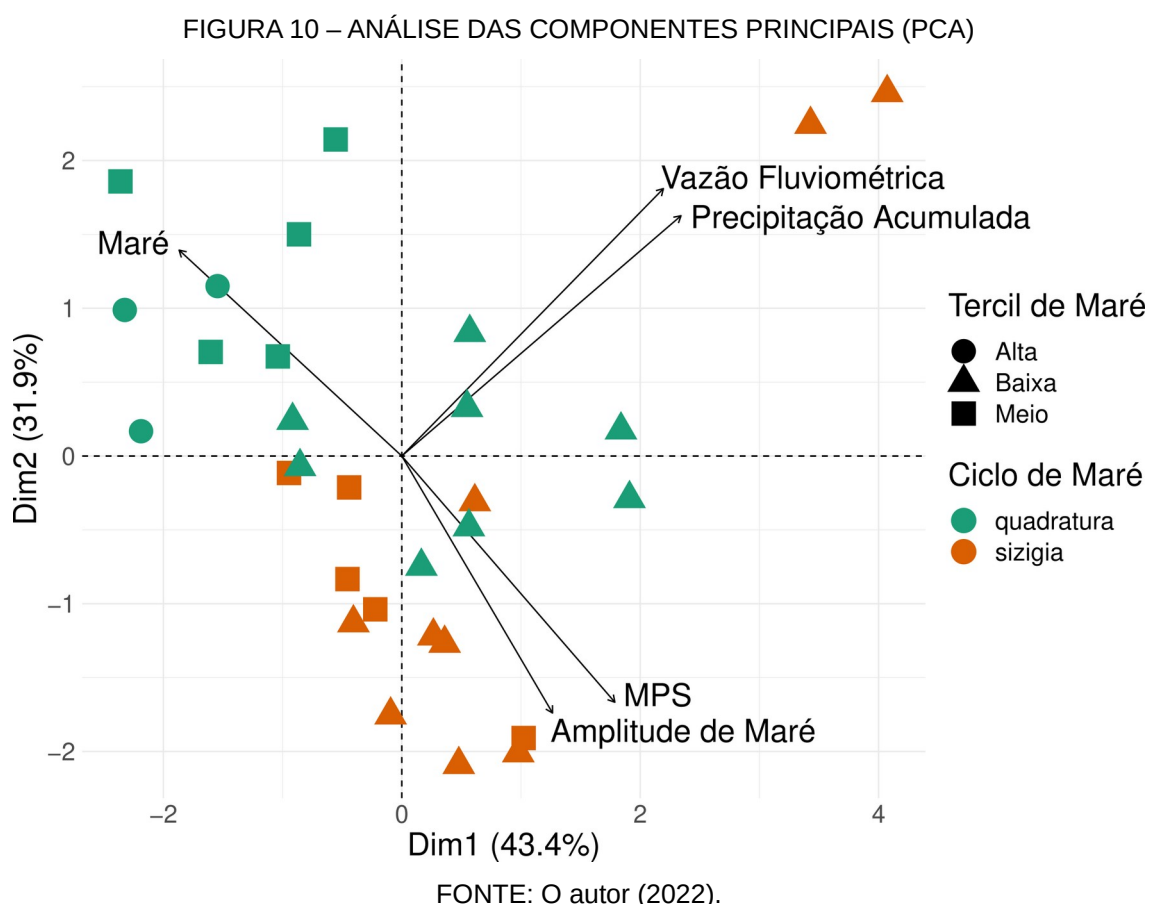
Os dados gerados pelo C2RCC (FIGURA 9A) apresentam concentrações levemente superiores no verão, mas não mostram a mesma variação sazonal vista nos dados *in situ* de Mantovanelli (1999). Ambas as estações do ano possuem um padrão de diminuição da concentração em direção à desembocadura, com um pico entre os quilômetros 30 e 40. Novamente, nota-se que os dados obtidos *in situ* e gerados pelo algoritmo encontram-se na mesma ordem de grandeza.

A PCA foi utilizada para avaliar as relações entre variáveis e observações, com os dados agrupados pelas datas (FIGURA 10). Os dados de amplitude de maré e vazão fluviométrica correspondem aos valores na data da imagem. A precipitação acumulada corresponde à soma da precipitação nos últimos 7 dias da data da imagem (incluindo a data da mesma). O MPS corresponde à concentração média de todos os pontos dos dois transectos (FIGURA 4) em cada data. Por fim, a maré corresponde à altura de maré no instante da imagem e o tercil de maré mostra a altura de maré em relação à amplitude de maré do dia.

Em conjunto, as duas componentes principais da PCA explicam 75,3% da variabilidade dos dados. As variáveis se dividiram, em geral, em dois grupos quase perpendiculares entre si. O primeiro grupo é formado pela precipitação acumulada e pela vazão fluviométrica, que mostraram uma relação direta entre si e não geraram separação dos dados em relação ao tercil e ciclo de maré. Apesar disso, dois pontos

isolados podem ser vistos no canto superior direito da FIGURA 10, indicando que estas datas estiveram marcadas por forte precipitação e vazão fluviométrica.

O segundo grupo de variáveis é formado por amplitude de maré, concentração de MPS e altura de maré. As duas primeiras variáveis apresentam relação direta entre si, ao passo que as duas últimas possuem relação inversa. Dessa forma, os maiores valores de MPS estiveram associados a altas amplitudes e baixas alturas de maré (o que pode estar associado a correntes de vazante de sizígia, por exemplo). Além disso, esse grupo de variáveis dividiu os dados entre marés de sizígia (com maior concentração de MPS) e quadratura (com menor concentração de MPS), bem como entre maré baixa (maior concentração de MPS) e maré alta (menor concentração de MPS).



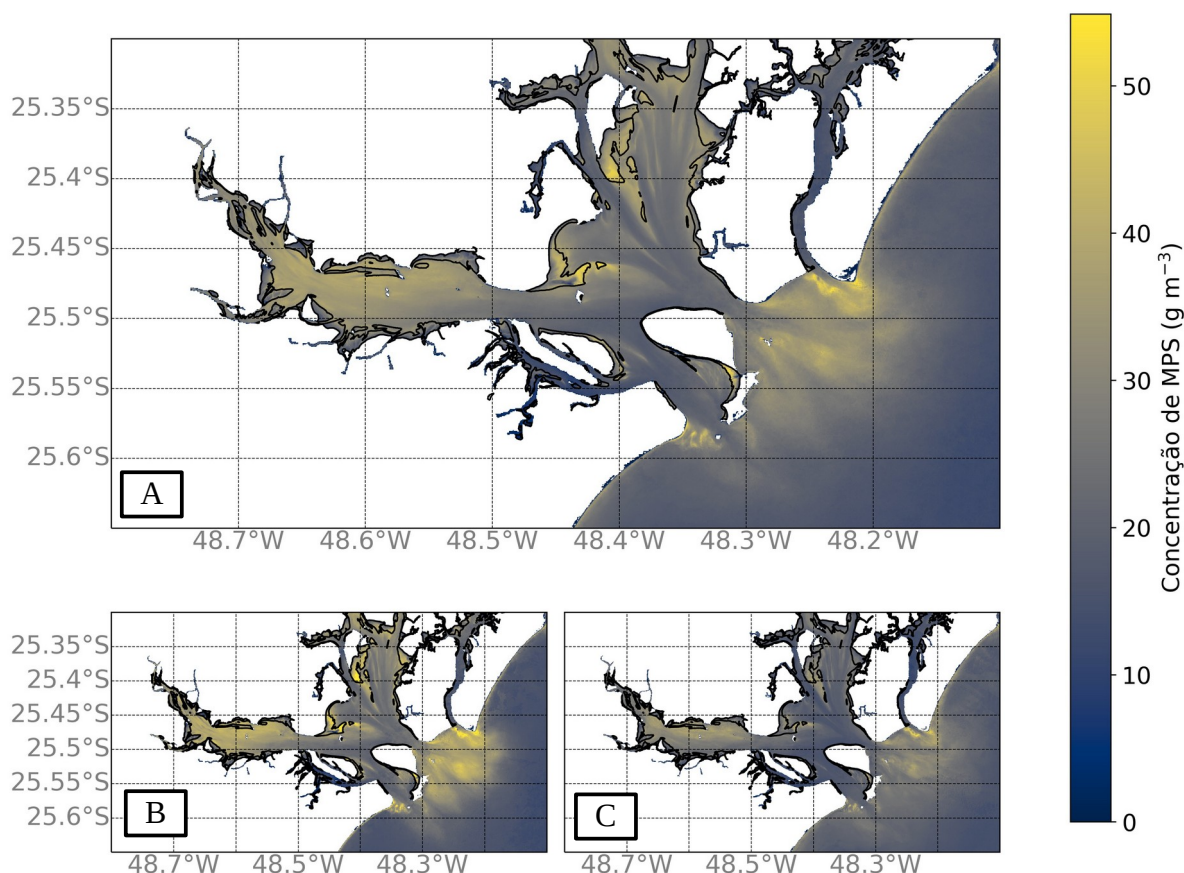
A FIGURA 11A mostra a média da concentração de MPS gerada pelo C2RCC no CEP, considerando todas as 50 imagens disponíveis para o período estudado (24 imagens em marés de sizígia e 26 em marés de quadratura). As FIGURAS 11B e 11C mostram a média da concentração de MPS para as estações do ano de

verão (15 imagens, sendo 7 em sizígia e 8 em quadratura) e inverno (10 imagens, sendo 4 em sizígia e 6 em quadratura), respectivamente. Em todas as imagens, as regiões de baixios estão delimitadas por linhas pretas.

No eixo L-O da FIGURA 11A, nota-se que o MPS apresenta uma distribuição homogênea, diminuindo gradativamente em direção à desembocadura. Como exceção, tem-se o pico de concentração observado na FIGURA 7A, localizado na entrada do Canal da Cotinga (FIGURA 4B), que provavelmente corresponde a um baixo, considerando a constância desse ponto nas imagens.

No eixo N-S, observa-se um padrão menos definido na concentração, com picos em diferentes porções do eixo. Tal afirmação confirma o que foi visto na FIGURA 8, com concentrações menores que no eixo L-O e praticamente constantes, excetuando-se alguns picos isolados. A variação sazonal novamente foi observada, com concentrações maiores no verão, especialmente nas regiões de baixios.

FIGURA 11 – MAPA DA CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE MPS NO CEP



FONTE: O autor (2022); *shapefile* dos baixios obtido de Noernberg *et al.* (2006).

LEGENDA: (A) concentração média de MPS para as 50 imagens; (B) para estação do ano de verão; (C) para estação de inverno. Linhas pretas delimitam as regiões de baixo.

Ademais, na desembocadura Sul do CEP, pode-se observar o Banco da Galheta (FIGURA 4B), com suas porções Norte e Sul separadas por concentrações menores de MPS no local em que se localiza o canal de navegação. Na desembocadura Norte, também são vistas concentrações elevadas, com valores máximos provavelmente também associados a baixios.

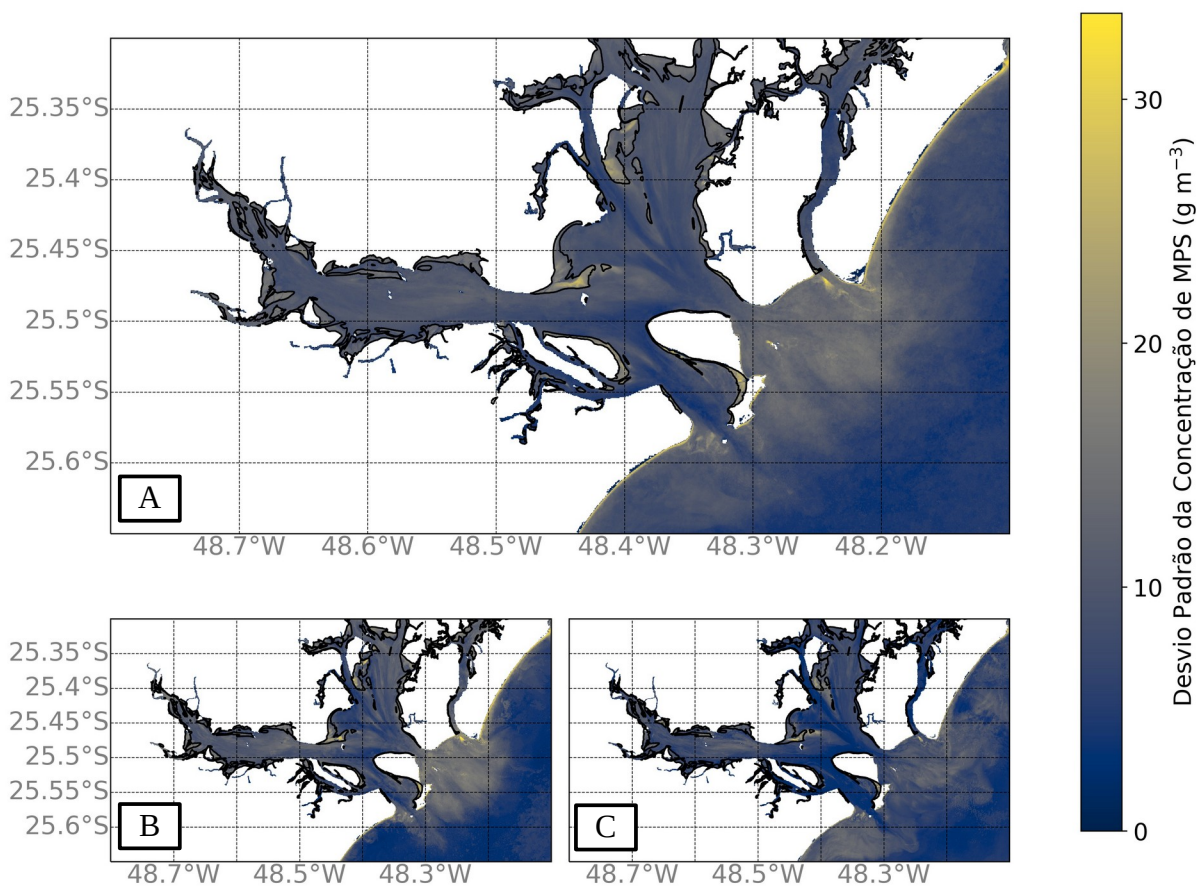
A variação sazonal do MPS no CEP pode ser vista nas FIGURAS 11B e 11C, que apresentam concentrações mais elevadas no verão em praticamente todo o CEP, especialmente nas áreas de baixios da margem oeste do eixo N-S. Na desembocadura, as maiores concentrações no verão podem indicar um fortalecimento da pluma estuarina na estação chuvosa.

Os baixios são um aspecto que merece atenção especial, já que o algoritmo conferiu concentrações mais elevadas em alguns casos (como nos baixios do eixo N-S) e mais baixas em outros (como na maioria dos baixios do eixo L-O). Em uma análise mais aprofundada, foi possível perceber que, em algumas imagens, as áreas de baixios possuem alta reflectância de topo da atmosfera, mas baixa reflectância emergente da superfície do mar. Esse resultado pode indicar problemas na correção atmosférica do algoritmo, mas os efeitos das diferenças nas características sedimentológicas desses baixios ou interferência de outros constituintes opticamente ativos (CDOM e pigmentos fitoplanctônicos) não podem ser desconsiderados.

O desvio padrão da concentração de MPS no CEP para todas as 50 imagens pode ser visto na FIGURA 12A. Em geral, o CEP apresenta valores baixos de desvio padrão, com alguns valores mais elevados na desembocadura (como no banco da Galheta e em alguns pontos da desembocadura Norte) e nos baixios (como na margem oeste do eixo N-S). Além disso, nota-se que as regiões de altas concentrações vistas na FIGURA 11 correspondem às regiões de alto desvio padrão na FIGURA 12.

As FIGURAS 12B e 12C mostram o desvio padrão do MPS nas estações de verão e inverno, respectivamente. Em ambas as imagens, notam-se valores mais altos na região da desembocadura, com maior extensão espacial durante o inverno, o que pode ser o reflexo da maior frequência de passagem de frentes frias nessa estação do ano. Além disso, o verão apresentou desvio padrão maior que o inverno nas porções interiores do CEP, com valores máximos em áreas de baixios.

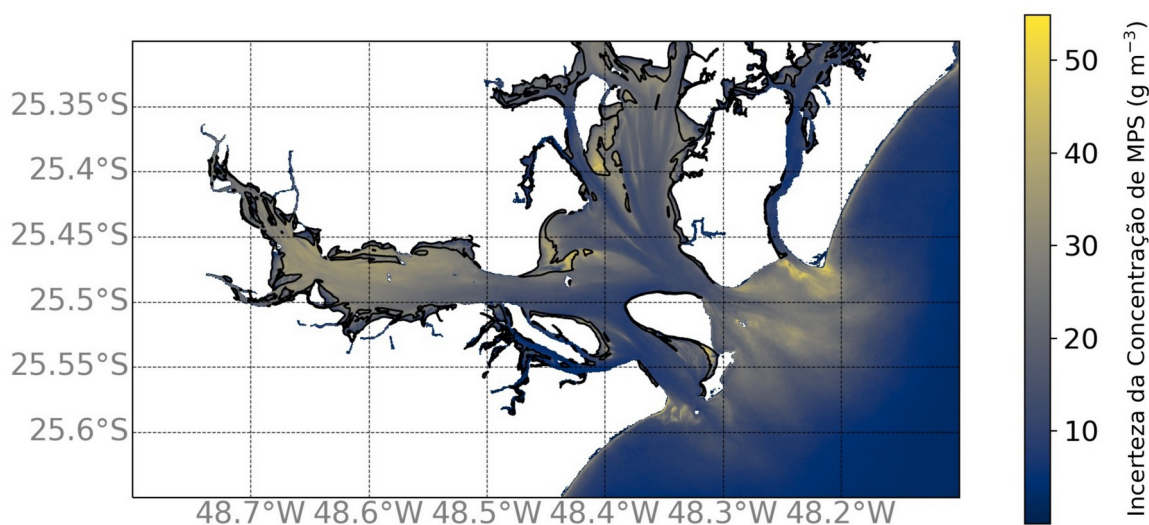
FIGURA 12 – MAPA DO DESVIO PADRÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MPS NO CEP



FONTE: O autor (2022); *shapefile* dos baixios obtido de Noernberg *et al.* (2006).

LEGENDA: (A) desvio padrão da concentração de MPS para as 50 imagens; (B) para estação do ano de verão; (C) para estação de inverno. Linhas pretas delimitam as regiões de baixo.

FIGURA 13 – MAPA DA INCERTEZA DA CONCENTRAÇÃO DE MPS NO CEP



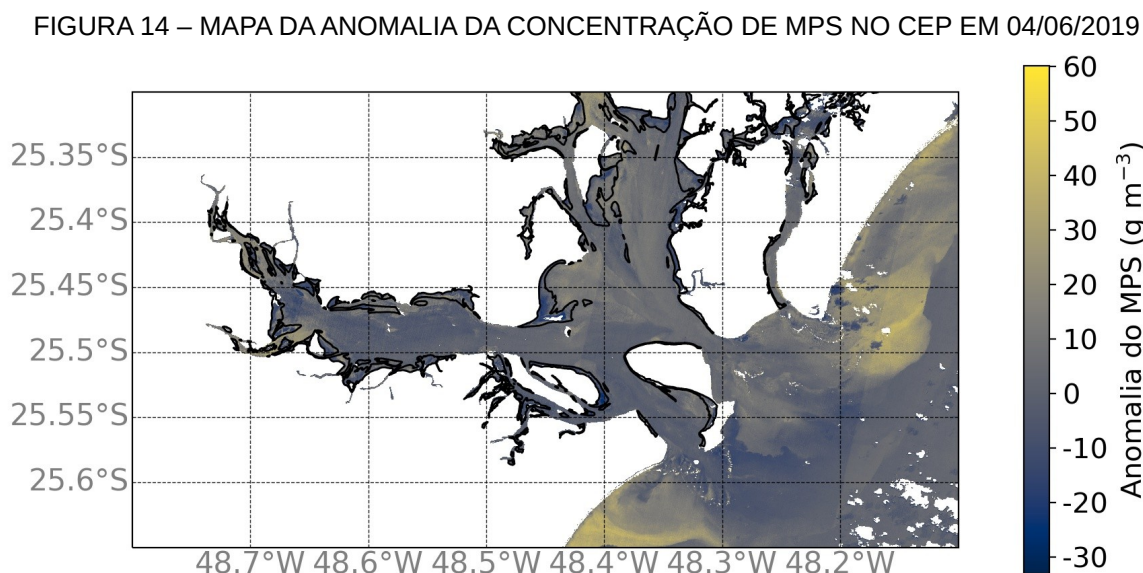
FONTE: O autor (2022); *shapefile* dos baixios obtido de Noernberg *et al.* (2006).

LEGENDA: incerteza da concentração de MPS para as 50 imagens. Linhas pretas delimitam as regiões de baixo.

A FIGURA 13 mostra a incerteza da concentração de MPS, conforme a EQUAÇÃO 2, e se assemelha muito com a FIGURA 11 (tanto em magnitude, quanto em distribuição espacial), apresentando distribuição mais homogênea no eixo L-O, mais heterogênea no eixo N-S e picos de concentração em baixios e na desembocadura.

As FIGURAS 14 e 15 mostram a anomalia da concentração de MPS no CEP para as datas de 04/06/2019 e 09/02/2020 (ou seja, a diferença entre a concentração em cada data e a concentração média da FIGURA 11), respectivamente. Essas datas foram selecionadas por apresentarem elevada precipitação e vazão fluvio-métrica, como visto na PCA (FIGURA 10).

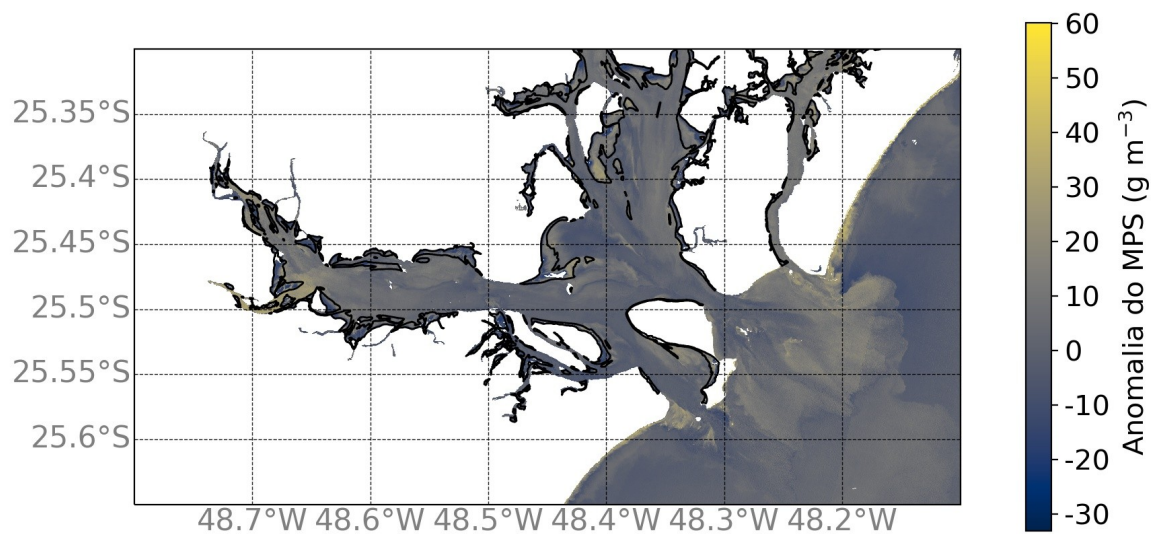
Na FIGURA 14, nota-se que a concentração permanece baixa em toda a área de estudo (anomalia negativa, especialmente em algumas regiões de baixios), com o que aparenta ser uma pluma de sedimentos a Norte a ao Sul da desembocadura. Por outro lado, a FIGURA 15 apresenta anomalia positiva na desembocadura do CEP, com a pluma estuarina bem definida. Além disso, os baixios no interior do CEP possuem anomalia positiva em algumas porções (como no banco da Galheta) e anomalia negativa em outras (como na maioria dos baixios do eixo L-O).



FONTE: O autor (2022); *shapefile* dos baixios obtido de Noernberg *et al.* (2006).

LEGENDA: mapa da anomalia em 04/06/2019. Linhas pretas delimitam as regiões de baixio.

FIGURA 15 – MAPA DA ANOMALIA DA CONCENTRAÇÃO DE MPS NO CEP EM 09/02/2020



FONTE: O autor (2022); *shapefile* dos baixios obtido de Noernberg *et al.* (2006).

LEGENDA: mapa da anomalia em 09/02/2020. Linhas pretas delimitam as regiões de baixo.

6 DISCUSSÃO

As concentrações geradas pelo C2RCC possuem máximo, mínimo e quartis semelhantes às concentrações medidas *in situ* por Noernberg (2001). Em conjunto, ambos os dados apresentaram valores semelhantes de média e desvio padrão, indicando efetividade da calibração dos parâmetros do algoritmo.

Em relação à distribuição longitudinal, o padrão geral de diminuição da concentração de MPS no eixo L-O (de montante para jusante do CEP) condiz com a maior influência fluvial nesse eixo (MANTOVANELLI, 1999; NOERNBERG, 2001). Apesar disso, esse padrão é diferente do encontrado em campo no trabalho de Noernberg (2001), com o algoritmo apresentando valores mais elevados que as medições *in situ* no setor 1A.

Por outro lado, o padrão de distribuição no eixo N-S se mostrou mais semelhante ao visto em campo por Noernberg (2001), excetuando-se os picos encontrados no setor Mistura, que serão discutidos mais adiante. Os máximos de concentração de MPS vistos nas FIGURAS 8A e 8B provavelmente correspondem à zona de máxima turbidez. No eixo L-O, o leve aumento da concentração de MPS visto no setor 1A da FIGURA 7A também pode ter sido causado pela presença da zona de máxima turbidez, mas essa interpretação merece cuidado, devido à presença de baixos no entorno dessa região (FIGURA 4C)

Entre as causas para essa possível não identificação da zona de máxima turbidez, destacam-se: sua grande variabilidade espaçotemporal, que depende dos estágios de maré (MANTOVANELLI, 1999) e pode não ser compatível com a resolução do satélite utilizado e; as diferenças teóricas entre turbidez (uma propriedade óptica aparente, que depende da geometria da luz e das características do material particulado) e MPS (MOBLEY, 2020). Esse último ponto já foi discutido por Mantovanelli (1999), que encontrou baixa correlação entre as variáveis no CEP, com relação bastante dependente do estágio de maré.

Em relação à variação sazonal, o padrão de MPS dado pelo algoritmo ao longo do eixo L-O do CEP durante a estação de verão se mostrou semelhante ao encontrado por Mantovanelli (1999), com redução em direção à desembocadura. No inverno, o padrão de distribuição de MPS dado pelo algoritmo diferiu do padrão encontrado por Mantovanelli (1999). Neste, as concentrações de MPS se mantiveram

praticamente constantes ao longo de todo o eixo, enquanto que nas concentrações do algoritmo foi observada uma nítida diminuição em direção à desembocadura.

Apesar dessa diferença entre os dados do algoritmo e medidos em campo, deve-se ter em mente que a sazonalidade da distribuição do MPS no CEP diverge na literatura. Noernberg (2001) não encontrou variação sazonal significativa da distribuição de MPS, ao passo que Mantovanelli (1999) encontrou marcante sazonalidade. Entre várias possíveis causas para essa divergência estão diferenças nas metodologias utilizadas nos dois trabalhos e variações interanuais na precipitação.

O clima da região possui variabilidade interanual associada aos fenômenos de El Niño e La Niña, que promove aumento e diminuição da precipitação, respectivamente (VANHONI; MENDONÇA, 2008). A influência do El Niño sobre as variações na concentração de MPS já foi observada para outra região costeira do Sul do Brasil (Lagoa dos Patos – RS), causando aumento do aporte fluvial e, conseqüentemente, maiores concentrações de MPS (TAVORA *et al.*, 2019). Entretanto, a baixa relação entre aporte fluvial e concentração de MPS no CEP (MANTOVANELLI, 1999; NOERNBERG, 2001), pode reduzir esse efeito.

O clima da região também aparenta influenciar a pluma estuarina do CEP, que ultrapassa a isóbata dos 20 m e possui formação mais associada à ressuspensão de sedimentos (posteriormente transportados pelas correntes de maré e correntes costeiras) do que à elevada precipitação (NOERNBERG, 2001). Nos dados de MPS obtidos pelo algoritmo, a pluma apresentou maior variabilidade espacial durante o inverno (período de maior agitação marítima), o que condiz com sua formação associada ao processo de ressuspensão.

Nesse sentido, os altos valores de desvio padrão em uma grande área da desembocadura no inverno (FIGURA 12C) podem ser causados por eventos episódicos (como frentes frias) que promovam aumentos da precipitação e da energia de ondas. Essa interpretação vai de acordo com os resultados de Mantovanelli (1999), que mostraram que a maior parte do MPS no CEP é introduzida em curtos períodos de tempo (eventos episódicos). Por outro lado, a pluma apresentou maiores concentrações durante o verão (estação chuvosa), o que pode indicar um papel importante da precipitação (e, conseqüentemente, do aporte fluvial) em sua formação.

Fora do padrão geral de diminuição do MPS, picos de concentração ao longo dos eixos do CEP podem estar associados a presença de baixios. Os baixios são

uma das principais dificuldades para o sensoriamento remoto do MPS na área de estudo, o que se expressa nos altos valores de desvio padrão e incerteza (FIGURAS 12 e 13). A separação entre reflectâncias do fundo e do MPS é complicada, especialmente porque regiões rasas estão tanto mais propensas aos processos de ressuspensão de sedimentos quanto aos efeitos do fundo. Essa dificuldade já foi observada por Krug e Noernberg (2007), em seu trabalho voltado à obtenção da batimetria da Baía das Laranjeiras por sensoriamento remoto. O problema ganha relevância, se considerarmos que cerca de 75% da área do CEP possui menos de 5 m de profundidade (NOERNBERG, 2001).

Alguns baixios não estiveram representados nos *shapefiles* de Noernberg (2006), mas sua constância nas imagens permitiu a identificação. Esse é o caso do pico de concentração da FIGURA 7A (entre os quilômetros 30 e 40) e dos picos no setor Mistura da FIGURA 8A. Além disso, uma queda na concentração de MPS deveria ter sido vista no início do transecto da FIGURA 7A (entre os quilômetros 0 e 5) devido à presença de baixios (FIGURA 4C), mas esses dados foram corretamente descartados pelo filtro de NDWI utilizado.

Em ambos os eixos, pode-se notar que alguns dos baixios apresentaram concentrações mais elevadas que as áreas mais profundas adjacentes. Um exemplo desse padrão de variação pode ser facilmente visto na desembocadura Sul do CEP, com altas concentrações de MPS sobre o Banco da Galheta e baixas concentrações no canal de navegação adjacente. Isso pode ser explicado pela ressuspensão dos sedimentos por ondas no Banco da Galheta (NOERNBERG, 2001) e pelas fortes correntes de maré no canal navegável, que praticamente coincide com o canal de maré e atua como um “molhe hidráulico” (NOERNBERG; MARONE; ANGULO, 2007). A anomalia positiva vista na FIGURA 15 sobre o Banco da Galheta é o resultado desse processo.

Alguns baixios também apresentaram baixas concentrações de MPS em comparação às áreas circundantes, o que possui ao menos duas possíveis causas. A primeira dessas causas está na correção atmosférica do C2RCC, já que, em algumas imagens, as áreas de baixios possuem alta reflectância de topo da atmosfera, mas baixa reflectância emergente da superfície do mar. Dessa forma, pode-se pensar que o aumento da reflectância em todas as bandas simultaneamente foi interpre-

tado pelo algoritmo como um indicativo de espalhamento especular (ilustrado na FIGURA 1 pela seta L_r), sendo erroneamente corrigido pela correção atmosférica.

A segunda causa se encontra nas imagens em que a reflectância sobre os baixios é inferior à da água circundante, tanto antes quanto depois da correção atmosférica. Nesses casos, foi observado um predomínio dos processos de absorção sobre os de espalhamento. Isso pode indicar a ocorrência de microalgas e maiores concentrações de matéria orgânica sobre os baixios. Nesse sentido, os sedimentos do eixo L-O possuem maior teor de matéria orgânica que os sedimentos do eixo N-S (LAMOUR; SOARES; CARRILHO, 2004), o que pode explicar as baixas concentrações de MPS encontradas sobre os baixios do eixo L-O.

Além disso, a presença de grandes trechos de manguezais no CEP pode atuar como fonte de matéria orgânica dissolvida (NOERNBERG *et al.*, 2020). Esse aporte aumenta a absorção por CDOM, que é maior nas porções mais interiores do CEP e durante o verão (estação chuvosa, o que difere da variação sazonal vista nas FIGURAS 11 e 12) (NOERNBERG *et al.*, 2020). Da mesma forma, a absorção por pigmentos fitoplanctônicos é superior nas porções mais interiores do CEP (NOERNBERG *et al.*, 2020). A existência de regiões com alta absorção pode ser um problema para a aplicação do C2RCC na obtenção de MPS, já que o algoritmo foi treinado para estar voltado às águas costeiras de grande espalhamento (TOMING *et al.*, 2017).

A variabilidade do MPS no CEP (conforme a PCA) se mostrou mais relacionada à altura e à amplitude de maré (relação inversa e direta com o MPS, respectivamente), com papel secundário da precipitação e da vazão fluviométrica. As correntes de maré já foram identificadas como principal forçante do MPS na área de estudo em trabalhos anteriores (MACHADO, 2011; MANTOVANELLI, 1999; NOERNBERG, 2001), o que corrobora com os resultados do algoritmo.

A maior relação entre marés de sizígia e altas concentrações de MPS (como visto na FIGURA 10) também encontra respaldo na literatura. Noernberg (2001) e Noernberg, Marone e Angulo (2007) mostraram que o limiar de transporte do sedimento no CEP é ultrapassado principalmente em marés de sizígia e em vazante, sendo o transporte de sedimentos menos intenso em marés enchentes de quadratura.

Mantovanelli (1999) encontrou menores valores para o número de Richardson nos ciclos de sizígia no CEP (especialmente em maré vazante), o que implica maior turbulência e aumento da concentração de MPS em relação aos ciclos de quadratura. Segundo Mantovanelli, esse padrão faz com que haja um predomínio da advecção sobre a ressuspensão do MPS nas marés de quadratura, sendo o contrário observado nas sizígias.

Nesse contexto, as imagens em datas com alta precipitação acumulada e vazão fluviométrica (FIGURAS 14 e 15) indicaram que essas variáveis não causaram uma alteração consistente na concentração de MPS no CEP. Nessas datas, as porções interiores do CEP não apresentaram aumento significativo de concentração, o que fortalece a identificação da maré como principal forçante do MPS na área de estudo. Deve-se ter em mente, também, que a maré não atua somente na ressuspensão dos sedimentos, mas também regula sua entrada pelo aporte fluvial.

A preponderância da maré como forçante no CEP difere do encontrado em regiões costeiras como a Lagoa dos Patos (RS), que apresenta dinâmica do MPS mais associada aos ventos e à descarga dos rios (TAVORA *et al.*, 2019). Apesar disso, o intervalo de valores de MPS encontrado no CEP se aproxima do encontrado na Lagoa (entre cerca de 10 e 38 g/m³, segundo TAVORA *et al.*, 2019) e na Lagoa Mirim (adjacente à Lagoa dos Patos e com concentrações entre 10,8 e 53 g/m³, segundo Fraga *et al.*, 2020).

Por outro lado, a maior turbulência nos períodos de sizígia, associada a maiores concentrações de MPS, também foi observada na Baía de Santos por Giannini, Harari e Ciotti (2017). O intervalo de concentrações encontrado pelos autores foi de, aproximadamente, 6 a 33 g/m³, estando na mesma ordem de grandeza que as concentrações do CEP obtidas no presente trabalho.

A dinâmica do MPS em regiões estuarinas, contudo, não depende unicamente de fatores naturais, mas também antrópicos, como a passagem de embarcações e as atividades de dragagens nos canais do CEP (MACHADO, 2011).

Outra forçante antrópica do MPS é encontrada no rio Cachoeira, principal controlador do aporte de MPS no CEP (MANTOVANELLI, 1999; NOERNBERG, 2001), que possui vazão regulada por uma barragem de usina hidrelétrica (Usina Hidrelétrica Governador Pedro Viriato Parigot de Souza). O controle artificial do rio Ca-

choeira faz com que sua vazão seja menos relacionada à precipitação, o que afeta a dinâmica do MPS (MANTOVANELLI, 1999).

O efeito de uma barragem de central hidrelétrica também foi observado na baía de Santos (central Henry Borden), por Giannini, Harari e Ciotti (2017), com redução da concentração de MPS e aumento da descarga de água doce em uma data específica. Um efeito parecido, com redução da concentração de MPS em momentos de maior vazão pela usina hidrelétrica, pode ser esperado no CEP.

A ausência de dados de concentração de MPS em datas coincidentes às de passagem do satélite Sentinel-2 figura como uma das principais limitações do presente trabalho. O efeito da defasagem temporal entre obtenção das imagens e coletas *in situ* pode ser vista no trabalho de Nazirova *et al.* (2021), mostrando que as melhores correlações entre dados medidos em campo e por sensoriamento remoto são obtidas para as menores diferenças de tempo entre coleta e passagem do satélite.

Tal dificuldade de obtenção de dados de “verdade-terrestre” não é uma particularidade do presente trabalho, mas um dos grandes obstáculos para a validação de algoritmos de sensoriamento remoto em geral (GIANNINI; HARARI; CIOTTI, 2017). A própria noção de verdade-terrestre pode ser discutida, principalmente se considerarmos que o presente estudo utilizou dados de dois trabalhos (MANTOVANELLI, 1999; NOERNBERG, 2001), mesmo que ambos contem com metodologias semelhantes.

Toming *et al.* (2017) mostraram que a metodologia utilizada na coleta e posterior análise laboratorial do MPS, ainda que seja a mesma, pode resultar em erros percentuais na casa das dezenas. Em caso de diferentes metodologias, os erros que podem ultrapassar algumas ordens de magnitude.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou avaliar um algoritmo de sensoriamento remoto (o C2RCC) para o estudo do MPS no Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP). Em geral, os dados de MPS gerados pelo algoritmo se mostraram semelhantes aos obtidos em campo por estudos anteriores, estando na mesma ordem de grandeza.

O padrão de distribuição do MPS foi bem representado no eixo N-S da área de estudo, possibilitando, inclusive, a identificação da zona de máxima turbidez. Para o eixo L-O, porém, as concentrações dadas pelo algoritmo apresentaram diminuição em direção à desembocadura, o que não foi observado em campo por trabalhos anteriores. Além disso, este eixo apresentou o mesmo padrão de distribuição nas estações do ano de inverno e verão, com maiores concentrações no verão (estação chuvosa), o que não está de acordo com medições *in situ*. A existência de variação sazonal do MPS, entretanto, é um tema abordado por outros estudos.

Os baixios representaram um desafio para a medição das concentrações MPS por sensoriamento remoto no CEP, criando picos ou vales nas concentrações geradas pelo algoritmo. Altas concentrações sobre baixios parecem estar relacionadas à reflectância do fundo, enquanto que baixas concentrações provavelmente se devem às falhas no processo de correção atmosférica e/ou à absorção por pigmentos fitoplanctônicos e matéria orgânica nos sedimentos.

Na desembocadura do CEP, destaca-se o banco de Galheta, com alta concentração associada à ressuspensão de sedimentos pela ação das ondas, e a pluma estuarina. A pluma mostrou maiores concentrações no verão e maior variabilidade espacial no inverno, o que pode ser o resultado das diferenças pluviométricas entre as estações do ano (maior precipitação no verão) e da passagem de frentes frias (maior energia de ondas, especialmente no inverno).

A maré aparenta ser a principal forçante da dinâmica do MPS no CEP, em concordância com o observado por outros trabalhos. As maiores concentrações de MPS estiveram associadas a baixas alturas de maré, altas amplitudes e ciclos de sizígia. Isso se deve, conforme a literatura, à maior turbulência nas marés vazantes de sizígia, o que favorece a ressuspensão de sedimentos. Esse resultado é um indicador positivo da performance do algoritmo.

Para futuros trabalhos, são deixadas quatro recomendações: (i) se possível, utilização de dados *in situ* de concentração de MPS coletados no mesmo instante da passagem do satélite, já que a utilização de dados pretéritos se mostrou uma das limitações do presente trabalho; (ii) análise da intensidade e direção do vento como forçante do MPS, considerando estações em diferentes porções do CEP; (iii) utilização de imagens de outros satélites/sensores, o que pode aumentar a cobertura espacial e temporal dos dados; (iv) análise mais aprofundada das regiões de baixios, com medições em campo de suas características ópticas, sedimentológicas e batimétricas.

REFERÊNCIAS

- ACKER, J. *et al.* Measuring marine suspended sediment concentrations from space: history and potential. 8th international conference on remote sensing for marine and coastal environments. **Anais...** 2005. Halifax, Canada.
- ALCANTARA, E. *et al.* Performance Analysis of the C2RCC Processor in Estimate the Water Quality Parameters in Inland Waters Using OLCI/Sentinel-3A Images. IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. **Anais...** p.9300–9303, 2018. Valencia: IEEE. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8517486/>>. Acesso em: 25/4/2022.
- ANGULO, R. J. **Geologia da Planície Costeira do Estado do Paraná**, 1992. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44136/tde-09122015-110705/pt-br.php>>. Acesso em: 5/7/2020.
- BABIN, M. *et al.* Light scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration. **Limnology and Oceanography**, v. 48, n. 2, p. 843–859, 2003.
- BIGARELLA, J. J. Contribuição ao Estudo da Planície Litorânea do Estado do Paraná. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. jubilee, p. 65–110, 2001.
- BINDING, C. E.; BOWERS, D. G.; MITCHELSON-JACOB, E. G. Estimating suspended sediment concentrations from ocean colour measurements in moderately turbid waters; the impact of variable particle scattering properties. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 3, p. 373–383, 2005.
- BOWERS, D. G.; BINDING, C. E. The optical properties of mineral suspended particles: A review and synthesis. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 67, n. 1–2, p. 219–230, 2006.
- BOWERS, D. G.; BOUDJELAS, S.; HARKER, G. E. L. The distribution of fine suspended sediments in the surface waters of the Irish Sea and its relation to tidal stirring. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 14, p. 2789–2805, 1998.
- BROCKMANN, C *et al.* Evolution of the C2RCC Neural Network for Sentinel 2 and 3 for the Retrieval of Ocean Colour Products in Normal and Extreme Optically Complex Waters. Living Planet Symposium. **Anais...** p.6, 2016. Prague, Czech Republic. Disponível em: <http://step.esa.int/docs/extra/Evolution%20of%20the%20C2RCC_LPS16.pdf>. Acesso em: 5/7/2020.
- CABALLERO, I.; NAVARRO, G.; RUIZ, J. Multi-platform assessment of turbidity plumes during dredging operations in a major estuarine system. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 68, p. 31–41, 2018.

CAMARGO, R. DE; HARARI, J. Modeling the Paranagua Estuarine Complex, Brazil: tidal circulation and cotidal charts. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 51, n. unico, p. 23–31, 2003.

CASAL, G. *et al.* Satellite-derived bathymetry in optically complex waters using a model inversion approach and Sentinel-2 data. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 241, p. 106814, 2020.

CHEN, S. *et al.* Estimating wide range Total Suspended Solids concentrations from MODIS 250-m imageries: An improved method. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 99, p. 58–69, 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). RESOLUÇÃO N° 454. 1. nov. 2012. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2012/res_conama_454_2012_materialserdragadoemaguasjurisdicionaisbrasileiras.pdf>. Acesso em: 1/9/2021.

DOERFFER, R.; SCHILLER, H. The MERIS Case 2 water algorithm. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 3–4, p. 517–535, 2007. Taylor & Francis.

DROPPO, I. G. Rethinking what constitutes suspended sediment. **Hydrological Processes**, v. 15, n. 9, p. 1551–1564, 2001.

DYER, K. Estuarine Circulation. **Encyclopedia of Ocean Sciences**. p.299–305, 2001. Elsevier. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123744739000771>>. Acesso em: 9/5/2022.

EUROPEAN SPACE AGENCY. **Sentinel-2 User Handbook**. Guia do Usuário, 2015.

FRAGA, R. S. *et al.* Empirical modelling of suspended solids in a subtropical lagoon (Brazil) using linear spectral mixing algorithm. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, p. 100380, 2020.

GIANNINI, M. F. C.; HARARI, J.; CIOTTI, A. M. The use of CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite) to trace the dynamics of total suspended matter at an urbanized coastal area. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 65, n. 2, p. 309–323, 2017.

HAFEEZ, S. *et al.* Comparison of Machine Learning Algorithms for Retrieval of Water Quality Indicators in Case-II Waters: A Case Study of Hong Kong. **Remote Sensing**, v. 11, n. 6, p. 617, 2019. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

HAYKIN, S. S. **Neural networks and learning machines**. 3rd ed. New York: Prentice Hall, 2009.

INSITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sinopse do censo demográfico**. Censo, Rio de Janeiro, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Malha Municipal. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/>>

malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 1/9/2021.

JAMES, G. *et al.* **An introduction to statistical learning: with applications in R**. Second edition. New York: Springer, 2021.

KRATZER, S.; KYRYLIUK, D.; BROCKMANN, C. Inorganic suspended matter as an indicator of terrestrial influence in Baltic Sea coastal areas — Algorithm development and validation, and ecological relevance. **Remote Sensing of Environment**, v. 237, p. 111609, 2020.

KRUG, L. A.; NOERNBERG, M. A. O sensoriamento remoto como ferramenta para determinação de batimetria de baixios na Baía das Laranjeiras, Paranaguá - PR. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, p. 101–105, 2007.

LAMOUR, M. R.; SOARES, C. R.; CARRILHO, J. C. MAPAS DE PARÂMETROS TEXTURAIIS DE SEDIMENTOS DE FUNDO DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ - PR. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 55, n. 0, 2004. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/geociencias/article/view/4286>>. Acesso em: 24/9/2020.

LANA, P. C. *et al.* The Subtropical Estuarine Complex of Paranaguá Bay, Brazil. In: **Coastal Marine Ecosystems of Latin America**, Ecological Studies. v. 144, p.131–145, 2001. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-04482-7_11>. Acesso em: 4/7/2020.

LAVROVA, O. YU. *et al.* River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data. In: C. R. Bostater; S. P. Mertikas; X. Neyt; C. Nichol; O. Aldred (Orgs.). p.99990G, 2016. Edinburgh, United Kingdom. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2241312>>. Acesso em: 4/7/2020.

MACHADO, C. G. Caracterização química dos agregados e sedimentos superficiais na zona de máxima turbidez no complexo estuarino de Paranaguá (CEP). **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 65, p. 40–47, 2011.

MANTOVANELLI, A. **Caracterização da dinâmica hídrica e do material particulado em suspensão na Baía de Paranaguá e em sua bacia de drenagem**, 1999. Dissertação (Mestrado em Geologia), Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/41425>>. Acesso em: 31/8/2021.

MARONE, E.; CAMARGO, R. DE. Marés meteorológicas no litoral do Estado do Paraná: O evento de 18 de agosto de 1993. **Nerítica**, v. 8, p. 73–85, 1994.

MARONE, E. *et al.* MEDIÇÕES DE CORRENTES E CURVA VAZÃO-MARÉ NA BAÍA DE PARANAGUÁ, PR. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 60, 2007. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/geociencias/article/view/9598>>. Acesso em: 4/7/2020.

MIKKELSEN, O. A. Variation in the projected surface area of suspended particles: Implications for remote sensing assessment of TSM. **Remote Sensing of Environment**, v. 79, n. 1, p. 23–29, 2002. Elsevier.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Programa Nacional para Conservação da Linha de Costa – PROCOSTA**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018.

MOBLEY, C. Ocean Optics Web Book. Disponível em: <<https://www.oceanopticsbook.info/view/introduction/>>. Acesso em: 25/4/2022.

MOREL, A.; PRIEUR, L. Analysis of variations in ocean color. **Limnology and Oceanography**, v. 22, n. 4, p. 709–722, 1977.

NAZIROVA, K. *et al.* Comparison of *in situ* and Remote-Sensing Methods to Determine Turbidity and Concentration of Suspended Matter in the Estuary Zone of the Mzymta River, Black Sea. **Remote Sensing**, v. 13, n. 1, p. 143, 2021.

NECHAD, B.; RUDDICK, K. G.; PARK, Y. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 4, p. 854–866, 2010.

NEMES, D. D.; MARONE, E. CARACTERIZAÇÃO DAS ONDAS DE SUPERFÍCIE NA PLATAFORMA INTERNA DO ESTADO DO PARANÁ. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 69, p. 12–25, 2013.

NEWCOMBE, C. P.; MACDONALD, D. D. Effects of Suspended Sediments on Aquatic Ecosystems. **North American Journal of Fisheries Management**, v. 11, n. 1, p. 72–82, 1991. Taylor & Francis.

NOERNBERG, M. A. *et al.* Remote Sensing and GIS Integration for Modelling the Paranaguá Estuarine Complex - Brazil. **Journal of Coastal Research**, p. 1627–1631, 2006. Coastal Education & Research Foundation, Inc.

NOERNBERG, M. A.; MARONE, E.; ANGULO, R. J. CORRENTES COSTEIRAS E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NOS CANAIS DE NAVEGAÇÃO DO ESTUÁRIO DA BAÍA DE PARANAGUÁ. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 60, 2007. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/geociencias/article/view/9616>>. Acesso em: 31/8/2021.

NOERNBERG, M. A. *et al.* Seasonal evolution of particulate and dissolved absorption coefficients in a subtropical estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 244, p. 106907, 2020.

OBSERVATÓRIO DO LITORAL PARANAENSE. Arquivos Shapefile. Disponível em: <<http://www.litoral.ufpr.br/portal/observatoriolitoral/geodados/arquivos-shapefile/>>. Acesso em: 1/9/2021.

OUILLOON, S. Why and How Do We Study Sediment Transport? Focus on Coastal Zones and Ongoing Methods. **Water**, v. 10, n. 4, p. 390, 2018.

PRITCHARD, D. W. Estuarine Hydrography. In: H. E. Landsberg (Org.); **Advances in Geophysics**. v. 1, p.243–280, 1952. Elsevier. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065268708602083>>.

ROBINSON, I. S. **Discovering the Ocean from Space**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.

STRICKLAND, J. D. H.; PARSONS, T. R. A practical handbook of seawater analysis. 1972. Fisheries research board of Canada.

TAVORA, J. *et al.* An Algorithm to Estimate Suspended Particulate Matter Concentrations and Associated Uncertainties from Remote Sensing Reflectance in Coastal Environments. **Remote Sensing**, v. 12, n. 13, p. 2172, 2020.

TAVORA, J. *et al.* The influence of river discharge and wind on Patos Lagoon, Brazil, Suspended Particulate Matter. **International Journal of Remote Sensing**, v. 40, n. 12, p. 4506–4525, 2019.

TEODORO, A. C.; VELOSO-GOMES, F.; GONÇALVES, H. Retrieving TSM Concentration From Multispectral Satellite Data by Multiple Regression and Artificial Neural Networks. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 5, p. 1342–1350, 2007.

TOMING, K. *et al.* Mapping Water Quality Parameters with Sentinel-3 Ocean and Land Colour Instrument imagery in the Baltic Sea. **Remote Sensing**, v. 9, n. 10, p. 1070, 2017.

VANHONI, F.; MENDONÇA, F. O CLIMA DO LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3, 2008. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/25423>>. Acesso em: 4/7/2020.